

文本复制检测报告单(全文标明引文)

№:ADBD2019R_2018122914160920190418220657705316955064

检测时间:2019-04-18 22:06:57

检测文献: 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究

作者: 赵琛

检测范围: 中国学术期刊网络出版总库

中国博士学位论文全文数据库/中国优秀硕士学位论文全文数据库

中国重要会议论文全文数据库

中国重要报纸全文数据库

中国专利全文数据库

图书资源

优先出版文献库

学术论文联合比对库

互联网资源(包含贴吧等论坛资源)

英文数据库(涵盖期刊、博硕、会议的英文数据以及德国Springer、英国Taylor&Francis 期刊数据库等)

港澳台学术文献库

互联网文档资源

CNKI大成编客-原创作品库

个人比对库

时间范围: 1900-01-01至2019-04-18

检测结果

去除本人已发表文献复制比: 5.7%

跨语言检测结果: 0%

去除引用文献复制比: 4.8%

总文字复制比: 5.7%

单篇最大文字复制比: 0.9% (郝李鹏 2140720039 结构工程 土木建筑工程学院)

重复字数: [5587] 总段落数: [9]

总字数: [97474] 疑似段落数: [6]

单篇最大重复字数: [856] 前部重合字数: [2898]

疑似段落最大重合字数: [1778] 后部重合字数: [2689]

疑似段落最小重合字数: [46]



指标: ☐ 疑似剽窃观点 ☒ 疑似剽窃文字表述 ☐ 疑似自我剽窃 ☐ 疑似整体剽窃 ☐ 过度引用

表格: 0 公式: 没有公式 疑似文字的图片: 0 脚注与尾注: 0

15.5% (1678) 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第1部分 (总10852字)

17.7% (1778) 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第2部分 (总10063字)

0% (0) 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第3部分 (总13658字)

0.4% (46) 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第4部分 (总12001字)

0% (0) 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第5部分 (总13079字)

0% (0) 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第6部分 (总12059字)

4.9% (486) 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第7部分 (总9936字)

14.4% (1546) 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第8部分 (总10737字)

1% (53) 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第9部分 (总5089字)



(注释: 无问题部分 文字复制部分 引用部分)

1. 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第1部分

总字数: 10852

相似文献列表

去除本人已发表文献复制比: 15.5%(1678) 文字复制比: 15.5%(1678) 疑似剽窃观点: (0)

1	郝李鹏 2140720039 结构工程 土木建筑工程学院 - 《学术论文联合比对库》- 2017-04-20	7.9% (856) 是否引证: 否
2	李四 李四 - 《学术论文联合比对库》- 2013-05-05	5.8% (624) 是否引证: 否
3	Q460高强度钢材焊缝连接受力性能和计算模型研究	4.9% (535)

	魏晨熙(导师：石永久) - 《清华大学硕士论文》 - 2013-05-01	是否引证：否
4	高强结构钢在建筑中的应用研究现状 邱林波;刘毅;侯兆新;陈水荣;钟国辉; - 《工业建筑》 - 2014-03-06 1	2.9% (318)
5	孟超_深入探讨新型金属材料——超级合金的性能与应用 孟超 - 《学术论文联合比对库》 - 2017-06-19	2.1% (232)
6	基于TVCC大楼火灾超高层建筑中钢结构损伤评估研究 翟传明(导师：韩庆华) - 《天津大学博士论文》 - 2014-12-01	0.6% (66)
7	基于语料库的汉语听觉通感式隐喻认知探讨 古洪精(导师：胡剑波) - 《湖南科技大学硕士论文》 - 2018-06-01	0.6% (61)
8	Q690钢焊接工字形截面压弯构件平面内局部—整体相关屈曲研究 于志兵(导师：申红侠) - 《西安建筑科技大学硕士论文》 - 2018-04-01	0.3% (31)
		是否引证：否

原文内容

摘要

高强度结构钢材是指强度大于 460MPa，并具有良好的延性、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，本文主要进行了以下内容的研究：

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，考虑材料的退化和失效，采用 ABAQUS/Explicit

显示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的两个变量进行参数分析。

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

II

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 main purpose of this paper is to study the mechanical properties of fillet weld joints of high strength steel and provide experimental basis for the calculation of bearing capacity of high strength steel fillet weld joints in China. The following research contents were carried out in this paper:

Firstly, the mechanical properties of Q890D high strength structural steel and ER120S-G high strength welding materials were tested, and the mechanical properties were obtained. The constitutive model of base metal and welding material was checked by "trial-and-error" method, and the test results were verified by ABAQUS finite element software.

Secondly, 48 high strength steel overlap joint fillet weld specimens under different loading angles were subjected to monotonic tensile loading, and the development history of strain field was collected by DIC measuring system. The strain development characteristics of high strength steel fillet weld specimens under monotonic tensile loading were analyzed in detail by means of GOM software of DIC measuring system,

and the response of maximum strain point set in the whole field was calculated. The variation of failure modes of specimens under different loading angles was obtained.

III Finally, the mechanical properties of fillet welds (including failure angle, deformation capacity, ultimate strength and load-carrying capacity) were summarized and analyzed,

and the effect of loading angle on the mechanical properties of fillet welds was emphatically studied.

Then the finite element model of the high strength steel fillet weld specimens under different loading angles was established by using ABAQUS/standard implicit solver. Secondly, considering the material degradation and failure, the finite element simulation of the cracking of the transverse fillet weld and the longitudinal fillet weld specimens was carried out by using ABAQUS/Explicit dynamic solver. Then, two

parameters affecting the fracture process were further analyzed.

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

I

目录

第 1 章绪论	5
1.1 研究背景及意义	5
1.2 角焊缝力学性能研究现状	6
1.2.1 正面和侧面角焊缝研究现状	7
1.2.2 斜向角焊缝研究现状	8
1.2.3 各国角焊缝设计规范对比	11
1.2.4 热输入量研究现状	12
1.3 角焊缝连接接头有限元模拟	13
1.4 数字图像相关方法研究现状	14
1.4.1 DIC 技术的发展历史	14
1.4.2 国内外工程应用现状	14
1.5 存在的问题与本文研究工作	15
1.5.1 存在的问题	15
1.5.2 本文研究工作	16
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
2.1 引言	18
2.2 高强钢 Q890D 单调拉伸试验研究	18
2.2.1 试验概况	18
2.2.2 试验结果	20
2.2.3 试验用钢材的可焊性	22
2.3 高强度焊材 ER120S-G 单调拉伸试验研究	23
2.3.1 试验概况	23
2.3.2 试验结果	24
2.4 材料本构模型的标定	25
2.4.1 “试错法”的校准流程	25
2.4.2 标准材性试件的有限元模拟	27
2.4.3 有限元结果与试验对比	28
2.5 本章小结	30
第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究	31
3.1 引言	31
3.2 试验概况	31
3.2.1 单边单条角焊缝试件设计	31
II	
3.2.2 单边双条角焊缝试件设计	36
3.3 试验装置及仪器	40
3.4 试验结果与分析	41
3.4.1 试件断后测量和断裂角度	43
3.4.2 荷载位移曲线和承载能力	46
3.4.3 极限强度	60
3.5 加载角度对角焊缝力学性能的影响	64
3.5.1 加载角度对断裂角度的影响	65
3.5.2 加载角度对变形能力的影响	65
3.5.3 加载角度对极限强度的影响	69
3.6 本章小结	75
第 4 章 DIC 测量系统监测下的试件应变分布特征	77
4.1 引言	77
4.2 DIC 测量系统简介	77
4.2.1 DIC 测量系统的工作原理	79
4.2.2 DIC 测量系统的精度校核	79
4.2.3 变形载体制备	80
4.3 DIC 监控下的角焊缝试件应变发展特征	82

