****

**硕士学位论文**

**（专业学位）**

**高强钢角焊缝的力学性能研究**

姓 名：赵 琛

学 号：1630643

所在院系：土木工程学院建筑工程系

学科门类：工 程

学科专业：建筑与土木工程

指导教师：孙飞飞 教授

二〇一九年四月

****

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Engineering

**Study on mechanical properties of fillet weld of high strength steel**

Candidate: Zhao Chen

Student Number: 1630643

School/Department: School of Civil Engineering

Discipline: Engineering

Major: Architecture & Civil Engineering

Supervisor: Prof. Sun Feifei

April， 2019

|  |
| --- |
| **高强钢角焊缝的力学性能研究**  **赵琛**  **同济大学** |

**学位论文版权使用授权书**

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

**同济大学学位论文原创性声明**

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

高强度结构钢材是指强度大于460MPa，并具有良好延性、韧性以及加工性能的结构钢材，近年来，随着我国科学技术和经济的不断发展，高强钢在国内逐渐推广开来。钢结构的连接通常分为焊接、铆接和螺栓连接，焊接连接是钢结构最主要的连接形式，与普通钢材相比，高强钢中的碳元素相对较少，因此其韧性较高，具有较好的焊接性能。角焊缝是焊接连接中非常重要的一种连接形式，与对接连接相比，不仅在连接角度方面限制减少，也在施工工艺和方法上，更加简便，在一般的承载力和构造要求下，避免坡口施工带来的麻烦。目前，针对高强钢焊缝连接的研究尚不充分，更缺乏高强钢焊缝链接的设计理论，这限制了高强钢的应用和推广，本文主要进行了以下内容的研究：

（1）采用“试错法”对高强钢Q890D和焊材ER120S-G的本构模型进行标定，利用ABAQUS软件建立试件的有限元模型，并与试验曲线进行了对比，两者总体吻合较好。

（2）对48个不同加载角度下的高强钢搭接接头角焊缝试件进行单调拉伸加载试验，并且使用DIC测量系统对焊缝区域的应变和位移进行采集，对角焊缝的力学性能进行分析，研究表明加载角度与试件的极限强度呈正相关，与试件的位移延性系数和断裂角度呈负相关。

（3）通过DIC测量系统监控焊缝区域的应变发展特征观察到，随着加载角度的增大，全场最大应变点断裂时刻对应的应变率增大，正面角焊缝试件断裂时刻最大应变率是侧面角焊缝的9.7倍。

（4）采用ABAQUS/standard隐式分析处理器建立高强钢角焊缝在不同加载角度下试件的有限元模型，可以近似模拟出试件的破坏面和承载力，但是无法模拟得到下降段；采用ABAQUS/Explicit显式动态求解器对正面角焊缝和侧面角焊缝试件的断裂过程进行有限元模拟，通过“试错法”可以模拟得到下降段，有限元得到的荷载位移曲线和试验曲线吻合较好。结果表明影响断裂预测准确性的因素有：断裂参数、破坏位移和网格精度。

**关键词**：高强钢，角焊缝，加载角度，试验研究，本构模型，DIC测量系统，有限元研究

ABSTRACT

High strength steel refers to structural steel with strength greater than 460 MPa and good ductility, toughness and processability. In recent years, with the rapid development of science, technology and economy in China, high strength steel has been gradually popularized in China. The connection of steel structure is usually divided into welding, riveting and bolt connection. Welding connection is the most important connection form of steel structure. Compared with ordinary steel, the carbon element in high strength steel is relatively less, so the toughness is higher and welding performance is better. The fillet weld is a kind of very important connection form in welding connection. Compared with the joint, it not only reduces the restriction of connection angle, but also simplifies the construction method. Under the general bearing capacity and structural requirements, it avoids the trouble caused by groove construction. At present, the research on weld joint of high strength steel is insufficient, and there lacks design theory of weld joint of high strength steel, which limits the application and promotion of high strength steel. The following research contents were carried out in this paper:

(1) The constitutive model of high strength steel Q890D and welding material ER120S-G is calibrated by "try-and-error" method. The finite element model of the specimens is established by using ABAQUS software, compared with the experimental curve, the two models are in good agreement.

(2) 48 specimens of fillet weld of high strength steel overlap joints under different loading angles were tested under monotonic tensile loading, the strain and displacement in the weld area were collected by DIC measuring system. The mechanical properties of fillet weld were analyzed. The results show that the loading angle is positively correlated with the ultimate strength of specimens, and negatively correlated with the displacement ductility coefficient and fracture angle of specimens.

(3) By monitoring the strain development characteristics of the weld area with DIC measurement system, it is observed that the strain rate corresponding to the breaking time of the maximum strain point in the whole field increases with the increase of loading angle, and the maximum strain rate at the breaking time of the transverse fillet weld specimen is 9.7 times that of the longitudinal fillet weld.

(4) Using ABAQUS/standard implicit analysis processor to establish the finite element model of high strength steel fillet weld specimens under different loading angles, the failure surface and bearing capacity of specimens can be approximately simulated, but the downward section can not be simulated. ABAQUS/Explicit explicit dynamic solver is used to simulate the fracture process of the transverse fillet weld and the longitudinal fillet weld specimens, and the "try-error method" is used to simulate the fracture process of the transverse fillet weld and the longitudinal fillet weld specimens. The descending section can be simulated, and the load-displacement curve obtained by finite element method is in good agreement with the experimental curve. The results show that the factors affecting the accuracy of fracture prediction are fracture parameters, failure displacement and mesh accuracy.

**Key words**: high strength steel, fillet welded joint, loading angle, experimental study, constitutive model, digitai image correlation measurement, finite element study

**目录**

[第1章 绪论 5](#_Toc6574643)

[1.1 研究背景及意义 5](#_Toc6574644)

[1.2 角焊缝力学性能研究现状 6](#_Toc6574645)

[1.2.1 正面和侧面角焊缝研究现状 7](#_Toc6574646)

[1.2.2 斜向角焊缝研究现状 8](#_Toc6574647)

[1.2.3 各国角焊缝设计规范对比 11](#_Toc6574648)

[1.2.4 热输入量研究现状 12](#_Toc6574649)

[1.3 角焊缝连接接头有限元模拟 13](#_Toc6574650)

[1.4 数字图像相关方法研究现状 14](#_Toc6574651)

[1.4.1 DIC技术的发展历史 14](#_Toc6574652)

[1.4.2 国内外工程应用现状 14](#_Toc6574653)

[1.5 存在的问题与本文研究工作 15](#_Toc6574654)

[1.5.1 存在的问题 15](#_Toc6574655)

[1.5.2 本文研究工作 16](#_Toc6574656)

[第2章 单调加载作用下高强钢和熔敷金属材料的本构模型标定 18](#_Toc6574657)

[2.1 引言 18](#_Toc6574658)

[2.2 高强钢Q890D单调拉伸试验研究 18](#_Toc6574659)

[2.2.1 试验概况 18](#_Toc6574660)

[2.2.2 试验结果 20](#_Toc6574661)

[2.2.3 试验用钢材的可焊性 22](#_Toc6574662)

[2.3 高强度焊材ER120S-G单调拉伸试验研究 23](#_Toc6574663)

[2.3.1 试验概况 23](#_Toc6574664)

[2.3.2 试验结果 24](#_Toc6574665)

[2.4 材料本构模型的标定 25](#_Toc6574666)

[2.4.1 “试错法”的校准流程 25](#_Toc6574667)

[2.4.2 标准材性试件的有限元模拟 27](#_Toc6574668)

[2.4.3 有限元结果与试验对比 28](#_Toc6574669)

[2.5 本章小结 30](#_Toc6574670)

[第3章 高强钢角焊缝力学性能试验研究 31](#_Toc6574671)

[3.1 引言 31](#_Toc6574672)

[3.2 试验概况 31](#_Toc6574673)

[3.2.1 单边单条角焊缝试件设计 31](#_Toc6574674)

[3.2.2 单边双条角焊缝试件设计 36](#_Toc6574675)

[3.3 试验装置及仪器 40](#_Toc6574676)

[3.4 试验结果与分析 41](#_Toc6574677)

[3.4.1 试件断后测量和断裂角度 43](#_Toc6574678)

[3.4.2 荷载位移曲线和承载能力 46](#_Toc6574679)

[3.4.3 极限强度 60](#_Toc6574680)

[3.5 加载角度对角焊缝力学性能的影响 64](#_Toc6574681)

[3.5.1 加载角度对断裂角度的影响 65](#_Toc6574682)

[3.5.2 加载角度对变形能力的影响 65](#_Toc6574683)

[3.5.3 加载角度对极限强度的影响 69](#_Toc6574684)

[3.6 本章小结 75](#_Toc6574685)

[第4章 DIC测量系统监测下的试件应变分布特征 77](#_Toc6574686)

[4.1 引言 77](#_Toc6574687)

[4.2 DIC测量系统简介 77](#_Toc6574688)

[4.2.1 DIC测量系统的工作原理 79](#_Toc6574689)

[4.2.2 DIC测量系统的精度校核 79](#_Toc6574690)

[4.2.3 变形载体制备 80](#_Toc6574691)

[4.3 DIC监控下的角焊缝试件应变发展特征 82](#_Toc6574692)

[4.3.1 正面角焊缝试件焊缝区域应变发展特征 82](#_Toc6574693)

[4.3.2 侧面角焊缝试件焊缝区域应变发展特征 85](#_Toc6574694)

[4.3.3 斜向角焊缝试件焊缝区域应变发展特征 88](#_Toc6574695)

[4.4 本章小结 93](#_Toc6574696)

[第5章 不同加载角度下角焊缝有限元分析 94](#_Toc6574697)

[5.1 引言 94](#_Toc6574698)

[5.2 有限元模型 94](#_Toc6574699)

[5.2.1 金属材料模型 94](#_Toc6574700)

[5.2.2 边界条件和约束设置 94](#_Toc6574701)

[5.2.3 网格划分和单元类型 98](#_Toc6574702)

[5.3 有限元隐式分析 99](#_Toc6574703)

[5.3.1 单边单条角焊缝试件 99](#_Toc6574704)

[5.3.2 单边双条角焊缝试件 100](#_Toc6574705)

[5.3.3 隐式分析结果与试验对比 101](#_Toc6574706)

[5.4 有限元显式分析 103](#_Toc6574707)

[5.4.1 准静态响应分析 103](#_Toc6574708)

[5.4.2 断裂机制模型 104](#_Toc6574709)

[5.4.3 正面和侧面角焊缝断裂模拟 106](#_Toc6574710)

[5.4.4 参数分析 108](#_Toc6574711)

[5.5 本章小结 111](#_Toc6574712)

[第6章 结论与展望 112](#_Toc6574713)

[6.1 本文的主要工作 112](#_Toc6574714)

[6.2 本文的主要结论 112](#_Toc6574715)

[6.3 展望 114](#_Toc6574716)

[参考文献 115](#_Toc6574717)

[致谢 119](#_Toc6574718)

[个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果 120](#_Toc6574719)

# 绪论

## 研究背景及意义

高强度结构钢材是指强度大于460MPa，并具有良好延性、韧性以及加工性能的结构钢材。迄今为止，高强度结构刚才已经在国内外多个钢结构工程中成功应用，并且取得了良好的工程效果和经济效益。相比普通钢结构而言，高强钢结构在受力性能上具有显著优势，不仅进一步提高了结构的安全性和可靠性，还可以创造更大的建筑使用空间或实现更灵活的建筑表现。此外，还能够节约建筑工程总成本，并降低能耗、碳排量和不可再生资源消耗量。高强钢结构属于绿色环保型结构体系，合理地使用高强钢结构，符合我国可持续发展战略及节能环保型社会的理念。[1]

近年来，随着我国科学技术和经济的不断发展，高强钢在国内逐渐推广开来。2008 年国家体育场(鸟巢)的钢结构工程中首次选用了国产舞阳钢厂生产的110mm厚的Q460E-Z35 高强度钢材，用于柱脚等主要受力节点，取得 了很好的效果；国家游泳中心“水立方”的钢结构工程为多面体空间刚架，选用了厚度达18mm的Q420C高强度钢板，是国内单个工程中高强钢应用 较多的工程；深圳会展中心的刚架梁下弦杆采用国产LG 460MPa高强钢拉杆，其直径达150mm，是国内钢结构工程应用的最大直径的高强钢拉杆；高压输电线路和大截面导线输电铁塔结构中也逐渐开始采用高强度钢材，我国西北第一条750kV输电铁塔就成功采用了Q420高强钢。这些工程中采用的高强度结构钢全部都是由国内的钢厂生产和供货的，并在钢材选用过程中组织了多次专家论证会，证明了我国生产的高强度结构钢的质量完全满足相关技术要求，并且能够满足建筑用钢的要求。高强度钢材已在我国范围内的多个建筑中得到成功应用，并取得了良好的社会效益和经济效益。但是，该领域还缺乏大量基础研究数据支撑，尚未形成成熟完善的高强度钢结构设计的行业标准。

钢结构的连接通常分为焊接、铆接和螺栓连接。焊接连接是钢结构最主要的连接形式，焊接接头的强度、韧性和疲劳问题，关系到钢结构的安全可靠性和使用寿命。与普通钢材相比，高强钢中的碳元素相对较少，因此其韧性较高，具有较好的焊接性能。但不同生产商生产的高强钢中合金元素成分各不相同，故适合于高强钢母材的焊接材料也就不同，不同材料带来的焊接匹配问题有待进一步研究。焊接接头的力学性能介于焊缝金属和母材强度之间，并随焊缝型式、焊条等级、焊材匹配性、焊接线能量等参数变化，经过施焊后的高强度钢材焊缝、热影响区、母材区的强度、延性等力学指标各不相同。因此，焊接接头的力学性能的研究具有十分重要的意义。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\WeChat Files\1bfb3e17224517ea8cd40575274ac0c.png | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\WeChat Files\f9939ebd80f7b200fbeb329f5655e9c.png | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\WeChat Files\5adebbed58bd00779250bbaae0b3084.png |
| 图 1.1 焊接连接 | 图 1.2铆钉连接 | 图 1.3螺栓连接 |

目前，在我国已建或在建的高强钢建筑中，一般先有针对性地对焊接连接部分进行焊接工艺评定，再以研究人员的试验为基础指导焊接施工，尚未有普遍适用的高强钢焊接理论。由于目前现行的钢结构设计规范（GB50017-2017）并未对高强度钢材焊缝连接的设计方法、强度指标和构造要求做出规定，工程设计人员尚只能套用普通强度钢材设计方法，并线性推广得到高强度钢材的相关指标，或是采用国外技术标准，缺乏合理性。如何保证高强度钢材焊接质量，如何确定对接焊缝和角焊缝在使用中的强度和韧性，以及在设计中需要注意哪些问题 ，均是亟待研究和解决的。因此，需要对高强度钢材焊缝连接承载性能进行深入研究，并提出相应的设计方法和强度指标。工程实践中提出的有关高强度钢结构焊接连接设计方面的关键技术问题，也是当前我国钢结构领域重点关注的研究课题。不断完善设计理论，不断改善焊接工艺和完善焊接标准 ，可以显著提升我国钢结构领域的研究水平及设计水平，更好地为基础建设事业服务。

## 角焊缝力学性能研究现状

角焊缝是焊接连接中非常重要的一种连接形式，与对接连接相比，不仅在连接角度方面限制减少，也在施工工艺和方法上，更加简便，在一般的承载力和构造要求下，避免坡口施工带来的麻烦。根据受力方向的不同可以主要有三种类型：正面角焊缝（即焊缝方向与加载方向垂直90°）、侧面角焊缝（即焊缝方向与加载方向平行0°）、其他不同方向的加载角度统称为斜向角焊缝。

从19世纪30年代到现在的大多数关于角焊缝的研究是对正面角焊缝和侧面角焊缝的力学性能研究。正面角焊缝决定了角焊缝的承载力上限和延性性能的下限，而侧面角焊缝决定了角焊缝的承载力下限和延性的上限。Butler和Kulak（1971），Clark(1971)， Holtz and Harre， Swannell and Skewes (1979a)， Biggs (1981)， Neis (1985) 和 Marsh (1985)等学者也进行了角焊缝在不同加载角度下的试验研究，这些试验研究都是针对母材为普通钢材的角焊缝。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| C:\Users\Administrator\Desktop\1.bmp | | |
| 图 1.4 侧面角焊缝 | 图 1.5 正面角焊缝 | 图 1.6 斜向角焊缝 |

* + 1. 正面和侧面角焊缝研究现状

正面和侧面角焊缝是工程中常用的两种角焊缝形式，国内外学者针对其承载力、破坏形式、变形性能、晶体组织变化及不同的焊接接头性能开展了许多试验和理论研究工作。

Spraragen and Claussen (1942)[2]  进行了423个正面角焊缝和416个侧面角焊缝的加载试验研究，发现侧面角焊缝的部分截面的最大剪应力是正面角焊缝的60%至100%，且无论焊缝是受拉还是受压，正面角焊缝和侧面角焊缝均具有足够的承载力，但正面角焊缝试验数据的离散性要大于侧面角焊缝。

Archer et al. (1959) [3]  进行了两个正面角焊缝和两个侧面角焊缝试验，发现正面角焊缝的剪切强度是侧面角焊缝的1.59倍，正面角焊缝的断裂面角度与侧面角焊缝接近，但是小于45°。

Naka and Kato (1966)[4]  对正面角焊缝试件进行了试验和理论研究，、试验采用了3种不同的焊接方式及2种不同的焊条，共计6种试件，分析并记录了材料特性、荷载、变形和焊缝断裂面角度。最后用五种不同的理论预测了试件的极限荷载，其中最大剪应力理论预测效果最好，但这些理论均低估了正面角焊缝的实际承载力。

Ligtenberg (1968)[5]  对一个角焊缝受拉的国际试验进行统计分析发现，正面角焊缝的承载强度 是侧面角焊缝的1.59倍。

Higgins and Preece (1969)[6]  进行了168个角焊缝的试验，虽然该试验的极限荷载和断裂面并未给出，但从已发表的论文来看，正面角焊缝的平均安全系数是侧面角焊缝的1.41~1.54倍。

国际焊接学会(1980) 给出了正面和侧面角焊缝的力-位移曲线，提出正面与侧面角焊缝的强度比是1.22，侧面角焊缝的变形能力是正面角焊缝的2倍。

高强钢在工程中逐渐普及，但对于高强钢角焊缝力学性能的研究还处于初步阶段，在近十年里才陆续有学术论文发表。在研究者中，较早且较为全面地对高强钢角焊缝性能进行研究的是德国斯图加特大学的 Kuhlmann 教授（2008-2012）[7] [8] [9] [10] ，他对 S355、S460 和 S690 等级的钢材在不同匹配比条件下的正面角焊缝和侧面角焊缝进行了研究，共试验了两百多个试件，测试了焊缝在轴向拉伸荷载下的承载力和变形性能；他还对焊缝附近区域进行了硬度测试，发现在热影响区测得硬度比母材和焊材区域都高，且没有发现软化现象，试件都在焊缝处发生破坏。

随后，芬兰拉普兰塔理工大学的 Bjork 教授（2012[11] -2014[12] ）及其研究梯队对 S960 钢材进行了39个角焊缝的试验研究，发现虽然通过硬度试验测得钢材焊接后会出现软化现象，但是实测的接头承载能力依然能够用现有的欧洲规范进行很好的预测。不过在随后的研究中，Bjork et al （2018）[13] 指出，对于非承载的角焊缝，由于焊后母材软化区出现，使得接头的强度降低。

魏晨熙（2013）[14]  对Q460C高强度钢材的角焊缝性能进行了研究，通过5个正面角焊缝接头试件和5个侧面角焊缝搭接接头试件的轴向拉伸试验，得到正面角焊缝与侧面角焊缝的强度比约为1.48，正面角焊缝试件的破坏角度为26°，而侧面角焊缝试件的破坏角度接近45°，属于纯剪切的受力和破坏状态。

施刚（2016）[15] 针对Q460、Q550和Q690三种高强度钢材共计进行了9个对接焊缝试件、9 个正面角焊缝试件和 9 个侧面角焊缝搭接接头试件的拉伸试验，并指出正面角焊缝接头的刚度大于侧面角焊缝，其平均极限强度可达侧面角焊缝的1.43倍。

郭小农（2016）[16] 对Q690高强钢角焊缝及母材进行了研究，进行了6个母材和6个对接焊缝的拉伸试验，以及3个端面角焊缝和3个侧面角焊缝的连接试验，并指出该高强钢母材的抗拉强度低于角焊缝的强度，其中端面角焊缝具有较高的强度和较低的延性，侧面角焊缝则具有较低的强度和较好的延性，沿侧面角焊缝的纵向方向，其两端应力较大，中间应力较小。

李金凤（2016）[17] 对以Q345钢材为母材的各种形状的角焊缝焊接接头进行了研究，并分别对T形、L形和J形焊接接头进行了拉伸实验，得到了焊接件的尺寸对于焊接接头力学性能的影响，并指出了在拉伸试验中，起弧或收弧段处更易出现塑性变形。

徐忠根等（2018）[18] 设置了Q345钢材三面围焊角焊缝连接、正面角焊缝和侧面角焊缝共 37个试件。其中正面角焊缝破坏角度在20°至30°之间，侧面角焊缝破坏角度接近45°。

* + 1. 斜向角焊缝研究现状

斜向角焊缝作为角焊缝的一种重要形式，其力学性能、破坏形式及变形能力备受国内外学者关注。

Freeman (1932)[19] ，Hankins andAllan (1934)[20] ，Vandeperre 和Joukoff (1939) [21] 在早期的试验研究中发现，斜向角焊缝试件在焊喉处的有效截面最大应力处在正面角焊缝与侧面角焊缝之间。此处应力定义为最大荷载除以有效截面积，但实际情况中断裂面与有效截面积不完全重合，且该研究并未建立角焊缝强度与加载角度的关系。

Butler and Kulak (1971)[22] 采用ER60焊条，制作了23个焊脚尺寸为6mm 的角焊缝试件，来研究角焊缝强度与加载角度之间的关系。文献提出了角焊缝极限强度和最大变形与加载角度 的经验公式，这奠定了后来CISC（1984）[23] 研究的基础。他指出，焊缝的极限强度随着加载角度的增大而增强，且正面角焊缝的极限强度是侧面角焊缝的1.45倍，而侧面角焊缝比正面角焊缝有更多的变形能力，并提出了单位长度的极限荷载和最大变形与加载角度的关系 ，如下式所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.1 ) |
|  |  | ( . ) |

式中，是加载方向与焊缝方向的夹角，是不同加载角度下单位长度的极限荷载（kips/in），是不同加载角度下最大变形（inches）。

Clark (1971)[24] 发表了8mm角焊缝的力-位移曲线，其理论模型低估了焊缝的真实强度。Clark提到焊缝真实强度和理论强度之间的差异是由焊缝接头搭接板与焊接板之间的约束引起的，但尚未给出更具体的细节描述。

Swannell and Skewes (1979a)[25]  针对角焊缝试件进行了不同加载角度下的受压试验，试验结果表明，正面角焊缝拉伸极限强度与受压试验接近，但是其极限强度对应的变形更小。

Biggs (1981)[26] 总结了Crofts 和Higgs的试验结果，认为断裂面角度随着加载角度变化，并提出断裂面平均拉应力和剪应力呈椭圆关系。Crofts 和Higgs采用受弯梁式加载，该加载方式在焊缝处同时产生纵向应力和横向应力，由于每个试件的加载角度都是变化的，故可以估计破坏时的加载角度，但他们并未详细描述试验材料的特性。

Neis (1985) [27] 采用Rate-Dependent塑性理论，基于Kamtekar (1982)提出的平均应力分布模式得到角焊缝的理论荷载-位移曲线，并与Butler和Kulak (1971)的正面角焊缝与侧面角焊缝荷载-位移曲线相吻合。其余加载角度的荷载-位移曲线表现出的差异与Kamtekar提出的平均应力分布的不准确的初始假设有关。

Marsh (1985)[28] 基于两个处于非平衡状态的自由体的受力分析图得到角焊缝极限强度与加载角度的理论关系 。所有的角焊缝不管加载方向断裂面的理论分析与试验观察不一致 。

Kennedy and Kriviak (1985)[29] 提出了两个对于同时承受纵向和横向力的角焊缝的作用关系。

Miazga 和Kennedy(1989)[30] 采用焊条E7014，选取5mm和9mm两种焊脚尺寸总共进行了42个试件的试验，试验表明5mm焊脚尺寸的正面角焊缝极限强度是侧面角焊缝的1.28倍，9mm焊脚尺寸的正面角焊缝极限强度是侧面角焊缝的1.60倍。他们提出了基于最大剪应力失效准则来预测角焊缝强度的方法，并把理论预测的结果与自己的试验数据以及其他学者（Butler 和Kulak[22] 等）的工作做了对比。

Lesik 和Kennedy[31] 在此基础上又做了一系列的试验工作，并且提出了一个简化的计算公式，通过该简化公式的预测结果与Miazga 和Kennedy[30] 的预测结果误差在1.5%以内，该简化公式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( . ) |

式中，为荷载在任意加载角度作用下的角焊缝的极限强度； 为加载方向与焊缝平行时的角焊缝的极限强度，此时为侧面角焊缝；表示加载方向与焊缝的夹角。式( 1.3 )被加拿大钢结构设计规范（CSA-S16）引用，用来预测角焊缝的承载能力；目前也被美国钢结构协会规程（AISC 1999）的附录J 中采用，通过上式可知，正面角焊缝的强度是相同尺寸侧面角焊缝强度的1.5倍。但是Miazga 和Kennedy仅仅研究了一种焊丝在一种焊接工艺下（电弧焊SMAW）的力学性能，不具代表性。

除了焊丝的强度和延性对接头力学性能造成的影响外，还有许多因素对角焊缝的性能可能造成不同程度的影响，包括：

（1）焊丝制造商

虽然不同焊丝都能在力学性能上达到材料标准，但是不同制造商生产的焊丝可能具有不同的化学成分，可能带来角焊缝性能的差异。

（2）焊工技能及焊接工艺

焊工的技能体现在焊接的每一个过程中，包括调试的焊接电压电流、焊接的预热温度、冷却速率、送丝速度等，这些差异对焊缝性能也会带来一定的影响。

（3）焊脚尺寸及焊道数

焊道数的影响主要表现在，破坏可能出现于相邻焊道之间的焊接面。

（4）断裂前母材是否屈服

如果在焊缝断裂前母材没有进入屈服，由于母材的约束作用更强，可能使得焊接接头具有更高的承载能力。

（5）温度

低温造成材料的韧性降低，韧性的改变可能造成角焊缝强度和延性的改变。

（6）焊缝与加荷方向

此处明确一个概念，加载方向与焊缝垂直的角焊缝称为正面角焊缝，加载方向与焊缝平行的角焊缝称为侧面角焊缝，其余角度称为斜向角焊缝。

（7）高强钢及高强焊丝的影响

之前的研究大都着眼于普通钢材，由于高强钢屈强比高、延性差，接头强度的预测公式可能与普通钢材不同。

* + 1. 各国角焊缝设计规范对比

欧洲规范Eurocode 3 Part 1-12[32] 、美国规范AWSD1.1/D1.1M2015[33] 以及新版中国规范GB50017-2017[34] 中均有针对高强钢角焊缝连接的相应设计条款，适用的钢材等级分别为S690（名义屈服强度690MPa），ASTM A514（名义屈服强度690MPa），Q460（名义屈服强度460MPa），具体条款如下：

* 欧洲规范

Eurocode 3 Part 1-8[35] 和Eurocode 3 Part 1-12给出了高强钢角焊缝的承载力计算公式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.4 ) |

式中，为焊缝材料的名义极限强度；为焊喉尺寸，取为；*l*为焊缝长度；为相关参数，对于高强钢材取值为1.0；为针对高强钢的强度折减系数；取为1.25， 为理论破坏面，也就是焊喉对应的破坏面。

* 美国规范

美国钢结构设计规范ANSI/AISC 360-10[36] 给出了高强钢角焊缝的承载力计算公式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.5 ) |

式中，为抗力分项系数，取为0.75；为加载方向与焊缝长度方向的夹角。

* 中国规范

中国钢结构设计标准GB50017-2017[34] 给出了Q460及以下强度等级的钢材的角焊缝的承载力设计公式如下：

对于正面角焊缝：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.6 ) |

对于侧面角焊缝：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.7 ) |

在各种力的综合作用下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.8 ) |

式中，和分别表示垂直于焊缝长度方向的正应力和沿焊缝长度方向的剪应力；为角焊缝的强度设计值，按公式计算，表示焊缝的极限强度；表示正面角焊缝的强度设计值增大系数，静力荷载下取为1.22，汇总公式( 1.6 )-( 1.8 )，可以得到在任意加载角度下，接头承载力设计值为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.9 ) |

* + 1. 热输入量研究现状

李艳等（2012）[37] 研究了三种不同焊接热输入量20kJ/cm、17kJ/cm及14kJ/cm对Q890D高强钢焊接接头性能和晶体组织的影响，指出热输入量变化对焊接接头性能有一定的影响。为保证焊接接头的强度和一定的工作效率，热输入量选择17kJ/cm较为合适，此时焊缝组织为板条贝氏体和粒状贝氏体；HAZ过热区组织为板条马氏体；HAZ细晶区组织为板条马氏体，呈细晶等轴状；HAZ不完全淬火区组织为细晶等轴状板条马氏体和回火马氏体。

孙建雄等（2013）[38] 分析了不同焊接热输入量下的钢材晶体组织与焊接接头力学性能的关系。他采用了GMAW焊接方法针对Q690、Q890钢进行了试验，结果表明当焊接热输入量从12kJ/cm提高到17.02kJ/cm时，焊缝及Q890钢的热影响区粗晶区奥氏体内部组织将明显细化，使其抗裂性和韧性较好；但当焊接热输入量较高时，该粗晶区将生成上贝氏体等组织，严重降低接头韧性。

