****

**硕士学位论文**

**（专业学位）**

**高强钢角焊缝力学性能研究**

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

二〇一九年六月

****

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

June， 2019

|  |
| --- |
| **高强钢角焊缝力学性能研究**  **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**

梁柱节点的设计和施工复杂，是抗震设计中的薄弱环节。可以通过安装转动型阻尼器或

1. 设计了六个不同的高强螺栓连接试件，对其进行了往复加载试验。试验结**关键词**：梁柱节点，抗震设计，耗能减震，摩擦型转动阻尼器，滞回性能，试验研究，有限元研究，设计建议

**Abstract**

The design and construction of beam-column joints which is very complex is the

1. Six high-strength bolted connections are designed and tested by cyclic loading. **Key words**: beam-column joints， seismic design， energy-dissipating， friction-type rotational damper， hysteretic behavior， experimental study， finite element study， design suggestion

**目录**

[第1章 绪论 4](#_Toc3565973)

[1.1 研究背景及意义 4](#_Toc3565974)

[1.2 高强钢角焊缝力学性能研究现状 5](#_Toc3565975)

[1.2.1 正面和侧面角焊缝研究现状 6](#_Toc3565976)

[1.2.2 斜向角焊缝研究现状 7](#_Toc3565977)

[1.2.3 角焊缝设计规范 10](#_Toc3565978)

[1.2.4 热输入量研究现状 11](#_Toc3565979)

[1.3 角焊缝连接接头有限元模拟 12](#_Toc3565980)

[1.4 DIC数字图像应用现状 13](#_Toc3565981)

[1.5 存在的问题与本文研究工作 15](#_Toc3565982)

[1.5.1 存在的问题 15](#_Toc3565983)

[1.5.2 本文研究工作 16](#_Toc3565984)

[第2章 单调荷载作用下高强钢和熔敷金属材料的本构模型校核 18](#_Toc3565985)

[2.1 引言 18](#_Toc3565986)

[2.2 高强钢Q890D单调拉伸试验研究 18](#_Toc3565987)

[2.2.1 试验概况 18](#_Toc3565988)

[2.2.2 试验结果 21](#_Toc3565989)

[2.2.3 试验用钢材的可焊性 22](#_Toc3565990)

[2.3 高强度焊材ER120S-G单调拉伸试验研究 25](#_Toc3565991)

[2.3.1 试验概况 25](#_Toc3565992)

[2.3.2 试验结果 25](#_Toc3565993)

[2.4 本构模型的校核 26](#_Toc3565994)

[2.4.1 “试错法”的校核流程 26](#_Toc3565995)

[2.4.2 标准材性试件的有限元模拟 29](#_Toc3565996)

[2.4.3 有限元结果与试验对比 30](#_Toc3565997)

[2.5 本章小结 32](#_Toc3565998)

[第3章 高强钢角焊缝力学试验研究 33](#_Toc3565999)

[3.1 引言 33](#_Toc3566000)

[3.2 试验概况 33](#_Toc3566001)

[3.2.1 单边单条角焊缝试件设计 33](#_Toc3566002)

[3.2.2 单边双条角焊缝试件设计 38](#_Toc3566003)

[3.3 试验装置及仪器 45](#_Toc3566004)

[3.4 试验结果与分析 47](#_Toc3566005)

[3.4.1 试件断后测量与断裂角度 49](#_Toc3566006)

[3.4.2 承载能力和变形能力 52](#_Toc3566007)

[3.4.3 极限强度和平均变形能力 66](#_Toc3566008)

[3.5 本章小结 71](#_Toc3566009)

[第4章 DIC测量系统监测下的试件应变分布特征 72](#_Toc3566010)

[4.1 引言 72](#_Toc3566011)

[4.2 DIC测量系统简介 72](#_Toc3566012)

[4.2.1 DIC测量系统的工作原理 73](#_Toc3566013)

[4.2.2 DIC测量系统的精度校核 74](#_Toc3566014)

[4.2.3 变形载体制备 75](#_Toc3566015)

[4.3 DIC监控下的角焊缝试件应变发展特征 77](#_Toc3566016)

[4.3.1 正面角焊缝试件焊缝区域应变发展特征 77](#_Toc3566017)

[4.3.2 侧面角焊缝试件焊缝区域应变发展特征 80](#_Toc3566018)

[4.3.3 斜向角焊缝试件焊缝区域应变发展特征 83](#_Toc3566019)

[4.4 本章小结 88](#_Toc3566020)

[第5章 不同加载角度下角焊缝有限元分析 89](#_Toc3566021)

[5.1 引言 89](#_Toc3566022)

[5.2 有限元模型 90](#_Toc3566023)

[5.2.1 网格划分 90](#_Toc3566024)

[5.2.2 边界条件 90](#_Toc3566025)

[5.3 有限元结果与试验对比 94](#_Toc3566026)

[5.4 本章小结 94](#_Toc3566027)

[第6章 不同加载角度下角焊缝力学性能 95](#_Toc3566028)

[6.1 引言 95](#_Toc3566029)

[6.2 与简化模型对比 95](#_Toc3566030)

[6.2.1 断裂角度 95](#_Toc3566031)

[6.2.2 承载能力 95](#_Toc3566032)

[6.3 相关规范对比 95](#_Toc3566033)

[6.4 强度模型修正 95](#_Toc3566034)

[6.5 本章小结 95](#_Toc3566035)

[第7章 结论与展望 97](#_Toc3566036)

[7.1 本文的主要工作 97](#_Toc3566037)

[7.2 本文的主要结论 97](#_Toc3566038)

[7.3 进一步的研究工作 97](#_Toc3566039)

[参考文献 99](#_Toc3566040)

[致谢 103](#_Toc3566041)

[个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果 104](#_Toc3566042)