4.3.1 正面角焊缝试件焊缝区域应变发展特征.....	82
4.3.2 侧面角焊缝试件焊缝区域应变发展特征.....	85
4.3.3 斜向角焊缝试件焊缝区域应变发展特征.....	88
4.4 本章小结.....	92
第 5 章不同加载角度下角焊缝有限元分析.....	94
5.1 引言.....	94
5.2 有限元模型.....	94
5.2.1 金属材料模型.....	94
5.2.2 边界条件和约束设置.....	94
5.2.3 网格划分和单元类型.....	98
5.3 有限元隐式分析.....	99
5.3.1 单边单条角焊缝试件.....	99
5.3.2 单边双条角焊缝试件.....	100
5.3.3 隐式分析结果与试验对比.....	101
5.4 有限元显式分析.....	103
5.4.1 准静态响应分析.....	103
5.4.2 断裂机制模型.....	104
5.4.3 正面和侧面角焊缝断裂模拟.....	106
5.4.4 参数分析.....	108
III	
5.5 本章小结.....	111
第 6 章结论与展望.....	112
6.1 本文的主要工作.....	112
6.2 本文的主要结论.....	112
6.3 展望.....	113
参考文献.....	115
致谢.....	119
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	120
IV	

第 1 章 绪论

5

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义高强度结构钢材是指强度大于 460MPa，并具有良好的延性、韧性以及加工性能的结构钢材。迄今为止，高强度结构钢材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、碳排放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

6

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。

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。

1.2 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。

第 1 章绪论

7

图 1.4 侧面角焊缝图 1.5 正面角焊缝图 1.6 斜向角焊缝

1.2.1 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。

8

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°。

1.2.2 斜向角焊缝研究现状

第 1 章绪论

9

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 and Allan (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：

$$R = 0.92 \frac{u}{l} + 0.0603 \frac{u}{l} \tan \theta$$

$$R_{ax} = 0.47 \max \{ 0.225 (5) + (1.2) \}$$

式中， θ 是加载方向与焊缝方向的夹角， u 是不同加载角度下单位长度的极限荷载 (kips/in)， m 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：

$$1.5 \\ 0 \\ 1.0 \ 0.50 \sin V \\ V \\ = + (1.3)$$

式中，V 为荷载在任意加载角度作用下的角焊缝的极限强度；0V 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。

第 1 章绪论

11

- (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。

指 标

疑似剽窃文字表述

1. 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。
2. 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

3. 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。
4. 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
5. 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。

2. 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第2部分

总字数：10063

相似文献列表

去除本人已发表文献复制比：17.7%(1778) 文字复制比：17.7%(1778) 疑似剽窃观点：(0)

1	钢的碳当量公式及其在焊接中的应用 - 《互联网文档资源 (http://wenku.baidu.c) 》 - 2017	4.9% (489) 是否引证：否
2	碳当量计算公式 - 《互联网文档资源 (http://wenku.baidu.c) 》 - 2016	4.9% (489) 是否引证：否
3	钢的碳当量公式及其在焊接中的应用 - 《互联网文档资源 (http://wenku.baidu.c) 》 - 2017	4.7% (473) 是否引证：否
4	钢的碳当量公式及其在焊接中的应用-百度文库 - 《互联网文档资源 (http://wenku.baidu.c) 》 - 2012	4.3% (432) 是否引证：否
5	中国化工CAD论坛 - 《互联网文档资源 (http://wenku.baidu.c) 》 - 2012	4.1% (410) 是否引证：否
6	钢的碳当量公式及其在焊接中的应用-百度文库 - 《互联网文档资源 (http://wenku.baidu.c) 》 - 2012	4.1% (408) 是否引证：否
7	碳当量计算小结[1] - 《互联网文档资源 (http://wenku.baidu.c) 》 - 2017	3.5% (348) 是否引证：否
8	碳当量计算小结2006.3 - 《互联网文档资源 (http://wenku.baidu.c) 》 - 2017	3.5% (348) 是否引证：否
9	8260131420-邹宇明-数字图像相关方法在材料力学性能测试中的应用研究-材料科学与工程-高怡斐-18801188706 邹宇明 - 《学术论文联合比对库》 - 2017-04-19	3.1% (309) 是否引证：否
10	焊接碳当量计算及公式应用 刘汉谊; - 《承钢技术》 - 2007-04-15	3.0% (300) 是否引证：否
11	钢的碳当量公式及其在焊接中的应用 曹良裕,魏战江 - 《材料开发与应用》 - 1999-02-15	2.8% (285) 是否引证：是
12	数字图像相关方法在应变测量中的应用研究 张睿诚(导师：杨昌棋) - 《重庆大学硕士论文》 - 2017-05-01	2.7% (271) 是否引证：是
13	钢焊接最低预热温度的确定 潘勇琨,王振家 - 《焊接技术》 - 2001-06-25	2.1% (209) 是否引证：否
14	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 陈庆顺(导师：郝兆朋) - 《长春工业大学硕士论文》 - 2018-06-01	1.7% (175) 是否引证：是
15	宣钢9#高炉铁口焊接维护技术的应用 全立新;张强;袁亚利; - 《2009年河北省冶金学会炼铁技术暨学术年会论文集》 - 2009-08-29	1.6% (162) 是否引证：否
16	焊接热输入对Q890D高强钢焊接接头力学性能及组织影响 李艳;杨建勋;李永强;冯文义; - 《莱钢科技》 - 2012-08-15	1.4% (137) 是否引证：否