杜全斌（2013）[39] 对国内最新研制的890MPa级TMCP高强钢的焊缝金属组织、硬度和冲击韧性进行了研究，并分别针对该钢材进行了三种不同的焊接热输入量（12kJ/cm、15kJ/cm、18kJ/cm）下的试验。其结果表明，随着焊接热输入量的增大，贝氏体板条和马氏体板条逐渐粗化，且板条马氏体减少，而粒状贝氏体增加；同时，焊缝金属和焊接接头的抗拉强度有所下降，但下降幅度不超过母材强度的10%；同时，冲击韧性似乎呈下降趋势。

杨喜胜等（2013）[40] 采用1000MPa级高强钢专用焊丝和调制态的低合金高强钢30MnCrNiMoB来研究三种焊接热输入量6kJ/cm、12kJ/cm、18kJ/cm下的焊接软化行为。试验结果表明，软化区宽度随焊接热输入量、预热温度的增加而增加，且基本呈线性关系。

## 角焊缝连接接头有限元模拟

孙红（2012）[41] 采用有限元分析软件ANSYS对多向角焊缝节点进行了承载力分析，结果表明多向角焊缝节点承载力低于节点中所有焊缝段承载力之和，即该节点往往在所有角焊缝均达到极限状态前就已破坏。此外，还考虑了焊脚尺寸、角焊缝长度及节点板是否屈服等因素对单向角焊缝节点的影响，并给出了多向角焊缝节点承载力计算方法。

魏晨熙（2013）[14] 对Q460C高强度钢的侧面角焊缝搭接接头试验进行了数值模拟，结合试验结果验证了有限元模型的合理性，并利用已验证的有限元模型对焊脚尺寸、连接板厚度、焊缝强度匹配、拉剪比等因素进行参数分析，以研究这些因素对焊接接头受力性能的影响。

李金凤（2016）[17] 通过拉伸试验得到了Q345角焊缝焊接接头的承载性能数据，并使用有限元模型来模拟拉伸试验，进而通过与试验数据对比来验证模型的可靠性，最后利用该有限元模型进行参数分析，主要考虑了焊脚及焊缝长度对角焊缝焊接接头承载力的影响。

张有振等（2018）[42] 通过材性试验得到并标定了不锈钢母材和焊缝金属材料的本构关系模型，然后 使用ANSYS对不锈钢角焊缝连接的承载性能进行了非线性有限元数值模拟，试验和有限元结果的比较结果验证了有限元模型的合理性与准确性。

徐忠根等（2018）[18] 使用ANSYS建立了三面围焊角焊缝连接的有限元模型，有限元计算得到的强度值与试验强度的比值在 0.99~1.06范围内，验证了有限元模型的正确度和精度。

## 数字图像相关方法研究现状

* + 1. DIC技术的发展历史

在高强度钢材的研究中，得到较为满意的力学性能参数，如强度、硬度、延伸率、疲劳极限、应变及位移等是非常重要的，对于这些参数的测量，目前已经有了较为成熟的测量方法。在应变测量领域，目前较为常用的方法是接触式测量，如引伸计测量或光学测量）， 这两种方法已经较为成熟。但是，引伸计不能进行连续的大变形、全场应变测量，故不能得到物体的整体变形信息。[43]

鉴于应变测量的重要性，以及传统方法在实际应用上的种种限制，近年来，随着科学技术和制造技术等方面的发展，非接触式光学测量方法渐渐发展起来。非接触式光学测量方法是通过处理一系列图像数据，并进行数学计算得到位移、应变等测量结果。在非接触式光学测量方法中，数字图像相关（Digital Image Correlation，DIC）方法发展相对较快，它的测量精度已接近于传统的接触式测量，甚至更高，且己逐渐在材料科学的研究中发挥越来越重要的作用。[44]

数字图像相关方法是一种通过计算变形前后物体表面图像的灰度信息来获取被测物体的力学性能的测量方法，自上世纪八十年代被提出以来，该方法发展十分迅猛。在使用该方法时，需要用特定手段在试件上喷涂散斑，并通过相机拍摄得到试验过程中的一系列试件照片，再利用计算机算法对照片上的散斑点进行相关处理，进而对散斑进行匹配追踪，最后得到试件表面各个点的位移。

由于数字图像相关方法能够得到材料表面的全场位移，为分析材料的变形特点提供了强力支持；另一方面，这种方法在测量过程中不接触材料，不会干扰材料的变形，从而避免了某些系统误差，提高了测量精度，可以克服引伸计常见的偏心、断标外等问题。随着数字图像测量技术的不断发展，其测量精度不断提升，使数字图像相关方法逐渐成为表面变形测量的一种灵活、有力的工具。

* + 1. 国内外工程应用现状

数字图像相关（DIC）方法是上世纪 80年代初由美国南卡罗来纳大学的W.H.Peters、W.F.Ranson（1981）[45] 和日本 Yamaguchi（1981）[46] 等人分别独立提出的。此后，美国南卡罗来纳大学在 M.A.Sutton[47] 等学者对DIC方法的理论发展与完善做出了突出贡献。

Kahn-Jetter、Chu（1990）[48]  开创了三维DIC方法领域。他们采用两个相机同时拍摄待测试件，并通过两个相机照片的视差来求解各散斑点的三维坐标，进而生成待测试件表面的三维数据。

随着材料科学的发展，DIC 方法也被用于各种材料力学参数参量的研究。Zink 等（1996）[49] 使用DIC方法对木材的应变和泊松比进行了测量；Chevalier 等（2001）[50] 利用DIC方法对高分子材料在单轴和双轴拉伸条件下的力学行为进行了分析。在国内，高建新等（1989）[51] 最先开始进行DIC方法的研究工作；杭超等（2013）[52] 进行了钛合金焊缝单向拉伸试验，并采用DIC方法进行变形场测量；张睿诚（2017）[53] 尝试将DIC技术拓展到岩石三轴试验中，并研究了DIC方法在应变测量中的应用；朱飞鹏等（2018）[54] 使用了三维DIC技术对8.8级螺栓及Q690钢试样在单轴拉伸试验全过程中的变形进行了监测，得到了试样从弹性变形到塑性变形的发展规律，试验结果表明三维DIC技术特别适合对小尺寸试样进行力学性能测试。

迄今为止，DIC的相关研究无论在理论算法还是在各个应用领域都取得了丰硕的研究成果 。但是，对于金属材料，特别是钢材变形测量方面，DIC方法的应用范围仍有待扩展。鉴于位移及应变测量在钢材的力学性能测试中占据十分重要的地位，将DIC方法应用于钢铁材料的常规力学性能测试（如拉伸、压缩及疲劳测试等）具有很大的实际意义与发展空间。

## 存在的问题与本文研究工作

* + 1. 存在的问题

**（1）高强钢角焊缝连接的承载力设计公式的适用性亟需试验验证**

我国现行《钢结构设计规范》(GB50017-2017)尚未对抗拉强度超过420MPa的高强度结构钢材的焊接连接设计方法、焊条选用原则、强度指标和构造做出规定，且高强钢角焊缝连接的承载力计算公式尚是由普通钢材拓展来的，在工程设计中直接套用普通强度钢材的设计方法或者采用线性外推的方式都不甚严谨。高强钢角焊缝接头在受拉过程中可能会出现异于普通钢焊接接头的破坏类型，进而导致现有的设计理论无法很好地预测高强钢焊接的连接承载力，这些问题亟需试验验证。

**（2）高强度钢材****Q890D和熔敷金属ER120S-G的本构模型需要校准**

高强度钢材采用焊接连接时，其在焊接连接处的强度、延性等力学性能与原先相比有很大的差异。因此，仅研究一部分区域的钢材力学性能无法准确得到焊缝连接的整体性能。当采用有限元软件对焊缝连接进行焊接成型模拟或受力性能模拟分析时，需要分别定义母材和熔敷金属这两种不同性质的材料，若仅同一种材料进行模拟则不能体现出两种不同材料之间力和变形的协调过程。目前，尚无准确的高强度钢材和熔敷金属的本构模型，因此高强度钢材和熔敷金属的本构模型的校准具有十分重要的意义。

**（3）传统试验中引伸计和应变片不能得到试件的整体变形信息**

对于高强钢角焊缝连接在不同加载角度下的单调拉伸试验，从试验开始到破坏整个过程中的荷载位移曲线以及试件表面的应变发展趋势是非常重要的数据，然而现有的引伸计和应变片在试件破坏后容易失效，不能进行连续的大变形、全场性的测量，以至于不能得到试件的整体变形信息。

* + 1. 本文研究工作

（1）第1章 绪论

本章首先介绍了研究背景，对正面、侧面及斜向角接接头力学性能的国内外研究现状进行了系统的介绍，综述了角焊缝连接接头有限元数值分析的研究现状，并且阐述了传统用引伸计在试验中的不足以及数字图像相关方法DIC技术的发展现状和工程应用实例，最后针对当前研究和试验中存在的问题提出本文拟研究的问题，给出研究思路和主要开展的工作。

（2）第2章 单调加载作用下高强钢和熔敷金属材料的本构模型标定

本章对试验用高强度结构钢材Q890D和高强度焊材ER120S-G进行了单调加载材料力学性能试验研究，获得材料主要的力学性能指标。其次采用“试错法”对母材和焊材的本构模型进行标定，得到基于Ramberg-Osgood模型改善的幂指数形式的材料本构模型的相关系数，包括应变硬化指数n和参数值K，最后利用ABAQUS软件建立试件的有限元模型，有限元结果与试验结果吻合很好从而验证了校准后母材和焊材的材料模型的适用性。

（3）第3章 高强钢角焊缝力学性能试验研究

本章对48个不同加载角度下的搭接接头高强钢角焊缝试件（母材为高强度钢材Q890D和焊材为ER120S-G）进行单调静力加载并且使用DIC测量系统对整个试件应变场的发展历程进行采集，详细介绍了试件加工制作过程及焊接工艺等详细参数，并且介绍了试验使用的仪器设备。本章对试验结果进行了详细的分析，得到不同加载角度下高强钢角焊缝试件的断裂面角度、承载能力、延性系数、极限强度及破坏模式的变化规律。

（4）第4章 DIC测量系统监测下的试件应变分布特征

本章将详细介绍DIC测量系统的技术特点、适用范围以及工作原理，并介绍四种试验中常用的变形信息载体制备的方法。借助GOM软件对高强钢角焊缝试件单调拉伸加载中应变发展特征进行详细的分析，并且通过计算全场最大应变点集的应变率得出不同加载角度下试件破坏模式的演变规律。

（5）第5章 不同加载角度下角焊缝有限元分析

本章首先采用ABAQUS/standard隐式分析处理器建立本文高强钢角焊缝在不同加载角度下试件的有限元模型，将详细介绍有限元模型中所用的材料模型、边界条件和约束设置、单元类型和网格划分，其次考虑材料的退化和失效，采用ABAQUS/Explicit显式动态求解器对正面角焊缝和侧面角焊缝试件的开裂进行有限元模拟，最后对影响断裂过程的断裂参数和破坏位移这两个参数进行参数分析。

（6）第6章 结论与展望

对本文的研究工作进行归纳总结，明确指出了本文研究成果的特色与创新，并指出今后研究中需要进一步深入和完善的工作。

# 单调加载作用下高强钢和熔敷金属材料的本构模型标定

## 引言

通过单调加载拉伸试验获得高强度钢材Q890D和高强度焊材ER120S-G的力学性能指标，是后续高强钢角焊缝试验及有限元研究的基础。其主要指标包括弹性模量、屈服强度、极限抗拉强度、极限应变、断后伸长率、截面收缩率等。本章将对舞阳钢铁公司生产的Q890D的高强度结构钢材和昆山中冶宝钢焊接材料有限公司生产的ER120S-G高强度焊材进行单调加载材料力学性能试验研究，共制作7个标准材性试件，试验得到了每个试件的单调拉伸荷载位移曲线及相应的性能指标。本章采用“试错法”对母材和焊材的本构模型进行标定，通过与实测荷载位移曲线的对比，得到母材和焊材基于Ramberg-Osgood模型改善的幂指数形式的材料本构模型的相关系数，包括应变硬化指数n和参数值K，最终获得材料标定后的本构模型。

## 高强钢Q890D单调拉伸试验研究

* + 1. 试验概况

本次试验试件所用高强钢材由舞阳钢铁公司提供，钢材的化学成分如表 2.1，力学性能如表 2.2所示。

表 2.1高强钢钢材化学成分（%）

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | C | Si | Mn | P | S | Cr | Al |
| Q890D-10mm | 0.160 | 0.310 | 1.300 | 0.012 | 0.001 | 0.260 | 0.039 |
| Q890D-20mm | 0.140 | 0.280 | 1.070 | 0.012 | 0.004 | 0.520 | 0.029 |
|  | Mo | Ti | Cu | Nb | Ni | V | Ceq |
| Q890D-10mm | 0.570 | 0.018 | 0.080 | 0.023 | 0.070 | 0.047 | 0.562 |
| Q890D-20mm | 0.460 | 0.013 | 0.050 | 0.013 | 0.820 | 0.013 | 0.570 |

表 2.2高强钢钢材力学性能（厂家提供）

|  |  |  | 伸长率% | 冲击功吸收能量(－20℃)，J | | | 冷弯（d=3a） |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Q890D-10mm厚 | 1040 | 1050 | 13.5 | 55 | 77 | 72 | 合格 |
| Q890D-20mm厚 | 914 | 979 | 15.4 | 191 | 189 | 175 | 合格 |

本篇论文需要用到10mm和20mm厚的Q890D钢板，单调拉伸试件为狗骨性，制取方法按照规范《金属材料拉伸试验第1部分：室温试验方法》[56] 进行，其加工尺寸如图 2.1和图 2.2所示，试件实际加工图如图 2.3所示，每种厚度各取三个试件。

|  |
| --- |
|  |
| 图 2.1 10mm钢板单调拉伸试件尺寸 |
|  |
| 图 2.2 20mm钢板单调拉伸试件尺寸 |
| C:\Users\zhaochen\Desktop\890_10_20.jpg |
| 图 2.3 Q890D试件实际加工图 |

由于试件在机加工过程尺寸存有误差，因此在试验前需要对试件的实际尺寸进行测量，汇总列于表 2.3中。

表 2.3 单调拉伸材性试件尺寸

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 试件编号 | 名义尺寸 | | 实际尺寸 | |
| 宽度（mm） | 厚度（mm） | 宽度（mm） | 厚度（mm） |
| 10\_1 | 20 | 10 | 19.35 | 10.09 |
| 10\_2 | 19.19 | 10.18 |
| 10\_3 | 19.33 | 10.16 |
| 平均值 | 19.29 | 10.14 |
| 20\_1 | 15 | 20 | 15.01 | 20.00 |
| 20\_2 | 15.18 | 19.95 |
| 20\_3 | 15.07 | 19.98 |
| 平均值 | 15.09 | 19.98 |

试验机采用同济大学力学实验室2000kN试验机，如图 2.4所示，试验机加载速率为2mm/min。一方面，试验采用引伸计测量应变，引伸计标距100mm，量程30mm。另一方面试验试件正反两面都贴有应变片，通过应变片也可以得到试件的应变从而得到应力应变关系曲线关系图。

|  |
| --- |
| C:\Users\zhaochen\Desktop\微信图片_20190124194014.jpg |
| 图 2.4 2000kN单调拉伸加载试验机及引伸计 |

* + 1. 试验结果

10mm和20mm厚的高强度钢材Q890D试件的名义应力应变关系曲线如图 2.5和图 2.6所示，钢材单调拉伸力学性能参数汇总如下表 2.4所示。两种厚度钢板的力学性能均符合规范《高强度结构用调制钢板(GB/T 16270)》[57] 的要求。

表 2.4 试件单调拉伸力学性能参数

|  | /MPa | /MPa |  |  | 截面收缩率/% | 断后伸长率/% | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 10\_1 | 1146.18 | 1150.43 | 0.9963 | 0.0658 | 57.18% | 13.84% | |
| 10\_2 | 1102.02 | 1150.04 | 0.9582 | 0.0675 | 54.13% | 12.53% | |
| 10\_3 | 1094.96 | 1135.50 | 0.9643 | 0.0593 | 51.49% | 11.14% | |
| 平均值 | 1114.39 | 1145.32 | 0.9730 | 0.0642 | 54.25% | 12.50% | |
| 20\_1 | 934.11 | 979.58 | 0.9536 | 0.0562 | 44.20% | 16.79% | |
| 20\_2 | 925.04 | 969.92 | 0.9537 | 0.0683 | 43.98% | 15.46% | |
| 20\_3 | 928.30 | 976.15 | 0.9510 | 0.0645 | 42.83% | 15.96% | |
| 平均值 | 929.15 | 975.22 | 0.9528 | 0.0630 | 43.67% | 16.07% | |
|  | | | | | | |
| 图 2.5 10mm钢板应力应变关系曲线 | | | | | | |
|  | | | | | | |
| 图 2.6 20mm钢板应力应变关系曲线 | | | | | | |

* + 1. 试验用钢材的可焊性

钢材内部化学元素的不同组成对钢材的力学性能及使用性能具有不同的影响，而焊接是钢材在使用过程中最常面临的加工工艺，钢材可焊性也是评定钢材性能好坏的重要方面，钢材可焊性通常用碳当量这一指标表示。文献[55] 中介绍了目前世界各国常用的碳当量公式及其使用的钢种、强度级别、化学成分范围及应用判据，根据本文使用的钢板的化学成分范围，适用于本试验中所用钢材的碳当量公式共有三个：

（1）计算预热温度的碳当量公式

美国金属学会提出的用于计算预热温度的碳当量公式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 2.1 ) |

式( 2.1 )适用于碳钢和低合金高强度钢，当CE（1）< 0.45%，可不预热；当CE（1）在0.45%~0.6%之间时，预热100~200°C；当CE（1）> 0.6%，预热200~370°C。

（2）评定焊接性的碳当量公式

美国金属学会提出的用于评定淬火碳钢和低合金钢的碳当量公式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 2.2 ) |

式( 2.2 )考虑钢中Si的影响，当CE（2）< 0.35%，通常不需要预热和焊后热处理；当CE（2）在0.35%~0.55%之间时，一般需预热；当CE（2）> 0.55%，既要预热又要焊后热处理。

（3）美国海军碳当量公式

美国海军用低合金高强度钢碳当量公式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 2.3 ) |

按照公式( 2.3 )求得的碳当量及含碳量的不同，可把钢的焊接性划分分为易焊区、可焊区和难焊区，如图2.1所示，含碳量为0.1%~0.12%以下的区域，为易焊区；含碳量大于0.1%~0.12%，且碳当量CE（3）<0.49% 以下的区域，为可焊区；其他情况为难焊区。钢材可焊性与钢材的碳含量和上述公式计算所得的碳当量关系如图 2.7所示。

钢的碳当量就是把钢中包括碳在内的对淬硬、冷裂纹及脆化等有影响的合金元素含量换算成碳的相当含量。通过对钢的碳当量和冷裂敏感指数的估算，可以初步衡量低合金高强度钢冷裂敏感性的高低，这对焊接工艺条件如预热、焊后热处理等的确定具有重要的指导作用。通过碳当量的计算可以看出，当碳当量增加时，钢材的淬硬倾向增大，硬度增加，这时钢材焊接热影响区就容易产生冷裂纹。

|  |
| --- |
| C:\Users\zhaochen\AppData\Local\Temp\1548233538(1).png |
| 图 2.7 碳当量、含碳量与可焊性的关系 |

根据以上三个公式，计算可得本试验中所用钢材的碳当量以及焊接过程中的热处理情况，结果汇总见下表 2.5，由此可知，试验用的10mm和20mm的Q890D钢材根据其碳当量属于需要焊前预热和焊接后热处理（难焊）的类型。本文试验焊接前预热150-200℃，焊接后消氢热处理的加热温度为250-350℃，保温时间2h，达到保温时间后应缓冷至常温。

表 2.5美国推荐的碳当量计算结果及热处理情况

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 钢材等级 | 厚度 | 轧制工艺 | 碳当量（%）及热处理情况 | | |
| CE(1) | CE(2) | CE(3) |
| Q890D | 10mm | 淬火回火钢QT | 0.595 | 0.583 | 0.614 |
| 预热100~200℃ | 预热+焊后热处理 | 难焊 |
| Q890D | 20mm | 淬火回火钢QT | 0.622 | 0.594 | 0.622 |
| 预热200~370℃ | 预热+焊后热处理 | 难焊 |

## 高强度焊材ER120S-G单调拉伸试验研究

* + 1. 试验概况

本次试验所用焊材采用昆山中冶宝钢焊接材料有限公司生产的AWS A5.28 ER120S-G，焊丝牌号为BHG-5，熔敷金属的化学成分如下表 2.6，机械性能如下表 2.7。焊接过程采用气体保护焊，保护气体为80%Ar+20%CO2 。

熔敷金属ER120S-G的单调拉伸的试样为圆棒性试件，其制取按照国家标准GB 2652-2008 《焊缝及熔敷金属拉伸试验方法》[58] 的相关要求进行，试件的设计尺寸如图 2.8所示。试验机采用同济大学力学实验室2000kN试验机，加载速率为2mm/min。

表 2.6 熔敷金属ER120S-G的化学成分（%）

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| C | Si | Mn | P | S | Ni | Mo | Cr |
| 0.09 | 0.74 | 1.73 | 0.006 | 0.003 | 2.29 | 0.58 | 0.33 |

表 2.7熔敷金属ER120S-G的机械性能

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 屈服强度（MPa） | 抗拉强度（MPa） | 伸长率% | 冲击功吸收能量(－20℃)，J | | | 射线检测 | |
| 实测值 | 908 | 1022 | 16.4 | 84 | 90 | 84 | 合格 | |
|  | | | | | | | |
| 图 2.8 ER120S-G熔敷金属单调拉伸试件尺寸 | | | | | | | |

* + 1. 试验结果

熔敷金属ER120S-G试件的名义应力应变关系曲线如图 2.9所示，焊材单调拉伸力学性能参数汇总如下表 2.8所示。

表 2.8 试件单调拉伸力学性能参数

| 试件编号 | /MPa | /MPa |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 120\_1 | 972.65 | 1084.19 | 0.8971 | 0.1123 |

|  |
| --- |
|  |
| 图 .9 熔敷金属ER120S-G应力应变关系曲线 |

## 材料本构模型的标定

* + 1. “试错法”的校准流程

在前文两节的高强钢Q890D和熔敷金属ER120S-G单轴拉伸试验中得到的数据是以名义应变和名义应力表示的，其计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 2.4 ) |

在试件发生颈缩之前，真实应力应变曲线可以通过下式( 2.5 )得到：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 2.5 ) |

其中是试件标距段的长度变化量，是试件的标距段长度，F是荷载，是试样标距段的初始截面面积，和分别为真实应变和真实应力。在试件发生颈缩之后，试件截面面积不再均匀，在颈缩除了轴向应力外还有环向应力存在，公式( 2.5 )不再适用，精确的本构模型的校准仍存在很大的困难，因此Matic et al.[59] 和Khoo et al.[60] 提出了“try and error”的方法来尝试得到材料的本构模型曲线，本文同样使用该方法，其中本构关系曲线以Ramberg-Osgood 本构模型的形式作为基础，具体的校准步骤见图 2.10。

文献[61] 对26根以Q690级高强度钢为母材的对接焊接头进行静态拉伸试验，基于试验误差法（try and error）校准方法得到对接焊缝中三种材料（母材、焊缝金属和热影响区）的真实应力-应变关系，并且有限元模拟结果与试验结果吻合较好，验证了该方法的有效性。

|  |
| --- |
| C:\Users\zhaochen\AppData\Local\Temp\1548339768(1).png |
| 图 2.10 本构关系曲线校准的一般步骤[61] |

本构关系曲线校准的一般步骤如下：

（1）首先进行材性试验得到名义应力应变曲线和荷载位移曲线，利用公式( 2.4 )和( 2.5 )得到颈缩前的真实应力应变曲线；

（2）基于Ramberg-Osgood模型，改善的幂指数形式的本构关系曲线如

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | for  for | ( 2.6 ) |

式中，和σ0为屈服平台结束时对应的塑性应变和真实应力，如果材料不存在屈服平台，则点(，σ0)即为试验的真实应力-塑性应变曲线和曲线σ=Eεp的交点，σ为真实应力，εp为塑性应变，σy为屈服应力，K为常数，n是应变硬化指数。对公式( 2.6 )的部分进行求导，得到

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | for | ( 2.7 ) |

在名义应力应变曲线的峰值点(，σu)处，可以得到

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 2.8 ) |

比较公式( 2.6 )和( 2.8 )得到参数n和K的初值表达式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 2.9 ) |

（3）建立和标准材性试件相同的有限元模型，材料模型使用上述方法校准的本构关系曲线，n和K使用公式( 2.9 )得到的初始值，边界条件和网格划分见2.4.2节。

（4）将试验得到的荷载位移曲线和有限元得出的荷载位移曲线进行对比，给定一个误差范围，通过微调参数n和K的值，使得试验曲线和有限元曲线的对比关系在误差范围内，最终使用的本构关系模型曲线即为校准的材料模型。

本文采用的高强钢Q890D和高强度焊材ER120S-G的基于Ramberg-Osgood模型改善的幂指数形式的材料本构模型的相关系数（应变硬化指数*n*和参数值*K*）汇总如下表 2.9中：

表 2.9 母材和焊材本构模型的相关系数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Q890-10mm | Q890-20mm | ER120S-G |
| 应变硬化指数n | 1478 | 1280 | 1610 |
| 参数值K | 0.0680 | 0.0738 | 0.1340 |

* + 1. 标准材性试件的有限元模拟

本节通过ABAQUS有限元软件建立高强度钢材Q890D和高强度焊材ER120S-G试验研究试件的有限元模型，进行数值模拟验证。

对于10mm和20mm厚的高强钢Q890D材性试件，由于其在X，Y，Z方向上的对称性，为了减少单元提高计算效率，仅建立1/8模型，试件长度为引伸计标距段的一半即50mm，有限元模型的边界条件的设置如图 2.11和图 2.12所示。网格单元类型采用C3D8R八结点线性六面体单元，减缩积分，沙漏控制，网格划分采用六面体结构化划分，在靠近试件中间段的10mm内细化网格，其大小为0.5\*0.5\*0.5mm，有限元网格划分如图 2.13和图 2.14所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 2.11 10mm试件边界条件 | 图 2.12 20mm试件边界条件 |
|  |  |
| 图 2.13 10mm试件网格划分 | 图 2.14 20mm试件网格划分 |

对于熔敷金属ER120S-G试件，根据其引伸计范围内是圆柱体的对称特性，有限元建模采用轴对称单元CAX8R八结点双向二次轴对称四边形单元，减缩积分，有限元模型的边界条件如图 2.15所示，网格单元形状为四边形进阶算法，网格大小如图 2.16所示，试件中间段网格大小为0.2\*0.2mm。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 2.15 熔敷金属试件边界条件 | 图 2.16 熔敷金属试件网格划分 |

* + 1. 有限元结果与试验对比

有限元分析得到高强钢和熔敷金属各试件的力位移曲线与试验数据对比如图 2.17至图 2.19所示，试验和有限元极限荷载和对应的位移汇总在表 2.10和表 2.11中。高强钢Q890-10mm/20mm试件极限荷载与有限元误差为2.29%/0.16%，极限荷载对应的位移试验与有限元误差为0.25%/5.95%；高强度焊材ER120S-G试件极限荷载与有限元误差为1.15%，极限荷载对应的位移试验与有限元误差为8.29%。有限元与试验结果在极限荷载处拟合优异，在极限位移处拟合存有一定误差，总体而言有限元模型验证了采用公式( 2.9 )校准的母材和焊材的材料模型的适用性。

|  |
| --- |
|  |
| 图 2.17 Q890-10mm力位移曲线有限元与试验对比 |
|  |
| 图 2.18 Q890-20mm力位移曲线有限元与试验对比 |
|  |
| 图 2.19 ER120S-G力位移曲线有限元与试验对比 |

表 2.10 Q890D试件极限荷载和位移试验与有限元对比

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 10\_1 | 10\_2 | 10\_3 | 平均值 | 有限元 | 误差 |
| 极限荷载（kN） | 224.61 | 224.66 | 223 | 224.09 | 229.23 | 2.29% |
| 极限荷载对应的位移(mm） | 6.584 | 6.754 | 5.934 | 6.424 | 6.440 | 0.25% |
|  | 20\_1 | 20\_2 | 20\_3 | 平均值 | 有限元 | 误差 |
| 极限荷载（kN） | 294.07 | 293.73 | 293.92 | 293.91 | 293.44 | 0.16% |
| 极限荷载对应的位移(mm） | 5.615 | 6.827 | 6.447 | 6.296 | 6.671 | 5.95% |

表 2.11 ER120S-G试件极限荷载和位移试验与有限元对比

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 120\_1 | 有限元 | 误差 |
| 极限荷载（kN） | 85.152 | 84.17 | 1.15% |
| 极限荷载对应的位移(mm） | 5.612578 | 6.120 | 8.29% |

## 本章小结

本章对舞阳钢铁公司生产的Q890D的高强度结构钢材和昆山中冶宝钢焊接材料有限公司生产的ER120S-G高强度焊材进行了单调加载材料力学性能试验研究，并且采用“试错法”对母材和焊材的本构模型进行标定，得到母材和焊材基于Ramberg-Osgood模型改善的幂指数形式的材料本构模型的相关系数，包括应变硬化指数n和参数值K，主要结论如下：

（1）10mm厚的高强度钢材Q890D的屈服强度为1114.39MPa，极限强度为1145.32MPa，屈强比为0.973，面缩率和伸长率分别为54.25%/12.50%；20mm厚的高强度钢材Q890D的屈服强度为929.15MPa，极限强度为975.22MPa，屈强比为0.953，面缩率和伸长率分别为43.67%/16.07%。两种厚度钢板的力学性能均符合规范《高强度结构用调制钢板(GB/T 16270)》的要求。

