****

**硕士学位论文**

**（专业学位）**

**高强钢角焊缝力学性能研究**

姓 名：赵 琛

学 号：1630643

所在院系：土木工程学院建筑工程系

学科门类：工 程

学科专业：建筑与土木工程

指导教师：孙飞飞 教授

二〇一九年六月

****

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Engineering

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

Candidate: Zhao Chen

Student Number: 1630643

School/Department: School of Civil Engineering

Discipline: Engineering

Major: Architecture & Civil Engineering

Supervisor: Prof. Sun Feifei

June, 2019

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

**学位论文版权使用授权书**

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

学位论文作者签名：

年 月 日

**同济大学学位论文原创性声明**

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

学位论文作者签名：

年 月 日

**摘要**

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

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

**Abstract**

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

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

**目录**

[第1章 绪论 5](#_Toc3315425)

[1.1 研究背景及意义 5](#_Toc3315426)

[1.2 高强钢角焊缝研究现状 5](#_Toc3315427)

[1.2.1 正面和侧面角焊缝研究现状 5](#_Toc3315428)

[1.2.2 不同加载角度的角焊缝研究现状 6](#_Toc3315429)

[1.2.3 角焊缝设计规范 8](#_Toc3315430)

[1.2.4 热输入量研究现状 10](#_Toc3315431)

[1.2.5 钢材可焊性研究现状 10](#_Toc3315432)

[1.3 断裂机制研究现状 10](#_Toc3315433)

[1.3.1 断裂机制研究现状 10](#_Toc3315434)

[1.3.2 断裂模型 12](#_Toc3315435)

[1.4 存在的问题与本文研究工作 17](#_Toc3315436)

[1.4.1 存在的问题 17](#_Toc3315437)

[1.4.2 本文研究工作 17](#_Toc3315438)

[第2章 单调荷载作用下高强钢和熔敷金属材料的本构模型校核 18](#_Toc3315439)

[2.1 引言 18](#_Toc3315440)

[2.2 高强钢Q890D单调拉伸试验研究 18](#_Toc3315441)

[2.2.1 试验概况 18](#_Toc3315442)

[2.2.2 试验结果 21](#_Toc3315443)

[2.2.3 试验用钢材的可焊性 22](#_Toc3315444)

[2.3 高强度焊材ER120S-G单调拉伸试验研究 25](#_Toc3315445)

[2.3.1 试验概况 25](#_Toc3315446)

[2.3.2 试验结果 26](#_Toc3315447)

[2.4 本构模型的校核 26](#_Toc3315448)

[2.4.1 “试错法”的校核流程 26](#_Toc3315449)

[2.4.2 标准材性试件的有限元模拟 29](#_Toc3315450)

[2.4.3 有限元结果与试验对比 30](#_Toc3315451)

[2.5 本章小结 32](#_Toc3315452)

[第3章 高强钢角焊缝力学试验研究 33](#_Toc3315453)

[3.1 引言 33](#_Toc3315454)

[3.2 试验概况 33](#_Toc3315455)

[3.2.1 单边单条角焊缝试件设计 33](#_Toc3315456)

[3.2.2 单边双条角焊缝试件设计 38](#_Toc3315457)

[3.3 试验装置及仪器 43](#_Toc3315458)

[3.4 试验结果与分析 45](#_Toc3315459)

[3.4.1 试件断后测量与断裂角度 47](#_Toc3315460)

[3.4.2 承载能力和变形能力 50](#_Toc3315461)

[3.4.3 极限强度和平均变形能力 65](#_Toc3315462)

[3.5 不同加载角度下焊缝性能对比 69](#_Toc3315463)

[3.5.1 承载能力与变形能力 69](#_Toc3315464)

[3.5.2 极限强度与平均变形能力 70](#_Toc3315465)

[3.5.3 断裂角度 70](#_Toc3315466)

[3.6 本章小结 72](#_Toc3315467)

[第4章 DIC测量系统监测下的试件应变分布特征 73](#_Toc3315468)

[4.1 引言 73](#_Toc3315469)

[4.2 DIC测量系统简介 73](#_Toc3315470)

[4.2.1 DIC测量系统的工作原理 75](#_Toc3315471)

[4.2.2 DIC测量系统的精度校核 75](#_Toc3315472)

[4.2.3 变形载体制备 76](#_Toc3315473)

[4.3 DIC监控下的角焊缝试件应变发展特征 77](#_Toc3315474)

[4.3.1 正面角焊缝试件焊缝区域应变发展特征 77](#_Toc3315475)

[4.3.2 侧面角焊缝试件焊缝区域应变发展特征 80](#_Toc3315476)

[4.3.3 不同加载角度下试件焊缝区域应变发展特征 82](#_Toc3315477)

[4.4 本章小结 85](#_Toc3315478)

[第5章 不同加载角度下角焊缝有限元分析 86](#_Toc3315479)

[5.1 引言 86](#_Toc3315480)

[5.2 有限元模型 86](#_Toc3315481)

[5.2.1 网格划分 86](#_Toc3315482)

[5.2.2 边界条件 86](#_Toc3315483)

[5.3 有限元结果与试验对比 86](#_Toc3315484)

[5.4 本章小结 86](#_Toc3315485)

[第6章 不同加载角度下角焊缝力学性能 86](#_Toc3315486)

[6.1 引言 86](#_Toc3315487)

[6.2 与简化模型对比 86](#_Toc3315488)

[6.2.1 断裂角度 86](#_Toc3315489)

[6.2.2 承载能力 86](#_Toc3315490)

[6.3 相关规范对比 87](#_Toc3315491)

[6.4 强度模型修正 87](#_Toc3315492)

[6.5 本章小结 87](#_Toc3315493)

[第7章 高强钢角焊缝的强度模型 87](#_Toc3315494)

[7.1 引言 87](#_Toc3315495)

[7.2 计算模型和失效准则 87](#_Toc3315496)

[7.2.1 计算模型 87](#_Toc3315497)

[7.2.2 失效准则 87](#_Toc3315498)

[7.3 强度模型 87](#_Toc3315499)

[7.3.1 参数校核 87](#_Toc3315500)

[7.3.2 强度模型验证 87](#_Toc3315501)