17	钻井平台悬臂梁用高强钢焊接工艺研究 朱秋东;孙敏锋;-《江苏船舶》-2017-04-30	1.3% (135) 是否引证: 否
18	39 刘勇 -《学术论文联合比对库》-2012-04-16	1.3% (132) 是否引证: 否
19	大高炉炉壳开裂焊接技术的应用实践 全立新;袁亚利;谢东青;-《炼铁技术通讯》-2010-12-15	1.3% (127) 是否引证: 否
20	基于人工神经网络的CSP热轧深冲板力学性能预报 谭成楠(导师:程晓茹)-《武汉科技大学硕士论文》-2008-05-22	1.2% (118) 是否引证: 否
21	碳当量 -《互联网文档资源 (http://wenku.baidu.c) 》-2017	1.2% (118) 是否引证: 否
22	碳当量在碳钢压力容器选材备料中的应用-百度文库 -《互联网文档资源 (http://wenku.baidu.c) 》-2012	1.1% (113) 是否引证: 否
23	基于数字图像相关法的断裂研究与数值模拟 张尧(导师:介玉新)-《清华大学硕士论文》-2016-11-01	1.0% (103) 是否引证: 否
24	3D打印蜂窝结构各向异性和屈曲研究及实验验证 徐隆坤(导师:祝雪峰)-《大连理工大学硕士论文》-2018-05-01	1.0% (98) 是否引证: 否
25	转向架构架用金属材料(钢)浅析 张杨;-《内燃机与配件》-2017-12-15	0.9% (95) 是否引证: 否
26	5 (1) -《学术论文联合比对库》-2015-04-16	0.8% (80) 是否引证: 否
27	8260121025-彭杏娜-高强焊接材料应用于装甲钢焊接的研究-材料加工工程-彭云-13810109440 彭杏娜-《学术论文联合比对库》-2015-04-20	0.7% (71) 是否引证: 否
28	地震及超高车辆撞击下功能可恢复混凝土连续梁桥研究 徐梁晋(导师:叶列平)-《清华大学博士论文》-2016-06-01	0.6% (65) 是否引证: 否
29	局部加强的三面围焊角焊缝连接受力性能研究及参数分析 周苗倩(导师:张春梅;徐忠根)-《广州大学硕士论文》-2018-06-01	0.6% (63) 是否引证: 否
30	纤维石膏速成板-钢筋混凝土密肋组合楼板承载能力有限元分析 谷岩;姜忻良;邹筱林;常好诵;-《工业建筑》-2011-06-20	0.4% (39) 是否引证: 否
31	现浇石膏外墙钢筋砼高层网格式筒中筒结构研究与应用 王其明(导师:马克俭;陈志华)-《天津大学博士论文》-2012-11-01	0.3% (32) 是否引证: 否

原文内容

(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,由于高强钢屈服比高、延性差,接头强度的预测公式可能与普通钢材不同。

1.2.3 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 AWS D1.1/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

3

2

/3

0.46

$w_{uw} EC e u e M f$

$F h l f A$

$= (1.4)$

式中, w_u

f 为焊缝材料的名义极限强度; e_h 为焊喉尺寸, 取为 $l/2f_h$; l 为焊缝长度; 为相关参数, 对于高强钢材取值为 1.0; M_2 为针对高强钢的强度折减系数; 取为 1.25, e_A 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

$$0.60 (1 - 0.5 \sin \theta) w_A N S l u e$$

$$F = f A + (1.5)$$

式中， f 为抗力分项系数，取为 0.75； θ 为加载方向与焊缝长度方向的夹角。

中国规范

12

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：

$$w f f f e N f$$

$$h l$$

$$= (1.6)$$

对于侧面角焊缝：

$$w f f e N f$$

$$h l$$

$$= (1.7)$$

在各种力的综合作用下：

$$2$$

$$f_2 w f f f$$

$$f$$

$$+$$

$$(1.8)$$

式中， f 和 f

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； $w f f$ 为角焊缝的强度设计值，按公式 $0.41 w w f u f = f$ 计算， $w u f$ 表示焊缝的极限强度； f 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：

$$2^{1/2}$$

$$0.41 (1 - 0.328 \sin \theta) w_G B u e$$

$$F f A = (1.9)$$

1.2.4 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。

第 1 章绪论

13

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。

1.3 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。

14

1.4 数字图像相关方法研究现状

1.4.1 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，且已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。

1.4.2 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。

第 1 章绪论

15

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。

1.5 存在的问题与本文研究工作

1.5.1 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

16

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来说, 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。

1.5.2 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 and 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。

第 1 章绪论

17

(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 显示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 2D 和破坏位移 p_u 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。

18

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

2.1 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。

2.2 高强钢 Q890D 单调拉伸试验研究

2.2.1 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)

0.2
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
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

19
0.2
伸长率%
冲击功吸收能量(- 20℃) , J
冷弯
(d=3a)

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

20
20
10
95 95
40
350
R2520120
1
2
1
2
1020
10
40
1-1截面 2-2截面
35
1-1截面 2-2截面
80 80
35
15
350
20 15020
R2520

1
2
1
2
15
20
20
20
20
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。

图 2.4 2000kN 单调拉伸加载试验机及引伸计

2.2.2 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。

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

21

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

0
200
400
600
800
1000
1200
1400
0.00 0.05 0.10 0.15
应力
/

应变

10_1
10_2
10_3
0
200
400
600
800
1000
1200
0.00 0.05 0.10 0.15 0.20
应力

/
应变
20_1
20_2
20_3
22

2.2.3 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：

(1)(%)

6 15 4 4 13

Mn Ni Mo Cr Cu

CE = C + + + + +

(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℃；当 CE (1) > 0.6%，预热 200~370℃。

(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)(%)

6 5 15

Mn Cr Mo V Cu Si Ni

CE C

+ + + +

= + + + (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：

(3)(%)

6 5 15

Mn Si Cr Mo V Cu Ni

CE C

+ + + +

= + + +

(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

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

23

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。

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。

指 标
疑似剽窃文字表述
1. 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。
2. 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，
3. 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

4. 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，

3. 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第3部分

总字数：13658

相似文献列表

去除本人已发表文献复制比：0%(0) 文字复制比：0%(0) 疑似剽窃观点：(0)

原文内容

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

2.3 高强度焊材 ER120S-G 单调拉伸试验研究

2.3.1 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

24

的设计尺寸如图 2.8 所示。试验机采用大学力学实验室 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

2.3.2 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

R5R5

R418

78

18

61

70

200

61

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

25

2.4 材料本构模型的标定

2.4.1 “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n

om

和名义应力n

om
表示的，其计算公式为：

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right)^n$$

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：

$$\sigma = \frac{F}{A} \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right)^n$$

其中 Δl 是试件标距段的长度变化量， l_0 是试件的标距段长度， F 是荷载， A_0

是试样标距段的初始截面面积， ϵ 和 σ 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。

图 2.10 本构关系曲线校准的一般步骤[

61]

26

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

$$\sigma = \sigma_0 + K \epsilon^n$$

式中， σ_0 和 ϵ_0 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(ϵ_0 , σ_0)即为试验的真实应力-塑性应变曲线和曲线 $\sigma = E \epsilon$ 的交点， σ 为真实应力， ϵ

为塑性应变， σ_y 为屈服应力， K 为常数， n 是应变硬化

指数。对公式(2.6)的 σ_0

部分进行求导，得到

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = K n \epsilon^{n-1}$$

p
(2.7)

在名义应力应变曲线的峰值点(u_p , σ_u)处, 可以得到

$1(u)$

$n u p$

$K n$

(2.8)

比较公式(2.6)和(2.8)得到参数 n 和 K 的初值表达式

()

$u p u p u p n$

K

(2.9)