（2）高强度焊材ER120S-G的屈服强度为972.65MPa，极限强度为1084.19MPa，屈强比为0.897，极限强度对应的应变为0.1123。

（3）通过计算10mm和20mm高强度钢材Q890D的碳当量得知该种钢材焊接时需要焊前预热和焊接后热处理。高强钢角焊缝试验焊接热处理工艺为：焊接前预热150-200℃，焊接后消氢热处理的加热温度为250-350℃，保温时间2h，达到保温时间后应缓冷至常温。

（4）采用“试错法”对母材和焊材的本构模型进行标定，通过与实测荷载位移曲线的对比，得到母材和焊材基于Ramberg-Osgood模型改善的幂指数形式的材料本构模型的相关系数，包括应变硬化指数n和参数值K，最终获得材料标定后的本构模型。

（5）利用ABAQUS有限元软件建立钢材和焊材单调拉伸标准材性试件的模型，有限元采用校准后的材料模型得到荷载位移曲线与试验曲线拟合效果优异，平均误差在3%以下，有限元模型验证了校准后母材和焊材的材料模型的适用性。

# 高强钢角焊缝力学性能试验研究

## 引言

众所周知，角焊缝的力学性能与焊缝和荷载二者之间的夹角有很大关系，试验研究发现正面角焊缝（焊缝与加荷方向垂直）较侧面角焊缝（焊缝与加荷方向平行）有更高的强度，但是变形能力更差。本章试验以高强度钢材Q890为母材匹配国产的高强度焊材ER120S-G，以焊缝方向与受力方向的夹角作为试验设计变量，选取0°（侧面角焊缝）、15°、30°、45°D（单边双条焊缝）、45°S（单边单条焊缝）、60°、75°、90°（正面角焊缝）共8个不同的加载角度，为了减少试验数据的离散型以保证试验数据合理有效，每个角度加工6个重复试件，共计48个搭接接头角焊缝试件。通过对试件进行单调静力加载并且使用DIC测量系统对整个试件应变场的发展历程进行采集，为高强钢角焊缝连接的力学性能的研究提供系统的试验数据。最后对角焊缝的力学性能（包括破坏角度、变形能力、极限强度和承载能力等方面）进行汇总并对比分析，着重研究加载角度对角焊缝力学性能的影响。

## 试验概况

* + 1. 单边单条角焊缝试件设计
       1. 试件加工设计图

加载角度为45°S（单边单条焊缝）、60°、75°、90°（正面角焊缝）的试件称为单边单条角焊缝，其加工步骤如下：

（1）每个角度焊接出两块如图 3.1所示的搭接接头焊件板；

（2）在焊件两端各切去50mm，消除起弧和灭弧的影响；

（3）每块搭接接头焊件板切割加工成3个如图 3.2至图 3.5所示的试件，每个角度的试件各有6个数量；

（4）试件一侧焊缝的焊脚尺寸为设计尺寸，即5mm，另一侧焊脚尺寸按10mm 进行加工，原因是为保证拉伸破坏发生在确定的角焊缝上。焊脚尺寸为5mm的角焊缝采用机加工的方式将焊缝的焊脚尺寸切割成标准的三角形截面，即消除余高的影响，焊脚尺寸为10mm的加强边不做任何处理。

试件最终加工图如图 3.6至图 3.9所示。试件的命名规则为X\_N，X代表加载角度，N代表每种角度的重复试件。

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552014175(1).png | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552014237(1).png |
| （a） 90°焊接件 | （b） 75°焊接件 |
| C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552014285(1).png | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552014344(1).png |
| （c） 60°焊接件 | （d）45°S焊接件 |
| 图 3.1 单边单条焊缝试件焊接件 | |

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552014553(1).png | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552014588(1).png |
| 图 3.2 90°试件设计图 | 图 3.3 75°试件设计图 |
| C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552014622(1).png | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552014676(1).png |
| 图 3.4 60°试件设计图 | 图 3.5 45°S试件设计图 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| I:\1毕业课题\#Graduate-thesis\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验前\IMG_E9922.JPG | I:\1毕业课题\#Graduate-thesis\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验前\IMG_E9926.JPG | I:\1毕业课题\#Graduate-thesis\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验前\IMG_E9923.JPG | I:\1毕业课题\#Graduate-thesis\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验前\IMG_E9925.JPG |
| 图 3.6 90°试件 | 图 3.7 75°试件 | 图 3.8 60°试件 | 图 3.9 45°S试件 |

* + - 1. 试件焊接工艺

《钢结构工程施工及验收规范》（GB50205）[62] 要求将焊接工艺评定报告列入竣工资料必备文件之一，焊接工艺评定的施焊参数，包括热输入、预热、后热制度等[63] 。单边单条角焊缝试验采用的焊接工艺是气体保护焊（GMAW），焊接过程采用气体保护焊，保护气体为80%Ar+20%CO2 。单边单条角焊缝试件的焊接工艺参数汇总在表 3.1中，其中热输入量的计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 3.1 ) |

表 3.1 单边单条角焊缝试件焊接工艺

| 试件编号 | 焊脚尺寸(mm) | 电流(A) | 电压(V) | 速度（mm/min） | 道间温度(°C) | 热输入（kJ/mm) |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 90\_1/90\_2/90\_3/90\_4/90\_5/90\_6 | 10 | 241 | 27.0 | 318 | 175 | 1.23 |
| 5 | 240 | 27.0 | 315 | 165 | 1.23 |
| 75\_1/75\_2/75\_3 | 10 | 240 | 26.9 | 310 | 170 | 1.25 |
| 5 | 242 | 27.0 | 315 | 185 | 1.24 |
| 75\_4/75\_5/75\_6 | 10 | 240 | 27.0 | 310 | 165 | 1.25 |
| 5 | 242 | 27.1 | 312 | 190 | 1.26 |
| 60\_1/60\_2/60\_3 | 10 | 240 | 26.8 | 315 | 155 | 1.23 |
| 5 | 240 | 27.0 | 310 | 175 | 1.25 |
| 60\_4/60\_5/60\_6 | 10 | 242 | 27.2 | 315 | 150 | 1.25 |
| 5 | 240 | 27.0 | 315 | 180 | 1.23 |
| 45S\_1/45S\_2/45S\_3 | 10 | 241 | 27.2 | 320 | 145 | 1.23 |
| 5 | 242 | 27.0 | 316 | 170 | 1.24 |
| 45S\_4/45S\_5/45S\_6 | 10 | 240 | 26.8 | 312 | 150 | 1.24 |
| 5 | 242 | 27.0 | 313 | 180 | 1.25 |

* + - 1. 试件原始尺寸测量

由于加工过程中的随机性，试件的焊脚尺寸和焊缝长度与设计尺寸会有一定误差，因为在试验前，需要对每个试件的实际尺寸进行详细的测量。沿着焊缝长度方向，每隔10mm测量一次焊缝截面的剪切边、受拉边和斜边，尺寸测量采用专业的焊脚尺，测量工具与试件测量示意图如图 3.10和图 3.11所示， 表 3.2汇总了单边单条角焊缝类型每个试件实测数据的平均值。

表 3.2 单边单条角焊缝试件实测值汇总

| 编号 | 1号边 | | | | 2号边 | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 剪切边（mm) | 受拉边（mm) | 斜边（mm) | 焊缝长度（mm) | 剪切边（mm) | 受拉边（mm) | 斜边（mm) | 焊缝长度（mm) |
| 45S\_1 | 4.70 | 4.50 | 6.49 | 69.02 | 4.60 | 5.00 | 6.67 | 69.69 |
| 45S\_2 | 4.60 | 5.00 | 6.64 | 69.45 | 4.70 | 5.20 | 6.96 | 69.64 |
| 45S\_3 | 4.50 | 4.90 | 6.49 | 68.99 | 5.00 | 5.20 | 6.95 | 70.22 |
| 45S\_4 | 4.80 | 4.90 | 6.91 | 69.25 | 4.90 | 5.00 | 6.74 | 70.75 |
| 45S\_5 | 4.60 | 5.00 | 6.94 | 68.27 | 4.40 | 5.00 | 6.54 | 69.04 |
| 45S\_6 | 4.80 | 5.00 | 6.65 | 68.80 | 4.40 | 4.90 | 6.49 | 69.19 |
| 60\_1 | 4.70 | 5.10 | 7.06 | 57.17 | 5.00 | 5.00 | 6.91 | 57.91 |
| 60\_2 | 4.63 | 5.00 | 6.61 | 57.46 | 5.00 | 5.00 | 6.87 | 58.93 |
| 60\_3 | 4.64 | 5.00 | 6.82 | 57.76 | 4.80 | 5.20 | 7.14 | 57.56 |
| 60\_4 | 4.70 | 5.10 | 6.90 | 57.68 | 4.90 | 5.10 | 6.87 | 58.86 |
| 60\_5 | 5.00 | 4.40 | 6.38 | 57.28 | 5.20 | 5.00 | 7.06 | 58.56 |
| 60\_6 | 4.80 | 5.00 | 6.83 | 57.47 | 5.00 | 4.95 | 6.89 | 58.88 |
| 75\_1 | 4.50 | 5.00 | 6.50 | 52.23 | 4.92 | 4.64 | 6.68 | 51.38 |
| 75\_2 | 4.82 | 4.50 | 6.69 | 51.89 | 5.46 | 4.32 | 6.62 | 52.75 |
| 75\_3 | 4.62 | 4.60 | 6.46 | 51.68 | 5.40 | 4.60 | 6.80 | 52.30 |
| 75\_4 | 4.76 | 4.66 | 6.61 | 51.74 | 4.80 | 4.72 | 6.51 | 52.36 |
| 75\_5 | 4.70 | 5.00 | 6.67 | 52.31 | 5.00 | 4.94 | 6.72 | 52.40 |
| 75\_6 | 4.70 | 4.40 | 6.68 | 53.51 | 4.50 | 4.40 | 6.50 | 53.65 |
| 90\_1 | 5.00 | 5.00 | 6.89 | 49.94 | 5.12 | 4.30 | 6.71 | 49.98 |
| 90\_2 | 4.63 | 4.90 | 6.42 | 49.99 | 5.00 | 4.90 | 6.80 | 50.01 |
| 90\_3 | 4.80 | 5.00 | 6.85 | 50.04 | 4.70 | 4.90 | 6.93 | 49.99 |
| 90\_4 | 4.90 | 5.00 | 6.73 | 49.95 | 5.20 | 4.95 | 6.83 | 49.98 |
| 90\_5 | 5.40 | 5.00 | 7.35 | 50.01 | 5.08 | 4.30 | 6.70 | 50.07 |
| 90\_6 | 5.30 | 4.50 | 6.70 | 50.02 | 5.60 | 4.50 | 6.97 | 50.06 |

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\zhaochen\AppData\Local\Temp\WeChat Files\502f1b4de45a5f32a8098c1148e5edd.jpg |  |
| 图 3.10 焊脚尺 | 图 3.11 试件测量示意图 |

* + 1. 单边双条角焊缝试件设计
       1. 试件加工设计图

加载角度为0°、15°、30°、45°D（单边双条焊缝）的试件称为单边双条角焊缝，试件设计图如图 3.12至图 3.15 所示，其加工步骤如下：

（1）在试件两端拼接高强钢Q890D的引弧板，其尺寸为50mm宽，200mm长，20mm厚，拼装好后采用点焊将引弧板和试件焊接起来，如图 3.16所示。

（2）焊接时在引弧板上起弧，保证所需焊缝处焊接饱满，焊接完后采用机加工线切割的方式将引弧板切掉。

（3）试件一侧焊缝的焊脚尺寸为设计尺寸，即5mm，另一侧焊脚尺寸按10mm 进行加工，原因是为保证拉伸破坏发生在确定的角焊缝上。焊脚尺寸为5mm的角焊缝采用机加工的方式将焊缝的焊脚尺寸切割成标准的三角形截面，即消除余高的影响。每种角度的试件各有6个数量，试件最终加工如图 3.17至图 3.20所示。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552028471.png | | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552028514(1).png | |
| 图 3.12 45°D试件设计图 | | 图 3.13 30°试件设计图 | |
| C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552028539(1).png | | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552028563(1).png | |
| 图 3.14 15°试件设计图 | | 图 3.15 0°试件设计图 | |
|  |  | |  |
| （a）拼装 | （b）点焊 | | （c）焊前准备 |
| 图 3.16 引弧板和试件拼装与焊接 | | | |

|  |  |
| --- | --- |
| I:\1毕业课题\#Graduate-thesis\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验前\IMG_9950.JPG | I:\1毕业课题\#Graduate-thesis\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验前\IMG_9989.JPG |
| 图 3.17 45°D试件 | 图 3.18 30°试件 |
| I:\1毕业课题\#Graduate-thesis\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验前\IMG_9991.JPG | I:\1毕业课题\#Graduate-thesis\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验前\IMG_0007.JPG |
| 图 3.19 15°试件 | 图 3.20 0°试件 |

* + - 1. 试件焊接工艺

单边双条角焊缝试验采用的焊接工艺是气体保护焊（GMAW），焊接过程采用气体保护焊，保护气体为80%Ar+20%CO2 。单边双条角焊缝试件的焊接工艺参数汇总在表 3.3中。

表 3.3 单边双条角焊缝试件焊接工艺

| 试件编号 | 焊脚尺寸(mm) | 电流(A) | 电压(V) | 速度（mm/min） | 道间温度(°C) | 热输入（kJ/mm) |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 00\_1 | 10 | 242 | 27.0 | 320 | 145 | 1.23 |
| 5 | 243 | 27.2 | 310 | 170 | 1.28 |
| 00\_2 | 10 | 240 | 27.0 | 316 | 150 | 1.23 |
| 5 | 241 | 27.0 | 312 | 175 | 1.25 |
| 00\_3 | 10 | 240 | 26.9 | 310 | 148 | 1.25 |
| 5 | 241 | 27.0 | 320 | 178 | 1.22 |
| 00\_4 | 10 | 243 | 27.1 | 325 | 150 | 1.22 |
| 5 | 242 | 27.1 | 318 | 170 | 1.24 |
| 00\_5 | 10 | 243 | 27.1 | 312 | 150 | 1.27 |
| 5 | 240 | 27.0 | 310 | 180 | 1.25 |
| 00\_6 | 10 | 240 | 26.9 | 316 | 149 | 1.23 |
| 5 | 242 | 27.0 | 312 | 173 | 1.26 |
| 15\_1 | 10 | 240 | 27.0 | 315 | 150 | 1.23 |
| 5 | 241 | 27.0 | 320 | 185 | 1.22 |
| 15\_2 | 10 | 240 | 27.3 | 310 | 148 | 1.27 |
| 5 | 240 | 27.1 | 310 | 180 | 1.26 |
| 15\_3 | 10 | 242 | 27.0 | 308 | 149 | 1.27 |
| 5 | 240 | 27.1 | 306 | 175 | 1.28 |
| 15\_4 | 10 | 242 | 26.9 | 315 | 148 | 1.24 |
| 5 | 242 | 27.0 | 310 | 187 | 1.26 |
| 15\_5 | 10 | 240 | 27.0 | 310 | 150 | 1.25 |
| 5 | 240 | 26.9 | 315 | 179 | 1.23 |
| 15\_6 | 10 | 240 | 27.0 | 320 | 150 | 1.22 |
| 5 | 240 | 26.9 | 315 | 177 | 1.23 |
| 30\_1 | 10 | 242 | 27.0 | 310 | 142 | 1.26 |
| 5 | 240 | 27.0 | 308 | 175 | 1.26 |
| 30\_2 | 10 | 242 | 27.1 | 318 | 146 | 1.24 |
| 5 | 241 | 27.0 | 310 | 185 | 1.26 |
| 30\_3 | 10 | 242 | 27.2 | 315 | 139 | 1.25 |
| 5 | 241 | 27.0 | 306 | 170 | 1.28 |
| 30\_4 | 10 | 240 | 27.0 | 310 | 141 | 1.25 |
| 5 | 242 | 27.0 | 310 | 173 | 1.26 |
| 30\_5 | 10 | 243 | 27.1 | 308 | 138 | 1.28 |
| 5 | 240 | 26.9 | 312 | 171 | 1.24 |
| 30\_6 | 10 | 241 | 27.1 | 315 | 140 | 1.24 |
| 5 | 239 | 27.2 | 310 | 165 | 1.26 |
| 45D\_1 | 10 | 240 | 27.0 | 310 | 149 | 1.25 |
| 5 | 243 | 27.2 | 310 | 190 | 1.28 |
| 45D\_2 | 10 | 241 | 27.0 | 309 | 142 | 1.26 |
| 5 | 240 | 27.0 | 308 | 180 | 1.26 |
| 45D\_3 | 10 | 242 | 27.0 | 310 | 141 | 1.26 |
| 5 | 242 | 27.0 | 315 | 170 | 1.24 |
| 45D\_4 | 10 | 240 | 27.1 | 318 | 138 | 1.23 |
| 5 | 241 | 27.0 | 320 | 169 | 1.22 |
| 45D\_5 | 10 | 240 | 26.8 | 315 | 135 | 1.23 |
| 5 | 242 | 27.1 | 310 | 171 | 1.27 |
| 45D\_6 | 10 | 240 | 27.0 | 308 | 143 | 1.26 |
| 5 | 242 | 26.9 | 310 | 186 | 1.26 |

* + - 1. 试件原始尺寸测量

单边双条角焊缝试件受拉边、剪切边、斜边及焊缝长度实测数据的平均值汇总在表 3.4中。

表 3.4 单边双条角焊缝试件实测值汇总

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 1号边 | | | | 2号边 | | | | 3号边 | | | | 4号边 | | | |
| 剪切边（mm) | 受拉边（mm) | 斜边（mm) | 焊缝长度（mm) | 剪切边（mm) | 受拉边（mm) | 斜边（mm) | 焊缝长度（mm) | 剪切边（mm) | 受拉边（mm) | 斜边（mm) | 焊缝长度（mm) | 剪切边（mm) | 受拉边（mm) | 斜边（mm) | 焊缝长度（mm) |
| 00\_1 | 5.60 | 5.00 | 7.71 | 29.10 | 5.10 | 5.10 | 7.22 | 27.95 | 5.40 | 5.00 | 7.47 | 30.28 | 5.70 | 5.20 | 7.68 | 32.24 |
| 00\_2 | 5.10 | 5.30 | 7.49 | 30.71 | 5.10 | 4.60 | 6.94 | 31.73 | 4.70 | 3.70 | 5.80 | 28.88 | 5.40 | 5.00 | 7.54 | 33.96 |
| 00\_3 | 5.50 | 5.20 | 7.81 | 34.09 | 5.00 | 6.10 | 7.91 | 35.00 | 5.10 | 5.30 | 7.29 | 31.24 | 5.50 | 4.80 | 7.00 | 30.67 |
| 00\_4 | 4.90 | 4.20 | 6.21 | 31.75 | 4.40 | 4.10 | 5.90 | 32.60 | 4.70 | 4.30 | 6.20 | 33.94 | 4.60 | 4.40 | 6.20 | 34.79 |
| 00\_5 | 5.00 | 5.30 | 7.17 | 33.52 | 4.80 | 4.90 | 7.13 | 31.80 | 5.20 | 4.90 | 7.24 | 33.64 | 5.20 | 5.00 | 7.47 | 35.00 |
| 00\_6 | 4.80 | 4.60 | 6.63 | 33.02 | 5.20 | 4.30 | 6.74 | 31.73 | 5.00 | 3.70 | 6.35 | 31.98 | 3.80 | 4.20 | 5.80 | 31.79 |
| 15\_1 | 4.80 | 4.00 | 6.28 | 51.24 | 4.90 | 4.00 | 6.20 | 47.87 | 4.70 | 4.00 | 6.20 | 47.87 | 4.50 | 3.90 | 6.00 | 50.75 |
| 15\_2 | 5.20 | 3.60 | 6.30 | 50.73 | 4.80 | 3.50 | 6.00 | 49.81 | 4.00 | 4.40 | 5.90 | 48.62 | 5.20 | 4.50 | 6.80 | 51.48 |
| 15\_3 | 4.40 | 4.40 | 6.10 | 49.99 | 4.40 | 3.90 | 5.80 | 51.45 | 4.80 | 3.80 | 6.10 | 48.38 | 4.30 | 4.50 | 6.20 | 49.93 |
| 15\_4 | 4.90 | 4.00 | 6.30 | 49.71 | 4.60 | 4.40 | 6.50 | 51.60 | 4.50 | 4.20 | 6.10 | 50.34 | 4.70 | 3.20 | 5.70 | 49.27 |
| 15\_5 | 4.20 | 4.50 | 6.10 | 52.85 | 5.00 | 3.50 | 6.10 | 49.87 | 4.80 | 3.60 | 6.00 | 51.51 | 4.20 | 4.40 | 6.20 | 48.91 |
| 15\_6 | 4.90 | 3.70 | 6.20 | 47.02 | 5.30 | 3.50 | 6.30 | 47.75 | 5.30 | 3.30 | 6.20 | 46.95 | 4.50 | 4.40 | 6.30 | 52.20 |
| 30\_1 | 4.20 | 3.80 | 5.80 | 60.62 | 4.30 | 4.30 | 6.10 | 62.40 | 4.70 | 4.30 | 6.30 | 61.46 | 5.00 | 4.00 | 6.40 | 59.01 |
| 30\_2 | 4.50 | 4.20 | 6.10 | 62.66 | 4.80 | 3.80 | 6.10 | 60.81 | 5.00 | 4.00 | 6.30 | 60.18 | 4.40 | 4.50 | 6.20 | 59.26 |
| 30\_3 | 5.00 | 3.60 | 6.20 | 62.05 | 4.70 | 4.20 | 6.20 | 61.32 | 4.40 | 4.40 | 6.30 | 62.52 | 5.30 | 4.00 | 6.40 | 63.56 |
| 30\_4 | 4.50 | 4.00 | 6.20 | 61.48 | 5.50 | 4.00 | 6.90 | 61.84 | 4.90 | 4.00 | 6.40 | 61.52 | 4.30 | 4.20 | 6.00 | 63.33 |
| 30\_5 | 4.60 | 4.40 | 6.50 | 62.38 | 4.90 | 4.30 | 6.40 | 60.33 | 5.50 | 4.20 | 6.70 | 59.86 | 4.70 | 4.10 | 6.30 | 63.70 |
| 30\_6 | 4.60 | 4.20 | 6.20 | 62.20 | 5.00 | 4.00 | 6.30 | 60.35 | 5.50 | 4.10 | 6.90 | 57.18 | 4.60 | 4.20 | 6.20 | 61.06 |
| 45D\_1 | 4.90 | 4.40 | 6.60 | 53.14 | 4.90 | 4.20 | 6.50 | 49.02 | 5.50 | 4.10 | 6.92 | 52.34 | 4.50 | 4.10 | 6.20 | 49.08 |
| 45D\_2 | 4.40 | 4.30 | 6.00 | 51.02 | 4.60 | 4.50 | 6.30 | 51.14 | 4.50 | 4.50 | 6.27 | 52.88 | 4.80 | 4.00 | 6.30 | 51.11 |
| 45D\_3 | 5.00 | 4.10 | 6.30 | 48.94 | 5.40 | 4.00 | 6.60 | 48.77 | 5.00 | 4.00 | 6.40 | 50.43 | 4.60 | 4.60 | 6.50 | 52.00 |
| 45D\_4 | 5.40 | 3.70 | 6.30 | 52.32 | 4.80 | 4.30 | 6.40 | 49.90 | 4.60 | 4.30 | 6.20 | 51.31 | 4.90 | 4.00 | 6.40 | 51.77 |
| 45D\_5 | 4.90 | 4.40 | 6.30 | 48.74 | 4.70 | 4.40 | 6.50 | 51.00 | 5.00 | 4.30 | 6.38 | 49.98 | 4.90 | 4.10 | 6.20 | 48.98 |
| 45D\_6 | 5.20 | 3.70 | 6.40 | 51.71 | 4.90 | 4.30 | 6.30 | 50.60 | 5.10 | 4.50 | 6.60 | 50.42 | 4.90 | 4.60 | 6.50 | 51.67 |

## 试验装置及仪器

本试验在同济大学南校区的结构实验室进行，加载机采用液压伺服控制的MTS多功能试验机如图 3.21所示，加载能力为2000kN，加载全程采用1mm/min 的位移控制来模拟静力加载过程，本试验的荷载数据取自试验机的加载力。

ARAMIS Digitai Image Correlation (DIC) -ARAMIS三维光学全场变形和应变测量分析系统（简称“DIC测量系统”）是一种全新的应变位移测量手段，仪器设备如图 3.22所示。在物理力学性能测试中，使用DIC系统，有助于深入了解材料和零件的力学行为和性能，特别适用于测量瞬时和局部应变。DIC技术采用非接触测量方式，适用于各种材料的静态和动态试验，获取完整的力学性能参数，全场应变测量系统的工作原理将在第四章做出更为详细的阐述，本试验的位移数据主要来自于DIC全场应变测量系统。

|  |  |
| --- | --- |
| IMG_5800 | IMG_5797 |
| 图 3.21 MTS多功能试验机 | 图 3.22 DIC测量系统 |

DIC测量系统数据采集的频率自定义为三阶段：第一阶段拍照频率为1/10Hz； 第二阶段拍照频率为1Hz；第三阶段拍照频率为2Hz。这样设定的目的是由于DIC拍照内存有限，在试验单调拉伸刚开始的弹性阶段降低拍照频率，能够节省拍照张数以便于减少数据内存，而在试件接近断裂时刻提高拍照频率，为了能够采集到试件断裂瞬间的位移和应变信息。不同加载角度的试件单调拉伸加载至试验结束用时不一致，表 3.5汇总了不同加载角度下试验过程中DIC测量系统的时间和频率设定。

变形信息载体是 DIC 方法进行变形测量的重要媒介，其质量的好坏关系到变形测量结果的准确性。因此制备小尺度散斑是实现裂纹萌生阶段应变测量的关键[62] 。用于DIC全场应变测量系统的难点在于如何获得颗粒尺寸微小且均匀附着在试样表面的变形载体。

表 3.5 试验过程中DIC测量系统的采集频率

| 试件加载角度 | 第一阶段 | | 第二阶段 | | 第三阶段 | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 开始时间（s） | 频率（Hz） | 持续时间（s） | 频率（Hz） | 持续时间（s） | 频率（Hz） |
| 0° | 0 | 1/10 | 420 | 1 | 540 | 2 |
| 15° | 0 | 1/10 | 480 | 1 | 600 | 2 |
| 30° | 0 | 1/10 | 600 | 1 | 720 | 2 |
| 45°D | 0 | 1/10 | 480 | 1 | 600 | 2 |
| 45°S | 0 | 1/10 | 600 | 1 | 720 | 2 |
| 60° | 0 | 1/10 | 480 | 1 | 600 | 2 |
| 75° | 0 | 1/10 | 480 | 1 | 540 | 2 |
| 90° | 0 | 1/10 | 480 | 1 | 540 | 2 |

本试验中试件变形载体制备过程分为三个步骤如图 3.23所示：（1）试件打磨，目的是去除锈斑，使得试验喷漆容易附着；（2）喷哑光白色底漆；（3）喷哑光黑色漆，形成不同大小颗粒均匀的散斑，便于DIC系统识别与测量。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| I:\1毕业课题\#Graduate-thesis\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验前\IMG_9939.JPG | I:\1毕业课题\#Graduate-thesis\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验前\IMG_9928.JPG | 黑漆 |
| （a）试件打磨 | （b）喷白色底漆 | （c）黑色散斑 |
| 图 3.23 DIC测量系统下的试件变形载体制备 | | |

## 试验结果与分析

本次试验试件破坏均出现在焊脚尺寸为5mm的角焊缝，尚未出现母材破坏情况，与试验预想结果一致。试件破坏模式有两种类型：（1）两侧焊缝同时断裂如图 3.24所示；（2）单边焊缝断裂如图 3.25所示，本试验中大部分试件是第一种破坏模式，仅有部分试件出现单边焊缝破坏模式，出现第二种破坏模式的试件编号为00-2/45S-2/45S-3/45S-6/60-3，原因是两侧焊缝机加工过程焊脚尺寸大小与焊缝长度差异较大。

|  |  |
| --- | --- |
| I:\1毕业课题\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验中-薛\IMG_9818.JPG | I:\1毕业课题\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验中-薛\IMG_9886.JPG |
| 图 3.24 试件两侧焊缝同时断裂 | 图 3.25 试件单边焊缝断裂 |

角焊缝试件破坏后的断裂面均匀平整，没有出现明显的孔洞与裂纹，说明试件在加工过程中焊接质量较高，试件90\_1和75\_1断口如图 3.26和图 3.27所示，不同加载角度下角焊缝试件断后汇总在图 3.28中。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| I:\1毕业课题\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验后\IMG_0251.JPG | | I:\1毕业课题\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验后\IMG_0242.JPG | | |
| 图 3.26 90\_1试件断口 | | 图 3.27 75\_1试件断口 | | |
| I:\1毕业课题\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验后\IMG_0252.JPG | | I:\1毕业课题\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验后\IMG_0124.JPG | | |
| （a）试件断裂后—0° | | （b）试件断裂后—15° | | |
| C:\Users\zhaochen\Desktop\13-1.jpg | I:\1毕业课题\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验后\IMG_0031.JPG | | I:\1毕业课题\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验后\IMG_0236.JPG |
| （c）试件断裂后—30° | （d）试件断裂后—45°D | | （e）试件断裂后—45°S |
| I:\1毕业课题\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验后\IMG_0197.JPG | I:\1毕业课题\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验后\IMG_0210.JPG | | I:\1毕业课题\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验后\IMG_0203.JPG |
| （f）试件断裂后—60° | （g）试件断裂后—75° | | （h）试件断裂后—90° |
| 图 3.28 断后试件汇总 | | | |