# 绪论

## 研究背景及意义

高强度结构钢材是指强度等级大于460MPa，具有良好延性、韧性以及加工性能的结构钢材。迄今为止国内外多个钢结构工程已经成功应用了高强度结构钢材，并且取得了良好的经济和社会效益。高强钢结构在受力性能、建筑使用功能以及社会经济和环保效益等方面具有显著优势，不仅能够进一步提高结构的安全性和可靠性，而且可以创造更大的建筑使用空间、实现更灵活的建筑表现，同时能够节约建筑工程总成本，降低能耗和不可再生资源消耗量以及碳排量，符合我国可持续发展战略及节能环保型社会的创建，属于绿色环保型建筑体系。[1]

近年来，随着我国科学技术和经济的不断发展，高强钢在国内的应用范围越来越广泛。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。国家游泳中心钢结构工程为多面体空间刚架，厚度大18mm的板材选用了Q420C高强度钢材，是国内单体工程中应用较多的工程。深圳会展中心的刚架梁下弦杆采用国产LG 460MPa高强钢拉杆，直径150mm，是国内钢结构工程应用的最大直径高强钢拉杆。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。新型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，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方面的行业标准。

钢结构的连接通常有焊接、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。由于高强钢的化学成分中碳元素相对较少，韧性较高，与普通钢材相比，具有较好的焊接性能。但是不同生产商生产的高强钢的合金元素成分不同，所以适合于高强钢母材的焊接材料也就不同，对应焊接匹配的问题有待进一步研究。焊接接头的力学性能随焊缝型式、焊条等级、焊材匹配性、焊接线能量等参数变化，介于焊缝金属和母材强度之间，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，因此对焊接接头的力学性能进行研究十分重要。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 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 |

目前我国已建或在建的高强钢建筑，焊缝连接部分基本上是有针对性的进行焊接工艺评定，在研究人员试验的基础上指导施工的，而普遍适用的关于高强钢的焊接理论还没有。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，工程设计人员无章可循只能套用普通强度钢材设计方法，线性推广到高强度钢材的相关指标，或是采用国外技术标准，其合理性无从考究。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高强度钢材应用中的强度和韧性，在设计中需要注意哪些问题，均是亟待解决的。因而需要对高强度钢材焊缝连接承载性能进行深入研究，提出相应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，有助于提高我国钢结构设计的设计水平，更好的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分为正面角焊缝（即焊缝方向与加载方向垂直为90°）和侧面角焊缝（即焊缝方向与加载方向平行为0°）两种形式，其他不同方向的加载角度统称为斜向角焊缝。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 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 |

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性能的上限。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，而这些试验研究都是针对母材为普通钢材的角焊缝。

* + 1. 正面和侧面角焊缝研究现状

Spraragen and Claussen (1942)[2] 对423个正面角焊缝和416个侧面角焊缝的加载试验进行研究，发现侧面角焊缝有截面上的最大剪应力是正面角焊缝的60%至100%。无论焊缝是受拉还是受压正面角焊缝和侧面角焊缝都是有足够的承载力的，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] 进行两个正面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接近侧面角焊缝，但是小于45°。

Naka and Kato (1966)[4] 对18个正面角焊缝试件进行了试验和理论研究，试件包括3种类型的焊接方式，2种焊条，每种类型的试件制作三个，试验记录了材料特性、荷载、变形和焊缝断裂面角度。最后用五种不同的理论预测试件的极限荷载，这五种理论都低估了正面角焊缝的实际承载力，其中最大剪应力理论预测结果最好。

Ligtenberg (1968)[5] 对一个涵盖10个国家的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] 做了168个角焊缝的试验，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)发表了正面和侧面角焊缝的力-位移荷载曲线，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。

随着高强钢在工程中的应用越来越普及，对于高强钢角焊缝力学性能的研究在近十年里才陆续有学术论文发表出来，现有文献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加工了两百多个试件，测试了在轴向拉伸荷载下的承载力和变形性能，并且对焊缝附近区域进行了硬度测试，在热影响区测得硬度比母材和焊材区域都高，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] ）研究梯队对 S960 钢材也进行了39个角焊缝的试验研究，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] 进行了5个Q460C高强度钢材正面角焊缝接头和5个侧面角焊缝搭接接头试件的轴向拉伸试验，正面角焊缝的强度约为侧面角焊缝强度的1.48倍，正面角焊缝试件的破坏角度为26°，侧面角焊缝试件的破坏角度比较接近45°，属于纯剪切受力状态和破坏状态。

施刚（2016）[15] 针对Q460/Q550/Q690三种钢材等级的高强度钢材进行了 9个对接焊缝试件、9 个正面角焊缝和 9 个侧面角焊缝搭接接头的拉伸试验。试验发现正面角焊缝接头的刚度大于侧面角焊缝，其平均极限强度至少达到侧面角焊缝的1.43倍。

郭小农（2016）[16] 进行了6个母材拉伸试验、6个对接焊缝拉伸试验、3个端面角焊缝连接试验和3个侧面角焊缝连接试验。试验证明Q690高强钢角焊缝的强度超过母材的抗拉强度，其中端面角焊缝的强度较高、延性较差，侧面角焊缝的强度较低、塑性较好，侧面角焊缝的应力分布沿纵向为两端大、中间小。

李金凤（2016）[17] 对 Q345 为母材的角焊缝T形、L形和J形焊接接头进行拉伸实验，研究焊接件的尺寸对于焊接接头力学性能的影响。研究得到起弧或收弧段的试样在拉伸实验中更易出现塑性变形。

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

Freeman (1932)[19] ， Hankins andAllan (1934)[20] ， Vandeperre 和Joukoff (1939) [21] 在早期的试验研究中发现焊缝与加载方向处在正面角焊缝和侧面角焊缝之间的角焊缝试件在焊吼有效截面最大应力也处在正面角焊缝与侧面角焊缝之间。此处应力的定义仅为最大荷载除以有效截面积，尽管断裂面与有效截面积不完全重合。然而这些研究并未建立角焊缝强度与加载角度的关系。

Butler and Kulak (1971)[22] 做了23个6mm焊脚尺寸ER60焊条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，焊缝的极限强度随着加载角度的增大而增强，正面角焊缝的极限强度是侧面角焊缝的1.45倍，侧面角焊缝比正面角焊缝有更多的变形能力，其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 ) |
|  |  | ( 1.2 ) |