(3) 建立和标准材料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

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

27

2.4.2 标准材料试件的有限元模拟

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 材料试件, 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。

28

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

2.4.3 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

0

50

100

150

200

250

0 2 4 6 8 10 12 14 16

力

/k N

位移/mm

10_1

10_2

10_3

有限元

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

29

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 (k N) 85.152 84.17 1.15%

极限荷载对应的位移(mm) 5.612578 6.120 8.29%

0

50

100

150

200

250

300

350

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22

力

/k N

位移/mm

20_1

20_2

20_3

有限元

0

10

20

30

40

50

60

70

80

90

0 2 4 6 8 10 12 14

力

/k N

位移/mm

120_1

有限元

30

2.5 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。

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

31

第3章高强钢角焊缝力学性能试验研究

3.1 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。

3.2 试验概况

3.2.1 单边单条角焊缝试件设计

3.2.1.1 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

32

加载角度, N 代表每种角度的重复试件。

- (a) 90°焊接件 (b) 75°焊接件
- (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

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

33

图 3.2 90°试件设计图图 3.3 75°试件设计图图 3.4 60°试件设计图图 3.5 45°S 试件设计图图 3.6 90°试件图 3.7 75°试件图 3.8 60°试件图 3.9 45°S 试件

34

3.2.1.2 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:

6
0
/)
/ min 100
V k J cm
cm
=
电压 () 电流 (A)
热输入 ()
焊接速度 ()

(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

(k J/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

3.2.1.3 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。

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

35

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

图 3.10 焊脚尺图 3.11 试件测量示意图斜边搭接板剪切边试验前测量主板受拉边

36

单边双条角焊缝试件设计

3.2.2.1 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。

图 3.12 45°D 试件设计图图 3.13 30°试件设计图图 3.14 15°试件设计图图 3.15 0°试件设计图

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

37

(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

3.2.2.2 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

(k J/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

38

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

(k J/mm)

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

3.2.2.3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

3.3 试验装置及仪器

本试验在大学南校区结构实验室进行，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。

4. 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第4部分		总字数：12001
相似文献列表		
去除本人已发表文献复制比：0.4%(46) 文字复制比：0.4%(46) 疑似剽窃观点：(0)		
1	04_BY1204152_苗国磊 苗国磊 - 《学术论文联合比对库》 - 2017-05-02	0.4% (46) 是否引证：否
原文内容		

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。

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个阶段：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。

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

41

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。

（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

3.4 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。

42

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。
图 3.26 90_1 试件断口图 3.27 75_1 试件断口
(a) 试件断裂后—0° (b) 试件断裂后—15°
第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究
43
(c) 试件断裂后—30° (d) 试件断裂后—45°D (e) 试件断裂后—45°S
(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
3.4.1 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。
图 3.29 游标万能角度尺图 3.30 试验后试件测量示意图断裂角度断裂面主板斜边试验后测量剪切边

44
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

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究
45
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
 46

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°)。

(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

3.4.2 荷载位移曲线和承载能力

3.4.2.1 单边单条角焊缝试件

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

47

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。

48

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

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

49

50

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

51

52

图 3.35 单边单条角焊缝试件荷载位移曲线

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

53

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 r

u

F_P 超过 0.92，断裂位移与极

限荷载对应的位移比值 r

u

F_P 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

u

P ，极限荷载对

应的位移

u

P ，断裂荷载 $r F$ 以及断裂时对应的位移

r

F ，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

u

P （kN）

断裂荷载

r

F

（kN）

极限荷载对应的变

形

u

P

（mm）

断裂荷载对应的变

形

r

F
(mm)

荷载

比

$r u F$

P

变形

比

$r u F$

P

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

54

编号

极限荷载

u

P (k N)

断裂荷载

r

F

(k N)

极限荷载对应的变

形

u

P

(mm)

断裂荷载对应的变

形

r

F

(mm)

荷载

比

$r u F$

P

变形

比

$r u F$

P

破坏方式曲线特征

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							
u							
P (kN)							
断裂荷载							
r							
F (kN)							
极限位移							
u							
P							
(mm)							
断裂位移							
r							
F							
(mm)							
荷载比							
r u F							
P 变形比							
r u F							
P							

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。

3.4.2.2 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。

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

55

56

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

57

58

图 3.36 单边双条角焊缝试件荷载位移曲线

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

59

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 /r

u

F P 一般大于 1.2， /r

u

F P 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， /r

u F P 在 0.9 以下， /r

u

F P 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

u
P，极限荷载对
应的位移

u
P，断裂荷载r F 以及断裂时对应的位移

r
F，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

u
P (k N)
断裂荷载

r
F
(k N)
极限荷载对应的变
形

u
P
(mm)
断裂荷载对应的变
形

r
F
(mm)

荷载
比

ru F
P
变形
比

ru F
P

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

60
编号

极限荷载
u
P (k N)
断裂荷载

r
F
(k N)
极限荷载对应的变
形

u
P
(mm)

断裂荷载对应的变
形

r
F
(mm)
荷载
比

r u F
P
变形
比
r u F
P

破坏方式曲线特征

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

u
P (k N)
断裂荷载

r
F (k N)
极限位移

u
P
(mm)
断裂位移

r
F
(mm)
荷载比
r u F
P 变形比
r u F
P

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 0.92 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. 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。

5. 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第5部分

总字数：13079

相似文献列表

去除本人已发表文献复制比：0%(0) 文字复制比：0%(0) 疑似剽窃观点：(0)

原文内容

3.4.3 极限强度

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

61

3.4.3.1 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

0

$P=P/2$ 。

(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 t_{throat}

A_0 。 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

fracture

A_0 。

(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

0

t_{throat}

P/A_0 与 $0/fractureP/A_0$ 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

0

t_{throat}

P/A_0 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

0

$fracture$

P/A_0 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 u

P

(kN)

0

P

(kN)

t_{throat}

A_0

(mm^2)

fracture

A_0

(mm^2)

0

$t_{throat} P$

A_0

(MPa)

0

fracture P

A_0

(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

62
 编号 u
 P
 (k N)
 0
 P
 (k N)
 throat
 A
 (mm²)
 fracture
 A
 (mm²)
 0
 throat P
 A
 (MPa)
 0
 fracture P
 A
 (MPa)
 断裂角度

(°)
 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 u
 P
 (k N)
 0
 P
 (k N)
 throat
 A
 (mm²)
 fracture
 A
 (mm²)

0
throat P
A
(MPa)
0
fracture P
A
(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 $\sigma_{throatP}$ A的结果比 $\sigma_{fractureP}$ A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 $\sigma_{throat fracture}$
 $\sigma_A < \sigma_A$ ，进而使得 $\sigma_{throat fracture}$
 $\sigma_A > \sigma_A$ 。

(2) 根据理论最小破坏截面面积计算的极限强度 $\sigma_{throatP}$ A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 $\sigma_{fractureP}$ A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。

3.4.3.2 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：

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

63

(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
 $P = P / 4$ 。

(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 l_r ；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 l_e 。