* + 1. 试件断后测量和断裂角度

试件破坏后，对试件的剪切边长度、断裂面长度、斜边长度和断裂角度进行了测量，试验后试件测量各个尺寸代表含义如下图 3.30所示，断后角度的测量采用游标万能角度尺进行测量，如下图 3.29所示。试件断后测量数据汇总在表 3.6和表 3.7中。

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\zhaochen\AppData\Local\Temp\1548655121(1).png |  |
| 图 3.29 游标万能角度尺 | 图 3.30 试验后试件测量示意图 |

表 3.6 单边单条角焊缝试件试验后测量数据汇总

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 1号边 | | | | 2号边 | | | |
| 剪切边a（mm） | 断裂面c（mm） | 斜边b（mm） | 断裂角度B（°） | 剪切边a（mm） | 断裂面c（mm） | 斜边b（mm） | 断裂角度B（°） |
| 45S\_1 | 6.12 | 4.93 | 1.89 | 15.3 | 6.43 | 5.22 | 2.15 | 17.6 |
| 45S\_2 | 6.23 | 5.02 | 2.18 | 18.6 | 7.01 | 5.76 | 2.23 | 16.7 |
| 45S\_3 | 5.97 | 4.90 | 1.87 | 16.3 | 6.81 | 5.24 | 2.88 | 23.3 |
| 45S\_4 | 6.00 | 4.99 | 1.65 | 13.6 | 6.99 | 5.48 | 2.63 | 20.0 |
| 45S\_5 | 6.42 | 5.21 | 2.15 | 17.6 | 7.01 | 5.73 | 2.36 | 18.0 |
| 45S\_6 | 5.94 | 4.75 | 2.07 | 18.3 | 6.74 | 5.42 | 2.45 | 19.7 |
| 60\_1 | 5.75 | 4.75 | 1.74 | 15.6 | 6.21 | 4.86 | 2.31 | 19.7 |
| 60\_2 | 5.79 | 4.80 | 1.69 | 15.0 | 6.91 | 5.50 | 2.36 | 17.7 |
| 60\_3 | 6.29 | 5.16 | 1.89 | 15.3 | 7.21 | 5.64 | 2.96 | 22.7 |
| 60\_4 | 6.14 | 5.02 | 1.96 | 16.6 | 6.81 | 5.46 | 2.34 | 18.0 |
| 60\_5 | 5.06 | 3.91 | 1.76 | 17.3 | 7.23 | 5.60 | 2.72 | 19.7 |
| 60\_6 | 5.85 | 4.79 | 1.79 | 15.6 | 6.90 | 5.50 | 2.33 | 17.3 |
| 75\_1 | 6.66 | 5.72 | 1.60 | 12.0 | 6.34 | 4.96 | 2.23 | 18.0 |
| 75\_2 | 6.09 | 4.75 | 2.15 | 18.0 | 6.16 | 4.76 | 1.99 | 15.0 |
| 75\_3 | 6.47 | 5.08 | 2.35 | 19.0 | 6.64 | 5.23 | 2.09 | 15.0 |
| 75\_4 | 5.96 | 4.84 | 1.79 | 15.0 | 7.86 | 6.16 | 2.86 | 19.0 |
| 75\_5 | 6.53 | 5.45 | 1.81 | 14.0 | 6.42 | 5.23 | 1.93 | 15.0 |
| 75\_6 | 5.80 | 4.57 | 1.96 | 17.0 | 7.58 | 5.98 | 2.64 | 18.0 |
| 90\_1 | 7.00 | 5.61 | 2.32 | 17.0 | 7.98 | 5.81 | 3.38 | 22.0 |
| 90\_2 | 5.67 | 4.60 | 1.85 | 17.0 | 7.53 | 5.95 | 2.63 | 18.0 |
| 90\_3 | 6.20 | 4.97 | 2.13 | 18.0 | 6.26 | 5.21 | 1.75 | 14.0 |
| 90\_4 | 6.47 | 5.21 | 2.13 | 17.0 | 6.61 | 5.34 | 2.00 | 15.0 |
| 90\_5 | 8.16 | 6.35 | 2.89 | 18.0 | 6.60 | 5.01 | 2.40 | 18.0 |
| 90\_6 | 7.92 | 6.16 | 2.62 | 16.0 | 5.90 | 4.47 | 2.09 | 17.0 |

表 3.7 单边双条角焊缝试件试验后测量数据汇总

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 1号边 | | | | 2号边 | | | | 3号边 | | | | 4号边 | | | |
| 剪切边a（mm) | 断裂面c（mm) | 斜边b（mm) | 断裂角度B | 剪切边a（mm) | 断裂面c（mm) | 斜边b（mm) | 断裂角度B | 剪切边a（mm) | 断裂面c（mm) | 斜边b（mm) | 断裂角度B | 剪切边a（mm) | 断裂面c（mm) | 斜边b（mm) | 断裂角度B |
| 00\_1 | 7.99 | 5.38 | 5.19 | 40.0 | 7.26 | 5.14 | 5.46 | 48.7 | 6.95 | 4.74 | 5.50 | 52.0 | 6.33 | 4.51 | 6.13 | 66.5 |
| 00\_2 | 6.20 | 4.47 | 4.15 | 42.0 | 6.22 | 4.17 | 4.48 | 46.0 | 6.08 | 3.91 | 5.85 | 67.7 | 6.78 | 4.72 | 6.02 | 60.0 |
| 00\_3 | 6.88 | 4.84 | 6.04 | 59.0 | 7.05 | 6.12 | 7.25 | 66.3 | 6.68 | 4.81 | 4.72 | 45.0 | 6.30 | 4.15 | 4.49 | 45.3 |
| 00\_4 | 6.15 | 4.10 | 5.54 | 61.7 | 6.01 | 4.11 | 4.78 | 52.3 | 6.47 | 4.38 | 5.09 | 51.7 | 5.02 | 3.50 | 4.12 | 54.3 |
| 00\_5 | 7.26 | 5.30 | 5.48 | 48.7 | 6.12 | 4.38 | 4.48 | 47.0 | 5.45 | 4.18 | 5.84 | 73.3 | 6.16 | 4.52 | 5.93 | 65.3 |
| 00\_6 | 6.57 | 4.76 | 6.14 | 63.3 | 5.45 | 3.50 | 4.66 | 58.0 | 5.68 | 3.39 | 4.30 | 49.0 | 5.90 | 4.48 | 4.90 | 54.3 |
| 15\_1 | 7.15 | 4.58 | 5.32 | 48.0 | 5.29 | 3.55 | 2.90 | 31.0 | 6.19 | 4.05 | 4.16 | 41.7 | 7.03 | 4.78 | 4.03 | 33.5 |
| 15\_2 | 6.30 | 3.78 | 3.99 | 37.0 | 6.87 | 4.29 | 4.14 | 34.7 | 7.30 | 5.45 | 4.16 | 34.3 | 5.97 | 3.91 | 4.73 | 52.3 |
| 15\_3 | 6.83 | 4.88 | 4.09 | 36.3 | 5.58 | 3.73 | 3.74 | 41.7 | 6.04 | 3.80 | 4.14 | 42.7 | 6.08 | 4.41 | 4.51 | 47.7 |
| 15\_4 | 6.28 | 4.39 | 2.99 | 25.5 | 7.13 | 4.98 | 4.44 | 38.0 | 7.80 | 5.35 | 6.23 | 52.7 | 7.45 | 4.23 | 5.56 | 47.7 |
| 15\_5 | 5.45 | 4.03 | 3.12 | 34.5 | 6.66 | 4.02 | 4.21 | 37.0 | 6.96 | 4.34 | 4.39 | 37.3 | 8.00 | 5.85 | 6.41 | 52.3 |
| 15\_6 | 6.32 | 3.92 | 4.12 | 39.3 | 6.13 | 4.01 | 2.96 | 24.0 | 6.69 | 3.89 | 4.05 | 33.3 | 7.01 | 4.90 | 4.99 | 45.3 |
| 30\_1 | 6.61 | 4.48 | 4.26 | 39.7 | 7.13 | 5.12 | 4.12 | 34.7 | 7.12 | 4.93 | 4.15 | 34.7 | 6.21 | 4.39 | 2.80 | 23.5 |
| 30\_2 | 6.36 | 4.68 | 2.90 | 25.0 | 5.84 | 4.07 | 2.72 | 24.5 | 6.47 | 4.40 | 3.31 | 28.0 | 6.43 | 5.13 | 2.22 | 18.0 |
| 30\_3 | 5.55 | 3.65 | 2.83 | 27.0 | 6.96 | 4.75 | 4.16 | 35.7 | 6.11 | 4.92 | 1.96 | 16.3 | 6.14 | 4.59 | 2.19 | 16.7 |
| 30\_4 | 8.30 | 5.62 | 5.13 | 37.3 | 7.78 | 4.80 | 4.84 | 36.3 | 6.89 | 4.51 | 4.16 | 35.7 | 5.92 | 4.73 | 1.94 | 16.7 |
| 30\_5 | 6.19 | 4.86 | 2.17 | 18.0 | 5.36 | 4.25 | 1.67 | 15.0 | 6.34 | 4.02 | 3.87 | 35.7 | 7.09 | 4.73 | 4.53 | 39.0 |
| 30\_6 | 5.59 | 4.15 | 2.40 | 23.0 | 5.61 | 3.88 | 2.72 | 26.0 | 5.68 | 3.83 | 2.78 | 25.7 | 7.28 | 5.05 | 4.19 | 34.0 |
| 45D\_1 | 4.63 | 3.69 | 1.43 | 15.0 | 5.39 | 4.29 | 1.63 | 14.3 | 6.80 | 4.32 | 3.98 | 33.3 | 6.44 | 4.46 | 3.71 | 34.0 |
| 45D\_2 | 7.22 | 5.13 | 4.24 | 35.3 | 6.54 | 4.80 | 3.22 | 28.0 | 6.71 | 4.84 | 3.79 | 33.7 | 6.12 | 4.56 | 2.36 | 19.3 |
| 45D\_3 | 6.05 | 4.26 | 2.84 | 25.0 | 6.40 | 4.70 | 2.40 | 17.7 | 6.00 | 4.36 | 2.46 | 20.7 | 5.82 | 4.63 | 1.99 | 17.7 |
| 45D\_4 | 6.93 | 4.86 | 2.84 | 19.3 | 6.57 | 5.00 | 2.48 | 19.3 | 5.17 | 3.99 | 1.92 | 19.2 | 6.26 | 4.50 | 2.70 | 22.3 |
| 45D\_5 | 6.57 | 4.92 | 2.68 | 21.3 | 5.65 | 4.12 | 2.68 | 26.3 | 7.17 | 5.01 | 3.64 | 28.3 | 6.70 | 4.43 | 4.09 | 36.3 |
| 45D\_6 | 6.73 | 4.12 | 4.15 | 35.7 | 7.05 | 5.05 | 3.32 | 25.7 | 5.62 | 3.95 | 2.89 | 29.0 | 5.66 | 4.38 | 2.08 | 19.0 |

对于角焊缝的研究，确定破坏角度是非常重要的环节，因为只有在知道了破坏角度之后，才能确定破坏面，给出破坏面面积，进而确定接头承载力。理论上，试件受拉时破坏将发生在截面面积最小的截面，即45°角度所对应的截面，然而，尽管该截面对应的面积最小，但是在该截面上承受的剪应力和正应力的组合并不是最高，也即45°角度所对应截面上的承载力不是最大，尤其对正面角焊缝而言，破坏角度接近18°左右，对于侧面角焊缝，破坏角度接近55°。图 3.31给出了不同加载角度下角焊缝试件断裂面的角度，从图中可以看出：

（1）单边单条角焊缝试件的破坏角度更集中，基本都分布在16°-18°之间；单边双条角焊缝的破坏角度较为离散，从24°-55°均有试件分布其中。

（2）正面角焊缝和侧面角焊缝的平均破坏角度分别为17.25°和54.90°，侧面角焊缝实际破坏面的角度稍高于理论破坏面；其余角焊缝试件的破坏角度均低于理论破坏面（45°）。

（3）随着加载角度的减小，高强钢角焊缝试件破坏时的断裂角度增大，这一规律与普通钢无差别。

|  |
| --- |
|  |
| 图 3.31 断裂角度与加载角度的关系 |

* + 1. 荷载位移曲线和承载能力
       1. 单边单条角焊缝试件

试件的承载能力和变形能力可以通过试件的荷载位移曲线得到，采用DIC全场应变测量系统可以得到测量面内（图 3.32所示蓝色区域）任意位置的应变以及任意两点的相对位移，这极大的丰富了测量试件的变形信息。为了更高效的处理数据，在试件90\_5表面选择10个代表性测点，其中点A、A1选取在试件搭接板的左侧；C、C1选取在试件搭接板的右侧；B、B1、B2、B3选取在试件中间板；W1、W2分别选取在试件左右焊缝中心，从DIC测得的工程文件中可获得各个测点的位移和应变随加载时间的发展趋势（本章试验其余试件处理方法相同）。

|  |
| --- |
|  |
| 图 3.32 测点选取位置（试件90\_5） |

从图 3.34中可以看出三块板内的测点具有相同的变形发展历程，从图 3.33中对比各区域的测点应变随时间的发展历程可以看出，仅有焊缝区域的点W1、W2进入塑性应变随之发生破坏，中间板及搭接板左侧和右侧上的测点均未发生屈服，也就是说试件的变形主要发生在焊缝区域，中间板和搭接板任意两点的相对位移可以代表试件的变形。本文选取三块钢板中线上同一高度处的三个测点（A、B、C）的相对位移B-A和B-C作为左右两侧焊缝的变形，并且取二者的平均值作为试件的变形。单边单条角焊缝试件的荷载位移曲线汇总在图 3.35中。

|  |
| --- |
|  |
| 图 3.33 各测点应变随加载时间的发展历程 |

|  |
| --- |
|  |
| 图 3.34 各测点绝对位移随加载时间的发展历程 |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  | |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  | |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  | |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  | |
| 图 3.35 单边单条角焊缝试件荷载位移曲线 | |

从试件的荷载位移曲线图可以观察到如下现象：

（1）单边单条角焊缝试件的荷载位移曲线呈现“上升趋势”。

* 加载角度为45°S（单边单条焊缝）、60°、75°、90°（正面角焊缝）的单边单条角焊缝试件断裂发生在荷载位移曲线的“上升阶段”，随着位移的增加，荷载稳步上升，在强化段荷载位移曲线的刚度基本保持不变，直至达到最大承载力时，曲线的刚度突然反向（负刚度），随后试件发生破坏。试件断裂荷载与极限荷载的比值 超过0.92，断裂位移与极限荷载对应的位移比值小于1.1。
* 单边单条角焊缝试件随着加载角度的减小，断裂时刻的荷载与极限荷载的比值降低，荷载位移曲线断裂时刻表现出从“上升阶段”逐渐到“平台阶段”过渡的趋势。

（2）对比试件的荷载位移曲线，三条曲线（B-A、B-C、均值曲线）加载初期的初始刚度差异很小，表明初始偏心加载的现象不严重。而仅有少数试件（编号为60-3）左右两条测试焊缝（曲线B-A和B-C）变形曲线不重合，原因是两侧焊脚尺寸不完全对称（明显存在一侧焊脚尺寸大于另外），并且该试件的破坏模式是单边断裂。

从试件的荷载位移曲线图中可以得知试件的极限承载能力，极限荷载对应的位移，断裂荷载以及断裂时对应的位移，单边单条角焊缝试件的承载能力和变形能力以及荷载位移曲线变化特征汇总在表 3.8中。

表 3.8 单边单条角焊缝试件承载能力和变形能力汇总

| 编号 | 极限荷载（kN） | 断裂荷载（kN） | 极限荷载对应的变形（mm) | 断裂荷载对应的变形（mm) | 荷载比 | 变形比 | 破坏方式 | 曲线特征 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 45S\_1 | 635.52 | 616.91 | 0.23 | 0.23 | 0.97 | 1.01 | 双边 | 上升 |
| 45S\_2 | 675.87 | 669.32 | 0.34 | 0.37 | 0.99 | 1.09 | **单边** | 上升 |
| 45S\_3 | 658.33 | 575.75 | 0.31 | 0.33 | 0.87 | 1.07 | **单边** | 上升 |
| 45S\_4 | 681.18 | 619.87 | 0.45 | 0.48 | 0.91 | 1.07 | 双边 | 上升 |
| 45S\_5 | 677.05 | 664.56 | 0.42 | 0.43 | 0.98 | 1.01 | 双边 | 上升 |
| 45S\_6 | 665.30 | 552.35 | 0.51 | 0.57 | 0.83 | 1.12 | **单边** | 上升 |
| 60\_1 | 612.69 | 577.61 | 0.31 | 0.33 | 0.94 | 1.06 | 双边 | 上升 |
| 60\_2 | 612.73 | 565.97 | 0.33 | 0.35 | 0.92 | 1.07 | 双边 | 上升 |
| 60\_3 | 578.35 | 533.20 | 0.23 | 0.24 | 0.92 | 1.05 | **单边** | 上升 |
| 60\_4 | 636.56 | 610.21 | 0.35 | 0.36 | 0.96 | 1.02 | 双边 | 上升 |
| 60\_5 | 575.71 | 531.62 | 0.29 | 0.30 | 0.92 | 1.01 | 双边 | 上升 |
| 60\_6 | 618.01 | 594.60 | 0.28 | 0.29 | 0.96 | 1.03 | 双边 | 上升 |
| 75\_1 | 580.59 | 580.59 | 0.28 | 0.28 | 1.00 | 1.00 | 双边 | 上升 |
| 75\_2 | 584.38 | 487.52 | 0.37 | 0.41 | 0.83 | 1.09 | 双边 | 上升 |
| 75\_3 | 557.74 | 534.05 | 0.32 | 0.39 | 0.96 | 1.22 | 双边 | 上升 |
| 75\_4 | 504.87 | 446.19 | 0.37 | 0.39 | 0.88 | 1.06 | 双边 | 上升 |
| 75\_5 | 576.77 | 517.97 | 0.39 | 0.43 | 0.90 | 1.11 | 双边 | 上升 |
| 75\_6 | 548.47 | 502.48 | 0.31 | 0.33 | 0.92 | 1.07 | 双边 | 上升 |
| 90\_1 | 571.58 | 539.65 | 0.37 | 0.40 | 0.94 | 1.09 | 双边 | 上升 |
| 90\_2 | 501.34 | 481.94 | 0.28 | 0.29 | 0.96 | 1.04 | 双边 | 上升 |
| 90\_3 | 551.52 | 519.49 | 0.41 | 0.44 | 0.94 | 1.09 | 双边 | 上升 |
| 90\_4 | 549.41 | 526.89 | 0.33 | 0.38 | 0.96 | 1.13 | 双边 | 上升 |
| 90\_5 | 598.71 | 572.32 | 0.33 | 0.34 | 0.96 | 1.04 | 双边 | 上升 |
| 90\_6 | 566.21 | 556.80 | 0.30 | 0.31 | 0.98 | 1.03 | 双边 | 上升 |

表 3.9 承载能力和变形能力平均值汇总

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 加载角度（°） | 极限荷载（kN） | 断裂荷载（kN） | 极限位移（mm） | 断裂位移（mm） | 荷载比 | 变形比 |
|
| 45S | 665.54 | 616.46 | 0.38 | 0.40 | 0.93 | 1.07 |
| 60 | 605.67 | 568.87 | 0.30 | 0.31 | 0.94 | 1.04 |
| 75 | 558.80 | 511.47 | 0.34 | 0.37 | 0.92 | 1.09 |
| 90 | 556.46 | 532.85 | 0.34 | 0.36 | 0.96 | 1.07 |

从单边单条角焊缝试件的承载能力和变形能力汇总表 3.8和表 3.9得知：

（1）正面角焊缝试件断裂荷载和极限荷载非常接近，通常情况下，在荷载下降到极限荷载的96%左右，试件便发生了突然破坏。随着加载角度的减小，试件断裂荷载与极限荷载的比值降低，在92%-95%之间；试件断裂位移与极限位移的比值在1.04至1.09之间。

（2）大部分试件的最大变形不超过0.4mm，随着加载角度的减小，试件变形能力增强。

* + - 1. 单边双条角焊缝试件

单边双条角焊缝试件荷载位移曲线的获取方式和单边单条角焊缝试件没有差异，此处不再赘述，单边双条角焊缝试件的荷载位移曲线汇总在图 3.36中。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  | |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  | |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  | |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  | |
| 图 3.36 单边双条角焊缝试件荷载位移曲线 | |

从试件的荷载位移曲线图可以观察到如下现象：

（1）单边双条角焊缝试件荷载位移曲线呈现“上升”、“平台”和“下降”三种趋势。

* 试件呈现“平台趋势”的试件特点是在强化段试件的刚度逐步降低，直至刚度为0，达到极限承载力，然后刚度反向逐渐增大，表现在荷载位移曲线上就是试件较快达到极限荷载，并在荷载不急剧降低的情况下变形发展一段时间，断裂位移和极限荷载对应的位移有一定差距，试件的一般大于1.2，在0.9至0.95之间。
* 试件呈现“下降趋势”的试件特点是在试件发生断裂时荷载已经有明显的降低，在0.9以下，一般大于1.7。
* 单边双条角焊缝试件随着加载角度的减小，断裂时刻的荷载与极限荷载的比值降低，荷载位移曲线断裂时刻表现出从“上升阶段”逐渐到“平台及下降阶段”过渡的趋势。

（2）对比试件的荷载位移曲线，三条曲线（B-A、B-C、均值曲线）加载初期的初始刚度差异很小，表明初始偏心加载的现象不严重。而仅有少数试件（编号为45D-5/30-5）左右两条测试焊缝（曲线B-A和B-C）变形曲线不重合，原因是两侧焊脚尺寸不完全对称（明显存在一侧焊脚尺寸大于另外）或者是存在偏心加载。

从试件的荷载位移曲线图中可以得知试件的极限承载能力，极限荷载对应的位移，断裂荷载以及断裂时对应的位移，单边双条角焊缝试件的承载能力和变形能力以及荷载位移曲线变化特征汇总在表 3.10中。

表 3.10 单边双条角焊缝试件承载能力和变形能力汇总

| 编号 | 极限荷载（kN） | 断裂荷载（kN） | 极限荷载对应的变形（mm) | 断裂荷载对应的变形（mm) | 荷载比 | 变形比 | 破坏方式 | 曲线特征 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 00\_1 | 487.75 | 355.54 | 0.52 | 0.91 | 0.73 | 1.76 | 双边 | 下降 |
| 00\_2 | 456.00 | 371.60 | 0.30 | 0.38 | 0.81 | 1.26 | **单边** | 平台 |
| 00\_3 | 603.63 | 502.25 | 0.50 | 0.98 | 0.83 | 4.95 | 双边 | 下降 |
| 00\_4 | 512.63 | 387.74 | 0.26 | 0.88 | 0.76 | 3.35 | 双边 | 下降 |
| 00\_5 | 576.15 | 519.69 | 0.53 | 1.00 | 0.90 | 1.90 | 双边 | 下降 |
| 00\_6 | 581.23 | 473.82 | 0.50 | 0.84 | 0.82 | 1.69 | 双边 | 下降 |
| 15\_1 | 717.56 | 702.49 | 0.18 | 0.19 | 0.98 | 1.03 | 双边 | 上升 |
| 15\_2 | 746.93 | 706.34 | 0.32 | 0.38 | 0.95 | 1.20 | 双边 | 平台 |
| 15\_3 | 770.64 | 753.07 | 0.27 | 0.34 | 0.98 | 1.25 | 双边 | 平台 |
| 15\_4 | 772.73 | 687.19 | 0.46 | 0.56 | 0.89 | 1.21 | 双边 | 平台 |
| 15\_5 | 811.85 | 621.62 | 0.33 | 0.56 | 0.77 | 1.70 | 双边 | 下降 |
| 15\_6 | 839.21 | 746.33 | 0.34 | 0.58 | 0.89 | 1.70 | 双边 | 下降 |
| 30\_1 | 1077.31 | 1059.67 | 0.42 | 0.52 | 0.98 | 1.23 | 双边 | 平台 |
| 30\_2 | 1149.15 | 1088.26 | 0.52 | 0.55 | 0.95 | 1.07 | 双边 | 上升 |
| 30\_3 | 1149.56 | 1101.71 | 0.39 | 0.55 | 0.96 | 1.39 | 双边 | 平台 |
| 30\_4 | 1153.41 | 1100.08 | 0.39 | 0.44 | 0.95 | 1.13 | 双边 | 平台 |
| 30\_5 | 879.72 | 844.97 | 0.21 | 0.24 | 0.96 | 1.18 | 双边 | 上升 |
| 30\_6 | 1064.91 | 841.61 | 0.46 | 0.47 | 0.79 | 1.03 | 双边 | 上升 |
| 45D\_1 | 943.81 | 889.27 | 0.27 | 0.29 | 0.94 | 1.08 | 双边 | 上升 |
| 45D\_2 | 963.28 | 909.84 | 0.19 | 0.20 | 0.94 | 1.08 | 双边 | 上升 |
| 45D\_3 | 957.76 | 945.85 | 0.30 | 0.30 | 0.99 | 1.02 | 双边 | 上升 |
| 45D\_4 | 995.42 | 936.30 | 0.40 | 0.42 | 0.94 | 1.03 | 双边 | 上升 |
| 45D\_5 | 1004.68 | 746.98 | 0.22 | 0.23 | 0.74 | 1.05 | 双边 | 上升 |
| 45D\_6 | 890.47 | 843.55 | 0.27 | 0.30 | 0.95 | 1.10 | 双边 | 上升 |

表 3.11承载能力和变形能力平均值汇总

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 加载角度（°） | 极限荷载（kN） | 断裂荷载（kN） | 极限位移（mm） | 断裂位移（mm） | 荷载比 | 变形比 |
|
| 0 | 536.23 | 435.11 | 0.43 | 0.83 | 0.81 | 2.16 |
| 15 | 776.49 | 702.84 | 0.32 | 0.43 | 0.91 | 1.37 |
| 30 | 1079.01 | 1006.05 | 0.40 | 0.46 | 0.93 | 1.16 |
| 45D | 959.23 | 878.63 | 0.27 | 0.29 | 0.93 | 1.05 |

从单边双条角焊缝试件的承载能力和变形能力汇总表 3.10和表 3.11得知：

（1）单边双条角焊缝试件断裂荷载与极限荷载的比值在81%-93%之间，断裂时对应的位移与极限位移比值在1.1-2.2之间。侧面角焊缝断裂位移比极限位移高出很多（超过2倍），表明试件不会出现突然断裂。

（2）绝大多数试件的最大变形在0.4-1mm，随着加载角度的减小，试件变形能力逐渐增强。

* + 1. 极限强度
       1. 单边单条角焊缝试件

单边单条角焊缝试件的极限强度按照如下步骤计算：

（1）确定试件承担荷载*P*：忽略试件机加工时焊脚尺寸大小的差异，假设两条焊缝承担同样的荷载。

（2）确定破坏面面积：该部分使用两种方法a）破坏截面按照试验前实测的焊喉尺寸（45°方向）与焊缝长度的乘积进行计算，即认为最小的截面为理论破坏截面，该面积记作 。b）破坏截面按照试验结束后，实测的断面尺寸（如图 3.30所示）与焊缝长度的乘积进行计算，该破坏截面为实际破坏截面面积，该面积记作。

（3）计算极限强度：由于确定破坏面积的方法有两种，因此极限强度也有两个取值，分别按照与计算。但无论采用哪种方法进行求解，得到的强度都是正应力和剪应力的组合。

两种确定焊缝强度的方法都有各自的优缺点，按照计算，可以提供一个标准值，对于不同情况的焊脚尺寸或者不同加载角度的试件在试验前就可以预测焊缝强度，但是很多情况下，破坏不是沿着截面最小的焊喉截面进行，将导致预测结果偏低；按照计算，对于相同条件下的不同试件，计算结果可能有很大不同，但是强度结果更加接近真实值。单边单条角焊缝试件极限强度汇总在表 3.12中。

表 3.12 单边单条角焊缝极限强度

| 编号 | （kN） | （kN） | （mm2） | （mm2） | （MPa） | （MPa） | 断裂角度（°） |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 45S\_1 | 635.52 | 317.7 | 230.13 | 352.10 | 1380.77 | 902.47 | 16.5 |
| 45S\_2 | 675.87 | 337.9 | 238.96 | 374.72 | 1414.17 | 901.82 | 17.7 |
| 45S\_3 | 658.33 | 329.1 | 240.87 | 353.15 | 1366.55 | 932.07 | 19.8 |
| 45S\_4 | 681.18 | 340.5 | 242.53 | 366.63 | 1404.35 | 928.99 | 16.8 |
| 45S\_5 | 677.05 | 338.5 | 229.58 | 375.73 | 1474.54 | 900.98 | 17.8 |
| 45S\_6 | 665.30 | 332.6 | 232.37 | 350.77 | 1431.53 | 948.35 | 19.0 |
| 60\_1 | 612.69 | 306.3 | 201.17 | 276.31 | 1522.86 | 1108.70 | 17.7 |
| 60\_2 | 612.73 | 306.3 | 201.78 | 300.04 | 1518.34 | 1021.08 | 16.3 |
| 60\_3 | 578.35 | 289.1 | 201.51 | 311.42 | 1435.03 | 928.58 | 19.0 |
| 60\_4 | 636.56 | 318.2 | 203.66 | 305.47 | 1562.75 | 1041.94 | 17.3 |
| 60\_5 | 575.71 | 287.8 | 200.13 | 275.96 | 1438.31 | 1043.11 | 18.5 |
| 60\_6 | 618.01 | 309.0 | 203.06 | 299.35 | 1521.73 | 1032.27 | 16.5 |
| 75\_1 | 580.59 | 290.3 | 174.07 | 276.63 | 1667.70 | 1049.40 | 15.0 |
| 75\_2 | 584.38 | 292.1 | 174.69 | 248.89 | 1672.58 | 1173.96 | 16.5 |
| 75\_3 | 557.74 | 278.8 | 175.80 | 268.13 | 1586.28 | 1040.06 | 17.0 |
| 75\_4 | 504.87 | 252.4 | 174.25 | 286.51 | 1448.66 | 881.05 | 17.0 |
| 75\_5 | 576.77 | 288.3 | 181.64 | 279.59 | 1587.67 | 1031.47 | 14.5 |
| 75\_6 | 548.47 | 274.2 | 170.33 | 282.79 | 1610.01 | 969.74 | 17.5 |
| 90\_1 | 571.58 | 285.7 | 170.57 | 285.20 | 1675.51 | 1002.07 | 19.5 |
| 90\_2 | 501.34 | 250.6 | 171.62 | 263.66 | 1460.57 | 950.72 | 17.5 |
| 90\_3 | 551.52 | 275.7 | 171.42 | 254.46 | 1608.70 | 1083.68 | 16.0 |
| 90\_4 | 549.41 | 274.0 | 177.00 | 263.46 | 1551.99 | 1042.66 | 16.0 |
| 90\_5 | 598.71 | 299.3 | 173.91 | 284.36 | 1721.38 | 1052.76 | 18.0 |
| 90\_6 | 566.21 | 283.1 | 173.59 | 265.90 | 1630.86 | 1064.69 | 16.5 |