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，理论模型低估了真实强度。Clark提到焊缝真实和理论强度的差异是由于焊缝接头搭接板与焊接板之间的约束，然而没有给出更具体的细节描述。

Swannell and Skewes (1979a)[25] 进行了不同加载角度下的受压试验，正面角焊缝受拉试验的极限强度与受压试验类似，但是极限强度对应的变形能力更小。

Biggs (1981)[26] 总结了Crofts 和Higgs的试验结果，断裂面角度随着加载角度变化，并且提出了断裂面平均拉应力和剪应力的椭圆关系。Crofts 和Higgs采用“梁”类型的加载方式，这种加载方式在焊缝处产生纵向和横向应力的组合。每个试件的加载角度都是变化的，破坏时的加载角度是可以估计的，试验材料特性并未给出具体描述。

Neis (1985) [27] 采用rate-dependent塑性理论，基于Kamtekar (1982)提出的平均应力分布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] 基于两个未处于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：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.3 ) |

式中，为待求的任意角度荷载作用下的角焊缝的承载力； 为加载方向与焊缝平行时的角焊缝的承载力，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；为焊吼尺寸，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，也就是焊吼对应的破坏面。

* 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GB 50017-2017[3]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] 研究三种不同焊接热输入量20kJ/cm、17kJ/cm、14kJ/cm对Q890D高强钢焊接接头性能和组织的影响。研究表明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，热输入量选择在17kJ/cm时较为合适，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] 本文采用GMAW焊接方法分析不同焊接热输入下Q690/Q890显微组织与焊接接头力学性能关系。试验表明当焊接热输入从12kJ/cm提高到17.02kJ/cm时，焊缝及Q890钢热影响区粗晶区奥氏体内部组织明显细化，抗裂性和韧性较好，而焊接热输入较高时，焊缝及Q890钢热影响区粗晶区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高强钢的焊接性进行了三种不同的热输入量下12kJ/cm、15kJ/cm、18kJ/cm的研究，试验表明随着热输入的增大，贝氏体板条和马氏体板条粗化，板条马氏体减少，粒状贝氏体含量增加。随着热输入的增大，焊缝金属和焊接接头的抗拉强度均呈下降的趋势，但均高于母材强度的90%。

杨喜胜等（2013）[40] 采用1000MPa级高强钢专用焊丝和低合金高强钢30MnCrNiMoB，研究三种热输入量6kJ/cm、12kJ/cm、18kJ/cm下焊接软化行为。试验结果表明，不同热输入与不同预热温度下，软化区宽度与热输入或预热温度基本都呈线性关系。软化区域最低硬度值基本相同，其组织为铁素体和淬火马氏体的混合组织；随着热输入和预热温度的增加，铁素体长大，且边界越完整，而马氏体含量减少。

## 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 ANSYS12.0 对单向角焊缝节点和多向角焊缝节点进行了承载力分析，所用模型均为双面搭接角焊缝焊接节点，考虑因素主要为角焊缝的长度、焊脚尺寸的大小、节点板屈服对单向角焊缝节点的影响等，除此之外还分析了影响多向角焊缝节点受力性能的若干因素，主要包括：节点中正面角焊缝段（包括绕角焊在内）对侧面角焊缝段受力性能的影响、侧面角焊缝段（包括绕角焊在内）对正面角焊缝段受力性能的影响、焊缝段韧性差异导致非关键焊缝段的承载力折减等。

魏晨熙（2013）[14] 采用有限元软件 ANSYS 建立了侧面角焊缝的有限元实体单元模型，材性试验可以获得焊缝与母材两种本构关系，对Q460C 高强度钢材侧面角焊缝搭接接头试验研究结果进行了数值模拟，验证了有限元模型的合理性。并且利用已验证的有限元实体单元模型进行参数分析，考虑因素主要包括对焊缝的焊脚尺寸、连接板厚度、焊缝强度匹配、拉剪比等对受力性能的影响。

李金凤（2016）[17] 用ANSYS建立Q345角焊缝焊接接头有限元模型来模拟拉伸试验，通过与试验数据对比来验证模型的可靠性，并且利用有限元模型进行参数分析，主要考虑因素包括：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] 首先进行不锈钢母材和焊缝金属材料的材性试验，标定了试件的本构关系模型，其次使用ANSYS有限元软件对S30408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，试验和有限元结果相对比验证了有限元模型的合理性与有效性。

徐忠根等（2018）[18] 使用ANSYS建立三面围焊角焊缝连接的有限元模型，有限元强度计算值与试验强度的比值范围在 0.99~1.06，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

对高强度钢材来讲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。应变测量较为常用的方法是接触式测量方法（引伸计测量及光学测量），这两种接触式的方法已经得到非常成熟的应用。引伸计可以精确地测定材料在特征应变条件下的应变数据，具有高分辨率与准确度，其优点是可以长期重复使用，并根据使用条件和要求选择不同规格和量程。但引伸计受外界条件（高温、低温、震动等）影响大，测量器件必须与被测试件进行接触，测量范围有限及存在偏心误差等问题使其使用受到了限制，同时，引伸计不能进行连续性的大变形、全场性测量，以至于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如位移和应变等测量结果。其中数字图像相关方法（Digital Image Correlation，DIC）发展相对较快，它们的测量精度已达到传统的接触式测量，甚至比传统的更好，而且己逐渐开始在材料科学研究中发挥出越来越重要的作用。[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试方法，这种方法首次由1980年被提出，在近几十年的时间中经历了飞速发展。该方法利用相机得到变形材料的照片，多张照片记录了材料的变形过程，通过对照片上散斑点的相关计算，进行匹配追踪，能够计算得到材料表面点发生的位移。数字图像相关方法一方面能够测量材料上每个点的位移，从而得到材料表面的全场位移，对于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。