(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 h ；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 h_r 。

(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 $A_{throat-le}$ 、 $A_{throat-lr}$ 、 $A_{fracture-le}$ 、 $A_{fracture-lr}$ 。

(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 $\sigma_{throat-le}$ 、 $\sigma_{throat-lr}$ 、 $\sigma_{fracture-le}$ 、 $\sigma_{fracture-lr}$ 。

P A、0

-

/fracture le

P A、0

-

/fracture lr

P A计算。按照

0 -

/throat le

P A和0

-

/throat lr

P A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 u

P

(k N)

0

P

(k N)

0

throat-le P

A

(MPa)

0

throat-lr P

A

(MPa)

0

fracture-le P

A

(MPa)

0

fracture-lr P

A

(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

64

编号 u

P

(k N)

0

P
 (k N)
 0
 throat-le P
 A
 (MPa)
 0
 throat-lr P
 A
 (MPa)
 0
 fracture-le P
 A
 (MPa)
 0
 fracture-lr P
 A
 (MPa)
 断裂角度
 (°)
 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 u

P
 (k N)
 0
 P
 (k N)
 0
 throat-le P
 A
 (MPa)
 0
 throat-lr P
 A
 (MPa)
 0
 fracture-le P
 A
 (MPa)
 0
 fracture-lr P
 A
 (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0

-

/t hroat le

P A >

0 -

/t hroat l_r

P A > 0

-

/f racture l_e

P A > 0

-

/f racture l_r

P A，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。

3.5 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第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

65

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。

3.5.1 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

$2 = 45 - \sin(30 + 9 \cos)$

(3.2)

3.5.2 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来讲，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

66

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

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

67

编号极限荷载

(k N)

极限位移

(mm)

屈服荷载

(k N)

屈服位移(mm)

初始线刚度

(N/mm)

位移延性系数

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

(k N)

极限位移(mm)

屈服荷载

(k N)

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

(k N)

极限位移

(mm)

屈服荷载

(k N)

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

68

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

(k N)

极限位移(mm)

屈服荷载

(k N)

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来讲，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

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

69

图 3.39 加载角度对初始线刚度的影响

3.5.3 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，

(k N)
破坏面长度 Lr
(mm)
throat
A
(mm²)
0
throat P
A
(MPa)
强度
归一化
nor
p
3.3
nor
p
()
.4
nor
p
(3)
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.

6. 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第6部分

总字数：12059

相似文献列表

去除本人已发表文献复制比：0%(0) 文字复制比：0%(0) 疑似剽窃观点：(0)

原文内容

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

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

71

编号极限荷

载

u

P

(k N)

单焊缝荷载

0

P

(k N)

破坏面长度 Lr

(mm)

throat

A

(mm²)

0

throat P

A

(MPa)

强度

归一化

nor

p

3.3

nor

p

()

.4

nor

p

(3)

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

u

P

(k N)

单焊缝荷载

0

P

(k N)

破坏面长度 Lr

(mm)

throat

A

(mm²)

0

throat P

A

(MPa)

强度

归一化

nor

p

3.3

nor

p

()

.4

nor

p

(3)

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

u

P

(k N)

单焊缝荷载

0

P

(k N)

破坏面长度 Lr

(mm)

throat

A

(mm²)

0

throat P

A

(MPa)

强度

归一化

nor

p

3.3

nor

p

()

.4

nor

p

(3)

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

—化

nor

P, 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

72

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来讲, 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。

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

73

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] 3

2

/3

0.575

$w_{uw} EC e u e M f$

$F h l f A$

$=$

不考虑

2

$=1.25M$ 折减

美国规范 ANSI/AISC 360-

10[

36]

1.5

$0.60 (1 - 0.5 \sin \alpha) w_{A NSI u e}$

$F = f A +$ 不考虑 $=0.75$

折减

中国规范 GB50017-2017[

34]

$2 \frac{1}{2}$

$0.41 (1 - 0.328 \sin \alpha) w_{G B u e}$

$F f A =$ 不考虑材料设计强度折减文献[73] 提出的简化公式

1.5

$0.65 (1.0 - (0.65 - 0.18 \cos \alpha) \sin \alpha) w_u$

e

$F = f A + + -$

表 3.24 角焊缝承载力与各国规范对比编号极限荷载 u_P

(kN)

欧洲规范

(kN)

美国规范

(kN)

中国

规范

ANSI

F

(kN)

简化公式

(k N)

EC3

u F

P ANSI u F

P GB u F P

u F

P

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

EC3

FA NSI

F F

74

编号极限荷载 uP

(k N)

欧洲规范

(k N)

美国规范

(k N)

中国

规范

ANSI

F

(k N)

简化公式

(k N)

EC3

u F

P ANSI u F

P GB u F P

u F

P

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) 对于角焊缝来说，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。

EC3

FA NSI

FF

第 3 章高强钢角焊缝力学性能试验研究

75

(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。

3.6 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；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。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) 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来讲，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) 对于角焊缝来说，采用三种规范（欧洲规范/美国规范/中国规范）得到

76

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。

第 4 章 DIC 测量系统监测下的试件应变分布特征

77

第4章 DIC 测量系统监测下的试件应变分布特征

4.1 引言 ARAMIS Digital 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。

4.2 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

数字散斑全场应变测量方法, 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, 测量过程方便快捷。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:

78

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, MSeExcel 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。

第 4 章 DIC 测量系统监测下的试件应变分布特征

79

4.2.1 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

4.2.2 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)

4.2.3 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。

7. 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第7部分 总字数：9936

相似文献列表

去除本人已发表文献复制比：4.9%(486) 文字复制比：4.9%(486) 疑似剽窃观点：(0)

1	10S033118-杨诗君-张素梅 杨诗君 - 《学术论文联合比对库》 - 2012-06-18	1.4% (138) 是否引证：否
2	04_BY1204152_苗国磊 苗国磊 - 《学术论文联合比对库》 - 2017-05-02	1.3% (127) 是否引证：否
3	11S033031-宋毛毛-王力 宋毛毛 - 《学术论文联合比对库》 - 2013-06-18	1.3% (126) 是否引证：否
4	空间网架组合节点受力性能分析 霁天菊(导师：柳锋) - 《山东建筑大学硕士论文》 - 2013-04-01	1.1% (113) 是否引证：否
5	10S033118-杨诗君-张素梅(1) 杨诗君 - 《学术论文联合比对库》 - 2012-06-25	1.0% (99) 是否引证：否
6	大径厚比薄壁圆钢管受弯性能研究 杨诗君(导师：张素梅;郭兰慧) - 《哈尔滨工业大学硕士论文》 - 2012-06-01	0.9% (93) 是否引证：否
7	微尺度散斑制备方法研究及应用进展评价 朱奇;郝文峰;陈雷;朱建国;何广龙; - 《实验力学》 - 2018-02-15	0.6% (55) 是否引证：是
8	持续荷载作用下混凝土构件的力学性能研究 鲁丽华;杨敏基;陈四利; - 《成都电子机械高等专科学校学报》 - 2011-03-25	0.4% (35) 是否引证：否
9	桩土界面特性及其对灌注桩竖向承载性状影响的试验研究与数值分析 占川(导师：王成华) - 《天津大学硕士论文》 - 2012-12-01	0.3% (34) 是否引证：否
10	双向反复荷载下型钢混凝土L形柱空间角节点抗震性能及计算方法研究 王妮 - 《学术论文联合比对库》 - 2014-03-19	0.3% (32) 是否引证：否