表 3.13 单边单条角焊缝极限强度均值

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | （kN） | （kN） | （mm2） | （mm2） | （MPa） | （MPa） | 断裂角度（°） |
| 45S | 665.54 | 332.77 | 235.74 | 362.18 | 1411.98 | 919.11 | 17.95 |
| 60 | 605.67 | 302.84 | 201.88 | 294.76 | 1499.84 | 1029.28 | 17.56 |
| 75 | 558.80 | 279.40 | 175.13 | 273.76 | 1595.48 | 1024.28 | 16.25 |
| 90 | 556.46 | 278.23 | 173.02 | 269.51 | 1608.17 | 1032.76 | 17.25 |

单边单条角焊缝试件的极限强度的平均值汇总在表 3.12和表 3.13中，从中得知：

（1）两种极限强度的计算方法中，通常的结果比大，原因是焊喉截面是理想的破坏面，即截面面积最小的截面。而不同加载角度下角焊缝实际断裂角度并不是沿着45°焊喉尺寸的方向，即实际的断裂面积通常不在最小截面上，通常，进而使得。

（2）根据理论最小破坏截面面积计算的极限强度都高于熔敷金属的极限强度，而根据实际的断裂面积计算的极限强度更接近熔敷金属真实的极限强度。

（3） 随着加载角度的降低，通过两种方法计算出来的极限强度都逐渐降低，正面角焊缝极限强度最高。

（4）单边单条角焊缝试件的断裂角度在16°-18°之间，随着加载角度的降低，试件的断裂角度无明显变化。

* + - 1. 单边双条角焊缝试件

单边双条角焊缝试件的极限强度按照如下步骤计算：

（1）确定试件承担荷载*P*：忽略试件机加工时焊脚尺寸大小的差异，假设四条焊缝承担同样的荷载。

（2）确定焊缝长度：该部分使用两种方法：a）试件断裂后测得焊缝断裂面的焊缝长度，记为；b）仅考虑工作焊缝处主板和搭接板的搭接长度，此方法得到的焊缝长度认为是有效焊缝长度，记为。

（3）确定破坏面高度：该部分使用两种方法：a）破坏截面按照试验前实测的焊喉尺寸，记为；b）破坏截面按照试验结束后，实测的断面尺寸（如图 3.30所示），破坏面高度认为是实际破坏面高度，记为。

（4）确定破坏面面积：由于确定破坏面积高度和焊缝长度的方法各有两种，因此确定破坏面面积的方法就有四种，分别记为、、、。

（5）计算极限强度：由于确定破坏面积的方法有四种，因此极限强度也有四个取值分别按照、、、计算。按照和计算，对于不同情况的试件在试验前就可以预测焊缝强度。单边双条角焊缝试件极限强度汇总在表 3.14中。

表 3.14 单边双条角焊缝极限强度

| 编号 | （kN） | （kN） | （MPa） | （MPa） | （MPa） | （MPa） | 断裂角度（°） |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 00\_1 | 487.75 | 121.9 | 1099.05 | 923.87 | 825.41 | 693.85 | 51.8 |
| 00\_2 | 456.00 | 114.0 | 1065.32 | 932.18 | 842.94 | 737.60 | 53.9 |
| 00\_3 | 603.63 | 150.9 | 1233.96 | 1096.86 | 925.14 | 822.35 | 53.9 |
| 00\_4 | 512.16 | 128.0 | 1227.53 | 1063.96 | 956.51 | 829.05 | 55.0 |
| 00\_5 | 576.15 | 144.0 | 1208.45 | 1044.70 | 935.87 | 809.06 | 58.6 |
| 00\_6 | 581.23 | 145.3 | 1455.70 | 1252.84 | 1121.84 | 965.50 | 56.2 |
| 15\_1 | 717.56 | 179.4 | 1193.27 | 1136.35 | 855.59 | 814.77 | 38.5 |
| 15\_2 | 746.93 | 186.7 | 1225.55 | 1162.15 | 854.30 | 810.11 | 39.6 |
| 15\_3 | 770.64 | 192.7 | 1273.48 | 1218.66 | 917.98 | 878.47 | 42.1 |
| 15\_4 | 772.73 | 193.2 | 1282.65 | 1205.74 | 811.58 | 762.92 | 41.0 |
| 15\_5 | 811.85 | 203.0 | 1348.37 | 1266.07 | 876.51 | 823.01 | 40.3 |
| 15\_6 | 839.21 | 209.8 | 1464.41 | 1369.06 | 1035.22 | 967.82 | 35.5 |
| 30\_1 | 1077.31 | 269.3 | 1456.07 | 1346.27 | 935.28 | 864.75 | 33.1 |
| 30\_2 | 1149.15 | 287.3 | 1536.05 | 1428.80 | 1034.87 | 962.61 | 23.9 |
| 30\_3 | 1149.56 | 287.4 | 1491.71 | 1373.11 | 1029.14 | 947.31 | 23.9 |
| 30\_4 | 1153.41 | 288.4 | 1508.03 | 1419.96 | 945.48 | 890.26 | 31.5 |
| 30\_5 | 879.72 | 219.9 | 1112.89 | 1053.49 | 799.89 | 757.19 | 26.9 |
| 30\_6 | 1064.91 | 266.2 | 1402.44 | 1314.24 | 1046.45 | 980.64 | 27.2 |
| 45D\_1 | 943.81 | 236.0 | 1450.98 | 1332.64 | 1106.12 | 1015.91 | 24.2 |
| 45D\_2 | 963.28 | 240.8 | 1489.67 | 1366.80 | 966.86 | 887.11 | 29.1 |
| 45D\_3 | 957.76 | 239.4 | 1500.04 | 1383.56 | 1066.83 | 983.99 | 20.3 |
| 45D\_4 | 995.42 | 248.9 | 1552.18 | 1436.74 | 1056.85 | 978.26 | 20.1 |
| 45D\_5 | 1004.68 | 251.2 | 1568.98 | 1429.80 | 1094.85 | 997.73 | 28.1 |
| 45D\_6 | 891.67 | 222.9 | 1344.88 | 1250.61 | 996.87 | 927.00 | 27.3 |

表 3.15 单边双条角焊缝极限强度和平均变形能力均值

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | （kN） | （kN） | （MPa） | （MPa） | （MPa） | （MPa） | 断裂角度（°） |
| 0 | 536.16 | 134.0 | 1215.00 | 1052.40 | 934.62 | 809.57 | 54.9 |
| 15 | 776.49 | 194.1 | 1297.95 | 1226.34 | 891.86 | 842.85 | 39.5 |
| 30 | 1079.01 | 269.8 | 1417.87 | 1322.64 | 965.19 | 900.46 | 27.8 |
| 45D | 959.43 | 239.9 | 1484.45 | 1366.69 | 1048.07 | 965.00 | 24.8 |

单边双条角焊缝试件的极限强度的平均值汇总在表 3.14和表 3.15中，从中得知：

（1）四种极限强度的计算方法中，单边双条角焊缝试件＞＞＞，原因是焊喉截面是理想的破坏面，即截面面积最小的截面，并且焊缝处主板和搭接板的搭接长度测得的有效焊缝长度比实际破坏时的焊缝长度小。

（2）根据理论最小破坏截面面积计算的极限强度一般高于熔敷金属的极限强度，根据断裂面高度与有限焊缝长度计算的极限强度更接近熔敷金属真实的极限强度，根据断裂面高度与实际破坏时焊缝长度计算的极限强度明显低于熔敷金属真实的极限强度。

（3） 随着加载角度的降低，通过四种方法计算出来的极限强度都逐渐降低，侧面角焊缝极限强度最低，其原因与破坏角度相关，侧面角焊缝的破坏面更接近45°，即破坏面更小，使得总承载力降低。

（4）单边双条角焊缝试件的断裂角度在25°-55°之间，随着加载角度的降低，试件的断裂角度有明显的增大。

## 加载角度对角焊缝力学性能的影响

前文对48个角焊缝试件的断裂角度、变形能力、极限强度和承载能力进行了单独地分析，为了更直观地研究加载角度对角焊缝的力学性能的影响，本节将角焊缝的力学性能进行汇总并对比分析，拟研究的力学性能包括破坏角度、变形能力、极限强度和承载能力等方面。

* + 1. 加载角度对断裂角度的影响

对于破坏出现在焊缝处的搭接接头角焊缝试件，文献[73] 推导出断裂时的破坏角度与加载角度的简化公式，如公式( 3.2 )所示，断裂面角度与加载角度的关系曲线以及试验实测断裂面角度数据绘制在图 3.37中。由图可以看出，该简化公式具有较高的精度。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | |
| 图 3.37 断裂角度与加载角度的关系 | | |
|  |  | ( 3.2 ) |

* + 1. 加载角度对变形能力的影响

从前文的试验结果可知：对于单边单条角焊缝，大部分试件的最大变形不超过0.4mm，而单边双条角焊缝试件的最大变形在0.4-1mm，虽然每种加载角度的试件有六个重复试件，但是每个试件的初始刚度有差异，导致试件的最大位移有较大的离散型。表 3.16记录了各个角焊缝试件的极限荷载、极限位移、屈服荷载、屈服位移、初始刚度、延性以及位移延性系数（即极限位移除以屈服位移）等多个力学性能指标，为了更直观地研究加载角度对角焊缝试件变形能力的影响，将六个重复试件取平均值，试验和有限元试件的变形能力分别记录在表 3.17和表 3.19，表中归一化处理是指各个加载角度下角焊缝试件的位移延性系数除以正面角焊缝试件的位移延性系数，表 3.18汇总了角焊缝变形能力的变异系数。

表 3.16 角焊缝试件的变形能力

| 编号 | 极限荷载（kN） | 极限位移(mm) | 屈服荷载（kN） | 屈服位移(mm) | 初始线刚度（N/mm） | 位移延性系数 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 00\_1 | 487.75 | 0.52 | 390.20 | 0.12 | 3263.38 | 4.33 |
| 00\_2 | 456.00 | 0.30 | 364.80 | 0.06 | 2911.89 | 5.05 |
| 00\_3 | 603.63 | 0.50 | 482.91 | 0.09 | 3686.32 | 5.56 |
| 00\_4 | 512.63 | 0.26 | 410.11 | 0.09 | 3081.66 | 3.07 |
| 00\_5 | 576.15 | 0.53 | 460.92 | 0.13 | 3440.74 | 4.05 |
| 00\_6 | 581.23 | 0.50 | 464.98 | 0.14 | 3617.99 | 3.54 |
| 15\_1 | 717.56 | 0.18 | 616.20 | 0.06 | 3116.37 | 3.00 |
| 15\_2 | 746.93 | 0.32 | 615.00 | 0.09 | 3065.19 | 3.54 |
| 15\_3 | 770.64 | 0.27 | 616.51 | 0.06 | 3086.41 | 4.48 |
| 15\_4 | 772.73 | 0.46 | 618.18 | 0.10 | 3076.76 | 4.63 |
| 15\_5 | 811.85 | 0.33 | 649.48 | 0.09 | 3197.21 | 3.66 |
| 15\_6 | 839.21 | 0.34 | 671.37 | 0.10 | 3462.08 | 3.42 |
| 30\_1 | 1077.31 | 0.42 | 861.84 | 0.12 | 3539.55 | 3.53 |
| 30\_2 | 1149.15 | 0.52 | 919.32 | 0.12 | 3784.60 | 4.30 |
| 30\_3 | 1149.56 | 0.39 | 919.65 | 0.10 | 3686.72 | 3.93 |
| 30\_4 | 1153.41 | 0.39 | 922.73 | 0.10 | 3718.14 | 3.89 |
| 30\_5 | 879.72 | 0.21 | 703.78 | 0.07 | 2857.75 | 2.93 |
| 30\_6 | 1064.91 | 0.46 | 851.93 | 0.12 | 3538.06 | 3.79 |
| 45D\_1 | 943.81 | 0.27 | 755.05 | 0.09 | 3708.87 | 2.98 |
| 45D\_2 | 963.28 | 0.19 | 770.62 | 0.07 | 3738.17 | 2.71 |
| 45D\_3 | 957.76 | 0.30 | 766.20 | 0.07 | 3828.34 | 4.23 |
| 45D\_4 | 995.42 | 0.40 | 796.33 | 0.08 | 3878.88 | 5.05 |
| 45D\_5 | 1004.68 | 0.22 | 803.74 | 0.08 | 4045.00 | 2.75 |
| 45D\_6 | 890.47 | 0.27 | 712.37 | 0.08 | 3485.19 | 3.38 |
| 45S\_1 | 635.52 | 0.23 | 508.41 | 0.08 | 3665.30 | 2.83 |
| 45S\_2 | 675.87 | 0.34 | 540.70 | 0.11 | 3887.39 | 3.07 |
| 45S\_3 | 658.33 | 0.31 | 526.66 | 0.11 | 3783.23 | 2.94 |
| 45S\_4 | 681.18 | 0.45 | 544.95 | 0.09 | 3892.47 | 4.85 |
| 45S\_5 | 677.05 | 0.42 | 541.64 | 0.11 | 3944.65 | 3.78 |
| 45S\_6 | 665.30 | 0.51 | 532.24 | 0.13 | 3857.08 | 3.78 |
| 60\_1 | 612.69 | 0.31 | 490.16 | 0.10 | 4259.25 | 3.08 |
| 60\_2 | 612.73 | 0.33 | 490.18 | 0.10 | 4211.55 | 3.30 |
| 60\_3 | 578.35 | 0.23 | 462.68 | 0.08 | 4012.12 | 2.89 |
| 60\_4 | 636.56 | 0.35 | 509.24 | 0.09 | 4369.69 | 3.93 |
| 60\_5 | 575.71 | 0.29 | 460.56 | 0.09 | 3975.87 | 3.27 |
| 60\_6 | 618.01 | 0.28 | 494.41 | 0.07 | 4249.31 | 3.97 |
| 75\_1 | 580.59 | 0.28 | 464.47 | 0.09 | 4482.90 | 3.14 |
| 75\_2 | 584.38 | 0.37 | 467.51 | 0.10 | 4467.75 | 3.73 |
| 75\_3 | 557.74 | 0.32 | 446.19 | 0.12 | 4291.14 | 2.63 |
| 75\_4 | 504.87 | 0.37 | 403.89 | 0.10 | 3879.85 | 3.66 |
| 75\_5 | 576.77 | 0.39 | 461.41 | 0.12 | 4406.59 | 3.25 |
| 75\_6 | 548.47 | 0.31 | 442.44 | 0.08 | 4128.73 | 3.83 |
| 90\_1 | 571.58 | 0.37 | 457.26 | 0.11 | 4576.29 | 3.34 |
| 90\_2 | 501.34 | 0.28 | 401.07 | 0.12 | 4010.71 | 2.36 |
| 90\_3 | 551.52 | 0.41 | 441.21 | 0.13 | 4410.80 | 3.27 |
| 90\_4 | 549.41 | 0.33 | 439.52 | 0.10 | 4398.33 | 3.25 |
| 90\_5 | 598.71 | 0.33 | 478.97 | 0.11 | 4785.88 | 3.10 |
| 90\_6 | 566.21 | 0.30 | 452.97 | 0.11 | 4526.05 | 2.76 |

表 3.17 不同加载角度下角焊缝变形能力平均值汇总

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 加载角度(°) | 极限荷载（kN） | 极限位移(mm) | 屈服荷载（kN） | 屈服位移(mm) | 初始线刚度（N/mm） | 位移延性系数 | 位移延性系数归一化 |
| 0 | 536.23 | 0.43 | 428.99 | 0.10 | 3333.66 | 4.27 | 1.42 |
| 15 | 776.49 | 0.32 | 631.12 | 0.08 | 3167.34 | 3.79 | 1.26 |
| 30 | 1079.01 | 0.40 | 863.21 | 0.11 | 3520.80 | 3.73 | 1.24 |
| 45D | 959.23 | 0.27 | 767.39 | 0.08 | 3780.74 | 3.52 | 1.17 |
| 45S | 665.54 | 0.38 | 532.43 | 0.11 | 3838.35 | 3.54 | 1.18 |
| 60 | 605.67 | 0.30 | 484.54 | 0.09 | 4179.63 | 3.41 | 1.13 |
| 75 | 558.80 | 0.34 | 447.65 | 0.10 | 4276.16 | 3.37 | 1.12 |
| 90 | 556.46 | 0.34 | 445.17 | 0.11 | 4451.34 | 3.01 | 1.00 |

表 3.18 不同加载角度下角焊缝变形能力变异系数汇总

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 加载角度(°) | 极限荷载（kN） | 极限位移(mm) | 屈服荷载（kN） | 屈服位移(mm) | 初始线刚度（N/mm） | 位移延性系数 |
| 0 | 0.101 | 0.251 | 0.101 | 0.269 | 0.083 | 0.198 |
| 15 | 0.051 | 0.268 | 0.034 | 0.204 | 0.044 | 0.153 |
| 30 | 0.089 | 0.242 | 0.089 | 0.172 | 0.088 | 0.114 |
| 45D | 0.039 | 0.246 | 0.039 | 0.088 | 0.045 | 0.244 |
| 45S | 0.023 | 0.249 | 0.023 | 0.160 | 0.024 | 0.197 |
| 60 | 0.036 | 0.131 | 0.036 | 0.121 | 0.034 | 0.120 |
| 75 | 0.049 | 0.116 | 0.048 | 0.144 | 0.050 | 0.123 |
| 90 | 0.053 | 0.125 | 0.053 | 0.071 | 0.053 | 0.115 |

表 3.19 有限元隐式分析角焊缝变形能力平均值汇总

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 加载角度(°) | 极限荷载（kN） | 极限位移(mm) | 屈服荷载（kN） | 屈服位移(mm) | 初始线刚度（N/mm） | 位移延性系数 | 位移延性系数归一化 |
| 0 | 472.74 | 0.43 | 406.56 | 0.09 | 3387.97 | 5.06 | 1.50 |
| 15 | 746.45 | 0.32 | 641.95 | 0.07 | 3209.74 | 4.53 | 1.35 |
| 30 | 1087.24 | 0.40 | 902.41 | 0.09 | 3683.30 | 4.41 | 1.31 |
| 45D | 1006.22 | 0.27 | 804.98 | 0.07 | 4024.88 | 3.92 | 1.17 |
| 45S | 664.32 | 0.38 | 571.32 | 0.09 | 4080.82 | 4.17 | 1.24 |
| 60 | 590.21 | 0.30 | 489.87 | 0.08 | 4223.05 | 3.74 | 1.11 |
| 75 | 562.70 | 0.34 | 450.16 | 0.10 | 4328.46 | 3.39 | 1.01 |
| 90 | 508.80 | 0.34 | 437.57 | 0.10 | 4375.68 | 3.36 | 1.00 |

为了研究加载角度对试件延性的影响，将试件的位移延性系数进行归一化处理即各个加载角度下角焊缝试件的位移延性系数除以正面角焊缝试件的位移延性系数。图 3.38给出了有限元和试验数据位移延性系数归一化的曲线，纵坐标为位移延性系数归一化，横坐标为加载角度，其中加载角度为45°的数据是45D和45S两类试件的平均值，图 3.39给出了加载角度对初始线刚度的影响曲线，从图表中可以看出：

（1）随着加载角度的减小，试件的延性系数提高，加载角度与试件的延性呈现负相关；侧面角焊缝的位移延性系数是正面角焊缝的1.42倍。

（2）随着加载角度的减小，试件的初始线刚度降低，加载角度与试件的初始线刚度大致呈现正相关，正面角焊缝的初始线刚度是侧面角焊缝的1.29倍。

（3）对于加载角度为45°的单边单条和单边双条角焊缝试件，两者的平均位移延性系数基本一致。

（4）有限元中加载角度与试件的延性呈线性负相关，这也佐证了有限元隐式分析模型的合理性。

|  |
| --- |
|  |
| 图 3.38加载角度对位移延性系数的影响 |
|  |
| 图 3.39加载角度对初始线刚度的影响 |

* + 1. 加载角度对极限强度的影响

Lesik 和Kennedy[30] 对不同加载角度下角焊缝试件的极限强度推导出如下( 3.3 )所示的简化公式，文献[73] 推导的简化公式( 3.4 )所示。本节研究不同加载角度对极限强度的影响。表 3.20汇总了角焊缝在不同加载角度下的极限强度，强度归一化处理是指各个加载角度下角焊缝试件的极限强度除以侧面角焊缝试件的极限强度平均值，归一化之后将分别与公式( 3.3 )和( 3.4 )对比，来检验两种简化公式的预测误差。表 3.21和表 3.22分别给出了不同加载角度下角焊缝试件极限强度的平均值和变异系数。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 3.3 ) |
|  |  | ( 3.4 ) |

表 3.20 角焊缝试件的极限强度

| 编号 | 极限荷载（kN） | 单焊缝荷载（kN） | 破坏面长度Lr（mm） | （mm2） | （MPa） | 强度  归一化 |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 00\_1 | 487.75 | 121.94 | 35.56 | 131.99 | 923.87 | 0.88 | 0.88 | 0.88 |
| 00\_2 | 456.00 | 114.00 | 35.79 | 122.29 | 932.18 | 0.89 | 0.89 | 0.89 |
| 00\_3 | 603.63 | 150.91 | 36.84 | 137.58 | 1096.86 | 1.04 | 1.04 | 1.04 |
| 00\_4 | 512.16 | 128.04 | 38.39 | 120.34 | 1063.96 | 1.01 | 1.01 | 1.01 |
| 00\_5 | 576.15 | 144.04 | 38.74 | 137.88 | 1044.70 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| 00\_6 | 581.23 | 145.31 | 37.33 | 115.98 | 1252.84 | 1.19 | 1.19 | 1.19 |
| 15\_1 | 717.56 | 179.39 | 51.91 | 157.87 | 1136.35 | 1.08 | 1.01 | 0.97 |
| 15\_2 | 746.93 | 186.73 | 52.90 | 160.68 | 1162.15 | 1.10 | 1.04 | 1.00 |
| 15\_3 | 770.64 | 192.66 | 52.18 | 158.09 | 1218.66 | 1.16 | 1.09 | 1.04 |
| 15\_4 | 772.73 | 193.18 | 53.43 | 160.22 | 1205.74 | 1.15 | 1.07 | 1.03 |
| 15\_5 | 811.85 | 202.96 | 54.09 | 160.31 | 1266.07 | 1.20 | 1.13 | 1.09 |
| 15\_6 | 839.21 | 209.80 | 51.86 | 153.25 | 1369.06 | 1.30 | 1.22 | 1.17 |
| 30\_1 | 1077.31 | 269.33 | 65.84 | 200.05 | 1346.27 | 1.28 | 1.09 | 1.00 |
| 30\_2 | 1149.15 | 287.29 | 65.29 | 201.07 | 1428.80 | 1.36 | 1.15 | 1.06 |
| 30\_3 | 1149.56 | 287.39 | 67.75 | 209.30 | 1373.11 | 1.30 | 1.11 | 1.02 |
| 30\_4 | 1153.41 | 288.35 | 65.89 | 203.07 | 1419.96 | 1.35 | 1.15 | 1.05 |
| 30\_5 | 879.72 | 219.93 | 65.04 | 208.76 | 1053.49 | 1.00 | 0.85 | 0.78 |
| 30\_6 | 1064.91 | 266.23 | 64.24 | 202.57 | 1314.24 | 1.25 | 1.06 | 0.97 |
| 45D\_1 | 943.81 | 235.95 | 55.41 | 177.06 | 1332.64 | 1.27 | 0.98 | 0.87 |
| 45D\_2 | 963.28 | 240.82 | 56.17 | 176.19 | 1366.80 | 1.30 | 1.00 | 0.89 |
| 45D\_3 | 957.76 | 239.44 | 54.25 | 173.06 | 1383.56 | 1.31 | 1.01 | 0.90 |
| 45D\_4 | 995.42 | 248.85 | 55.45 | 173.21 | 1436.74 | 1.37 | 1.05 | 0.93 |
| 45D\_5 | 1004.68 | 251.17 | 54.51 | 175.67 | 1429.80 | 1.36 | 1.05 | 0.93 |
| 45D\_6 | 891.67 | 222.92 | 54.95 | 178.25 | 1250.61 | 1.19 | 0.92 | 0.81 |
| 45S\_1 | 635.52 | 317.76 | 69.36 | 230.13 | 1380.77 | 1.31 | 1.01 | 0.90 |
| 45S\_2 | 675.87 | 337.94 | 69.55 | 238.96 | 1414.17 | 1.34 | 1.04 | 0.92 |
| 45S\_3 | 658.33 | 329.16 | 69.61 | 240.87 | 1366.55 | 1.30 | 1.00 | 0.89 |
| 45S\_4 | 681.18 | 340.59 | 70.00 | 242.53 | 1404.35 | 1.33 | 1.03 | 0.91 |
| 45S\_5 | 677.05 | 338.53 | 68.66 | 229.58 | 1474.54 | 1.40 | 1.08 | 0.96 |
| 45S\_6 | 665.30 | 332.65 | 69.00 | 232.37 | 1431.53 | 1.36 | 1.05 | 0.93 |
| 60\_1 | 612.69 | 306.35 | 57.54 | 201.17 | 1522.86 | 1.45 | 1.03 | 0.91 |
| 60\_2 | 612.73 | 306.36 | 58.20 | 201.78 | 1518.34 | 1.44 | 1.03 | 0.90 |
| 60\_3 | 578.35 | 289.17 | 57.66 | 201.51 | 1435.03 | 1.36 | 0.97 | 0.85 |
| 60\_4 | 636.56 | 318.28 | 58.27 | 203.66 | 1562.75 | 1.48 | 1.06 | 0.93 |
| 60\_5 | 575.71 | 287.85 | 57.92 | 200.13 | 1438.31 | 1.37 | 0.97 | 0.86 |
| 60\_6 | 618.01 | 309.00 | 58.18 | 203.06 | 1521.73 | 1.45 | 1.03 | 0.91 |
| 75\_1 | 580.59 | 290.30 | 51.81 | 174.07 | 1667.70 | 1.58 | 1.07 | 0.95 |
| 75\_2 | 584.38 | 292.19 | 52.32 | 174.69 | 1672.58 | 1.59 | 1.08 | 0.96 |
| 75\_3 | 557.74 | 278.87 | 51.99 | 175.80 | 1586.28 | 1.51 | 1.02 | 0.91 |
| 75\_4 | 504.87 | 252.43 | 52.05 | 174.25 | 1448.66 | 1.38 | 0.93 | 0.83 |
| 75\_5 | 576.77 | 288.38 | 52.36 | 181.64 | 1587.67 | 1.51 | 1.02 | 0.91 |
| 75\_6 | 548.47 | 274.24 | 53.58 | 170.33 | 1610.01 | 1.53 | 1.04 | 0.92 |
| 90\_1 | 571.58 | 285.79 | 49.96 | 170.57 | 1675.51 | 1.59 | 1.06 | 0.96 |
| 90\_2 | 501.34 | 250.67 | 50.00 | 171.62 | 1460.57 | 1.39 | 0.93 | 0.84 |
| 90\_3 | 551.52 | 275.76 | 50.02 | 171.42 | 1608.70 | 1.53 | 1.02 | 0.93 |
| 90\_4 | 549.41 | 274.70 | 49.97 | 177.00 | 1551.99 | 1.47 | 0.98 | 0.89 |
| 90\_5 | 598.71 | 299.36 | 50.04 | 173.91 | 1721.38 | 1.64 | 1.09 | 0.99 |
| 90\_6 | 566.21 | 283.10 | 50.04 | 173.59 | 1630.86 | 1.55 | 1.03 | 0.94 |

表 3.21 不同加载角度下角焊缝极限强度平均值汇总

| 编号 | 极限荷载（kN） | 单焊缝荷载（kN） | 破坏面长度Lr（mm） | （mm2） | （MPa） | 强度  归一化 |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 0 | 536.16 | 134.04 | 37.11 | 127.68 | 1052.40 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 15 | 776.49 | 194.12 | 52.73 | 158.40 | 1226.34 | 1.17 | 1.09 | 1.05 |
| 30 | 1079.01 | 269.75 | 65.67 | 204.14 | 1322.64 | 1.26 | 1.07 | 0.98 |
| 45D | 959.43 | 239.86 | 55.12 | 175.57 | 1366.69 | 1.30 | 1.00 | 0.89 |
| 45S | 665.54 | 332.77 | 69.36 | 235.74 | 1411.98 | 1.34 | 1.03 | 0.92 |
| 60 | 605.67 | 302.84 | 57.96 | 201.88 | 1499.84 | 1.43 | 1.02 | 0.89 |
| 75 | 558.80 | 279.40 | 52.35 | 175.13 | 1595.48 | 1.52 | 1.03 | 0.91 |
| 90 | 556.46 | 278.23 | 50.00 | 173.02 | 1608.17 | 1.53 | 1.02 | 0.93 |