与传统的引伸计相比，DIC方法具有三维、全场、非接触等优势，使其可以在大的变形范围及远距离非接触测量中发挥作用，在一般性测量中则可以克服引伸计常见的偏心、断标外等问题。与传统的光学测量方法对比，DIC方法则具有测量光路相对简单、测量环境及光源要求低的优势，应用范围更加广泛。当前阶段，随着科学技术和数字化技术的不断发展与更新，数字图像的分辨率和清晰程度在不断扩大，数字图像处理技术的测量精度也因此不断提升，数字图像测量技术的优点使得DIC方法被广泛接受，并被视为表面变形测量的一种灵活而有力的工具。DIC方法在材料的力学行为测试与分析上的优势使其在材料科学领域得到了广泛的应用，尤其是在薄膜材料％、木材及岩石材料的变形场的定量测量方面。

* + 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。在此后的二十多年里，美国南卡罗来纳大学在 M.A.Sutton[47] 等学者的领导下，继续保持着 DIC研究的中心地位，对 DIC 方法的理论发展与完善做出了突出贡献。

Kahn-Jetter、Chu（1990）[48] 利用两个固定的相机同时拍摄物体的散斑场，根据两个相机的二维数字图像相关视差求解出物体的三维坐标，开启了三维 DIC 方法的理论与应用研究。

Zink 等（1996）[49] 利用数字图像相关方法完成了对木材应变、泊松比的测量。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。

Chevalier 等（2001）[50] 利用数字图像相关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，并建立有限元分析模型对其力学行为进行模拟。

在国内，高建新等学者（1989）[51] 最先开始进行DIC方法的研究工作。此后，其他众多学者也对DIC理论和应用研究进行了大量有意义的工作。

杭超等（2013）[52] 采用数字图像相关方法对TC4钛合金焊缝在单向拉伸载荷作用下的变形场进行测量，得到了焊缝材料在不同载荷下不同区域的应变场，其中母材区、焊缝区、热影响区3个区域的应变依次递减，并且母材区的应变远大于焊缝区和热影响区，母材区具有良好的韧性。除此之外还对加载过程中的变形局部化现象进行了定量测量，焊缝在达到峰值载荷时就已经出现微小的颈缩，峰值载荷时颈缩量仅为0.075 mm，断前一瞬间颈缩量可达0.271 mm，最后对试验系统的误差作了简要分析，验证了DIC方法的可靠性。

张睿诚（2017）[53] 对数字图像相关（DIC）方法在应变测量中的应用进行了研究，并将 DIC 测试技术扩展到岩石带围压的三轴试验中。

朱飞鹏等（2018）[54] 利用三维数字图像相关(3D-DIC)方法，对8.8级螺栓和Q690钢这两类试样在单轴拉伸试验全过程中的变形进行了测试，分别得到了应力—应变曲线、屈服强度、强度极限、弹性模量、延伸率和面缩率，由于试样在屈服阶段应变增加而应力基本不变，因此同时研究了该阶段中试样从弹性变形演化到塑性变形的发展规律。试验结果表明三维DIC在小尺寸试样力学性能测试方面具有很强的优越性，可用来灵活地测量变形并研究变形的演化规律。

迄今为止，DIC 方法无论在理论算法还是在不同领域的应用方面都取得了丰硕的研究成果。但是，对于金属材料，特别是钢铁材料变形测量方面，DIC方法的应用范围仍有待扩展。鉴于位移及应变测量在钢铁材料的力学性能测试中占有十分重要的地位，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）高强钢焊缝链接的承载力设计公式的适用性需要得到验证。**

我国现行《钢结构设计规范》(GB50017-2017)对抗拉强度超过420MPa高强度结构钢材的焊接连接设计方法、焊条选用原则、强度指标和构造未做出规定，并且高强钢角焊缝连接的承载力计算公式基本上是从普通钢材延伸过来的，高强钢角焊缝接头在受拉过程中是否出现异于普通钢焊接接头的破坏类型，进而导致现有设计理论在预测高强钢焊接连接上的不足等一系列的问题急需通过试验进行验证，在工程设计中直接套用现行规范中普通强度钢材设计方法或者采用线性外推的设计方法欠缺谨慎。

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

高强度钢材经过焊接进行连接，其在焊接连接处的强度、延性等力学性能与母材相比具有很大的改变，焊缝区及母材有不同的性质，仅研究其在一部分区域的力学性能不能根本解决焊缝连接的整体性能问题。当采用有限元软件对焊缝链接进行焊接成型模拟或受力性能模拟分析，需要将母材和熔敷金属两种不同性质的材料分别定义，采用单纯的同一种材料进行模拟的结果不能体现出两种不同材料的力和变形的协调过程，所以高强度钢材Q890D和熔敷金属ER120S-G的本构模型需要进行单调拉伸试验来校准。

**（3）传统试验中引伸计和应变片不能得到试件整体变形信息。**

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来讲，能获得从试验开始到破坏整个过程的荷载位移曲线以及试件表面的应变发展趋势是至关重要的，然而现有的引伸计和应变片在试件破坏后容易失效，不能进行连续性的大变形、全场性测量，以至于不能得到物体的整体变形信息。

* + 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 单调荷载作用下高强钢和熔敷金属材料的本构模型校核

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校核，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

（4）第4章 DIC测量系统监测下的试件应变分布特征

（5）第5章 不同加载角度下角焊缝有限元分析

（6）第6章 不同加载角度下角焊缝力学性能

（7）第7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。

因此，本文对高强度钢材焊缝连接力学性能进行了试验研究和数值模拟。

# 单调荷载作用下高强钢和熔敷金属材料的本构模型校核

## 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，共7个试件，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校核，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，最终获得材料校核后的本构模型。

## 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。

|  |
| --- |
| 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 |

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。

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 。

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 |

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。

|  |
| --- |
|  |
| 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 2.9 熔敷金属ER120S-G应力应变关系曲线 |

## 材料本构模型的校核

* + 1. “试错法”的校核流程

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( 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 | 0.068 | 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( 2.6 )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 |

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% | |
|  | | | | | | |
| 图 2.19 ER120S-G力位移曲线有限元与试验对比 | | | | | | |

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校核，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校核，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，最终获得材料校核后的本构模型。