原文内容

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。

第 4 章 DIC 测量系统监测下的试件应变分布特征

81

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

82

4.3 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。

4.3.1 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

第 4 章 DIC 测量系统监测下的试件应变分布特征

83

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） $t_1=475s$ ，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%（ y

$y = E972.65 / 206000 = 0.47\%$ ）。

（2） $t_2=600s$ ，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） $t_3=659s$ ，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 t_2 到 t_3 ，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 $t_4=665s$ ，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。

0
100
200
300
400
500
600
700
0 0.1 0.2 0.3 0.4

荷载（

kN

）

位移（mm）

$t_3=659s$ $d_3=0.325mm$ $t_4=665s$ $d_4=0.34mm$ $t_1=475s$ $d_1=0.085mm$ $t_2=600s$

$d_2=0.194mm$

0

2
4
6
8
10
12
0 100 200 300 400 500 600 700

工程应变 (%)

加载时间(s)

点1 点2
点3 点4
点5 点6
点7 点8
点9 点10
点11 点12
点13 点14
点15 点16

点1
点11
点12

t1=475s t2=600s t3=659s

t4=665s

84

(a) t1=475s 时, 试件处于弹性阶段
(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

第 4 章 DIC 测量系统监测下的试件应变分布特征

85

(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

4.3.2 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 所示焊缝高强钢角焊缝的力学性能研究

86

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

0
100
200
300
400
500
600
0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1
荷载 (

kN
)
位移 (mm)
t1=412s t2=512s
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
0 100 200 300 400 500
工程应变 (%)
加载时间(s)

点1
点2
点3
点4
点5
点6
点7
点8
点9
点10
点9
点10
点8

t1=412s
t2=512s

第 4 章 DIC 测量系统监测下的试件应变分布特征

87

(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 0.109s⁻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 0.147 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) 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。

0%
10%
20%
30%
40%

50%
60%
70%
0 100 200 300 400 500 600
应变率加载时间(s)
点9
88

(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) 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)

4.3.3 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。

0
100
200
300
400
500
0 0.2 0.4 0.6 0.8 1
荷载 (kN)
位移 (mm)
t1=484s t4=558s
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
0 100 200 300 400 500 600
工程应变 (%)
加载时间(s)
点1
点2
点3
点4
点5
点6
点7
点8
点9
点10
点4
点7
点8
t1=484s t2=535s t3=545s
t4=558s
0%
20%

40%
60%
80%
100%
120%
140%
160%
0 100 200 300 400 500 600
应变率加载时间(s)

点4
t2=535s
t4=558s

第 4 章 DIC 测量系统监测下的试件应变分布特征

89
(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

0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
0 100 200 300 400 500 600 700
工程应变 (

%
)
加载时间(s)

点1 点2
点3 点4
点5 点6
点7 点8
点9 点10
点11 点12
点13 点14
点15 点16
点8
点5
点9
t1=530s
t2=682.5s

90
(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

第4章 DIC 测量系统监测下的试件应变分布特征

91

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，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。整体来讲，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

92

（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

4.4 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）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

第4章 DIC 测量系统监测下的试件应变分布特征

93

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 5 s

-1 之间。

（3）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-

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。整体来讲，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。

94

第5章不同加载角度下角焊缝有限元分析

5.1 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 显示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2D 和破坏位移pu 这两个参数进行参数分析。

5.2 有限元模型

5.2.1 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。

5.2.2 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，

第 5 章不同加载角度下角焊缝有限元分析

95

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。

指 标		
疑似剽窃文字表述		
1. 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。		
8. 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第8部分		总字数：10737
相似文献列表		
去除本人已发表文献复制比：14.4%(1546) 文字复制比：14.4%(1546) 疑似剽窃观点：(0)		
1	筒形变薄旋压加工有限元分析 刘粉妮(导师：姚进) - 《四川大学硕士论文》 - 2006-05-07	3.4% (369) 是否引证：否
2	异形钢管混凝土组合柱力学性能研究 王鑫(导师：徐亚丰) - 《沈阳建筑大学硕士论文》 - 2009-06-01	2.9% (307) 是否引证：否
3	傅毅大论文 - 《学术论文联合比对库》 - 2011-11-08	2.9% (307) 是否引证：否
4	陈科 陈科 - 《学术论文联合比对库》 - 2012-12-11	2.9% (307) 是否引证：否
5	04-2012100427张志函 张志函 - 《学术论文联合比对库》 - 2017-04-25	2.8% (306) 是否引证：否
6	基于ABAQUS对某型无人机机翼的有限元分析及其局部优化 韩洪黎 - 《学术论文联合比对库》 - 2011-12-07	2.8% (305) 是否引证：否
7	2130695-张超-机械工程-机械学院 张超 - 《学术论文联合比对库》 - 2017-04-26	2.6% (283) 是否引证：否