[7.3.3 强度模型公式修正 87](#_Toc3315502)

[7.4 强度模型的简化公式 88](#_Toc3315503)

[7.4.1 简化公式 88](#_Toc3315504)

[7.4.2 简化公式验证 88](#_Toc3315505)

[7.5 本章小结 88](#_Toc3315506)

[第8章 高强钢及熔敷金属力学矩形缺口试验研究 88](#_Toc3315507)

[8.1 引言 88](#_Toc3315508)

[8.2 试验概况 88](#_Toc3315509)

[8.2.1 试件设计及原始尺寸测量 88](#_Toc3315510)

[8.2.2 试验现象及试验曲线 90](#_Toc3315511)

[8.2.3 极限荷载及断裂荷载 90](#_Toc3315512)

[8.3 试验有限元分析 91](#_Toc3315513)

[8.3.1 有限元模型 91](#_Toc3315514)

[8.3.2 有限元结果 91](#_Toc3315515)

[8.4 本章小结 91](#_Toc3315516)

[第9章 考虑断裂的高强钢角焊缝有限元研究 92](#_Toc3315517)

[9.1 引言 92](#_Toc3315518)

[9.2 有限元模型 93](#_Toc3315519)

[9.3 模拟结果和试验结果对比分析 93](#_Toc3315520)

[9.4 本章小结 93](#_Toc3315521)

[第10章 不同焊接工艺对角焊缝力学性能影响 93](#_Toc3315522)

[10.1 引言 93](#_Toc3315523)

[10.2 热输入量对角焊缝力学性能影响 93](#_Toc3315524)

[10.3 焊后消氢对角焊缝力学性能影响 93](#_Toc3315525)

[10.4 本章小结 93](#_Toc3315526)

[第11章 结论与展望 94](#_Toc3315527)

[11.1 本文的主要工作 94](#_Toc3315528)

[11.2 本文的主要工作 94](#_Toc3315529)

[11.3 进一步的研究工作 94](#_Toc3315530)

[参考文献 96](#_Toc3315531)

[致谢 97](#_Toc3315532)

[个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果 98](#_Toc3315533)

# 绪论

## 研究背景及意义

结构控制理论按是否有能量输入来分类分为：主动控制，被动控制，半主文献综述

## 高强钢角焊缝研究现状

从19世纪30年代到现在的大多数关于角焊缝的研究是对正面角焊缝和侧面角焊缝的力学性能研究。正面角焊缝决定了角焊缝的承载力上限和延性性能的下限，而侧面角焊缝决定了角焊缝的承载力下限和延性性能的上限。Butler和Kulak（1971）[1]，Clark(1971), Holtz and Harre, Swannell and Skewes (1979a)， Biggs (1981)， Neis (1985) 和 Marsh (1985)等学者也进行了角焊缝在不同加载角度下的试验研究，而这些试验研究都是针对母材为普通钢材的角焊缝。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图1.1 转动摩擦阻尼器（RFD） | 图1.2 摩擦转动阻尼器 |

* + 1. 正面和侧面角焊缝研究现状

Spraragen and Claussen (1942)对423个正面角焊缝和416个侧面角焊缝的加载试验进行研究，发现侧面角焊缝有截面上的最大剪应力是正面角焊缝的60%至100%。无论焊缝是受拉还是受压正面角焊缝和侧面角焊缝都是有足够的承载力的，正面角焊缝试验数据的离散性要大于侧面角焊缝。

Archer et al. (1959) 进行两个正面和两个侧面角焊缝试验，发现正面角焊缝的剪切强度是侧面角焊缝的1.59倍，正面角焊缝的断裂面角度接近侧面角焊缝，但是小于45°。

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

Ligtenberg (1968)对一个涵盖10个国家的角焊缝受拉的国际试验进行统计分析，发现正面角焊缝的承载强度是侧面角焊缝的1.59倍。

Higgins and Preece (1969)做了168个角焊缝的试验，极限荷载和断裂面并未给出，但从已发表的论文来看，正面角焊缝的平均安全系数是侧面角焊缝的1.41-1.54倍。

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

* + 1. 不同加载角度的角焊缝研究现状

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

Butler and Kulak (1971)做了23个6mm焊脚尺寸ER60焊条的角焊缝试件来研究角焊缝强度与加载角度之间的关系。文献提出了角焊缝极限强度和最大变形与加载角度的经验公式，这奠定了后来CISC（1984）研究的基础，焊缝的极限强度随着加载角度的增大而增强，正面角焊缝的极限强度是侧面角焊缝的1.45倍，侧面角焊缝比正面角焊缝有更多的变形能力。

Clark (1971)发表了8mm角焊缝的力位移曲线，理论模型低估了真实强度。Clark提到焊缝真实和理论强度的差异是由于焊缝接头搭接板与焊接板之间的约束，然而没有给出更具体的细节描述。

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

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

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

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

Kennedy and Kriviak (1985)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[1]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[2]等）的工作做了对比。Lesik 和Kennedy[3]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[1]的预测结果误差在1.5%以内，该简化公式如下：

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

式中，V\_θ为待求的任意角度荷载作用下的角焊缝的承载力； V\_0 为加载方向与焊缝平行时的角焊缝的承载力，此时为侧面角焊缝；θ表示加载方向与焊缝的夹角。式(1.1)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[1]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，这可能带来角焊缝性能的差异。

（2）焊工技能及焊接工艺

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

（3）焊脚尺寸及焊道数

焊道数的影响主要表现在，破坏可能出现于相邻焊道之间的焊接面。

（4）断裂前母材是否屈服

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

（5）温度

低温造成材料的韧性降低，韧性的改变可能造成角焊缝强度和延性的改变。

（6）焊缝与加荷方向

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

（7）高强钢及高强焊丝的影响

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

* + 1. 角焊缝设计规范

欧洲规范Eurocode 3 Part 1-12、美国规范AWSD1.1/D1.1M2015以及新版中国规范GB50017-2017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 和Eurocode 3 Part 1-12给出了高强钢角焊缝的承载力计算公式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.2 ) |