表 3.22 不同加载角度下角焊缝极限强度变异系数汇总

| 编号 | 极限荷载（kN） | 单焊缝荷载（kN） | 破坏面长度Lr（mm） | （mm2） | （MPa） | 强度  归一化 |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 0 | 0.101 | 0.101 | 0.032 | 0.067 | 0.105 | 0.105 | 0.105 | 0.105 |
| 15 | 0.051 | 0.051 | 0.016 | 0.016 | 0.062 | 0.062 | 0.062 | 0.062 |
| 30 | 0.089 | 0.089 | 0.016 | 0.018 | 0.096 | 0.096 | 0.096 | 0.096 |
| 45D | 0.039 | 0.039 | 0.012 | 0.011 | 0.046 | 0.046 | 0.046 | 0.046 |
| 45S | 0.023 | 0.023 | 0.006 | 0.022 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 |
| 60 | 0.036 | 0.036 | 0.005 | 0.006 | 0.031 | 0.031 | 0.031 | 0.031 |
| 75 | 0.049 | 0.049 | 0.011 | 0.019 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 |
| 90 | 0.053 | 0.053 | 0.001 | 0.012 | 0.053 | 0.053 | 0.053 | 0.053 |

图 3.40和图 3.41绘制了不同加载角度下极限强度的变化规律，以及与公式( 3.3 )和( 3.4 )所绘制曲线的对比。图中横坐标为加载角度，纵坐标为极限强度归一化，图中数据点是圆圈图形的代表本文的试验数据，数据点是三角形的来自Lesik 和Kennedy[30] 的文献，由上述图表分析可得：

（1）角焊缝极限强度归一化处理后介于公式( 3.3 )和( 3.4 )之间，单边双条角焊缝试件极限强度的变异系数大于单边单条角焊缝试件。

（2）随着加载角度的增大，角焊缝的极限强度提高，正面角焊缝的极限强度最高，侧面角焊缝的极限强度最低，正面角焊缝试件的平均极限强度是侧面角焊缝的1.53倍。

（3）对于加载角度为45°的单边单条和单边双条角焊缝试件，两者的平均极限强度基本一致。

（4）文献[30] 中正面角焊缝的极限强度是侧面角焊缝的1.28倍。

|  |
| --- |
|  |
| 图 3.40 不同加载角度下角焊缝极限强度的变化规律（数据来自文献[30] ） |
|  |
| 图 3.41 不同加载角度下角焊缝极限强度的变化规律（本文试验数据） |

下文汇总了欧洲规范、美国规范和中国规范中针对角焊缝连接的相关设计条款，文献[73] 给出了针对角焊缝承载力计算的简化公式见表 3.23，本文高强钢Q890D在不同加载角度下角焊缝的承载力与各国规范的对比情况汇总在表 3.24中。

表 3.23 针对角焊缝的设计条款汇总表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 设计规范 | 公式 | 备注 |
| 欧洲规范Eurocode 3 Part 1-8[35] |  | 不考虑折减 |
| 美国规范ANSI/AISC 360-10[36] |  | 不考虑折减 |
| 中国规范GB50017-2017[34] |  | 不考虑材料设计强度折减 |
| 文献[73] 提出的简化公式 |  | - |

表 3.24 角焊缝承载力与各国规范对比

| 编号 | 极限荷载（kN） | 欧洲  规范（kN） | 美国  规范（kN） | 中国  规范    （kN） | 简化  公式    （kN） |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 00\_1 | 487.75 | 277.17 | 289.22 | 197.63 | 313.32 | 0.568 | 0.593 | 0.405 | 0.642 |
| 00\_2 | 456.00 | 268.14 | 279.80 | 191.19 | 303.11 | 0.588 | 0.614 | 0.419 | 0.665 |
| 00\_3 | 603.63 | 305.62 | 318.91 | 217.92 | 345.48 | 0.506 | 0.528 | 0.361 | 0.572 |
| 00\_4 | 512.16 | 260.36 | 271.68 | 185.65 | 294.32 | 0.508 | 0.530 | 0.362 | 0.575 |
| 00\_5 | 576.15 | 297.63 | 310.57 | 212.22 | 336.45 | 0.517 | 0.539 | 0.368 | 0.584 |
| 00\_6 | 581.23 | 249.24 | 260.08 | 177.72 | 281.75 | 0.429 | 0.447 | 0.306 | 0.485 |
| 15\_1 | 717.56 | 375.06 | 417.13 | 270.42 | 469.97 | 0.523 | 0.581 | 0.377 | 0.655 |
| 15\_2 | 746.93 | 380.62 | 423.32 | 274.43 | 476.95 | 0.510 | 0.567 | 0.367 | 0.639 |
| 15\_3 | 770.64 | 377.48 | 419.83 | 272.17 | 473.01 | 0.490 | 0.545 | 0.353 | 0.614 |
| 15\_4 | 772.73 | 376.19 | 418.39 | 271.24 | 471.39 | 0.487 | 0.541 | 0.351 | 0.610 |
| 15\_5 | 811.85 | 375.70 | 417.85 | 270.88 | 470.78 | 0.463 | 0.515 | 0.334 | 0.580 |
| 15\_6 | 839.21 | 358.13 | 398.31 | 258.22 | 448.76 | 0.427 | 0.475 | 0.308 | 0.535 |
| 30\_1 | 1077.31 | 461.57 | 566.79 | 343.51 | 670.45 | 0.428 | 0.526 | 0.319 | 0.622 |
| 30\_2 | 1149.15 | 466.64 | 573.01 | 347.28 | 677.81 | 0.406 | 0.499 | 0.302 | 0.590 |
| 30\_3 | 1149.56 | 480.86 | 590.47 | 357.86 | 698.46 | 0.418 | 0.514 | 0.311 | 0.608 |
| 30\_4 | 1153.41 | 477.11 | 585.87 | 355.07 | 693.02 | 0.414 | 0.508 | 0.308 | 0.601 |
| 30\_5 | 879.72 | 492.83 | 605.17 | 366.77 | 715.85 | 0.560 | 0.688 | 0.417 | 0.814 |
| 30\_6 | 1064.91 | 473.38 | 581.28 | 352.29 | 687.59 | 0.445 | 0.546 | 0.331 | 0.646 |
| 45D\_1 | 943.81 | 406.20 | 549.87 | 316.77 | 671.40 | 0.430 | 0.583 | 0.336 | 0.711 |
| 45D\_2 | 963.28 | 403.48 | 546.19 | 314.65 | 666.90 | 0.419 | 0.567 | 0.327 | 0.692 |
| 45D\_3 | 957.76 | 398.39 | 539.30 | 310.69 | 658.50 | 0.416 | 0.563 | 0.324 | 0.688 |
| 45D\_4 | 995.42 | 399.97 | 541.44 | 311.92 | 661.11 | 0.402 | 0.544 | 0.313 | 0.664 |
| 45D\_5 | 1004.68 | 399.49 | 540.80 | 311.55 | 660.32 | 0.398 | 0.538 | 0.310 | 0.657 |
| 45D\_6 | 891.67 | 413.53 | 559.80 | 322.50 | 683.53 | 0.464 | 0.628 | 0.362 | 0.767 |
| 45S\_1 | 635.52 | 287.15 | 388.71 | 223.93 | 474.62 | 0.452 | 0.612 | 0.352 | 0.747 |
| 45S\_2 | 675.87 | 298.17 | 403.63 | 232.53 | 492.84 | 0.441 | 0.597 | 0.344 | 0.729 |
| 45S\_3 | 658.33 | 300.55 | 406.85 | 234.38 | 496.77 | 0.457 | 0.618 | 0.356 | 0.755 |
| 45S\_4 | 681.18 | 302.61 | 409.65 | 235.99 | 500.18 | 0.444 | 0.601 | 0.346 | 0.734 |
| 45S\_5 | 677.05 | 286.46 | 387.78 | 223.40 | 473.49 | 0.423 | 0.573 | 0.330 | 0.699 |
| 45S\_6 | 665.30 | 289.94 | 392.50 | 226.11 | 479.25 | 0.436 | 0.590 | 0.340 | 0.720 |
| 60\_1 | 612.69 | 251.00 | 367.46 | 206.12 | 452.97 | 0.410 | 0.600 | 0.336 | 0.739 |
| 60\_2 | 612.73 | 251.77 | 368.58 | 206.74 | 454.34 | 0.411 | 0.602 | 0.337 | 0.742 |
| 60\_3 | 578.35 | 251.43 | 368.09 | 206.47 | 453.74 | 0.435 | 0.636 | 0.357 | 0.785 |
| 60\_4 | 636.56 | 254.12 | 372.03 | 208.68 | 458.59 | 0.399 | 0.584 | 0.328 | 0.720 |
| 60\_5 | 575.71 | 249.71 | 365.57 | 205.06 | 450.64 | 0.434 | 0.635 | 0.356 | 0.783 |
| 60\_6 | 618.01 | 253.37 | 370.92 | 208.06 | 457.23 | 0.410 | 0.600 | 0.337 | 0.740 |
| 75\_1 | 580.59 | 217.20 | 334.22 | 185.91 | 407.89 | 0.374 | 0.576 | 0.320 | 0.703 |
| 75\_2 | 584.38 | 217.98 | 335.42 | 186.57 | 409.35 | 0.373 | 0.574 | 0.319 | 0.700 |
| 75\_3 | 557.74 | 219.36 | 337.54 | 187.76 | 411.95 | 0.393 | 0.605 | 0.337 | 0.739 |
| 75\_4 | 504.87 | 217.42 | 334.57 | 186.10 | 408.32 | 0.431 | 0.663 | 0.369 | 0.809 |
| 75\_5 | 576.77 | 226.64 | 348.75 | 193.99 | 425.63 | 0.393 | 0.605 | 0.336 | 0.738 |
| 75\_6 | 548.47 | 212.53 | 327.04 | 181.91 | 399.13 | 0.387 | 0.596 | 0.332 | 0.728 |
| 90\_1 | 571.58 | 212.83 | 333.12 | 185.12 | 396.97 | 0.372 | 0.583 | 0.324 | 0.695 |
| 90\_2 | 501.34 | 214.14 | 335.18 | 186.27 | 399.43 | 0.427 | 0.669 | 0.372 | 0.797 |
| 90\_3 | 551.52 | 213.88 | 334.78 | 186.04 | 398.94 | 0.388 | 0.607 | 0.337 | 0.723 |
| 90\_4 | 549.41 | 220.85 | 345.68 | 192.10 | 411.94 | 0.402 | 0.629 | 0.350 | 0.750 |
| 90\_5 | 598.71 | 216.99 | 339.64 | 188.74 | 404.73 | 0.362 | 0.567 | 0.315 | 0.676 |
| 90\_6 | 566.21 | 216.60 | 339.03 | 188.40 | 404.01 | 0.383 | 0.599 | 0.333 | 0.714 |
| 平均值 | | | | | | 0.439 | 0.577 | 0.342 | 0.685 |
| 标准差 | | | | | | 0.052 | 0.048 | 0.027 | 0.074 |
| 变异系数 | | | | | | 0.119 | 0.084 | 0.078 | 0.108 |

由表分析可得：

（1）对于高强钢角焊缝，采用三种规范（欧洲规范/美国规范/中国规范）得到的承载力都偏于保守，其中欧洲规范未考虑加载角度对承载力的影响，不推荐欧洲规范；中国规范对承载力的预测最为保守，预测值与试验值的平均比值仅为0.342；三种常用的规范中只有美国规范对承载力的预测更接近试验值，预测值与试验值的平均比值为0.577。

（2）文献[73] 给出的针对角焊缝承载力计算的简化公式的预测结果最接近本文试验结果的平均值，比值为0.685。

## 本章小结

本章对48个不同加载角度下的搭接接头高强钢角焊缝试件（母材为高强度钢材Q890D和焊材为ER120S-G）进行单调静力加载并且使用DIC测量系统对整个试件应变场的发展历程进行采集，详细介绍了试件加工制作过程及焊接工艺等详细参数，并且介绍了试验使用的仪器设备。最后对角焊缝的力学性能（包括破坏角度、变形能力、极限强度和承载能力等方面）进行汇总并对比分析，着重研究了加载角度对角焊缝力学性能的影响，主要结论如下：

（1）本章试验中所有角焊缝试件的破坏都出现在焊材上，大部分试件的破坏模式是两侧焊缝同时断裂，仅有部分试件的破坏模式是单边焊缝先破坏。

（2）高强钢角焊缝在不同加载角度下的破坏角度与普通钢基本一致，随着加载角度的减小，破坏角度增大。加载角度大于45°的单边单条角焊缝破坏角度更集中，分布在16°-18°之间；加载角度小于45°的单边双条角焊缝破坏角度较为离散，分布在24°-55°之间；正面角焊缝和侧面角焊缝的平均破坏角度分别为17.25°和54.90°。

（3）单边单条角焊缝试件断裂荷载和极限荷载非常接近，通常情况下在92%-95%之间，试件断裂位移与极限位移的比值在1.04-1.09之间。大部分试件的最大变形不超过0.4mm；单边双条角焊缝试件断裂荷载与极限荷载的比值在81%-93%之间，断裂时对应的位移与极限位移比值在1.1-2.2之间。侧面角焊缝断裂位移比极限位移高出很多（超过2倍），表明试件不会出现突然断裂。绝大多数试件的最大变形在0.4-1mm。

（4）对于加载角度为45°的单边单条和单边双条角焊缝试件，两者的延性系数和平均极限强度基本一致。

（5）加载角度与试件的初始刚度呈正相关，与试件的延性系数呈负相关，正面角焊缝的初始线刚度是侧面角焊缝的1.29倍，侧面角焊缝的位移延性系数是正面角焊缝的1.42倍。

（6）随着加载角度的增大，角焊缝的极限强度提高，正面角焊缝的极限强度最高，侧面角焊缝的极限强度最低，正面角焊缝试件的平均极限强度是侧面角焊缝的1.53倍。

（7）对于角焊缝，采用三种规范（欧洲规范/美国规范/中国规范）得到的承载力都偏于保守，其中欧洲规范未考虑加载角度对承载力的影响，不推荐欧洲规范；中国规范对承载力的预测最为保守，预测值与试验值的平均比值仅为0.342；三种常用的规范中只有美国规范对承载力的预测更接近试验值，预测值与试验值的平均比值为0.577。

# DIC测量系统监测下的试件应变分布特征

## 引言

ARAMIS Digitai Image Correlation（DIC）-ARAMIS三维光学全场变形和应变测量分析系统（简称“DIC测量系统”）是一种全新的应变位移测量手段。在物理力学性能测试中，使用DIC系统，有助于深入了解材料和零件的力学行为和性能，特别适用于测量瞬时和局部应变。DIC技术采用非接触测量方式，适用于各种材料的静态和动态试验，获取完整的力学性能参数。相对于传统的应变片和位移计（或者引伸计）测试手段，该技术可以追踪至关键点直到破坏为止的应变，并且各个关键点的应变数据无距离限制。在位移测量中，标距长度不再有限制，并且可以跟踪至试件破坏，中间无须暂停（取下引伸计等）。该测试系统可以测得全场任意位置的平均应变和任意两点的相对位移，这大大扩充了单次试验的数据量，本试验的位移数据主要来自于DIC全场应变测量系统，为了验证试验数据的有效性和合理性，试验前须对DIC测量系统所得数据与传统测量方法（引伸计和应变片）获得的数据进行对比。

本章将详细介绍DIC测量系统的技术特点、适用范围以及工作原理，并介绍四种试验中常用的变形信息载体制备的方法。借助GOM软件对高强钢角焊缝试件单调拉伸加载中应变发展特征进行详细的分析，并且通过计算全场最大应变点的应变率得出不同加载角度下试件破坏模式的演变规律。

## DIC测量系统简介

ARAMIS系统采用非接触测量方式，适合于各种材料的静态和动态试验，获取完整的力学性能参数，其中包括：1）三维型面坐标；2）三维位移和变形速度；

3）表面应变；4）应变率。区别于传统的应变测量，ARAMIS提供了全新的DIC数字散板全场应变测量方法，测量范围覆盖从几毫米的试样到数十米的大型零件。无需对试样进行复杂和费时的制备，测量过程方便快速。同时对试样的几何形状以及测量环境（温度）没有限制。

ARAMIS系统的应用范围：1）测定材料特性、2）零件强度分析、3）验证有限元分析、4）实时监控试验设、5）考察零件的非线性变形、6）疲劳实验、7）确定材料的成型特性曲线(FLC)。

（1）材料测试：

通过ARAMIS的全场应变结果，显著提高了测定材料特性的精度，使常规的力学性能测试更有效更可靠，可以很好的满足一些特殊要求的材料测试，包括：高温测试、高速测试和尺寸非常小的试样。目前，ARAMIS全场应变测试系统已在全球范围内应用于材料的力学性能测试，是得到广泛认可的测量解决方案：应变-应力曲线、R值、泊松比、杨氏模量、成形极限曲线 FLC、残余应力分析、剪切模量。

（2）三维实时测量：

ARAMIS可对试样表面多个测量位置进行实时测量，测量数据实时传递给试验设备、数据采集系统或数据处理软件（如LabView，DIAdem， MSExcel等），利用实时获得的信息，对试验过程进行在线控制：实时控制试验设备、长周期的寿命失效测试、震动分析、三维视频引伸计。

（3）零件测试和分析：

ARAMIS可满足零件性能测试中的各种复杂挑战：不受材料、尺寸和几何形状的限制，可在产品的实际工作条件下进行测量；借助ARAMIS系统可以获得实际零件的几何形状信息，克服了传统测试工具，如应变片、位移传感器（LVDT）、振动计的测试局限。

由于三维零件具有明显的非线性变形行为，因此获得零件表面三维全场的测量结果是至关重要的。ARAMIS系统可以非常方便地将实际测试获得的三维结果与产品的三维CAD模型进行坐标对齐，并进行对比分析，得到整个零件变形的可视化结果。

无论是静态或是动态测试，无论是小尺寸零件还是大型零件，抑或是在高速状态下，ARAMIS都能很好的获得完整地测试结果，以便做以下分析：强度分析、

振动分析、耐久性分析、碰撞试验。

（4）有限元分析：

在新产品设计和制造过程中，越来越多地应用有限元分析软件来进行模拟分析，对产品性能和制造工艺进行优化和改进。材料的性能参数和零件的变形行为则对仿真软件的计算精度和可靠性具有重要的影响。ARAMIS系统可以直接读取各种有限元结果（ANSYS、ABAQUS、Autoform、PAM-Crush），通过对比分析实际测试结果和理论数据，达到验证和优化对有限元计算精度的目的。

ARAMIS系统的技术特点：（1）非接触测量、（2）适合于各种材料、（3）不受试样的几何形状限制、（4）二维和三维测量、（5）便携、灵活、（6）全场测量、（7）高精度、（8）满足高温测试、（9）高速测试、（10）试样制备简单、（11）方便地与各种测试设备集成、（12）测量范围从小尺寸试样到大型零件、（13）应变范围从微应变到大应变。

* + 1. DIC测量系统的工作原理

ARAMIS系统采用高分辨率数码相机，在加载过程中，对被测零件表面进行连续的拍照测量，补偿计算测量镜头的光学变形，精确确定测量头状态、相机位置和测量范围。基于数字图像相关性技术（DIC），对每组图像进行分析和计算。在每个相机图像中获得大量微面片，计算每个微面片的灰阶分布，从而计算出每个微面片在所有图像中的准确位置，计算精度可达到亚像素级。

根据测量头上两个相机标定后的数学关系，结合数字图像相关性和立体相机光学三角形计算，最终获得每个微面片的高精三维坐标。分析微面片在不同加载阶段的三维空间位置，准确计算出在X/Y/Z方向上的位移。结合试样的几何形状和塑性理论，计算整个试样表面的应变分布。由于图像拍摄的时间连续性，系统自动计算出每个局部点的三维速度和应变速率。ARAMIS系统获得的测量结果包括：全场三维坐标系、位移和应变；高分辨率的三维网格面；平面应变张量；基于三维几何形状的可视化结果。

ARAMIS系统配置包括如下图 4.1所示：1）测量相机：CCD和CMOS相机、不同的相机分辨率、可调图像尺寸、可按不同测试要求自定义采集频率、稳定并经过计量的镜头；2）测量头：可调节或固定的相机安装架、集成照明光源、集成激光导航，方便确定测量位置；3）测量控制器：为相机、照明光源和激光定位器提供电源、触发器、同步相片采集、模拟信号输入和输出；4）台式/便捷式图形工作站。

|  |
| --- |
|  |
| 图 4.1 ARAMIS全场应变测量系统 |

* + 1. DIC测量系统的精度校核

DIC测量系统应用于全场应变的测量已经比较成熟，在国内外已有了广泛应用。由于本试验的位移数据和应变数据均来自于DIC全场应变测量系统，为了证明本试验得到数据的有效性，在试验前以试件120\_1为例，进行了传统测量方法（应用引伸计测位移和贴应变片测应变）和DIC全场应变测量系统的对比试验，试验结果图 4.2所示。

从图中得知DIC和引伸计测得的试件位移随时间的变化规律基本一致，并且在测量试件的应变时应变片会在试件破坏时受损而失效，而DIC可测量试件从开始到破坏结束整个过程中的应变，这丰富了单次试验的试验数据。该对比试验说明DIC全场应变测量系统确实有较高的精度和可信度。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）位移随时间的变化规律 | （b）应变随时间的变化规律 |
| 图 4.2 DIC测试结果与传统测量结果对比（以试件120\_1为例） | |

* + 1. 变形载体制备

变形信息载体是 DIC 方法进行变形测量的重要媒介，其质量的好坏关系到变形测量结果的准确性。因此制备小尺度散斑是实现裂纹萌生阶段应变测量的关键[62] 。用于DIC全场应变测量系统的难点在于如何获得颗粒尺寸微小且均匀附着在试样表面的变形载体。目前可用于 DIC 方法的变形信息载体种类有很多，包括试样（结构）表面制备散斑、材料表面的自然纹理，其中最常用的载体是在试件表面喷制散斑。

宏观尺度下的散斑制作方法相对成熟，例如美国 Cor⁃related Solutions 公司制作了不同尺寸的散斑制作工具，可以直接在试件表面印刷散斑[64] 。图 4.3和图 4.4所示的用于制作散斑的图案刷子和喷雾模板使用起来方便快捷且高效。

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1551504887(1).png | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1551504981(1).png |
| 图 4.3 图案刷子 | 图 4.4 喷雾模板 |

小尺度散斑制作方法目前尚无成熟的商业散斑制作工具，清华大学谢惠民等[65] 采用聚焦电子束方法在试件表面制备微尺度散斑，但是这种方法时间成本和经济成本都比较高。文献[66] 提出了一种基于离心甩胶技术的制作方法，尽管该方法花费较低但对试件表面要求比较高并且受到光照强度影响。试验中常用的制备小尺度散斑方法有两种，第一种是用油漆笔或者马克笔在试样表面画出较为规则的网格，如图 4.5所示。第二种方法如图 4.6所示，用哑光白色漆在试件表面打底色，然后用哑光黑色漆喷成随机分布的黑色散斑，随着加载的进行，试件发生变形，附着在试件表面的散斑随试件移动，散斑间发生错动，测量系统中的一组相机将实时拍摄散斑的相对位置图，再通过ARAMIS 系统的软件计算，即可得到全局的应变场，详细的测量原理参见用户手册[67] 。本论文中所有试件的测试均采用第二种喷漆制作散斑的方法。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 图 4.5 油漆笔画出图案 | 图 4.6 白漆打底黑漆散斑 | |

## DIC监控下的角焊缝试件应变发展特征

根据4.2节的介绍可知，相比传统的引伸计和应变片在试件断裂后数据采集失效这一缺点，DIC全场应变测量系统具有能够监测试验从开始到结束整个过程中的三维变形和应变的巨大优势，该测试系统可以测得全场任意位置的平均应变和任意两点的相对位移，这大大扩充了单次试验的数据量。而角焊缝试件在受拉时的断裂行为对接头的承载能力和变形能力有重大的影响，为了更好的研究和预测接头的断裂行为，对整个加载过程中的焊缝区域应变场的分布和发展情况进行监测显得尤为重要，DIC全场应变测量系统为实时测量焊缝区域的应变场分布的发展过程提供了技术支持。

* + 1. 正面角焊缝试件焊缝区域应变发展特征

本小节以正面角焊缝试件90\_5为例对正面角焊缝焊缝区域的应变发展过程进行分析，该试件在试验中DIC系统图像采集的频率规则如下：0-480s，图像采集频率为1/10Hz（即十秒拍一张图片）；480-540s，图像采集频率为1Hz；540s至试验结束，图像采集频率为2Hz。为了定量观察焊缝区域应变发展规律，DIC后处理在5mm\*5mm的等腰三角形焊缝区选取16个监测点，这16个监测点将焊缝区域划分为A，B，C，D四个区域，A区域靠近试件竖直方向加载过程中的受拉边，D区域靠近试件竖直方向加载过程中的受剪边，监测点和分区布置如图 4.7所示。结合图 4.8中试件90\_5的荷载位移曲线和监测点的应变发展过程，选择四个代表性的时刻进行分析与描述。

|  |
| --- |
|  |
| 图 4.7 试件90\_5焊缝区域应变测点和分区布置 |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 4.8 正面角焊缝的荷载位移曲线和测点处的应变发展过程（试件90\_5） | |

（1）t1=475s，此时试件处于弹性加载阶段，整个焊缝区域的应变分布基本一致，均低于试件的屈服应变为0.47%（）。

（2）t2=600s，此时试件焊缝区的应变已经产生了明显的差异，监测点13，12，11，1（区域D）应变发展最快，都产生了塑性变形，而A/B/C区域塑性发展较慢。

（3） t3=659s，此时试件的承载力达到最大，应变在图 4.9（c）所示虚线所在的路径（与竖直面夹角约为20°）处增大最快，同时根据图 4.8监测点应变发展过程曲线可以看出，从t2到t3，试件各个测点应变增长极快，整个焊缝区域都的应变都在持续增加，并未出现应变在焊根处集中发展的现象，说明此时焊根处并未发生开裂，否则应变会在裂纹附近急剧发展，其他位置的弹性应变得到释放。

（4）达到极限荷载后，仅过了6s，试件突然发生破坏，破坏前DIC测量系统拍摄的最后一张图片在t4=665s，如图 4.9（d）所示。各个监测点中点1，11，12应变最大，应变最大区域分布在D区，最大应变为10.40%。DIC在540s后图像采集频率为2Hz，当t=665.5s时，试件破坏DIC未捕捉到应变场。

总结来看，试件的变形能力和承载能力与材料的断裂性能息息相关。借助DIC测量系统监测的正面角焊缝试件焊缝区域的应变场发展过程可以直观观察到试件率先出现塑性发展的区域和点集、试件全面进入塑性阶段的时刻、断裂时刻应变最大产生的区域和点集、破坏面的角度以及记录下焊缝区域应变随加载过程中的定量数据。这些信息可以解释在不同加载角度下的角焊缝试件的破坏模式和变形失效模式，后续章节将会作出更详细的介绍。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a） t1=475s时，试件处于弹性阶段 | |
|  | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1551356563(1).png |
| （b） t2=600s时，试件处于弹塑性阶段 | |
|  |  |
| （c） t3=659s时，试件达到极限荷载的应变分布 | |
|  |  |
| （d） t4=665s时，试件达到断裂荷载的应变分布 | |
|  | |
| （e） t5=665.5s时，试件突然断裂，未捕捉到应变场 | |
| 图 4.9 试件90\_5焊缝区域应变场随时间发展的分布 | |

* + 1. 侧面角焊缝试件焊缝区域应变发展特征

针对侧面角焊缝试件，前文3.4.2小节中提出试件的荷载位移曲线呈现“下降（试件编号为00\_1/00\_3/00\_4/00\_5/00\_6）”和“平台”（试件编号为00\_2）两种趋势，本节借助DIC测量系统将对出现这两种特征曲线的试件（以00\_1和00\_2为例）做出更加详细的分析。侧面角焊缝试件在试验时DIC系统图像采集的频率规则如下：0-420s，图像采集频率为1/10Hz（即十秒拍一张图片）；420-540s，图像采集频率为1Hz；540s至试验结束，图像采集频率为2Hz。由于DIC拍摄角度的影响，对于侧面角焊缝只能监测一条焊缝（图像右侧焊缝）的应变发展特征。

为了定量观察焊缝区域应变发展规律，DIC后处理时在如图 4.10所示焊缝区沿着焊缝长度的方向选取10个监测点，这样可以监测整个焊缝长度方向在加载过程中的应变发展特征。

|  |
| --- |
|  |
| 图 4.10 侧面角焊缝试件焊缝区域应变测点分布（以00\_1为例） |

对于荷载位移曲线呈现“下降”趋势的试件00\_1，从图 4.11中可得知以下信息：

（1）从图（a）试件的荷载位移曲线和图（b）试件焊缝区域应变发展规律可以看出，沿着焊缝长度方向分布的监测点在试验整个加载过程中的应变都在持续增加，试件在t1=412s时试件整体进入塑性阶段，在试件达到断裂时刻t2=512s，测点9达到最大应变9.22%。

（2）从图（c）测点9在加载过程中的应变率得知所测焊缝在试件破坏前应变率（单位时间下的应变增加值）逐步提高，说明试件断裂不是突然发生的，在试件达到断裂时刻t2=512s，测点9达到最大应变率0.61s-1，试件在加载过程中变形能力比较强。