8	铝合金中厚板拉深成形研究 于晓东(导师：冯再新) - 《中北大学硕士论文》 - 2012-04-20	2.6% (274) 是否引证：否
9	基于ABAQUS的钢—混凝土组合梁钢框架抗震性能研究 宋毛毛(导师：王力) - 《哈尔滨工业大学硕士论文》 - 2013-06-01	2.5% (273) 是否引证：否
10	Simwe¸jour¸NO¸11 - 豆丁网 - 《互联网文档资源 (http://www.docin.com) 》 - 2017	2.5% (269) 是否引证：否
11	2012100427+张志函 张志函 - 《学术论文联合比对库》 - 2016-06-06	2.5% (267) 是否引证：否
12	砌体墙、柱高厚比的研究 杨超(导师：赵成文;高连玉) - 《沈阳建筑大学硕士论文》 - 2010-12-01	2.5% (266) 是否引证：否
13	复杂刀具的数字化模型建立及关键参数测量 - 《学术论文联合比对库》 - 2017-04-26	2.4% (257) 是否引证：否
14	091102050187_耿乾坤_气力卸船机液压臂架设计及其力学性能的研究 耿乾坤 - 《学术论文联合比对库》 - 2012-04-12	2.4% (254) 是否引证：否
15	RBS钢梁设置加劲肋后的梁柱节点受力性能研究 王春彩(导师：李军) - 《青岛理工大学硕士论文》 - 2010-12-01	2.3% (245) 是否引证：否
16	多层柱间支撑门式刚架结构体系的纵向抗震性能研究 刘凯(导师：冉红东) - 《西安建筑科技大学硕士论文》 - 2018-04-01	2.3% (242) 是否引证：否
17	11S033031-宋毛毛-王力 宋毛毛 - 《学术论文联合比对库》 - 2013-06-18	2.3% (242) 是否引证：否
18	耕耙犁设计与试验 蔡海涛(导师：朱德泉;张健美) - 《安徽农业大学硕士论文》 - 2015-06-01	2.3% (242) 是否引证：否
19	ABAQUS显式算法的准静态加速分析方法研究 郭春红;陶忠;张品乐; - 《低温建筑技术》 - 2015-08-28	2.2% (240) 是否引证：否
20	201091303532491 - 《学术论文联合比对库》 - 2013-06-11	2.0% (213) 是否引证：否
21	基于J-C模型的Q235钢的失效准则 郭子涛;舒开鸥;高斌;张伟; - 《爆炸与冲击》 - 2017-11-29 1	1.6% (176) 是否引证：否
22	2014010303-聂世波-新型混凝土网格板受力性能数值分析及试验研究-防灾减灾工程及防护工程-贾留东-土木工程学院 聂世波 - 《学术论文联合比对库》 - 2017-04-10	1.3% (144) 是否引证：否
23	基于性能等同的预制拼装桥墩抗震安全性能评价 糜长荣(导师：葛继平;闫兴非) - 《上海应用技术大学硕士论文》 - 2018-01-04	1.1% (113) 是否引证：否
24	培养物袋装滚动加载的生物反应器研制及有限元仿真 郜军霞(导师：张春秋) - 《天津理工大学硕士论文》 - 2012-01-01	0.8% (86) 是否引证：否
25	多向角焊缝节点受力性能和设计方法研究 孙红(导师：郭成喜) - 《西安建筑科技大学硕士论文》 - 2012-05-01	0.7% (79) 是否引证：是
26	花键冷敲精密成形数值模拟研究 贾燕龙(导师：付建华) - 《太原科技大学硕士论文》 - 2014-05-01	0.7% (77) 是否引证：否
27	基于ABAQUS/Explicit的深水连接器准静态分析 赵三军;段梦兰;李旭东;刘亚磊;罗晓兰;代广文;李博; - 《石油矿场机械》 - 2014-08-25	0.5% (57) 是否引证：否
28	某大型民机吊挂应急断离保险销强度研究 郭瀚泽(导师：薛彩军) - 《南京航空航天大学硕士论文》 - 2017-12-01	0.5% (57) 是否引证：否
29	基于微观机理的梁柱节点焊接细节断裂分析 周晖;王元清;石永久;熊俊; - 《工程力学》 - 2015-05-25	0.5% (52) 是否引证：否
30	桩基和刚性复合地基抗震性能的振动台试验数值模拟 倪克闯;高文生; - 《建筑科学》 - 2013-05-20	0.4% (47) 是否引证：否
31	钢结构外套管式节点试验研究与分析 朱赢(导师：陶忠) - 《昆明理工大学硕士论文》 - 2013-04-20	0.4% (47) 是否引证：否
32	高强钢箱形轴压及偏压构件相关屈曲有限元模型的建立与验证 刘翔; - 《建筑结构》 - 2017-08-10	0.4% (43) 是否引证：否
33	圆端形不锈钢管混凝土桥墩抗震性能试验研究 张建周(导师：赵秋红) - 《天津大学硕士论文》 - 2017-12-01	0.3% (33) 是否引证：否
34	质量缩放在风电锁紧盘装配分析中的应用 陶德峰;王建梅;唐亮;康建峰; - 《太原科技大学学报》 - 2013-02-15	0.3% (33) 是否引证：否

原文内容

[

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

96

(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。

第 5 章不同加载角度下角焊缝有限元分析

97

(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

98

(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

5.2.3 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

($^{\circ}$)

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。

第 5 章不同加载角度下角焊缝有限元分析

99

图 5.3 正面角焊缝试件有限元模型网格划分

5.3 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。

5.3.1 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

t

l就是设计长度el，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。

100

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

5.3.2 单边双条角焊缝试件对于单边双条角焊缝试件来说，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

t

l；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

e

l。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。

0

100

200

300

400

500

600

0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60

荷载 (

k N

)

位移 (mm)

90_2 90_3 90_4

90_5 90_6 90_1

FEM

0

100

200

300

400

500

600

0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60

荷载 (

k N

)

位移 (mm)

75_1 75_2 75_3

75_4 75_5 75_6

FEM

0

100

200

300

400

500

600

700

0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50

荷载 (

k N

)

位移 (mm)
60_1 60_2 60_3
60_4 60_5 60_6
FEM
0
100
200
300
400
500
600
700
800
0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70

荷载 (k N)

位移 (mm)
45S_1 45S_2
45S_3 45S_4
45S_5 45S_6

FEM
第 5 章不同加载角度下角焊缝有限元分析

101
(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。

5.3.3 隐式分析结果与试验对比

0
200
400
600
800
1000
1200
0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60

荷载 (k N)

位移 (mm)
45D_1 45D_2 45D_3
45D_4 45D_5 45D_6
FEM-Le FEM-Lt

0
200
400
600
800
1000
1200
1400
0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80

荷载 (k N)

位移 (mm)
30_1 30_2 30_3

30_4 30_5 30_6
FEM-Le FEM-Lt
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80

荷载 (k N)
位移 (mm)
15_1 15_2 15_3
15_4 15_5 15_6
FEM-Le FEM-Lt

0
100
200
300
400
500
600
700
0.00 0.20 0.40 0.60 0.80 1.00 1.20

荷载 (k N)
位移 (mm)
00_1 00_2 00_3
00_4 00_5 00_6
FEM-Le FEM-Lt

102

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

u

P

(k N)

极限位移

u

P

(mm)

极限位移对应的荷载 -uP Le

(k N)

误差极限位移对应的荷载 -uP Lt

(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%

第 5 章不同加载角度下角焊缝有限元分析

103

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）总体来讲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。

5.4 有限元显式分析 ABAQUS/Explicit 可以进行显示动态分析，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。对于角焊缝来说，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 显示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。

5.4.1 准静态响应分析

104

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：

$$=T_{OTAL} + I + V + KE + F + D + W$$

$$E + E + E + E + E + E \quad (5.1)$$

式中，IE 是内能（包括弹性和塑性应变能），VE 是粘性耗散吸收的能量，

KE

E 是动能，F + D + E 是摩擦耗散吸收的能量，WE 是外力所做的功，T_{OTAL}

E 是在系统中的

总能量。通常情况下，变性材料的动能 KE

E 占内能 IE 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：

$$=$$

$$e \cdot d \cdot L \cdot t$$

$$c$$

(5.2)

式中，t 为稳定时间增量，Le 是特征单元长度，dc 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：

$$=d \cdot E$$

$$c$$

(5.3)