（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，但是接头变形能力更差。本章试验以高强钢钢Q890为母材，ER120S-G为熔敷金属，考虑焊缝与受力方向的夹角，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）作为试验设计变量，每个角度得试件加工6个，共计48个。

## 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）为保证焊缝在要求的一端断裂，在尺寸设计上，为保证拉伸破坏发生在某确定的角焊缝上，有意的对称加强了另一边角焊缝，在轴向力加载的拉伸试验中不会对结果造成影响。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，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] 。本文试验采用的焊接方法是焊条手工电弧焊（SMAW），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。

|  |  |
| --- | --- |
| 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 |

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 |

* + 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）为保证焊缝在要求的一端断裂，在尺寸设计上，为保证拉伸破坏发生在某确定的角焊缝上，有意的对称加强了另一边角焊缝，在轴向力加载的拉伸试验中不会对结果造成影响。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，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 | 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 3.17 45°D试件 | 图 3.18 30°试件 | 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 | | | | |
| 剪切边（mm) | 受拉边（mm) | 斜边（mm) | 焊缝长度（mm) | 实际长度（mm) | 剪切边（mm) | 受拉边（mm) | 斜边（mm) | 焊缝长度（mm) | 实际长度（mm) |
| 00\_1 | 5.60 | 5.00 | 7.71 | 29.10 | 56.18 | 5.10 | 5.10 | 7.22 | 27.95 | 63.03 |
| 00\_2 | 5.10 | 5.30 | 7.49 | 30.71 | 48.40 | 5.10 | 4.60 | 6.94 | 31.73 | 51.58 |
| 00\_3 | 5.50 | 5.20 | 7.81 | 34.09 | 51.20 | 5.00 | 6.10 | 7.91 | 35.00 | 49.46 |
| 00\_4 | 4.90 | 4.20 | 6.21 | 31.75 | 52.98 | 4.40 | 4.10 | 5.90 | 32.60 | 50.99 |
| 00\_5 | 5.00 | 5.30 | 7.17 | 33.52 | 57.94 | 4.80 | 4.90 | 7.13 | 31.80 | 54.27 |
| 00\_6 | 4.80 | 4.60 | 6.63 | 33.02 | 55.39 | 5.20 | 4.30 | 6.74 | 31.73 | 52.13 |
| 15\_1 | 4.80 | 4.00 | 6.28 | 51.24 | 61.58 | 4.90 | 4.00 | 6.20 | 47.87 | 56.28 |
| 15\_2 | 5.20 | 3.60 | 6.30 | 50.73 | 62.00 | 4.80 | 3.50 | 6.00 | 49.81 | 63.03 |
| 15\_3 | 4.40 | 4.40 | 6.10 | 49.99 | 58.26 | 4.40 | 3.90 | 5.80 | 51.45 | 57.00 |
| 15\_4 | 4.90 | 4.00 | 6.30 | 49.71 | 62.53 | 4.60 | 4.40 | 6.50 | 51.60 | 67.41 |
| 15\_5 | 4.20 | 4.50 | 6.10 | 52.85 | 65.32 | 5.00 | 3.50 | 6.10 | 49.87 | 62.66 |
| 15\_6 | 4.90 | 3.70 | 6.20 | 47.02 | 56.80 | 5.30 | 3.50 | 6.30 | 47.75 | 59.35 |
| 30\_1 | 4.20 | 3.80 | 5.80 | 60.62 | 81.91 | 4.30 | 4.30 | 6.10 | 62.40 | 79.98 |
| 30\_2 | 4.50 | 4.20 | 6.10 | 62.66 | 78.94 | 4.80 | 3.80 | 6.10 | 60.81 | 76.55 |
| 30\_3 | 5.00 | 3.60 | 6.20 | 62.05 | 85.63 | 4.70 | 4.20 | 6.20 | 61.32 | 87.00 |
| 30\_4 | 4.50 | 4.00 | 6.20 | 61.48 | 74.44 | 5.50 | 4.00 | 6.90 | 61.84 | 73.00 |
| 30\_5 | 4.60 | 4.40 | 6.50 | 62.38 | 75.99 | 4.90 | 4.30 | 6.40 | 60.33 | 69.12 |
| 30\_6 | 4.60 | 4.20 | 6.20 | 62.20 | 77.26 | 5.00 | 4.00 | 6.30 | 60.35 | 75.64 |