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

* 美国规范

美国钢结构焊接规范AWSD1.1/D1.1M2015给出了高强钢角焊缝的承载力计算公式

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

* 中国规范

中国钢结构设计标准GB 50017-2017给出了Q460及其以内强度等级的钢材的角焊缝的承载力设计公式如下：

对于正面角焊缝：

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

对于侧面角焊缝：

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

在各种力的综合作用下：

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

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

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

* + 1. 热输入量研究现状
    2. 钢材可焊性研究现状

大

## 断裂机制研究现状

* + 1. 断裂机制研究现状

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[3]-[6]，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[7] [8]，如图1.3所示：

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) | (b) |
|  |  |
| (c) | (d) |
| 图1.3 微空穴形核、扩张和聚合机理 | |

（1）空穴形核：大部分钢材包含杂质或第二相质点，当有足够的应力施加在质点之间的粘结界面时，界面破坏，空穴在第二相质点的周围形核。形核过程可简单归纳如下，在较低的塑性应变阶段（≈0.14~0.24），在特定的局部应力场作用下，空穴形核于一些与基体结合力不是很强的“中等”尺度（2~10μm）质点或稍大的片状硫化锰周围（当≥0.20）；在较高的塑性应变范围（≈0.24~0.60），空穴进一步在与基体结合力较强的、大小不等的质点周围形核；当塑性应变达到0.60以至于更高时，空穴形核于细小的（直径在1μm左右或更小）、与基体结合力很强的球形质点周围。因此，空穴形核实际上是一个贯穿于大部分塑性应变范围内的延续性过程。而第一代空穴开始较大量形核主要集中在颈缩开始前后，形核应变≈0.14。对于第二相质点粘结较好的材料，空穴形核过程控制着断裂特性；而对于截面粘结力不是很强的材料，其他机理（空穴扩张和聚合）控制断裂特性。Argon[41]和Goods[42]；

（2）空穴扩张和聚合：在空穴形核后，增长的等效塑性应变和流体静应力使空穴不断扩张。开始时，空穴扩张相互独立，但扩张到一定程度后，相邻的空穴相互独立，但扩张到一定程度后，相邻的空穴相互作用，最终塑性应变沿着空穴的某一特定平面发生集中，空穴突然扩张形成宏观裂缝。当≈0.60时，可观察到空穴开始聚合的现象，值得注意的是，此时空穴聚合是沿着荷载的方向。当≈0.14~0.24时，大部分空穴形核成接近球形；随着等效塑性应变和应力三轴度的不断增加，仍以近似球形扩张，继而逐渐拉长呈椭球状，最终导致荷载轴向相邻空穴首先开始聚合。当两个或数个空穴径向间距不大时，随着空穴的扩张，空穴径向间基体材料产生“内颈缩”。且往往由于塑性剪应变的影响，这种“内颈缩”常常与剪切脱开同时作用，造成空穴聚合方向与加载轴线呈一定角度。从多个试样观测来看，发生大体垂直于荷载方向聚合时的等效塑性应变约相当于试件断裂应变的90%左右。此后直至试样分离，空穴扩张聚合甚速。在试样分离过程中伴随着大量更细小的空穴形核与扩张，对于大量经常使用的钢材来说，空穴扩张和聚合这一步控制着断裂过程，而控制空穴扩张和聚合的应力应变场对于预测断裂十分重要。

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

* + 1. 断裂模型

（1）临界断裂应变准则[86]

临界断裂应变准则认为材料点处的等效塑性应变达到临界破坏值时，该点发生开裂破坏，即

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

该准则仅将等效塑性应变作为一个断裂判据指标，而未考虑应力状态对断裂延性的影响。

（2）空穴扩张模型（VGM）及应力修正临界应变模型（SMCS）

Rice和Tracey推导了理想弹塑性材料中的单个圆柱形和球形空穴在三轴应力作用下的扩张方程[60]，指出空穴扩张速率与应力三轴度呈指数关系，对于球形的空穴，空穴扩张速率可以表达为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.10 ) |

其中R是瞬时空穴直径，由于假定材料为理想弹塑性，因此=常数。对上式两侧积分，可以得到在一个塑性加载过程中总的空穴扩张量为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.11 ) |

上述公式左侧可以理解为临界空穴尺寸（或空穴最终尺寸与初始尺寸比值的临界值），等式右侧是施加的应力应变历史的函数。

这个模型的局限性在于：没有考虑多个空穴相互作用导致空穴间收缩不稳定的特性；分析局限于理想弹塑性材料。

为了在等式中考虑材料的强化特性，D’Escata和Devaux将屈服强度替换为von Mises应力，上述公式则转化为[87]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.12 ) |

再由应力三轴度的定义式，可将上式变为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.13 ) |

当空穴在施加的塑性应变作用下扩张直至达到临界空穴尺寸时，认为发生断裂破坏，进而发生裂纹扩展，得到临界断裂判断依据为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.14 ) |

为了利用这个模型预测断裂，需要进行有限元分析来记录应力三轴度和塑性应变并计算等式左边的积分直到它达到临界值，等式左边的系数0.283是由试验拟合得到的，将这个系数记为常数c，则公式简化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.15 ) |

其中I从空穴扩张的角度定义了材料的承载力，是一个材料特性常数，可以用圆周平滑槽口试件的拉伸试验对其进行校准，并将其用于有限元分析以预测断裂破坏，而公式( 1.15 )即为VGM模型的判定式。

VGM模型中包含了应力三轴度对塑性应变的显式积分，然而在一些情况中，材料的变形是有限的，及时塑性应变发展较大，但应力三轴度大体上保持不变，因此公式( 1.15 )积分中的应力三轴度一项可以作为常数提取出来，进而将VGM模型简化为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.16 ) |

与断裂破坏对应的临界塑性应变可表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.17 ) |

将与材料相关的参数合并为得到：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.18 ) |

这就是SMCS模型的基本形式，Hancock[88]解释为：单个材料点的延性撕裂取决于应力三轴度与塑性应变的相互作用，后来Theocaris[89]也有相同的观点，随着应力三轴度的增加，塑性应变的临界值降低。