（3）从图（d）DIC测量系统拍摄的试件断裂时刻的图片可以看出，左右两边的焊缝同时断裂。

（4）总结来看：荷载位移曲线呈现“下降”趋势的试件，左右两侧焊缝同时断裂，沿着焊缝长度的应变逐步增大，并未出现明显的平台期，并且全场最大应变点（点9）对应的应变率也是逐步提高，并未出现二次提高的现象。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）试件00\_1力位移曲线 | （b）试件00\_1焊缝区域应变发展规律 |
|  | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552476125(1).png |
| （c）测点9在加载过程中的应变率 | （d）试件00\_1焊缝同时断裂 |
| 图 4.11 荷载位移曲线呈现“下降”趋势的试件（以00\_1为例） | |

对于荷载位移曲线呈现“平台”趋势的试件00\_2，从图 4.12中可得知以下信息：

（1）从图（a）试件的荷载位移曲线和图（b）试件焊缝区域应变发展规律可以看出，试件在t1=484s时试件整体进入塑性阶段，在试件达到断裂时刻t4=558s，测点4达到最大应变16.83%。沿着试件右侧焊缝长度方向分布的监测点在试验整个加载过程中的应变都在持续增加，但与试件00\_1不同的是该试件在t2=535s至t3=545s监测点的应变发展有一段时间的平台端。

（2）从图（c）测点4在加载过程中的应变率得知所测焊缝在t2=535s时应变突然增大，对应的应变率为0.54s-1，但是此时试件尚未破坏。结合图（d）可以观察到在t2=535s时刻试件左侧焊缝已出现明显的裂纹而右侧焊缝尚未出现裂纹，右侧试件焊缝区域应变突然增大，沿着焊缝长度方向应力分布集中。

（3）在t4=558s时，试件右侧焊缝应变率达到0.73 s-1，试件左右两侧焊缝均发生断裂，试件破坏。

（4）根据试件00\_2原始的测量尺寸可知，DIC拍摄的图像中左边焊缝是3号边，右边焊缝是1号边，其中3号边的机加工尺寸（受拉边3.7mm和剪切边4.7mm）远小于1号边（受拉边5.3mm和剪切边5.1mm），这也正好解释了试件左右两侧焊缝先后出现断裂的情形。

（5）总结来看：荷载位移曲线呈现“平台”趋势的试件，左右两侧焊缝机加工后焊脚尺寸大小不一致导致焊缝出现先后断裂，沿着焊缝长度的应变出现了明显的平台期，并且全场最大应变点（点4）对应的应变率出现二次提高的现象。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）试件00\_2力位移曲线 | （b）试件00\_2焊缝区域应变发展规律 |
|  | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552477153(1).png |
| （c）测点4在加载过程中的应变率 | （d）t2=535s时左侧焊缝先出现裂纹 |
| 图 4.12 荷载位移曲线呈现“平台”趋势的试件（以00\_2为例） | |

* + 1. 斜向角焊缝试件焊缝区域应变发展特征

斜向角焊缝试件焊缝区域监测点布置与正面角焊缝试件类似，监测点共16个将焊缝区域分割成A/B/C/D四个区域，由于不同加载角度下试件重复6个，现每个加载角度选取一个最有代表性的试件进行研究与分析，本节选取的试件编号为75\_3/60-2/45S\_1/45D\_3/30\_4/15\_2。各个试件焊缝区域的应变发展情况如图 4.13所示，图中t1代表试件全面进入塑性阶段的时刻，t2代表试件的破坏时刻，并且图中标记了断裂时刻应变发展最大的点集。

在试验加载过程中可以从图中直观观察到试件率先出现塑性发展的区域和点集、试件全面进入塑性阶段的时刻、断裂时刻应变最大产生的区域和点集、试件的断裂时间和最大应变值等数据，将这些信息汇总于表 4.1中。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a1）75\_3断裂时刻全场应变分布特征 | （a2）75\_3各监测点应变发展规律 |
|  |  |
| （b1）60\_2断裂时刻全场应变分布特征 | （b2）60\_2各监测点应变发展规律 |
|  |  |
| （c1）45S\_1断裂时刻全场应变分布特征 | （c2）45S\_1各监测点应变发展规律 |
|  |  |
| （d1）45D\_3断裂时刻全场应变分布特征 | （d2）45D\_3各监测点应变发展规律 |
|  |  |
| （e1）30\_4断裂时刻全场应变分布特征 | （e2）30\_4各监测点应变发展规律 |
|  |  |
| （f1）15\_2断裂时刻全场应变分布特征 | （f2）15\_2各监测点应变发展规律 |
| 图 4.13 不同加载角度下试件焊缝区域应变发展规律 | |

从表 4.1中得知：

（1）随着加载角度的减小，最大应变发展路径所在的区域从D区域（靠近试件竖直方向加载过程中的受剪边）向A区域（靠近试件竖直方向加载过程中的受拉边）过渡，这与试件破坏时的断裂角度有关，此处不再赘述。

（2）借助DIC全场应变测量系统可以观察到焊缝是否同时断裂的定性特征以及不同加载角度下的角焊缝试件应变发展过程的定量数据，但是无法得出较为精准的断裂面的角度。

表 4.1 试件应变发展情况汇总

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 试件编号 | 率先出现塑性发展的点集 | 率先出现塑性发展的区域 | 全面进入塑性阶段的时间 | 最大应变产生的点集 | 最大应变产生的区域 | 最大应变（%） | 断裂时刻（s） |
| 90\_5 | 13，12，11 | D | 475s | 1，11，12 | D | 10.40 | 665 |
| 75\_3 | 13，1，8 | C&D | 470s | 10，11，8 | C | 13.70 | 631 |
| 60\_2 | 1，10，6 | B&C | 524s | 1，11，8 | C | 9.32 | 682.5 |
| 45S\_1 | 6，7，8 | B | 530s | 8，5，9 | B | 8.21 | 682.5 |
| 45D\_3 | 4，2，9 | B&A | 696s | 3，7，6 | A | 20.39 | 816.5 |
| 30\_4 | 6，9，10，12 | B&C | 680s | 6，7，10 | B&A | 10.93 | 852 |
| 15\_2 | 1，8，11 | B&C | 544s | 8，9，5 | B | 15.24 | 626 |
| 00\_1 | 1，2，3 | --- | 412s | 9，10，8 | --- | 9.22 | 512 |

由上文分析可知每种加载角度下可以得出产生最大应变的点集，现对该监测点的应变进一步处理得到应变率（单位时间下的应变增加量），将不同加载角度下产生最大应变监测点的应变率汇总如下图 4.14所示，从图中汇总全场最大应变点断裂时刻的应变率、断裂前的应变率、断裂时刻应变率增大倍数、应变率归一化（即不同加载角度下的应变率与侧面角焊缝的对比）等数据于表 4.2中。从图表中可以分析如下规律：

（1）对于单边单条角焊缝试件，应变率在接近断裂时刻突然增大，正面角焊缝试件断裂时刻应变率增大22倍，说明试件发生突然破坏，表现出脆性断裂，试件荷载位移曲线呈现“上升”趋势。单边单条角焊缝试件的应变率在断裂时刻在3 s-1至5 s-1之间，并且随着加载角度的减小，断裂时刻应变率降低，荷载位移曲线由“上升”趋势向“平台”趋势过渡。

（2）对于单边双条角焊缝试件，应变率在接近断裂时刻逐步增大，说明试件应变增加较单边单条角焊缝试件更为平缓，在试件达到断裂荷载时刻，试件已经进入塑性流动阶段，变形和应变发展较快，荷载发展较慢，荷载位移曲线表现为有明显的平台段，试件破坏表现出延性断裂。单边双条角焊缝试件的应变率在断裂时刻在0.6 s-1至3 s-1之间，并且随着加载角度的减小，断裂时刻应变率降低，荷载位移曲线由“平台”趋势向“下降”趋势过渡。

（3）不同受力变形失效模式说明了试件的断裂模式及变形能力不同，通常荷载位移曲线具有“上升”趋势的试件发生脆性断裂且变形能力较低；而具有“平台”和“下降”趋势的试件发生延性断裂且变形能力较高。整体上，试件加载角度从90°到0°的变化过程中，试件破坏表现出脆性断裂向延性断裂过渡的趋势，正面角焊缝试件断裂时刻最大应变率是侧面角焊缝的9.69倍。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）90\_5试件最大应变测点应变率 | （b）75\_3试件最大应变测点应变率 |
|  |  |
| （c）60\_2试件最大应变测点应变率 | （d）45S\_1试件最大应变测点应变率 |
|  |  |
| （e）45D\_3试件最大应变测点应变率 | （f）30\_4试件最大应变测点应变率 |
|  |  |
| （g）15\_2试件最大应变测点应变率 | （h）00\_1试件最大应变测点应变率 |
| 图 4.14 不同加载角度下最大应变监测点的应变率发展特征 | |

表 4.2 试件应变率发展情况汇总

| 试件编号 | 全场最大应变点断裂时刻的应变率（s-1） | 全场最大应变点断裂前的应变率（s-1） | 应变率断裂时增大倍数 | 应变率归一化 |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 90\_5 | 5.91 | 0.27 | 21.89 | 9.69 |
| 75\_3 | 4.68 | 0.39 | 12.00 | 7.67 |
| 60\_2 | 3.98 | 0.17 | 23.41 | 6.52 |
| 45S\_1 | 2.90 | 0.58 | 5.00 | 4.75 |
| 45D\_3 | 2.95 | 0.67 | 4.40 | 4.84 |
| 30\_4 | 1.33 | 0.3 | 4.43 | 2.18 |
| 15\_2 | 2.10 | 0.46 | 4.57 | 3.44 |
| 00\_1 | 0.61 | 0.2 | 3.05 | 1.00 |

## 本章小结

本章详细介绍了DIC测量系统的技术特点、适用范围以及工作原理，并且介绍了四种试验中常用的变形信息载体制备的方法，而由于全文试验的位移和应变数据均来自DIC测量系统，为了验证试验数据的有效性和合理性，试验前对DIC测量系统所得数据与传统测量方法（引伸计和应变片）获得的数据进行对比，验证了DIC测量系统的高精度。本章借助DIC测量系统监测角焊缝试件焊缝区域的应变场发展过程可以直观观察到试件率先出现塑性发展的区域和点集、试件全面进入塑性阶段的时刻、断裂时刻应变最大产生的区域和点集、破坏面的角度以及记录下焊缝区域应变随加载过程中的定量数据，主要结论如下：

（1）随着加载角度的减小，最大应变发展路径所在的区域从D区域（靠近试件竖直方向加载过程中的受剪边）向A区域（靠近试件竖直方向加载过程中的受拉边）过渡，这与试件破坏时的断裂角度息息相关，借助DIC全场应变测量系统可以观察到焊缝是否同时断裂的定性特征以及不同加载角度下的角焊缝试件应变发展过程的定量数据，但是无法得出较为精准的断裂面的角度。

（2）随着加载角度的增大，全场最大应变点断裂时刻对应的应变率增大，正面角焊缝试件断裂时刻最大应变率是侧面角焊缝的9.69倍。

（3）对于单边单条角焊缝试件，应变率在接近断裂时刻突然增大，说明试件发生突然破坏，表现出脆性断裂，单边单条角焊缝试件的应变率在断裂时刻在3 s-1至6 s-1之间；对于单边双条角焊缝试件，应变率在接近断裂时刻逐步增大，说明试件应变增加较单边单条角焊缝试件更为平缓，试件破坏表现出延性断裂，单边双条角焊缝试件的应变率在断裂时刻在0.6 s-1至3 s-1之间。

（4）不同受力变形失效模式说明了试件的断裂模式及变形能力不同，通常荷载位移曲线具有“上升”趋势的试件发生脆性断裂且变形能力较低；而具有“平台”和“下降”趋势的试件发生延性断裂且变形能力较高。整体看，试件加载角度从90°到0°的变化过程中，试件破坏表现出脆性断裂向延性断裂过渡的趋势。

# 不同加载角度下角焊缝有限元分析

## 引言

试验研究和有限元分析是目前结构工程研究的两个重要方法，试验分析的结果相比有限元真实直观，可为实际工程中的应用提供最可靠的数据支持，但由于目前试验水平和条件的限制，完全依靠试验来解决实际问题则不太可行。有限元软件省时省力，且可以得到在试验中难以实现的困难数据的获取，因此，近年来有限元分析显得愈发重要。ABAQUS是国际上最先进的大型通用有限元计算分析软件之一，它拥有隐式(Standard)和显式（Explicit）两种求解器，五百多种单元模型，此外还拥有多种材料模型和分析过程等，其在接触与连接类型、几何非线性与材料非线性的处理上具有其他有限元软件无法比拟的优势。[68]

本章首先采用ABAQUS/standard隐式分析处理器建立本文高强钢角焊缝在不同加载角度下试件的有限元模型，将详细介绍有限元模型中所用的材料模型、边界条件和约束设置、单元类型和网格划分，其次考虑材料的退化和失效，采用ABAQUS/Explicit显式动态求解器通过“试错法”对正面角焊缝和侧面角焊缝试件的开裂进行有限元模拟，最后对影响断裂过程的断裂参数和破坏位移这两个参数进行参数分析。

## 有限元模型

* + 1. 金属材料模型

试验所用两种厚度（10mm和20mm）的高强度钢材Q890D以及熔敷金属ER120S-G的本构模型已经在2.4节进行了标定，通过拟合极限荷载前的真实应力应变得到的幂指数的公式，来预测达到断裂时刻的全应力应变曲线，输入到abaqus的塑性模型中。由于焊缝区尺寸较小，无法直接进行焊缝区域的材性试验，焊缝金属的材料模型选用2.4节的熔敷金属标定后的材料模型。

* + 1. 边界条件和约束设置

根据单边单条角焊缝试件在X，Y，Z三个方向上的对称性，单边单条角焊缝试件（加载角度为75°，60°，45°S）建立1/4模型，而加载角度为90°的正面角焊缝试件建立1/8模型。图 5.1给出了模型的荷载和边界条件的设置情况，由于模型的对称性，在对称面上分别约束法向位移，如图中left face/bottom face/transverse face所示。在加载面上，约束了除加载方向外的其它五个方向的自由度，此外将加载面上的节点绑定到一个参考点上进行轴向位移控制加载。

整体上，模型由三个部分组成（盖板Q890D-10mm、底板Q890D-20mm和焊缝ER120S-G），三部分的接触设置如下：（1）盖板和底板间为contact接触，接触需定义法向和切向的接触属性，法向采用硬接触，切向采用罚函数定义的摩擦接触，摩擦系数设为0.45；（2）焊缝的受拉面与盖板合并merge到一起；（3）焊缝的受剪面与底板采用tie接触，其中盖板接触面为主面，焊缝接触面为从面。

对焊缝的受拉面与盖板进行merge操作的优点是：（1）不需要为相交区域定义绑定约束（tie），直接为合并后的新部件划分网格即可；（2）不需要为多个部件逐个定义材料属性，只需为合并后的新部件定义一次材料属性即可；（3）如果需要施加显示体约束（display body），只需为合并后的新部件实体定义一次即可；（4）合并后模型会变得更加简洁。[69]

焊缝的受剪面与底板采用绑定约束（tie constraint）的优点是：分析过程中不再考虑从面节点的自由度，也不需要判断从面节点的接触状态，计算时间会大大缩短。

|  |
| --- |
|  |
| （a）加载角度为90°（正面角焊缝）有限元模型及边界条件——1/8模型 |
|  |
| （b）加载角度为75°角焊缝有限元模型及边界条件——1/4模型 |
|  | |
| （c）加载角度为60°角焊缝有限元模型及边界条件——1/4模型 | |
|  |
| （d）加载角度为45°S角焊缝有限元模型及边界条件——1/4模型 |
| 图 5.1单边单条角焊缝试件有限元模型及边界条件 |

根据单边双条角焊缝试件在X，Y，Z三个方向上的对称性，加载角度为0°，15°，30°，45°D的单边双条角焊缝试件建立1/4模型。

图 5.2给出了模型的荷载和边界条件的设置情况，由于模型的对称性，在对称面上分别约束法向位移。在加载面上，约束了除加载方向外的其它五个方向的自由度，此外将加载面上的节点绑定到一个参考点上进行轴向位移控制加载。

整体上，模型由三个部分组成（盖板Q890D-10mm、底板Q890D-20mm和焊缝ER120S-G），三部分的接触设置如下：（1）盖板和底板间为contact接触，接触需定义法向和切向的接触属性，法向采用硬接触，切向采用罚函数定义的摩擦接触，摩擦系数设为0.45；（2）焊缝的受拉面与盖板合并merge到一起；（3）焊缝的受剪面与底板采用tie接触，其中盖板接触面为主面，焊缝接触面为从面接触设置的优点在前文已经解释，此处不再赘述。

|  |
| --- |
|  |
| （a）加载角度为45°D有限元模型及边界条件——1/4模型 |
|  |
| （b）加载角度为30°角焊缝有限元模型及边界条件——1/4模型 |
|  |
| （c）加载角度为15°角焊缝有限元模型及边界条件——1/4模型 |
|  |
| （d）加载角度为0°（侧面角焊缝）有限元模型及边界条件——1/4模型 |
| 图 5.2单边双条角焊缝试件有限元模型及边界条件 |

* + 1. 网格划分和单元类型

网格划分的合理与否直接影响计算结果精度，网格划分太细，精度稍有提高但计算量却成倍的增加，这是不合理的；网格划分过于粗糙则导致计算结果不准确。有限元模型中底板和盖板采用八结点线性六面体单元二次减缩积分沙漏控制（C3D8R）单元类型，焊缝采用六结点母性三棱柱单元（C3D6）单元类型，由于破坏出现在焊缝处，将焊缝处单元网格划分的较为密集，网格单元尺寸为0.2mm，为了节省计算时间，母材靠近焊缝部分单元网格较小，其他位置的网格密度较稀疏，正面角焊缝试件网格划分如图 5.3所示，有限元模型网格单元类型及网格数量汇总在表 5.1中。

表 5.1 有限元模型网格单元类型及网格数量汇总

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 加载角度（°） | 网格数 | | 单元类型 | | | 网格大小 |
| 底板 | 盖板和焊缝 | 底板 | 盖板 | 焊缝 | 焊缝处 |
| 90 | 5390 | 6125 | C3D8R | C3D8R | C3D6 | 0.2mm |
| 75 | 10300 | 11776 | C3D8R | C3D8R | C3D6 | 0.2mm |
| 60 | 12300 | 14272 | C3D8R | C3D8R | C3D6 | 0.2mm |
| 45S | 16300 | 18212 | C3D8R | C3D8R | C3D6 | 0.2mm |
| 45D | 4300 | 32196 | C3D8R | C3D8R | C3D6 | 0.2mm |
| 30 | 4300 | 75777 | C3D8R | C3D8R | C3D6 | 0.2mm |
| 15 | 4300 | 77669 | C3D8R | C3D8R | C3D6 | 0.2mm |
| 0 | 1500 | 5540 | C3D8R | C3D8R | C3D6 | 0.2mm |
| C3D8R: 八结点线性六面体单元, 减缩积分, 沙漏控制. | | | | | | |
| C3D6: 六结点母性三棱柱单元. | | | | | | |

|  |
| --- |
| C:\Users\Administrator\Desktop\90mesh.png |
| 图 5.3正面角焊缝试件有限元模型网格划分 |

## 有限元隐式分析

ABAQUS/Standard是一个通用分析模块，它能够求解广泛领域的线性和非线性问题，包括静态分析、动态分析，以及复杂的非线性耦合物理场分析等。在每一个求解增量步中，ABAQUS/Standard隐式地求解方程组。ABAQUS/Standard提供并行的稀疏矩阵求解器，对各种大规模问题都能十分可靠地快速求解。ABAQUS能自动控制结构的收敛情况和分析求解过程，若经过16次迭代计算仍不能满足精度要求，或者后一次迭代比前一次的误差要大，ABAQUS会自动把增量步调整为原来的四分之一再进行迭代计算。如果分析结果仍然不收敛，软件会按照这一方法继续调增量步，直到增量步达到用户预先定义的最小增量步。若连续两个增量步的计算都只用了小于5次迭代，求解结果就收敛了，ABAQUS则将增量步自动调整为原来的1.5倍进行迭代，这些设置均可以设为默认，用户也可以根据具体收敛情况进行相应修改。本节将采用ABAQUS/Standard隐式求解器对不同加载角度下的角焊缝试件进行有限元模拟。

* + 1. 单边单条角焊缝试件

对于单边单条角焊缝试件，焊缝长度不存在起弧和灭弧区的影响，在有限元模型中焊缝的实际长度就是设计长度，有限元模拟的荷载位移曲线与试验的荷载位移曲线对比如图 5.4至图 5.7所示。由图可知，有限元模拟的荷载位移曲线和试验曲线吻合较好，但是由于有限元隐式分析不考虑材料强度损伤和开裂（单元删除），使得有限元得出的荷载位移曲线不存在下降段，曲线较试验曲线越来越高。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 5.4 90°试件荷载位移曲线有限元结果 | 图 5.5 75°试件荷载位移曲线有限元结果 |
|  |  |
| 图 5.6 60°试件荷载位移曲线有限元结果 | 图 5.7 45°S试件荷载位移曲线有限元结果 |

* + 1. 单边双条角焊缝试件

对于单边双条角焊缝试件，每个试件存在长度不一的灭弧区，焊缝长度有两种情况：a）将焊缝的起弧和灭弧区域的长度都算进来，此方法得到的焊缝长度认为是实际焊缝长度，记为；b）仅考虑工作焊缝处主板和搭接板的搭接长度，此方法得到的焊缝长度认为是有效焊缝长度，记为。有限元分析时考虑两种焊缝长度每种加载角度建立两个有限元模型，以加载角度为45°D为例，两种有限元模型如图 5.8所示，其中FEM-Lt是根据实际焊缝长度建立的有限元模型，FEM-Le是根据有效焊缝长度建立的有限元模型。有限元模拟的荷载位移曲线与试验的荷载位移曲线对比如图 5.9至图 5.12所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| （a）实际焊缝长度FEM-Lt | | （b）有效焊缝长度FEM-Le |
| 图 5.8 45°D试件的两种有限元模型 | | |
|  |  | | |
| 图 5.9 45°D试件荷载位移曲线有限元结果 | 图 5.10 30°试件荷载位移曲线有限元结果 | | |
|  |  | | |
| 图 5.11 15°试件荷载位移曲线有限元结果 | 图 5.12 00°试件荷载位移曲线有限元结果 | | |

由图可知，有限元FEM-Lt模型模拟的荷载位移曲线和试验曲线吻合较好，FEM-Le模型模拟的荷载位移曲线低于试验曲线。两种有限元模型均采用隐式分析，不考虑材料强度损伤和开裂（单元删除），使得有限元得出的荷载位移曲线不存在下降段，曲线较试验曲线越来越高。

* + 1. 隐式分析结果与试验对比

正面角焊缝和侧面角焊缝最终的变形及Mises应力云图如图 5.13和图 5.14所示。可以看出，应力应变都在焊根处集中发展，这与DIC测量系统对焊缝区域应变场发展历程的监测结果相一致，焊缝区最大应变出现在焊根处。根据应力和应变的云图，可以粗略看出有限元模拟得到的正面角焊缝和侧面角焊缝试件的断裂面角度分别为15°/45°，这与试验实测结果17°/54°比较接近。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）等效应力云图 | （b）等效塑性应变云图 |
| 图 5.13 正面角焊缝试件有限元隐式分析模拟的最终变形和应力云图 | |
| （a）等效应力云图 | （b）等效塑性应变云图 |
| 图 5.14 侧面角焊缝试件有限元隐式分析模拟的最终变形和应力云图 | |

表 5.2 有限元隐式分析结果与试验对比

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 加载角度（°） | 试验 | | FEM-Le | | FEM-Lt | |
| 极限荷载（kN） | 极限位移（mm） | 极限位移对应的荷载（kN） | 误差 | 极限位移对应的荷载（kN） | 误差 |
| 90 | 556.46 | 0.34 | 508.80 | 8.6% | - | - |
| 75 | 558.80 | 0.34 | 562.70 | 0.7% | - | - |
| 60 | 605.67 | 0.30 | 590.21 | 2.6% | - | - |
| 45S | 665.54 | 0.38 | 664.32 | 0.2% | - | - |
| 45D | 959.23 | 0.27 | 939.45 | 2.1% | 1006.22 | 4.9% |
| 30 | 1079.01 | 0.40 | 993.27 | 7.9% | 1087.24 | 0.8% |
| 15 | 776.49 | 0.32 | 658.45 | 15.2% | 746.45 | 3.9% |
| 0 | 536.23 | 0.46 | 442.54 | 17.5% | 472.74 | 11.8% |
| 备注：侧面角焊缝的六个重复试件离散型较大，表中其极限位移的选取方法为去掉最大值与最小值后的平均值。 | | | | | | |

由于有限元隐式分析得到的模拟曲线与试验曲线在试件达到极限荷载之前吻合较好，但因不考虑材料强度损伤和开裂（单元删除），使得荷载位移曲线不存在下降段。所以将根据试验极限位移得到有限元极限荷载与试验的极限荷载对比，来判断有限元隐式分析模拟的效果。有限元隐式分析结果与试验对比结果见表 5.2。从中分析可得：

（1）正面角焊缝试件有限元得到的极限荷载低于试验数据，相对误差为8.6%；其余单边单条角焊缝试件模拟误差非常小，平均误差仅为1.2%。

（2）针对有限元FEM-Le模型，侧面角焊缝试件试验离散型较大，有限元模拟结果与平均值也有较大的误差（17.5%）；其余单边双条角焊缝试件有限元模拟结果平均误差为8.4%。

（3）有限元FEM-Lt模型得到的极限荷载比FEM-Le模型更接近试验实测值，除了侧面角焊缝有较大的误差（11.8%）外，其余单边双条角焊缝试件有限元模拟结果平均误差仅为4.8%。

（4）总体上，单边单条角焊缝试件有限元模拟相较于单边双条角焊缝试件模拟效果更佳。

## 有限元显式分析

ABAQUS/Explicit可以进行显式动态分析，适用于求解：（1）复杂的接触问题，例如模拟成型问题；（2）高速动力学事件；（3）复杂的后屈曲问题；（4）高度非线性的准静态问题，特别是用于模拟短暂、瞬时的动态试件，如冲击和爆炸问题；（5）材料的退化和失效问题。ABAQUS/Explicit的求解方法是在时间域中以很小的时间增量步向前推进结果，而无需再每一个增量步求解耦合的方程系统，或者生成总体刚度矩阵。对于角焊缝，加载过程通常伴随着材料的开裂（焊根处开始）和失效，为了建立更精确地模型，需要考虑材料的退化和失效，并且为了解决隐式分析ABAQUS/Standard开裂后收敛困难的问题，本节将采用ABAQUS/Explicit显式动态求解器对正面角焊缝和侧面角焊缝试件的开裂进行预测。

* + 1. 准静态响应分析

**光滑幅值曲线**

ABAQUS/Explicit在模拟静力分析时，需要设置合适的加载参数以确保加载过程中不产生显著的动力响应，首先要求施加的荷载尽可能地光滑。ABAQUS/Explicit中具有一条简单、固定的光滑加载幅值曲线为平滑分析步（smooth step），它自动地创建一条光滑的加载曲线，该曲线的一阶和二阶导数是光滑的，在每组数据点上，它的斜率都为零，使用这种幅值曲线加载，允许用户进行准静态分析，而不会产生由于加载速率不连续引起的波动。

**能量平衡**

评估模拟是否产生了正确的准静态响应，最具有普遍意义的方式是研究模型中的各种能量，下式( 5.1 )是在ABAQUS/Explicit中的能量平衡方程：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 5.1 ) |

式中，是内能（包括弹性和塑性应变能），是粘性耗散吸收的能量，是动能，是摩擦耗散吸收的能量，是外力所做的功，是在系统中的总能量。通常情况下，变性材料的动能占内能的比例不超过5%至10%时，可以认为模拟符合准静态加载。

**质量放大**

质量放大（mass scaling）可以在不需要人为提高加载速率的情况下降低运算成本，稳定时间增量与材料密度之间的关系如下( 5.2 )所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 5.2 ) |

式中，为稳定时间增量，是特征单元长度， 为材料的膨胀波速，线弹性材料在泊松比为零时的膨胀波速为公式( 5.3 )所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 5.3 ) |

式中，是弹性模量， 是材料密度。

根据上述公式，若将材料密度增加倍，则波速降低*f*倍，从而稳定时间增量将提高*f*倍，同样的分析所需要的增量步就会减少，这正是质量放大的目的。但是放大质量对惯性效果与人为地提高加载速率恰好具有相同的影响；因此，过度地质量放大，正像过度地提高加载速率，使得动能增大。为了避免错误发生，需要在质量放大后，监测模型的动能与内能，使其达到静力加载的要求。

* + 1. 断裂机制模型

钢材由于微观结构、应力条件和温度的不同，可以有多种断裂模式，如稳定的延性断裂和不稳定的脆性断裂，这些不同的断裂模式是由不同条件下起作用的断裂机制所引起的。结构工程中普遍使用的钢材经常出现延性断裂并伴随着大量的塑性变形，这种类型的断裂大体有空穴形核，扩张和聚合几个过程，如图5.15所示：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
| 图5.15 微空穴形核、扩张和聚合机理 | | | |

如果不考虑材料在加载过程中的损伤情况，有限元模型在数值模拟的整个加载过程中荷载不存在下降段，为了建立更精确的模型，需要考虑材料的退化和失效。材料的失效与多种因素有关并夹着复杂的物理机制，常见的断裂模型有临界断裂应变准则、空穴扩张模型（VGM）及应力修正临界应变模型（SMCS）、最大剪应力断裂准则以及经验型Johnson-Cook断裂准则等。其中，应力修正临界应变模型（SMCS）的断裂判据如( 5.4 )所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 5.4 ) |