| 45D\_1 | 4.90 | 4.40 | 6.60 | 53.14 | 69.54 | 4.90 | 4.20 | 6.50 | 49.02 | 62.11\* |
| 45D\_2 | 4.40 | 4.30 | 6.00 | 51.02 | 66.20 | 4.60 | 4.50 | 6.30 | 51.14 | 71.53 |
| 45D\_3 | 5.00 | 4.10 | 6.30 | 48.94 | 66.30 | 5.40 | 4.00 | 6.60 | 48.77 | 57\* |
| 45D\_4 | 5.40 | 3.70 | 6.30 | 52.32 | 68.92 | 4.80 | 4.30 | 6.40 | 49.90 | 65.5\* |
| 45D\_5 | 4.90 | 4.40 | 6.30 | 48.74 | 65.00 | 4.70 | 4.40 | 6.50 | 51.00 | 66.45 |
| 45D\_6 | 5.20 | 3.70 | 6.40 | 51.71 | 64.40 | 4.90 | 4.30 | 6.30 | 50.60 | 68.33 |
| 编号 | 3号边 | | | | | 4号边 | | | | |
| 剪切边（mm) | 受拉边（mm) | 斜边（mm) | 焊缝长度（mm) | 实际长度（mm) | 剪切边（mm) | 受拉边（mm) | 斜边（mm) | 焊缝长度（mm) | 实际长度（mm) |
| 00\_1 | 5.40 | 5.00 | 7.47 | 30.28 | 37.71 | 5.70 | 5.20 | 7.68 | 32.24 | 53.34 |
| 00\_2 | 4.70 | 3.70 | 5.80 | 28.88 | 45.71 | 5.40 | 5.00 | 7.54 | 33.96 | 51.16 |
| 00\_3 | 5.10 | 5.30 | 7.29 | 31.24 | 45.70 | 5.50 | 4.80 | 7.00 | 30.67 | 50.14 |
| 00\_4 | 4.70 | 4.30 | 6.20 | 33.94 | 53.61 | 4.60 | 4.40 | 6.20 | 34.79 | 57.34 |
| 00\_5 | 5.20 | 4.90 | 7.24 | 33.64 | 48.83 | 5.20 | 5.00 | 7.47 | 35.00 | 56.91 |
| 00\_6 | 5.00 | 3.70 | 6.35 | 31.98 | 51.52 | 3.80 | 4.20 | 5.80 | 31.79 | 52.72 |
| 15\_1 | 4.70 | 4.00 | 6.20 | 47.87 | 56.61 | 4.50 | 3.90 | 6.00 | 50.75 | 62.88 |
| 15\_2 | 4.00 | 4.40 | 5.90 | 48.62 | 60.73 | 5.20 | 4.50 | 6.80 | 51.48 | 58.66 |
| 15\_3 | 4.80 | 3.80 | 6.10 | 48.38 | 61.68 | 4.30 | 4.50 | 6.20 | 49.93 | 58.75 |
| 15\_4 | 4.50 | 4.20 | 6.10 | 50.34 | 62.37 | 4.70 | 3.20 | 5.70 | 49.27 | 59.87 |
| 15\_5 | 4.80 | 3.60 | 6.00 | 51.51 | 59.29\* | 4.20 | 4.40 | 6.20 | 48.91 | 55.89\* |
| 15\_6 | 5.30 | 3.30 | 6.20 | 46.95 | 60.75 | 4.50 | 4.40 | 6.30 | 52.20 | 71.04 |
| 30\_1 | 4.70 | 4.30 | 6.30 | 61.46 | 77.85 | 5.00 | 4.00 | 6.40 | 59.01 | 83.19 |
| 30\_2 | 5.00 | 4.00 | 6.30 | 60.18 | 84.33 | 4.40 | 4.50 | 6.20 | 59.26 | 76.02 |
| 30\_3 | 4.40 | 4.40 | 6.30 | 62.52 | 79.28 | 5.30 | 4.00 | 6.40 | 63.56 | 83.73 |
| 30\_4 | 4.90 | 4.00 | 6.40 | 61.52 | 77.07 | 4.30 | 4.20 | 6.00 | 63.33 | 85.23 |
| 30\_5 | 5.50 | 4.20 | 6.70 | 59.86 | 79.57 | 4.70 | 4.10 | 6.30 | 63.70 | 77.14 |
| 30\_6 | 5.50 | 4.10 | 6.90 | 57.18 | 76.29 | 4.60 | 4.20 | 6.20 | 61.06 | 76.24 |
| 45D\_1 | 5.50 | 4.10 | 6.92 | 52.34 | 67.93 | 4.50 | 4.10 | 6.20 | 49.08 | 69.45 |
| 45D\_2 | 4.50 | 4.50 | 6.27 | 52.88 | 67.77 | 4.80 | 4.00 | 6.30 | 51.11 | 74.78 |
| 45D\_3 | 5.00 | 4.00 | 6.40 | 50.43 | 63.2\* | 4.60 | 4.60 | 6.50 | 52.00 | 67.47 |
| 45D\_4 | 4.60 | 4.30 | 6.20 | 51.31 | 63.68 | 4.90 | 4.00 | 6.40 | 51.77 | 70.86 |
| 45D\_5 | 5.00 | 4.30 | 6.38 | 49.98 | 65.1\* | 4.90 | 4.10 | 6.20 | 48.98 | 75.6 |
| 45D\_6 | 5.10 | 4.50 | 6.60 | 50.42 | 67.30 | 4.90 | 4.60 | 6.50 | 51.67 | 66 |