在VGM或SMCS模型中，延性裂纹开展是整体行为，而不是单个材料点的行为，因此还需要引入一个特征长度参数来描述多个材料点的破坏，一旦VGM判据或SMCS判据在特征长度上达到它们的临界条件，则认为发生了延性裂纹开展，特征长度的选择和确定基于材料微观结构的尺寸。

由此可见VGM和SMCS模型均考虑了应力三轴度对材料断裂延性的影响，但是未考虑Lode角的影响。两个模型的差别主要在于SMCS模型是基于应力三轴度不随塑性应变的增加而发生显著变化的假定，因此该模型预测的临界塑性应变仅取决于应力三轴度的当前值，而忽略了加载历史效应，在不发生大的几何变形的情况下是可行的。在许多工程问题中，这一模型是一种简化的方法，不需要积分，而且试验和分析预测结果吻合较好[90-93]。

在延性材料发生大的几何变形情况下，材料点处的应力三轴度经常发生变化，例如：金属材料的材性试验，在试件发生颈缩现象后，颈缩截面处的应力三轴度会发生明显的增长。因此，虽然VGM模型要对应力应变历史全程监测，计算复杂，但是更为合理准确。（from王苑佐开题报告）

（3）最大剪应力准则

与Tresca屈服准则类似的，Coulomb和Tresca提出最大剪应力准则至今仍广泛应用在土木工程材料的断裂预测中，这一准则假定当材料点的最大剪应力达到一个阈值时，则该点发生开裂，公式形式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.19 ) |

其中

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.20 ) |

如果材料屈服模型取为von Mises屈服准则，则上式可转化为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.21 ) |

其中A和n是幂函数形式的强化函数中的材料常数。公式( 1.19 )中的与Tresca屈服准则中的屈服剪应力类似，但是一般。由式( 1.21 )可见最大剪应力准则考虑了Lode角对断裂延性的影响，而未考虑应力三轴度的影响。

（4）Johnson-Cook断裂准则

Johnson和Cook提出了一个断裂应变与应力三轴度呈指数函数相关的预测公式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1.22 ) |

可以看到该公式类型与SMCS模型类似，仅考虑了应力三轴度对材料断裂延性的影响，同时也未考虑加载历史效应，只是在材料常数的数量上有增加，因为这两个模型均是基于柱状或球形空穴在加载过程中的扩张机理得到的。而Johnson和Holmquist通过材性试验标定了多种金属材料的三个材料常数、和。但是这两位学者设计的材性试验均是在高应力三轴度进行研究，对于低或负应力三轴度范围内的断裂行为未进行研究，这也限制了J-C准则的应用。

（5）Mohr-Coulomb断裂准则

麻省理工学院的Bai等学者基于Mohr-Coulomb破坏准则，提出了用于预测金属延性断裂的Mohr-Coulomb准则，值得一提的是，学者Bai还将修正后的金属塑性模型考虑在了断裂模型中，该准则的数学形式如下

|  |  |
| --- | --- |
|  | ( 1.23 ) |

图1.4所示即为Mohr-Coulomb准则给出的一个典型的延性断裂面。

|  |
| --- |
|  |
| 图1.4 Mohr-Coulomb延性断裂面 |

Lou等学者分析了Mohr-Coulomb断裂准则的精度[95, 96]，发现Mohr-Coulomb断裂准则对应力状态对应受拉Lode角的断裂行为无法给出精确的预测，这一结果也在Bai等学者的研究中有所体现[97]。

（6）Bai-Wierzbicki断裂准则

|  |
| --- |
|  |
| 图1.5 Bai-Wierzbicki延性断裂面 |

后续有很多学者基于B-W断裂模型开展了一系列研究[98]，并标定了多种金属材料的断裂参数，反映出B-W断裂准则的适用性被广泛接受。

* + - 1. 单边单条角焊缝试件设计

## 存在的问题与本文研究工作

* + 1. 存在的问题

当前，为避免梁柱节点发生脆性破坏，国内外学者已对摩擦型转动阻尼器及耗能节点进行了诸多探究。这些阻尼器及耗能节点显著地提高了梁柱节点的塑性转动能力、耗能能力，避免了梁柱节点进入脆性破坏，保护了结构整体。但这些耗能阻尼器及耗能节点存在占用使用空间，影响结构美观、工作过程中转动中心不明确，工作过程不宜预测、破坏结构整体性、引起结构本身塑性损伤等问题。

* + 1. 本文研究工作

（1）第一章，绪论。阐述本文的研究背景，综述转动型阻尼器、转动型耗能节点和摩擦型阻尼器的国内外研究现状，并针对当前研究存在的问题提出本文所研究的新型摩擦型转动阻尼器。

# 单调荷载作用下高强钢和熔敷金属材料的本构模型校核

## 引言

对高强度钢材Q890D和高强度焊材ER120S-G的单调加载力学性能的研究是后续相关研究的基础，其主要力学性能指标包括弹性模量、屈服强度、极限抗拉强度、极限应变、断后伸长率、截面收缩率等。

本章对舞阳钢铁公司生产的Q890D的高强度结构钢材和昆山中冶宝钢焊接材料有限公司生产的ER120S-G高强度焊材进行了单调加载材料力学性能试验研究，共7个试件，得到了每个试件的单调拉伸力位移曲线及相应的性能指标，为研究此种钢材的材料力学性能提供了试验数据。

## 高强钢Q890D单调拉伸试验研究

* + 1. 试验概况

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

表 2.1高强钢钢材化学成分（%）

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

表 2.2高强钢钢材力学性能（厂家提供）

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

本篇论文需要用到10mm和20mm厚的Q890D钢板，单调拉伸试件为狗骨性，制取方法按照规范《金属材料拉伸试验第1部分：室温试验方法》[3] 进行，其加工尺寸如图 2.1和图 2.2所示，试件实际加工图如图 2.3所示，每种厚度各取三个试件。

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

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

表 2.3 单调拉伸材性试件尺寸

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

试验机采用同济大学力学实验室2000kN试验机，如图 2.4所示，试验机加载速率为2mm/min。

一方面，试验采用引伸计测量应变，引伸计标距100mm，量程30mm。另一方面试验试件正反两面都贴有应变片，通过应变片也可以得到试件的应变从而得到应力应变关系曲线关系图。