如果将校准的单调荷载作用下的SMCS模型为断裂判据使用在ABAQUS有限元软件中，需要自编子程序VUMAT，但是在本节的显式分析中使用ABAQUS自带的Johnson-Cook Damage模型来模拟角焊缝试件的断裂过程，该模型仅在ABAQUS/Explicit可用。G.R.Johnson（1985）等[70] 考虑应力三轴度、温度及应变率效应，扩展了Hancock[71] -Mackenzie[72] 的断裂模型形成新的断裂模型如公式( 5.5 )所示:

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( 5.5 ) |

式中：为材料参数；为应力三轴度，定位为，其中静水压力，为等效应力；为无量纲等效塑性应变率，为参考应变率，为无量纲温度参数，为参考温度，为材料熔化温度。Johnson-Cook失效模型利用累积损伤的思想考虑了应力状态、应变率及温度变化对材料破坏的影响，且认为损伤并不影响材料强度，损伤变量初始值为0，当达到1时，材料即失效。

对比公式( 5.4 )和( 5.5 )可知，当时，Johnson-Cook模型可以等同为SMCS模型，即为模型中的断裂参数。

* + 1. 正面和侧面角焊缝断裂模拟

文献[74] 采用ABAQUS有限元软件建立了高强钢Q890搭配焊材ER110/ER120的正面角焊缝和侧面角焊缝模型，进行了角焊缝的断裂模拟，但是该文献并没有进行试验研究，不能确定有限元方法的适用性与合理性，因此，为了模拟本文试验中正面角焊缝和侧面角焊缝的断裂过程，使用ABAQUS自带的Johnson-Cook模型。

该模型包括损伤起始准则（damage initiation criteria）和损伤演化规律（damage evolution）的定义，当单元所有积分点应力到达零时，激发单元删除（delete element）选项使其从网格中除去。Johnson-Cook模型中参数取值为，为模型中的断裂参数，即定义了损伤起始点，除此之外破坏位移与损伤演化有关，不能从试验中标定，其与有限元模型中网格大小有关，后续章节将对和这两个参数对断裂过程的影响进行参数分析。

本节有限元显式分析的模型中正面角焊缝试件的断裂参数为 ，侧面角焊缝试件的断裂参数为 ，有限元显式分析得到的荷载位移曲线与试验曲线的对比如图 5.16和图 5.17所示，有限元显式分析得到的正面角焊缝和侧面角焊缝试件在断裂前和断裂后的变形应力云如图 5.18至图 5.21所示，有限元显式分析结果与试验对比结果见表 5.3中。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 5.16 正面角焊缝试件荷载位移曲线有限元结果 | 图 5.17 侧面角焊缝试件荷载位移曲线有限元结果 |

|  |  |
| --- | --- |
| （a）等效应力云图 | （b）等效塑性应变云图 |
| 图 5.18 正面角焊缝试件有限元显式分析断裂前变形和应力云图 | |
| （a）等效应力云图 | （b）等效塑性应变云图 |
| 图 5.19 正面角焊缝试件有限元显式分析断裂后变形和应力云图 | |
| （a）等效应力云图 | （b）等效塑性应变云图 |
| 图 5.20 侧面角焊缝试件有限元显式分析断裂前变形和应力云图 | |
| （a）等效应力云图 | （b）等效塑性应变云图 |
| 图 5.21 侧面角焊缝试件有限元显式分析断裂后变形和应力云图 | |

表 5.3 有限元显式分析结果与试验对比

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 加载角度（°） | 试验 | | 有限元 | | | |
| 极限荷载（kN） | 极限位移（mm） | 极限荷载-FEM（kN） | 相对误差 | 极限位移-FEM（mm） | 相对误差 |
| 90 | 556.46 | 0.34 | 583.43 | 4.6% | 0.34 | 0.7% |
| 0 | 536.23 | 0.46 | 624.99 | 14.2% | 0.47 | 2.4% |

从图表分析可得：

（1）有限元显式分析模型FEM-EXP考虑了材料强度损伤和开裂（单元删除），有限元得到的荷载位移曲线和试验曲线吻合较好，并且在达到极限荷载后有下降段。

（2）正面角焊缝有限元模拟得到的断裂面角度在10°左右，侧面角焊缝有限元模拟得到的断裂面角度大约在45°。

（3）从正面角焊缝和侧面角焊缝的应力及应变云图可以看到，试件在断裂前焊根处应力集中，裂纹从焊根处产生、发展，当试件断裂后焊缝区域应力及应变急剧下降。

（4）从有限元显式分析结果与试验对比中可得，正面角焊缝和侧面角焊缝有限元得到的极限荷载都比试验值高，其相对误差分别为4.6%/14.2%；正面角焊缝和侧面角焊缝有限元得到的极限位移与试验值接近，其相对误差仅为0.7%/2.4%；总体上，正面角焊缝试件有限元模拟结果优于侧面角焊缝有限元模拟。

* + 1. 参数分析
       1. 不同断裂参数对断裂过程的影响

结合公式( 5.4 )和( 5.5 )可知，塑性应变与应力三轴度的关系如下式( 5.6 )，从中看出断裂参数的取值对塑性应变与应力三轴度的关系具有很大影响，本节拟研究断裂参数的取值见表 5.4，不同断裂参数取值对塑性应变和应力三轴度关系曲线的影响如图 5.22所示，由图可知，当断裂参数增加，达到临界等效塑性应变时对应的应力三轴度越高。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 5.6 ) |

表 5.4断裂参数D2取值

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 第一种情况 | 第二种情况 | 第三种情况 |
| 正面角焊缝 | D2=1 | D2=1.5 | D2=2.2 |
| 侧面角焊缝 | D2=0.25 | D2=0.3 | D2=0.35 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | |
| 图 5.22 不同断裂参数D2取值对等效塑性应变与应力三轴度关系曲线的影响 | | |
|  | |  |
| 图 5.23 不同断裂参数D2对正面角焊缝荷载位移曲线的影响 | | |
|  |  | |
| 图 5.24 不同断裂参数D2对侧面角焊缝荷载位移曲线的影响 | | |

不同断裂参数取值对正面和侧面角焊缝荷载位移曲线的影响如图 5.23和图 5.24所示，由此图分析可得：

（1）断裂参数取值越小，荷载位移曲线越早出现下降段，意味着在加载过程中当位移越小时越先出现断裂，这是因为断裂参数越小，试件断裂时对应的临界等效塑性应变和应力三轴度越低。

（2）侧面角焊缝试件对应的断裂参数小于正面角焊缝试件对应的断裂参数，这是因为在单调加载过程中，侧面角焊缝处于纯剪状态，正面角焊缝承受正应力和剪应力，前者的应力三轴度低于后者。

（3）断裂参数定义了有限元模型的损伤起始点，不同的断裂参数使得模型具有不同的断裂起始点，每个试件的极限荷载也不同，断裂参数越大，试件的极限荷载越高。

* + - 1. 不同破坏位移对断裂过程的影响

本节拟研究破坏位移的取值见表 5.5，不同破坏位移取值对正面和侧面角焊缝荷载位移曲线的影响如图 5.25和图 5.26所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 5.25 不同破坏位移对正面角焊缝荷载位移曲线的影响 | |
|  |  |
| 图 5.26不同破坏位移对侧面角焊缝荷载位移曲线的影响 | |

表 5.5破坏位移Up取值

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 第一种情况 | 第二种情况 | 第三种情况 |
| 正面角焊缝/侧面角焊缝 | Up=0.005 | Up=0.01 | Up=0.015 |

由图表分析可得：

（1）破坏位移的取值不同时，正面角焊缝试件和侧面角焊缝试件的极限荷载基本一致，即破坏位移的取值与有限元模型的损伤起始点无关。（2）破坏位移与有限元模型网格大小有关，其影响的是有限元模型发生破坏后达到极限荷载所发生的变形，当破坏位移取值越小，有限元模拟的极限位移越小。

## 本章小结

本章首先采用ABAQUS/standard隐式分析处理器建立了本文高强钢角焊缝在不同加载角度下试件的有限元模型，详细介绍了有限元模型中所用的材料模型、边界条件和约束设置、单元类型和网格划分，其次考虑材料的退化和失效，采用ABAQUS/Explicit显式动态求解器对正面角焊缝和侧面角焊缝试件的开裂进行有限元模拟，有限元结果与试验数据的对比验证了有限元模型的可靠性与合理性，最后对影响断裂过程的断裂参数和破坏位移这两个参数进行参数分析，主要结论如下：

（1）有限元隐式分析模型可以近似模拟出试件的破坏面和承载力，有限元模拟的荷载位移曲线与试验曲线在试件达到极限荷载之前吻合较好，达到极限荷载后，由于有限元模型未考虑材料的断裂行为，导致有限元的模拟曲线持续上升，无法模拟得到下降段。

（2）单边单条角焊缝试件有限元隐式分析得到的承载力与试验断裂位移对应的承载力误差为3%，单边双条平均误差为5.35%。

（3）有限元显式分析模型考虑了材料强度损伤和开裂（单元删除），有限元得到的荷载位移曲线和试验曲线吻合较好，并且在达到极限荷载后有下降段。正面角焊缝和侧面角焊缝有限元显式分析得到的极限荷载都比试验值高，其相对误差分别为4.6%/14.2%；有限元得到的极限位移与试验值接近，其相对误差仅为0.7%/2.4%。

（4）断裂参数定义了有限元模型的损伤起始点，不同的断裂参数使得模型具有不同的断裂起始点，每个试件的极限荷载也不同，断裂参数越大，试件的极限荷载越高。破坏位移的取值与有限元模型的损伤起始点无关，其影响的是有限元模型发生破坏后达到极限荷载所发生的变形，当破坏位移取值越小，有限元模拟的极限位移越小。

# 结论与展望

## 本文的主要工作

本文的主要目的是研究高强钢角焊缝连接的力学性能，为我国高强钢角焊缝连接承载力的计算提供试验和研究基础，本文的主要研究工作如下：

本文首先对试验用高强度结构钢材Q890D和高强度焊材ER120S-G进行了单调拉伸材料力学性能试验研究，获得其力学性能指标，采用“试错法”对母材和焊材的本构模型进行标定，并利用ABAQUS有限元软件对试验结果进行验证。其次对48个不同加载角度下的高强钢搭接接头角焊缝试件进行单调拉伸加载并且使用DIC测量系统对整个试件应变场的发展历程进行采集，借助DIC测量系统GOM软件对高强钢角焊缝试件单调拉伸加载中应变发展特征进行详细地分析，并且通过计算全场最大应变点集的应变率得出不同加载角度下试件失效模式的演变规律。接着对角焊缝的力学性能（包括破坏角度、变形能力、极限强度和承载能力等方面）进行汇总并对比分析，着重研究加载角度对角焊缝力学性能的影响。然后采用ABAQUS/standard隐式分析处理器建立本文高强钢角焊缝在不同加载角度下试件的有限元模型，其次考虑材料的退化和失效，采用ABAQUS/Explicit显式动态求解器对正面角焊缝和侧面角焊缝试件的开裂进行有限元模拟，接着对影响断裂过程的断裂参数和破坏位移这两个参数进行参数分析。

## 本文的主要结论

在本文的研究基础上，得到以下结论：

（1）加载角度为45°的角焊缝试件有两种构造形式（单边单条45S和单边双条45D），两者的延性系数和平均极限强度基本一致，断裂荷载与极限荷载的比值均为0.93，断裂位移与极限位移的比值分别为1.07/1.05，断裂角度分别为18°/25°。

（2）高强钢角焊缝在不同加载角度下的破坏角度与普通钢基本一致，随着加载角度的减小，破坏角度增大。加载角度大于45°的单边单条角焊缝破坏角度更集中，分布在16°-18°之间；加载角度小于45°的单边双条角焊缝破坏角度较为离散，分布在24°-55°之间；正面角焊缝和侧面角焊缝的平均破坏角度分别为17.25°和54.90°。

（3）单边单条角焊缝试件断裂荷载和极限荷载非常接近，通常情况下在92%-95%之间，试件断裂位移与极限位移的比值在1.04-1.09之间，大部分试件的最大变形不超过0.4mm；单边双条角焊缝试件断裂荷载与极限荷载的比值在81%-93%之间，断裂时对应的位移与极限位移比值在1.1-2.2之间，大多数试件的最大变形在0.4-1mm之间。

（4）加载角度与试件的初始线刚度呈正相关，与试件的延性系数呈负相关。正面角焊缝的初始线刚度是侧面角焊缝的1.29倍，侧面角焊缝的位移延性系数是正面角焊缝的1.42倍。

（5）随着加载角度的增大，角焊缝的极限强度提高。正面角焊缝的极限强度最高，侧面角焊缝的极限强度最低，正面角焊缝试件的平均极限强度是侧面角焊缝的1.53倍。

（6）对于高强钢角焊缝，采用三种规范（欧洲规范/美国规范/中国规范）得到的承载力都偏于保守，其中欧洲规范未考虑加载角度对承载力的影响，不推荐欧洲规范；中国规范对承载力的预测最为保守，预测值与试验值的平均比值仅为0.342；三种常用的规范中只有美国规范对承载力的预测更接近试验值，预测值与试验值的平均比值为0.577。

（7）通过DIC测量系统监控焊缝区域的应变发展特征可观察到，随着加载角度的增大，全场最大应变点断裂时刻对应的应变率增大。对于单边单条角焊缝试件，应变率在接近断裂时刻突然增大，说明试件发生突然破坏；对于单边双条角焊缝试件，应变率在接近断裂时刻逐步增大，说明试件应变增加较单边单条角焊缝试件更为平缓。正面角焊缝试件断裂时刻最大应变率是侧面角焊缝的9.7倍。

（8）有限元隐式分析模型可以近似模拟出试件的破坏面和承载力，有限元模拟的荷载位移曲线与试验曲线在试件达到极限荷载之前吻合较好，达到极限荷载后，由于有限元模型未考虑材料的断裂行为，导致有限元的模拟曲线持续上升，无法模拟得到下降段，单边单条角焊缝试件有限元得到的承载力与试验断裂位移对应的承载力误差为3%，单边双条平均误差为5.35%。

（9）有限元显式分析考虑了材料强度损伤和开裂（单元删除），采用Johnson-Cook模型通过“试错法”可以模拟得到下降段，有限元得到的荷载位移曲线和试验曲线吻合较好。正面角焊缝和侧面角焊缝有限元显式分析得到的极限荷载都比试验值高，其相对误差分别为4.6%/14.2%；有限元得到的极限位移与试验值接近，其相对误差仅为0.7%/2.4%。

（10）有限元显式分析断裂参数定义了有限元模型的损伤起始点，断裂参数越大，试件的极限荷载越高；破坏位移的取值与有限元模型的损伤起始点无关，其影响的是有限元模型发生破坏后达到极限荷载所发生的变形，当破坏位移取值越小，有限元模拟的极限位移越小；本文断裂参数的取值范围是0.25至2.2，破坏位移的取值范围是0.005至0.015。

## 展望

高强钢焊接后的力学性能是由一系列的影响因素决定的，本文的研究虽然取得了初步的成果，但仍然有待进一步深入的研究和补充，主要体现在以下方面：

（1）试验设计方面：单边双条角焊缝试件存在长度不一的灭弧区，这对角焊缝的承载力有一定影响，因此在以后的试验设计中可以通过机加工的方法将灭弧区切除，以保证焊缝质量来减小试验数据的离散型。

（2）DIC测量方面：借助DIC全场应变测量系统可以观察到焊缝区域应变场的发展特征，但是无法得出较为精准的断裂面角度，并且由于在试验时DIC设备的拍摄方式无法得到整条焊缝的应变发展特征，因此在以后的试验过程中可以调整设备的拍照角度，来获得整条焊缝沿着焊缝长度方向的应变分布和发展特征。

（3）有限元模拟方面：断裂预测过程需要进行大量的计算，尤其是在显式分析模块中为了模拟准静态加载过程导致计算速度非常慢，因此需要采用高性能的计算平台以提高计算效率；另外本文仅对正面和侧面角焊缝试验进行断裂模拟，在以后的研究中可对其余加载角度的断裂进行有限元模拟。

# 参考文献

1. 施刚，班慧勇，石永久，et al.高强度钢材钢结构研究进展综述[J]. 工程力学， 2013， 30(1):1-13.
2. SPRARAGEN，W.，and CLAUSSEN，G.E. 1942. Static tests of fillet and plug welds-a review of the literature from 1932 to January 1，1940. Welding Journal，Research Supplement，21(4): 161s- 197s.
3. ARCHER，F. E.，FISCHER，H. K.，and KITCHEN，E. M. 1959. Fillet welds subject to bending and shear. Civil Engineering and Public Works Review，54(634): 455-458.
4. NAKA，T.，and KATO，B.1966. Deformations and strength of end fillets. Journal of the Faculty of Engineering，University of Tokyo，XXVIII(3): 239-254.
5. LIGTENBERG，F. L. 1968. International test series. Final Report，IIW Document XV-242-68，International Institute of Welding，London，England.
6. HIGGINS，T. R.，and PREECE，F. R. 1969. Proposed working stresses for fillet welds in building construction. Engineering Journal，American Institute of Steel Construction，6(1): 16-20.
7. Kuhlmann U，Günther H，Rasche C. High-strength steel fillet welded connections. Steel Construction，2008，1(1): 77～84.
8. Rasche C, Kuhlmann U. Investigations on longitudinal fillet welded lap joints of HSS，2009.
9. Rasche C，Kuhlmann U. The load bearing capacity of fillet welded connections of high strength steels International Association for Bridge and Structural Engineering，2010.
10. Günther H，Hildebrand J，Rasche C，et al. Welded Connections of High-Strength Steels For The Building Industry. Welding in the World，2012，56(5): 86～106.
11. Björk T，Toivonen J，Nykänen T. Capacity of Fillet Welded Joints Made of Ultra High-Strength Steel. Welding in the World，2012，56(3-4): 71～84.
12. Björk T，Penttilä T，Nykänen T. Rotation capacity of fillet weld joints made of high-strength steel. Welding in the World，2014，58(6): 853～863.
13. Björk T，Ahola A，Tuominen N. On the design of fillet welds made of ultra-high-strength steel. Welding in the World，2018，62(5): 985～995.
14. 魏晨熙. Q460高强度钢材焊缝连接受力性能和计算模型研究[D].清华大学，2013.
15. 施刚，陈玉峰.高强度钢材焊缝连接试验研究[J].工业建筑，2016，46(7).
16. 郭小农，刘晓，罗永峰，et al. Q690高强钢焊缝连接承载力试验研究[J].工业建筑，2016， 46(7).
17. 李金风. Q345角焊缝焊接接头力学性能的实验研究和数值模拟[D].山东理工大学，2016.
18. 徐忠根，周苗倩，郭俊宇，et al.局部加强的三面围焊角焊缝力学性能研究[J].工业建筑，2018(7).
19. FREEMAN，F. R. 1932. Strengthof arc-weldedjoints. Welding Journal，ll(6): 16-24.
20. HANKINS，G. A，and ALLAN，G. W. 1934. Second report on the steel structures research committee. His Majesty's Stationary Office，London，England，pp. 319-332，360-366.
21. VANDEPERRE，I. J.，and JOUKOFF，A. 1939. Le calcul des constructions soudees. A de Boeck，Brussels，Belgium.
22. BUTLER，L. J.，and KULAK，G. L. 1971. Strength of fillet welds as a function of direction of load. Welding Journal，Welding Research Supplement，50(5): 231s-234s.
23. CISC. 1984. Handbook of steel construction. 4th ed. Canadian Institute of Steel Construction， Willowdale，Ont
24. CLARK，P. J. 1971. Basis of design for fillet-welded joints under static loading. Proceedings， Conference on Improving Welded Product Design，The Welding Institute，Cambridge， England，Vol. 1，pp. 85-96.
25. SWANNELL，P.，and SKEWES，I. C. 1 9 7 9 . The design of welded brackets loaded in plane: elastic and ultimate load techniques Australian Welding Research Association Report P6-8-77. Australian Welding Research，7: 28-59.
26. BIGGS，M. S.，CROFTS，M. R.，HIGGS，J. D.，MARTIN， L. H.，and Tozoc~us，A. 1981. Failure of fillet weld connections subject to static load. Conference on Joints in Structural Steelwork，Proceedings，Teelongitudinal Polytechnic，Pentech Press，London，England， pp. 1.92-1.109.
27. NEIS，V. V. 1985. New constitutive law for equal leg fillet welds. ASCE Journal of the Structural Division，lll(8): 1747-1759.
28. MARSH，C. 1985. Strength of aluminum fillet welds. Welding Journal，Welding Research Supplement，64(12): 335s-338s.
29. KENNEDY，D. J. L.，and KRIVIAK，G. J. 1985. The strength of fillet welds under longitudinal and transverse shear: a paradox. Canadian Journal of Civil Engineering，12: 226-231.
30. Miazga G S，Kennedy D J L. Behaviour of fillet welds as a function of the angle of loading. Canadian Journal of Civil Engineering，1989，16(4): 583～599.
31. Lesik D F，Kennedy D J L. Ultimate strength of fillet welded connections loaded in plane. Canadian Journal of Civil Engineering，1990，17(1): 55～67.
32. . EN 1993-1-12. Eurocode 3 - Design of steel structures-Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S700.
33. AWS D1.1-D1.1M-2015 Structural Welding Code-Steel.钢结构焊接规范.
34. 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50017-2017.钢结构设计标准.
35. . EN 1993-1-8. Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-8: Design of joints
36. . ANSI/AISC 360-10. ANSI/AISC 360-10 Specification for Structural Steel Buildings
37. 李艳，杨建勋，周平，等.焊接热输入对Q890D高强钢焊接接头力学性能及微观组织影响[C] 全国轧钢生产技术会. 2012.
38. 孙建雄，李亚江，姚永威，et al.焊接热输入对Q690／Q890高强钢GMAW接头裂纹及显微组织的影响[J]. 现代焊接，2013(5):25-28.
39. 杜全斌. 890MPa级TMCP高强钢焊接性研究[D]. 昆明理工大学，2013.
40. 杨喜胜，杨滨，彭云， et al. 低合金调质高强钢焊接软化行为研究[J]. 热加工工艺，2013， 42(17):32-36.
41. 孙红.多向角焊缝节点受力性能和设计方法研究[D]. 西安建筑科技大学，2012.
42. 张有振，杨璐，赵梦晗等. 奥氏体型S30408不锈钢角焊缝连接承载性能有限元分析[J]. 建筑钢结构进展，2018，20(1):39-47.
43. 邹宇明.数字图像相关（DIC）方法在钢铁材料力学性能测试中的应用研究[D]. 2017.
44. 陈庆顺.小型非接触式材料力学性能拉伸试验机的研制与试验研究[D]. 2018.
45. Peters W H，Ranson W F. Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis，Opt. Eng. 1981，21: 427~431.
46. Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments， 1981，14:1270~1273.
47. Chu T C，Ranson W F，Sutton M A，et al. Applications of Digital Image Correlation Techniques to Experimental Mechanics. Exp. Mech，1985，25: 232~244.
48. Kahn-Jetter Z L，Chu T C. Three dimensional displacement measurement using digital image correlation and photogrammic analysis [J]. Experimental Mechanics，1990，30: 10-16.
49. Zink A G，Davidson R W，Hamna R B. Experimental measurement of the strain distribution in double overlap wood adhesive joints[J]. Journal of Adhesion，1996，56: 27-43.
50. Chevalier L，Calloch S，Hild F，Marco Y. Digital image correlation used to analyze the multi-axial behavior of rubber-like materials. European Journal of Mechanics A: Solids，2001， 20(1): 169-187.
51. 高建新.数字散斑相关方法及其在力学测量中的应用[D]. 清华大学，1989.
52. 杭超，杨广，李玉龙，et al.数字图像相关方法在焊缝材料力学性能测试中的应用[J].航空学报，2013，34(10).
53. 张睿诚.数字图像相关方法在应变测量中的应用研究[D].重庆大学.2017.
54. 朱飞鹏，孔德阳，龚琰，et al. 基于三维DIC方法的高强钢拉伸力学性能测定[J].力学季刊，2018(2).
55. 曹良裕，魏战江.钢的碳当量公式及其在焊接中的应用[J]. 材料开发与应用， 1999，14(1):39-43.
56. GBT 228.1-2010. 金属材料 拉伸试验第1部分：室温试验方法.
57. GB 16270-2009. 高强度结构用调质钢板.
58. GB 2652-2008T. 焊缝及熔敷金属拉伸试验方法.
59. Matic P, Jolles M I . Defect，Constitutive Behavior and Continuum Toughness Conlongitudinalrations for Weld Integrity Analysis[J]. 1988.
60. Khoo H A，Cheng J， Hrudey T M. Determine steel properties for large strain from a standard tension test，2002.
61. Sun Feifei，Ran Mingming，Li Guoqiang et al. Experimental and numerical study of high-strength steel butt weld with softened HAZ. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings，2018，171(8): 583-597.
62. GB50205. 钢结构工程施工及验收规范.
63. GB 50661-2011. 钢结构焊接规范.
64. 朱奇，郝文峰，陈雷， et al.微尺度散斑制备方法研究及应用进展评价[J].实验力学， 2018.
65. Wang H ，Xie H ，Li Y ，et al. Fabrication of micro-scale speckle pattern and its applications for deformation measurement[J]. Measurement Science and Technology，2012，23(3):035402.
66. 何广龙.微尺度数字图像相关方法和技术研究[D].
67. Aramis. User manual — software. v6.1 rev.b ed.. Braunschweig， Germany: GOM mbH， 2009.
68. 石亦平，周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]．北京：机械工业出版社，2006.
69. 曹金凤，石亦平. ABAQUS有限元分析常见问题解答[M]．北京：机械工业出版社，2013.
70. JOHNSON G R，COOK W H． Fracture characteristics of three metals subjected to various strains，strain rates，temperatures and pressures［J］． Engineering Fracture Mechanics，1985，21: 31-48.
71. HANCOCK J W，MACKENZIE A C．On the mechanisms of ductile failure in high strength steels subjected to multi-axial stress-states［J］．Journal of the Mechanics and Physics of Solids，1976，24( 2) : 147-169．
72. MACKENZIE A C，HANCOCK J W，BＲOWN D K．On the influence of state of stress on ductile failure initiation in high strength steels［J］．Engineering Fracture Mechanics，1977，9( 1) : 167-188．
73. 冉明明. 高强钢焊缝连接的力学性能和设计理论研究[D].同济大学.2019.
74. MAGI D T. Numerical simulation of welded joints in High Strength Steel Q890[D].同济大学.2017.

# 致谢

行笔至此，感慨良多，看着屏幕右下角的时间，只能感慨还有不到两个月就将结束我在同济本科和硕士七年的求学生涯。从大四上学期保研时第一次见到恩师孙飞飞教授，到入学后第一次见到研究室的小伙伴们，再到今天，一路走来经历了很多，成长了很多，值得回忆的很多，终身难忘的很多。谨以此文献给曾经给予我帮助和关心的所有人。

首先要感谢我的恩师孙飞飞教授，在学术上，孙老师学识渊博、态度严谨、循循善诱，从论文的选题、试验方案的设计、试验的开展以及论文成果的整理等各个关键阶段孙老师都给予了我莫大的帮助与指导。在生活上，孙老师平易近人的处事方式让我既感轻松，更觉温暖，交流起来亦师亦友。孙老师对学生未来的发展非常重视，在求职期间尊重我们每个人的想法并且为我的择业提供了很多指导，让我受益良多。能够在求学生涯的最后三年里遇到这样一位师德高尚、才思敏捷的老师，实在无比幸运，再次感谢孙老师为我付出的一切。

同时，我要感谢李国强教授，在李老师的带领下我们教研室拥有良好的学术氛围，感谢教研室陈素文老师、蒋首超老师、楼国彪老师、何亚楣老师、刘玉姝老师等在三年中给予的帮助与指导。

感谢课题组的胡智斌、冉明明、莫刚、裴少帅、黄杰、贾瑞梓、肖蕾、王述文、侯玉芳、焦联洪、肖贲、王萌、唐志明、马志东、吴坦烨等师兄师姐的指导和帮助；感谢魏智锴和戴晓欣两位同门在学习和生活中的陪伴；感谢A615研究室赵元梓、赵忆冬、王琛奥、王欣欣、饶雯婷、王紫珮、王程灏、周杰、章宇宽、吴弘宸、李志远、冯宇迪、蒋蕴涵、王苑佐、Andrea，和你们在一起拥有那么多美好的回忆，非常庆幸可以成为这个单纯的教研室中的一员。

此外，感谢张文津、黄涛、余斯杰、张洵、刘鹏、姜睿涵等学长好友在求职路上的引导和帮助；感谢我的挚友文建秀、师圣蔓，与你们拥有长达十年的友情倍感幸运，愿我们友谊长存，愿我们前途光明，愿我们来日方长！

感谢我的男友薛炳晟，感谢研究生三年期间的陪伴与鼓励，是你让我鼓起勇气面对生活中的每一次挑战，是你鞭策着我不断进步成为更好的自己。

感谢我的父母、姐姐、奶奶，你们是我最强大的后盾，你们的支持让我无所顾虑地求学。千言万语，无以言谢。我愿用此生来回报你们。

最后，感谢各位评阅专家、教授在百忙之中抽出宝贵时间参与本文的审阅，您的宝贵意见对我的研究工作至关重要。

2019年4月于同济

# 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

**个人简历：**

赵琛，女，1994年1月生，山西运城人。

2012年9月至2016年6月，同济大学，土木工程专业，获学士学位。

2016年9月至今，同济大学，建筑与土木工程专业，攻读硕士学位。

**已发表论文：**

[1] 孙飞飞，赵琛. 快速面积矩法绘制结构变形图[J]. 高等建筑教育，2018，27（3）：69-73.

[2] Le-Tian Hai，Fei-Fei Sun，Chen Zhao，et al. Experimental cyclic behavior and constitutive modeling of high strength structural steels[J]. Construction and Building Materials，2018（189）：1264-1285.