## 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试验机 |

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。

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 |

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。

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 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 3.26 断后试件汇总 | | | |

试件断裂面均匀平整，说明试件加工质量合格\*。

|  |  |
| --- | --- |
| 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 3.27 90\_1试件断口 | 图 3.28 75\_1试件断口 |

* + 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表 3.6和

表 3.7。

|  |  |
| --- | --- |
| 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 |

对于角焊缝的研究来说，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°）。

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

* + 1. 承载能力和变形能力
       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，一般来讲，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 | 0.20 | 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 | 0.38 | 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 | 0.92 | 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荷载高出很多（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. 极限强度和平均变形能力
       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和平均变形能力汇总在表 3.12中。由于不同加载角度下角焊缝试件的焊缝实际长度设计不同，表中的平均变形能力以无量纲化的形式给出，定义为极限荷载对应的位移与焊缝长度的比值。

表 3.12 单边单条角焊缝极限强度和平均变形能力汇总

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | （kN） | （kN） | （MPa） | （MPa） | 断裂角度（°） |  |  |
| 45S\_1 | 635.52 | 317.7 | 1380.8 | 902.4 | 16.5 | 0.33% | 0.33% |
| 45S\_2 | 675.87 | 337.9 | 1414.2 | 901.8 | 17.7 | 0.49% | 0.53% |
| 45S\_3 | 658.33 | 329.1 | 1366.6 | 932.0 | 19.8 | 0.45% | 0.48% |
| 45S\_4 | 681.18 | 340.5 | 1404.3 | 928.9 | 16.8 | 0.64% | 0.68% |
| 45S\_5 | 677.05 | 338.5 | 1474.5 | 900.9 | 17.8 | 0.62% | 0.62% |
| 45S\_6 | 665.30 | 332.6 | 1431.5 | 948.3 | 19.0 | 0.73% | 0.82% |
| 60\_1 | 612.69 | 306.3 | 1522.9 | 1108.7 | 17.7 | 0.54% | 0.56% |
| 60\_2 | 612.73 | 306.3 | 1518.3 | 1021.0 | 16.3 | 0.57% | 0.61% |
| 60\_3 | 578.35 | 289.1 | 1435.0 | 928.5 | 19.0 | 0.40% | 0.42% |
| 60\_4 | 636.56 | 318.2 | 1562.8 | 1041.9 | 17.3 | 0.61% | 0.62% |
| 60\_5 | 575.71 | 287.8 | 1438.3 | 1043.1 | 18.5 | 0.51% | 0.51% |
| 60\_6 | 618.01 | 309.0 | 1521.7 | 1032.2 | 16.5 | 0.48% | 0.49% |
| 75\_1 | 580.59 | 290.3 | 1667.7 | 1049.4 | 15.0 | 0.55% | 0.55% |
| 75\_2 | 584.38 | 292.1 | 1672.6 | 1173.9 | 16.5 | 0.71% | 0.78% |
| 75\_3 | 557.74 | 278.8 | 1586.3 | 1040.0 | 17.0 | 0.61% | 0.74% |
| 75\_4 | 504.87 | 252.4 | 1448.7 | 881.0 | 17.0 | 0.70% | 0.75% |
| 75\_5 | 576.77 | 288.3 | 1587.7 | 1031.4 | 14.5 | 0.74% | 0.83% |
| 75\_6 | 548.47 | 274.2 | 1610.0 | 969.7 | 17.5 | 0.57% | 0.61% |
| 90\_1 | 571.58 | 285.7 | 1675.5 | 1002.0 | 19.5 | 0.74% | 0.80% |
| 90\_2 | 501.34 | 250.6 | 1460.6 | 950.7 | 17.5 | 0.57% | 0.59% |
| 90\_3 | 551.52 | 275.7 | 1608.7 | 1083.6 | 16.0 | 0.82% | 0.89% |
| 90\_4 | 549.41 | 274.0 | 1552.0 | 1042.6 | 16.0 | 0.67% | 0.75% |
| 90\_5 | 598.71 | 299.3 | 1721.4 | 1052.7 | 18.0 | 0.65% | 0.68% |
| 90\_6 | 566.21 | 283.1 | 1630.9 | 1064.6 | 16.5 | 0.60% | 0.62% |

表 3.13 单边单条角焊缝极限强度和平均变形能力均值

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 加载角度（°） | 极限荷载（kN） | 每条焊缝的承载力（kN） | （N/mm2） | （N/mm2） | 断裂角度B（°） |  |  |
| 45S | 665.54 | 332.77 | 1411.98 | 919.11 | 17.95 | 0.54% | 0.58% |
| 60 | 605.67 | 302.84 | 1499.84 | 1029.28 | 17.56 | 0.52% | 0.54% |
| 75 | 558.80 | 279.40 | 1595.48 | 1024.28 | 16.25 | 0.65% | 0.71% |
| 90 | 556.46 | 278.23 | 1608.17 | 1032.76 | 17.25 | 0.67% | 0.72% |

单边单条角焊缝试件的极限强度和平均变形能力的平均值汇总在表 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。

（5）大部分试件的断裂位移和极限荷载对应的位移相差不大，这与荷载位移曲线的特征有关，前面已做过介绍，此处不再赘述。

* + - 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）将焊缝的起弧和灭弧区域的长度都算进来，对于单边双条角焊缝，起弧和灭弧难以通过机加工消除，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。

（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和平均变形能力汇总在表 3.14中。由于不同加载角度下角焊缝试件的焊缝实际长度设计不同，表中的平均变形能力以无量纲化的形式给出，定义为极限荷载对应的位移与焊缝长度的比值。

表 3.14 单边双条角焊缝极限强度和平均变形能力汇总

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | （kN） | （MPa） | （MPa） | （MPa） | （MPa） | 断裂角度（°） |  |  |
| 00\_1 | 121.9 | 1099.1 | 796.9 | 825.4 | 598.5 | 51.8 | 1.74% | 3.05% |
| 00\_2 | 114.0 | 1065.3 | 828.6 | 842.9 | 655.7 | 53.9 | 0.97% | 1.22% |
| 00\_3 | 150.9 | 1234.0 | 987.2 | 925.1 | 740.1 | 53.9 | 0.60% | 2.98% |
| 00\_4 | 128.0 | 1227.5 | 938.9 | 956.5 | 731.6 | 55.0 | 0.79% | 2.63% |
| 00\_5 | 144.0 | 1208.4 | 920.0 | 935.9 | 712.5 | 58.6 | 1.57% | 2.98% |
| 00\_6 | 145.3 | 1455.7 | 1099.6 | 1121.8 | 847.4 | 56.2 | 1.54% | 2.60% |
| 15\_1 | 179.4 | 1193.3 | 1084.6 | 855.6 | 777.7 | 38.5 | 0.36% | 0.37% |
| 15\_2 | 186.7 | 1225.6 | 1105.0 | 854.3 | 770.3 | 39.6 | 0.64% | 0.76% |
| 15\_3 | 192.7 | 1273.5 | 1168.4 | 918.0 | 842.2 | 42.1 | 0.54% | 0.67% |
| 15\_4 | 193.2 | 1282.6 | 1137.5 | 811.6 | 719.8 | 41.0 | 0.92% | 1.11% |
| 15\_5 | 203.0 | 1348.4 | 1193.2 | 876.5 | 775.7 | 40.3 | 0.65% | 1.10% |
| 15\_6 | 209.8 | 1464.4 | 1285.4 | 1035.2 | 908.7 | 35.5 | 0.71% | 1.20% |
| 30\_1 | 269.3 | 1456.1 | 1251.9 | 935.3 | 804.1 | 33.1 | 0.69% | 0.85% |
| 30\_2 | 287.3 | 1536.0 | 1335.6 | 1034.9 | 899.8 | 23.9 | 0.85% | 0.91% |
| 30\_3 | 287.4 | 1491.7 | 1272.0 | 1029.1 | 877.5 | 23.9 | 0.63% | 0.87% |
| 30\_4 | 288.4 | 1508.0 | 1341.6 | 945.5 | 841.1 | 31.5 | 0.63% | 0.71% |
| 30\_5 | 219.9 | 1112.9 | 1000.1 | 799.9 | 718.8 | 26.9 | 0.33% | 0.39% |
| 30\_6 | 266.2 | 1402.4 | 1236.5 | 1046.4 | 922.6 | 27.2 | 0.76% | 0.78% |
| 45D\_1 | 236.0 | 1451.0 | 1232.1 | 1106.1 | 939.3 | 24.2 | 0.53% | 0.57% |
| 45D\_2 | 240.8 | 1489.7 | 1262.7 | 966.9 | 819.5 | 29.1 | 0.36% | 0.39% |
| 45D\_3 | 239.4 | 1500.0 | 1283.9 | 1066.8 | 913.1 | 20.3 | 0.59% | 0.61% |
| 45D\_4 | 248.9 | 1552.2 | 1337.3 | 1056.9 | 910.5 | 20.1 | 0.79% | 0.81% |
| 45D\_5 | 251.2 | 1569.0 | 1313.3 | 1094.9 | 916.4 | 28.1 | 0.44% | 0.47% |
| 45D\_6 | 222.9 | 1344.9 | 1168.7 | 996.9 | 866.3 | 27.3 | 0.53% | 0.58% |