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

* + 1. 试验结果

10mm和20mm厚的高强度钢材Q890D试件的名义应力应变关系曲线如图 2.5和图 2.6所示，钢材单调拉伸力学性能参数汇总如下表 2.4所示。两种厚度钢板的力学性能均符合规范《高强度结构用调制钢板(GB/T 16270)》[4] 的要求。

表 2.4 试件单调拉伸力学性能参数

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

|  |
| --- |
|  |
| 图 2.5 10mm钢板应力应变关系曲线 |
|  |
| 图 2.6 20mm钢板应力应变关系曲线 |

* + 1. 试验用钢材的可焊性

钢材内部化学元素的不同组成对钢材的力学性能及使用性能具有不同的影响，而焊接是钢材在使用过程中最常面临的加工工艺，钢材可焊性也是评定钢材性能好坏的重要方面，钢材可焊性通常用碳当量这一指标表示。文献[2] 中介绍了目前世界各国常用的碳当量公式及其使用的钢种、强度级别、化学成分范围及应用判据，根据本文使用的钢板的化学成分范围，适用于本试验中所用钢材的碳当量公式共有三个：

（1）计算预热温度的碳当量公式

美国金属学会提出的用于计算预热温度的碳当量公式：

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

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

（2）评定焊接性的碳当量公式

美国金属学会提出的用于评定淬火碳钢和低合金钢的碳当量公式：

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

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

（3）美国海军碳当量公式

美国海军用低合金高强度钢碳当量公式：

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

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

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

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

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

表 2.5美国推荐的碳当量计算结果及热处理情况

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

## 高强度焊材ER120S-G单调拉伸试验研究

* + 1. 试验概况

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

表 2.6 熔敷金属ER120S-G的化学成分（%）

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

表 2.7熔敷金属ER120S-G的机械性能

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 屈服强度（MPa） | 抗拉强度（MPa） | 伸长率% | 冲击功吸收能量(－20℃),J | | | 射线检测 |
| 实测值 | 908 | 1022 | 16.4 | 84 | 90 | 84 | 合格 |

熔敷金属ER120S-G的单调拉伸的试样为圆棒性试件，其制取按照国家标准GB 2652-2008 《焊缝及熔敷金属拉伸试验方法》[5] 的相关要求进行，试件的设计尺寸如图 2.8所示。试验机采用同济大学力学实验室2000kN试验机，加载速率为2mm/min。

|  |
| --- |
|  |
| 图 2.8 ER120S-G熔敷金属单调拉伸试件尺寸 |

* + 1. 试验结果

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

表 2.8 试件单调拉伸力学性能参数

|  | /MPa | /MPa |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 120\_1 | 972.65 | 1084.19 | 0.9963 | 0.1123 |

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

## 本构模型的校核

* + 1. “试错法”的校核流程

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

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

在试件发生颈缩之前，真实应力应变曲线可以通过下式( 2.5 )得到：

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

其中是试件标距段的长度变化量，是试件的标距段长度，F是荷载，是试样标距段的初始截面面积，和分别为真实应变和真实应力。在试件发生颈缩之后，试件截面面积不再均匀，在颈缩除了轴向应力外还有环向应力存在，公式( 2.5 )不再适用，精确的本构模型的校准仍存在很大的困难，因此Matic et al.[6] 和Khoo et al.[7] 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。

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

本构关系曲线校准的一般步骤如下：

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

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

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

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

对公式( 2.6 )的部分进行求导，得到

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

在名义应力应变曲线的峰值点( , σu)处，可以得到

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

比较公式( 2.6 )和( 2.8 )得到参数n和K的初值表达式

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

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

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

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

表 2.9 母材和焊材本构模型的相关系数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Q890-10mm | Q890-20mm | ER120S-G |
| 应变硬化指数*n* | 1478 | 1280 | 1610 |
| 参数值*K* | 0.068 | 0.0738 | 0.1340 |

* + 1. 标准材性试件的有限元模拟

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

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

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 2.11 10mm试件边界条件 | 图 2.12 20mm试件边界条件 |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 2.13 10mm试件网格划分 | 图 2.14 20mm试件网格划分 |

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

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

* + 1. 有限元结果与试验对比

有限元分析得到高强钢和熔敷金属各试件的力位移曲线与试验数据对比如图 2.17图 2.18和图 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%。有限元与试验在极限荷载处拟合优异，在极限位移处拟合存有一定误差，总体而言有限元模型验证了采用公式( 2.6 )校准的母材和焊材的材料模型的适用性。

|  |
| --- |
|  |
| 图 2.17 Q890-10mm力位移曲线有限元与试验对比 |

|  |
| --- |
|  |
| 图 2.18 Q890-20mm力位移曲线有限元与试验对比 |

表 2.10 Q890D试件极限荷载和位移试验与有限元对比

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

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

表 2.11 ER120S-G试件极限荷载和位移试验与有限元对比

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

## 本章小结

# 高强钢角焊缝力学试验研究

## 引言

众所周知，角焊缝的力学性能与焊缝和荷载二者之间的夹角有很大关系，试验研究发现正面角焊缝（焊缝与加荷方向垂直）较侧面角焊缝（焊缝与加荷方向平行）有更高的强度，但更差的接头变形能力。本试验拟研究在不同焊缝与加荷的方向等影响下角焊缝的力学性能，以及对目前各国规范对角焊缝承载能力设计的适用性进行分析。本次试验以高强钢钢Q890为母材，ER120S-G为熔敷金属，考虑焊缝与受力方向的夹角，选取0°（侧面角焊缝）、15°、30°、45°D（单边双条焊缝）、45°S（单边单条焊缝）、60°、75°、90°（正面角焊缝）作为试验设计变量，每个角度得试件加工6个，共计48个。

## 试验概况

* + 1. 单边单条角焊缝试件设计
       1. 试件加工设计图

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

（1）每个角度焊接出两块如图 3.1所示的搭接接头焊件板；

（2）在焊件两端各切去50mm，消除起弧和灭弧的影响；

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

（4）焊脚尺寸为5mm的角焊缝采用机加工的方式将焊缝的焊脚尺寸切割成标准的三角形截面，即消除余高的影响，焊脚尺寸为10mm的加强边不做任何处理，试件最终加工图如图 3.6至图 3.9所示。试件的命名规则为X\_N，X代表加载角度，N代表每种角度的重复试件。