式中，E 是弹性模量，是材料密度。

根据上述公式，若将材料密度增加 f_2 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。

5.4.2 断裂机制模型

第 5 章不同加载角度下角焊缝有限元分析

105

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：

$$= \exp(1.5) f_{SMCS} (5.4)$$

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：

*1

2 3 4 5

$$:= \exp(-) (1 + \ln) (1 + \ln T) f_{Coo} D + D D_{Johnson} D D_k (5.5)$$

式中：1

5

D 为材料参数； D 为应力三轴度，定位为 =

/m

e

，其中静水压力 1

1 2 2 3 3

$$= (+) / 3m + ,$$

e

为等效应力； $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ 为无量纲等效塑性应变速率，

0

为参考应变速率， $T = (T - T_r) / (T_m - T_r)$

m r

为无量纲温度参数， T_r 为参考温度， T_m 为材料熔化温度。

106

Johnson-Cook 失效模型利用累积损伤的思想考虑了应力状态、应变速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 1

4 5 3

$D = D = D = 0$ $D = 1.5$ 时，Johnson-Cook

模型可以等同为 SMCS 模型，2D 即为模型中的断裂参数。

5.4.3 正面和侧面角焊缝断裂模拟由上文可知，为了模拟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 1

4 5 3

$D = D = D = 0$ $D = 1.5$ ，2D 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 p_u 与损伤演化有关，

p

u 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 2D 和 p_u 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 $2D=1.5$
 $=0.01pu$ ，侧面角焊缝试件的断裂参数为 $2D=0.3=0.01$

p

u，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

0

100

200

300

400

500

600

700

0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60

荷载 (

k N

)

位移 (mm)

90_2 90_3

90_4 90_5

90_6 90_1

FEM-EXP

0

100

200

300

400

500

600

700

0.00 0.20 0.40 0.60 0.80 1.00 1.20

荷载 (

k N

)

位移 (mm)

00_1 00_2

00_3 00_4

00_5 00_6

FEM-EXP

第 5 章不同加载角度下角焊缝有限元分析

107

(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

108

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

u

P (k N)

极限位移

u

P (mm)

极限荷载

u P -

FEM (kN)

相对误差

极限位移

u

P -

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%; 总体来讲, 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。

5.4.4 参数分析

5.4.4.1 不同断裂参数 $2D$ 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 $2D$ 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 $2D$ 的取值见表 5.4 , 不同断裂参数

2

D 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 $2D$ 增加, 达到临界等效塑性应变时对应的应力三轴度越高。

() $2_{exp} = 1.5f D$ (5.6)

第 5 章不同加载角度下角焊缝有限元分析

109

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

0

100

200

300

400

500

600

700

0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60

荷载 (

k N

)

位移 (mm)

$D2=1$ $D2=1.5$ $D2=2.2$

450

470

490

510

530

550

570

590

610

630
650
0.10 0.20 0.30 0.40
荷载 (k N)
位移 (mm)
D2=1 D2=1.5 D2=2.2
0
100
200
300
400
500
600
700
800
0.00 0.20 0.40 0.60 0.80 1.00 1.20
荷载 (k N)
位移 (mm)
D2=0.25 D2=0.3 D2=0.35
550
570
590
610
630
650
670
690
0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80
荷载 (k N)
位移 (mm)
D2=0.25 D2=0.3 D2=0.35
110

不同断裂参数2D 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2D 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。

指 标	
疑似剽窃文字表述	
1.	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。
2.	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。
3.	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。
4.	根据上述公式，若将材料密度增加 f2 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，

5. 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：
6. 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。

9. 780626_赵琛_高强钢角焊缝力学性能研究_第9部分		总字数：5089
相似文献列表		
去除本人已发表文献复制比：1%(53) 文字复制比：1%(53) 疑似剽窃观点：(0)		
1	基于微观机理的钢材及焊缝金属延性断裂研究 刘亚宁(导师：陈爱国) - 《北京交通大学硕士论文》 - 2018-05-01	1.0% (53) 是否引证：否
原文内容		

(2) 侧面角焊缝试件对应的断裂参数 $2D$ 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 $2D$ 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。

5.4.4.2 不同破坏位移 p_u 对断裂过程的影响

本节拟研究破坏位移 p_u 的取值见表 5.5，不同破坏位移

p_u 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 p_u 对正面角焊缝荷载位移曲线的影响图 5.26 不同破坏位移 p_u 对侧面角焊缝荷载位移曲线的影响

荷载 (kN)

位移 (mm)

$U_p=0.005$

$U_p=0.01$

$U_p=0.015$

380

430

480

530

580

630

0.25 0.35 0.45 0.55

荷载 (kN)

位移 (mm)

$U_p=0.005$

$U_p=0.01$

$U_p=0.015$

0

100

200

300

400

500

600

700
0.00 0.20 0.40 0.60 0.80 1.00

荷载 (

k N

)

位移 (mm)

Up=0.005

Up=0.01

Up=0.015

500

520

540

560

580

600

620

640

660

0.35 0.55 0.75 0.95 1.15

荷载 (

k N

)

位移 (mm)

Up=0.005

Up=0.01

Up=0.015

第 5 章不同加载角度下角焊缝有限元分析

111

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 p_u 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 p_u 的取值与有限元模型的损伤起始点无关。(2) 破坏位移 p_u 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。

5.5 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 显示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 2D 和破坏位移 p_u 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，无法拟合下降段。

(2) 单边单条角焊缝试件有限元隐式分析模拟相较于单边双条角焊缝试件模拟效果更佳，前者平均误差仅为 1.2%，后者平均误差为 8.4%。

(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° 。

(4) 断裂参数 2D 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。

(5) 破坏位移 p_u 的取值与有限元模型的损伤起始点无关，破坏位移

p

u 的取值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。

112

第6章结论与展望

6.1 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。

6.2 本文的主要结论在本文的研究基础上，得到以下结论：

（1）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；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。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° 。

（2）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

第 7 章结论与展望

113

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。

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

（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）对于角焊缝来说，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）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 5 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。

（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，

无法拟合下降段；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° 。

6.3 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：

114

（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。

115

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 , Penttil 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] 李金凤. 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. Strength of arc-welded joints. Welding Journal , 11(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. 116

[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. 1979. 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 , 111(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.

[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.

117

[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 photogrammetric 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, Hrudehy 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.

118

[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.

119

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,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上的陪伴;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。我愿用此生来回馈你们。

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 6 月于同济

说明: 1.总文字复制比:被检测论文总重合字数在总字数中所占的比例

2.去除引用文献复制比:去除系统识别为引用的文献后,计算出来的重合字数在总字数中所占的比例

3.去除本人已发表文献复制比:去除作者本人已发表文献后,计算出来的重合字数在总字数中所占的比例

4.单篇最大文字复制比:被检测文献与所有相似文献比对后,重合字数占总字数的比例最大的那一篇文献的文字复制比

5.指标是由系统根据《学术论文不端行为的界定标准》自动生成的

6.红色文字表示文字复制部分;绿色文字表示引用部分;棕灰色文字表示作者本人已发表文献部分

7.本报告单仅对您所选择比对资源范围内检测结果负责



 amlc@cnki.net

 <http://check.cnki.net/>

 <http://e.weibo.com/u/3194559873/>