表 3.15 单边双条角焊缝极限强度和平均变形能力均值

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 加载角度（°） | （kN） | （MPa） | （MPa） | （MPa） | （MPa） | 断裂角度（°） |  |  |
| 0 | 134.0 | 1215.0 | 928.5 | 934.6 | 714.3 | 54.9 | 1.20% | 2.58% |
| 15 | 194.1 | 1298.0 | 1162.4 | 891.9 | 799.0 | 39.5 | 0.64% | 0.87% |
| 30 | 269.8 | 1417.9 | 1239.6 | 965.2 | 844.0 | 27.8 | 0.65% | 0.75% |
| 45D | 239.9 | 1484.5 | 1266.3 | 1048.1 | 894.2 | 24.8 | 0.54% | 0.57% |

单边双条角焊缝试件的极限强度和平均变形能力的平均值汇总在表 3.14和表 3.15中，从中得知：

（1）四种极限强度的计算方法中，加载角度为15°、30°、45°D的角焊缝试件＞＞＞，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焊缝长度小。但是加载角度为0°的侧面角焊缝试件＞＞＞，原因是对于侧面角焊缝实际焊缝长度对于计算极限强度的影响远超过焊喉截面对于计算极限强度的影响。

（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。

（5）随着加载角度的降低，单边双条角焊缝试件极限荷载对应的平均位移增大，侧面角焊缝试件变形能力最强。

## 本章小结

# 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。本试验的位移数据主要来自于DIC全场应变测量系统。

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。

## 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来说，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，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。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （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来说，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109.25%，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146.60%，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）荷载位移曲线呈现“平台”趋势的试件是因为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。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （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，前文已经对不同加载角度下的角焊缝试件的破坏角度做过分析，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，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16至30之间。

（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，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至3之间。

（3）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，侧面角焊缝试件较正面角焊缝试件变形能力更强。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）90\_5试件测点1应变率 | （b）75\_3试件测点10应变率 |
|  |  |
| （c）60\_2试件测点1应变率 | （d）45S\_1试件测点8应变率 |
|  |  |
| （e）45D\_3试件测点3应变率 | （f）30\_4试件测点6应变率 |
|  |  |
| （g）15\_2试件测点8应变率 | （h）00\_1试件测点9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 | |

## 本章小结

# 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]

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[53]。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。

ABAQUS/Explicit可以进行显示动态分析，适用于求解复杂非线性动力学问题和准静态问题，特别是用于模拟短暂、瞬时的动态试件，如冲击和爆炸问题。此外，它对于处理接触条件变化的高度非线性问题也非常有效，例如模拟成型问题。其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。

本章选择ABAQUS来建立本文高强钢角焊缝在不同加载角度下试验的有限元模型，采用ABAQUS/standard隐式分析处理器，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。

## 有限元模型

* + 1. 金属材料的J-C失效准则模型

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节的熔敷金属校核后的材料模型。

材料的失效与多种因素有关并夹着复杂的物理机制，常见的有常塑性应变断裂准则、最大剪应力断裂准则、最大主应力断裂准则、基于塑性功的C-L断裂准则以及经验型Johnson-Cook断裂准则等。

金属材料的延性断裂与材料中空洞形核、扩展和聚合有关，而微孔洞的产生和增长与材料的应力状态即应力三轴度显著相关，温度和应变率对材料的断裂也有很大影响。G.R.Johnson等[70] 考虑应力三轴度、温度及应变率效应，扩展了Hancock[71] -Mackenzie[72] 的断裂模型形式，如公式( 5.1 )所示:

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

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。J-C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。

* + 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/front 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。

## 有限元分析结果与试验对比

## 本章小结

# 不同加载角度下角焊缝力学性能

## 引言

前文中分别对48 个角焊缝试件的承载力、强度、变形能力以及破坏角度进行了单独的分析，为了更直观的研究加载角度对角焊缝的力学性能的影响，本节着重分析不同加载角度下角焊缝的极限强度、变形能力和开裂角度的关系，且进行统一分析和对比。

## 与简化模型对比

* + 1. 断裂角度

文献[73]

* + 1. 承载能力

## 相关规范对比

为了对比本文高强钢Q890D在不同加载角度下角焊缝的承载力

## 强度模型修正

## 本章小结

# 结论与展望

本文首先对高强螺栓连接试件进行了循环加载试验研究，对高强螺栓连接在循环加载下的滑移过程、滞回性能、影响因素有了直观的认识。

## 本文的主要工作

在本文的研究基础上，得到以下结论：

## 本文的主要结论

在本文的研究基础上，得到以下结论：

## 进一步的研究工作

需要进一步研究的问题：

# 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， Teeside 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 Considerations 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.

# 致谢

行笔至此，感慨良多。

2017年6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.

**参考文献**

[1] Kulak L J B G. Strength of fillet welds as a function of direction of load[J]. 1971.

[2] 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.

**校对报告**

当前使用的样式是 [中华人民共和国国家标准\_GBT\_7714-2005]

当前文档包含的题录共3条

有0条题录存在必填字段内容缺失的问题

所有题录的数据正常