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

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

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

* + - 1. 试件焊接工艺

《钢结构工程施工及验收规范》（GB50205）[8] 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[9] 。本文试验采用的焊接方法是焊条手工电弧焊（SMAW），焊接过程采用气体保护焊，保护气体为80%Ar+20%CO2 。单边单条角焊缝试件的焊接工艺参数汇总在表 3.1中，其中热输入量的计算公式为：

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

表 3.1 单边单条角焊缝试件焊接工艺

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

* + - 1. 试件原始尺寸测量

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

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

表 3.2 单边单条角焊缝试件实测值汇总

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

* + 1. 单边双条角焊缝试件设计
       1. 试件加工设计图

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

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

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

（3）焊脚尺寸为5mm的角焊缝采用机加工的方式将焊缝的焊脚尺寸切割成标准的三角形截面，即消除余高的影响。每种角度的试件各有6个数量，试件最终加工如图 3.17至图 3.20所示。

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552028471.png | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552028514(1).png |
| 图 3.12 45°D试件设计图 | 图 3.13 30°试件设计图 |
| C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552028539(1).png | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1552028563(1).png |
| 图 3.14 15°试件设计图 | 图 3.15 0°试件设计图 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| （a）拼装 | （b）点焊 | （c）焊前预准备 |
| 图 3.16 引弧板和试件拼装与焊接 | | |

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

* + - 1. 试件焊接工艺

单边双条角焊缝试件的焊接工艺参数汇总在表 3.3中。

表 3.3 单边双条角焊缝试件焊接工艺

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

* + - 1. 试件原始尺寸测量

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

表 3.4 单边双条角焊缝试件实测值汇总

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 1号边 | | | | | 2号边 | | | | |
| 剪切边（mm) | 受拉边（mm) | 斜边（mm) | 焊缝长度（mm) | 实际长度（mm) | 剪切边（mm) | 受拉边（mm) | 斜边（mm) | 焊缝长度（mm) | 实际长度（mm) |
| 00\_1 | 5.60 | 5.00 | 7.71 | 29.10 | 56.18 | 5.10 | 5.10 | 7.22 | 27.95 | 63.03 |
| 00\_2 | 5.10 | 5.30 | 7.49 | 30.71 | 48.40 | 5.10 | 4.60 | 6.94 | 31.73 | 51.58 |
| 00\_3 | 5.50 | 5.20 | 7.81 | 34.09 | 51.20 | 5.00 | 6.10 | 7.91 | 35.00 | 49.46 |
| 00\_4 | 4.90 | 4.20 | 6.21 | 31.75 | 52.98 | 4.40 | 4.10 | 5.90 | 32.60 | 50.99 |
| 00\_5 | 5.00 | 5.30 | 7.17 | 33.52 | 57.94 | 4.80 | 4.90 | 7.13 | 31.80 | 54.27 |
| 00\_6 | 4.80 | 4.60 | 6.63 | 33.02 | 55.39 | 5.20 | 4.30 | 6.74 | 31.73 | 52.13 |
| 15\_1 | 4.80 | 4.00 | 6.28 | 51.24 | 61.58 | 4.90 | 4.00 | 6.20 | 47.87 | 56.28 |
| 15\_2 | 5.20 | 3.60 | 6.30 | 50.73 | 62.00 | 4.80 | 3.50 | 6.00 | 49.81 | 63.03 |
| 15\_3 | 4.40 | 4.40 | 6.10 | 49.99 | 58.26 | 4.40 | 3.90 | 5.80 | 51.45 | 57.00 |
| 15\_4 | 4.90 | 4.00 | 6.30 | 49.71 | 62.53 | 4.60 | 4.40 | 6.50 | 51.60 | 67.41 |
| 15\_5 | 4.20 | 4.50 | 6.10 | 52.85 | 65.32 | 5.00 | 3.50 | 6.10 | 49.87 | 62.66 |
| 15\_6 | 4.90 | 3.70 | 6.20 | 47.02 | 56.80 | 5.30 | 3.50 | 6.30 | 47.75 | 59.35 |
| 30\_1 | 4.20 | 3.80 | 5.80 | 60.62 | 81.91 | 4.30 | 4.30 | 6.10 | 62.40 | 79.98 |
| 30\_2 | 4.50 | 4.20 | 6.10 | 62.66 | 78.94 | 4.80 | 3.80 | 6.10 | 60.81 | 76.55 |
| 30\_3 | 5.00 | 3.60 | 6.20 | 62.05 | 85.63 | 4.70 | 4.20 | 6.20 | 61.32 | 87.00 |
| 30\_4 | 4.50 | 4.00 | 6.20 | 61.48 | 74.44 | 5.50 | 4.00 | 6.90 | 61.84 | 73.00 |
| 30\_5 | 4.60 | 4.40 | 6.50 | 62.38 | 75.99 | 4.90 | 4.30 | 6.40 | 60.33 | 69.12 |
| 30\_6 | 4.60 | 4.20 | 6.20 | 62.20 | 77.26 | 5.00 | 4.00 | 6.30 | 60.35 | 75.64 |
| 45D\_1 | 4.90 | 4.40 | 6.60 | 53.14 | 69.54 | 4.90 | 4.20 | 6.50 | 49.02 | 62.11\* |
| 45D\_2 | 4.40 | 4.30 | 6.00 | 51.02 | 66.20 | 4.60 | 4.50 | 6.30 | 51.14 | 71.53 |
| 45D\_3 | 5.00 | 4.10 | 6.30 | 48.94 | 66.30 | 5.40 | 4.00 | 6.60 | 48.77 | 57\* |
| 45D\_4 | 5.40 | 3.70 | 6.30 | 52.32 | 68.92 | 4.80 | 4.30 | 6.40 | 49.90 | 65.5\* |
| 45D\_5 | 4.90 | 4.40 | 6.30 | 48.74 | 65.00 | 4.70 | 4.40 | 6.50 | 51.00 | 66.45 |
| 45D\_6 | 5.20 | 3.70 | 6.40 | 51.71 | 64.40 | 4.90 | 4.30 | 6.30 | 50.60 | 68.33 |
| 编号 | 3号边 | | | | | 4号边 | | | | |
| 剪切边（mm) | 受拉边（mm) | 斜边（mm) | 焊缝长度（mm) | 实际长度（mm) | 剪切边（mm) | 受拉边（mm) | 斜边（mm) | 焊缝长度（mm) | 实际长度（mm) |
| 00\_1 | 5.40 | 5.00 | 7.47 | 30.28 | 37.71 | 5.70 | 5.20 | 7.68 | 32.24 | 53.34 |
| 00\_2 | 4.70 | 3.70 | 5.80 | 28.88 | 45.71 | 5.40 | 5.00 | 7.54 | 33.96 | 51.16 |
| 00\_3 | 5.10 | 5.30 | 7.29 | 31.24 | 45.70 | 5.50 | 4.80 | 7.00 | 30.67 | 50.14 |
| 00\_4 | 4.70 | 4.30 | 6.20 | 33.94 | 53.61 | 4.60 | 4.40 | 6.20 | 34.79 | 57.34 |
| 00\_5 | 5.20 | 4.90 | 7.24 | 33.64 | 48.83 | 5.20 | 5.00 | 7.47 | 35.00 | 56.91 |
| 00\_6 | 5.00 | 3.70 | 6.35 | 31.98 | 51.52 | 3.80 | 4.20 | 5.80 | 31.79 | 52.72 |
| 15\_1 | 4.70 | 4.00 | 6.20 | 47.87 | 56.61 | 4.50 | 3.90 | 6.00 | 50.75 | 62.88 |
| 15\_2 | 4.00 | 4.40 | 5.90 | 48.62 | 60.73 | 5.20 | 4.50 | 6.80 | 51.48 | 58.66 |
| 15\_3 | 4.80 | 3.80 | 6.10 | 48.38 | 61.68 | 4.30 | 4.50 | 6.20 | 49.93 | 58.75 |
| 15\_4 | 4.50 | 4.20 | 6.10 | 50.34 | 62.37 | 4.70 | 3.20 | 5.70 | 49.27 | 59.87 |
| 15\_5 | 4.80 | 3.60 | 6.00 | 51.51 | 59.29\* | 4.20 | 4.40 | 6.20 | 48.91 | 55.89\* |
| 15\_6 | 5.30 | 3.30 | 6.20 | 46.95 | 60.75 | 4.50 | 4.40 | 6.30 | 52.20 | 71.04 |
| 30\_1 | 4.70 | 4.30 | 6.30 | 61.46 | 77.85 | 5.00 | 4.00 | 6.40 | 59.01 | 83.19 |
| 30\_2 | 5.00 | 4.00 | 6.30 | 60.18 | 84.33 | 4.40 | 4.50 | 6.20 | 59.26 | 76.02 |
| 30\_3 | 4.40 | 4.40 | 6.30 | 62.52 | 79.28 | 5.30 | 4.00 | 6.40 | 63.56 | 83.73 |
| 30\_4 | 4.90 | 4.00 | 6.40 | 61.52 | 77.07 | 4.30 | 4.20 | 6.00 | 63.33 | 85.23 |
| 30\_5 | 5.50 | 4.20 | 6.70 | 59.86 | 79.57 | 4.70 | 4.10 | 6.30 | 63.70 | 77.14 |
| 30\_6 | 5.50 | 4.10 | 6.90 | 57.18 | 76.29 | 4.60 | 4.20 | 6.20 | 61.06 | 76.24 |
| 45D\_1 | 5.50 | 4.10 | 6.92 | 52.34 | 67.93 | 4.50 | 4.10 | 6.20 | 49.08 | 69.45 |
| 45D\_2 | 4.50 | 4.50 | 6.27 | 52.88 | 67.77 | 4.80 | 4.00 | 6.30 | 51.11 | 74.78 |
| 45D\_3 | 5.00 | 4.00 | 6.40 | 50.43 | 63.2\* | 4.60 | 4.60 | 6.50 | 52.00 | 67.47 |
| 45D\_4 | 4.60 | 4.30 | 6.20 | 51.31 | 63.68 | 4.90 | 4.00 | 6.40 | 51.77 | 70.86 |
| 45D\_5 | 5.00 | 4.30 | 6.38 | 49.98 | 65.1\* | 4.90 | 4.10 | 6.20 | 48.98 | 75.6 |
| 45D\_6 | 5.10 | 4.50 | 6.60 | 50.42 | 67.30 | 4.90 | 4.60 | 6.50 | 51.67 | 66 |

## 试验装置及仪器

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

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

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

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

表 3.5 试验过程中DIC测量系统的采集频率

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

变形信息载体是 DIC 方法进行变形测量的重要媒介，其质量的好坏关系到变形测量结果的准确性。因此制备小尺度散斑是实现裂纹萌生阶段应变测量的关键[8] 。用于DIC全场应变测量系统的难点在于如何获得颗粒尺寸微小且均匀附着在试样表面的变形载体。

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

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

## 试验结果与分析

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

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

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

试件断裂面均匀平整，说明试件加工质量合格\*。

|  |  |
| --- | --- |
| I:\1毕业课题\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验后\IMG_0251.JPG | I:\1毕业课题\4试验照片\201901第二批角焊缝试验\试验后\IMG_0242.JPG |
| 图 3.27 90\_1试件断口 | 图 3.28 75\_1试件断口 |

* + 1. 试件断后测量与断裂角度

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至表 3.6和表 3.7。

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

表 3.6 单边单条角焊缝试件试验后测量数据汇总

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

表 3.7 单边双条角焊缝试件试验后测量数据汇总

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 1号边 | | | | 2号边 | | | |
| 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 | 48.6 |
| 00\_2 | 6.20 | 4.47 | 4.15 | 42.0 | 6.22 | 4.17 | 4.48 | 46.0 |
| 00\_3 | 6.88 | 4.84 | 6.04 | 59.0 | 7.05 | 6.12 | 7.25 | 66.3 |
| 00\_4 | 6.15 | 4.10 | 5.54 | 61.6 | 6.01 | 4.11 | 4.78 | 52.3 |
| 00\_5 | 7.26 | 5.30 | 5.48 | 48.6 | 6.12 | 4.38 | 4.48 | 47.0 |
| 00\_6 | 6.57 | 4.76 | 6.14 | 63.3 | 5.45 | 3.50 | 4.66 | 58.0 |
| 15\_1 | 7.15 | 4.58 | 5.32 | 48.0 | 5.29 | 3.55 | 2.90 | 31.0 |
| 15\_2 | 6.30 | 3.78 | 3.99 | 37.0 | 6.87 | 4.29 | 4.14 | 34.7 |
| 15\_3 | 6.83 | 4.88 | 4.09 | 36.3 | 5.58 | 3.73 | 3.74 | 41.7 |
| 15\_4 | 6.28 | 4.39 | 2.99 | 25.5 | 7.13 | 4.98 | 4.44 | 38.0 |
| 15\_5 | 5.45 | 4.03 | 3.12 | 34.5 | 6.66 | 4.02 | 4.21 | 37.0 |
| 15\_6 | 6.32 | 3.92 | 4.12 | 39.3 | 6.13 | 4.01 | 2.96 | 24.0 |
| 30\_1 | 6.61 | 4.48 | 4.26 | 39.6 | 7.13 | 5.12 | 4.12 | 34.7 |
| 30\_2 | 6.36 | 4.68 | 2.90 | 25.0 | 5.84 | 4.07 | 2.72 | 24.0 |
| 30\_3 | 5.55 | 3.65 | 2.83 | 27.0 | 6.96 | 4.75 | 4.16 | 35.7 |
| 30\_4 | 8.30 | 5.62 | 5.13 | 37.3 | 7.78 | 4.80 | 4.84 | 36.3 |
| 30\_5 | 6.19 | 4.86 | 2.17 | 18.0 | 5.36 | 4.25 | 1.67 | 15.0 |
| 30\_6 | 5.59 | 4.15 | 2.40 | 23.0 | 5.61 | 3.88 | 2.72 | 26.0 |
| 45D\_1 | 4.63 | 3.69 | 1.43 | 15.0 | 5.39 | 4.29 | 1.63 | 14.3 |
| 45D\_2 | 7.22 | 5.13 | 4.24 | 35.3 | 6.54 | 4.80 | 3.22 | 28.0 |
| 45D\_3 | 6.05 | 4.26 | 2.84 | 25.0 | 6.40 | 4.70 | 2.40 | 17.7 |
| 45D\_4 | 6.93 | 4.86 | 2.84 | 19.3 | 6.57 | 5.00 | 2.48 | 19.3 |
| 45D\_5 | 6.57 | 4.92 | 2.68 | 21.3 | 5.65 | 4.12 | 2.68 | 26.3 |
| 45D\_6 | 6.73 | 4.12 | 4.15 | 35.6 | 7.05 | 5.05 | 3.32 | 25.7 |
| 编号 | 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（°） |
| 00\_1 | 6.95 | 4.74 | 5.50 | 52.0 | 6.33 | 4.51 | 6.13 | 66.5 |
| 00\_2 | 6.08 | 3.91 | 5.85 | 67.6 | 6.78 | 4.72 | 6.02 | 60.0 |
| 00\_3 | 6.68 | 4.81 | 4.72 | 45.0 | 6.30 | 4.15 | 4.49 | 45.3 |
| 00\_4 | 6.47 | 4.38 | 5.09 | 51.6 | 5.02 | 3.50 | 4.12 | 54.3 |
| 00\_5 | 5.45 | 4.18 | 5.84 | 73.3 | 6.16 | 4.52 | 5.93 | 65.3 |
| 00\_6 | 5.68 | 3.39 | 4.30 | 49.0 | 5.90 | 4.48 | 4.90 | 54.3 |
| 15\_1 | 6.19 | 4.05 | 4.16 | 41.6 | 7.03 | 4.78 | 4.03 | 33.0 |
| 15\_2 | 7.30 | 5.45 | 4.16 | 34.3 | 5.97 | 3.91 | 4.73 | 52.3 |
| 15\_3 | 6.04 | 3.80 | 4.14 | 42.7 | 6.08 | 4.41 | 4.51 | 47.7 |
| 15\_4 | 7.80 | 5.35 | 6.23 | 52.7 | 7.45 | 4.23 | 5.56 | 47.7 |
| 15\_5 | 6.96 | 4.34 | 4.39 | 37.3 | 8.00 | 5.85 | 6.41 | 52.3 |
| 15\_6 | 6.69 | 3.89 | 4.05 | 33.3 | 7.01 | 4.90 | 4.99 | 45.3 |
| 30\_1 | 7.12 | 4.93 | 4.15 | 34.7 | 6.21 | 4.39 | 2.80 | 23.0 |
| 30\_2 | 6.47 | 4.40 | 3.31 | 28.0 | 6.43 | 5.13 | 2.22 | 18.0 |
| 30\_3 | 6.11 | 4.92 | 1.96 | 16.3 | 6.14 | 4.59 | 2.19 | 16.7 |
| 30\_4 | 6.89 | 4.51 | 4.16 | 35.7 | 5.92 | 4.73 | 1.94 | 16.7 |
| 30\_5 | 6.34 | 4.02 | 3.87 | 35.7 | 7.09 | 4.73 | 4.53 | 39.0 |
| 30\_6 | 5.68 | 3.83 | 2.78 | 25.7 | 7.28 | 5.05 | 4.19 | 34.0 |
| 45D\_1 | 6.80 | 4.32 | 3.98 | 33.3 | 6.44 | 4.46 | 3.71 | 34.0 |
| 45D\_2 | 6.71 | 4.84 | 3.79 | 33.7 | 6.12 | 4.56 | 2.36 | 19.3 |
| 45D\_3 | 6.00 | 4.36 | 2.46 | 20.7 | 5.82 | 4.63 | 1.99 | 17.7 |
| 45D\_4 | 5.17 | 3.99 | 1.92 | 19.1 | 6.26 | 4.50 | 2.70 | 22.3 |
| 45D\_5 | 7.17 | 5.01 | 3.64 | 28.3 | 6.70 | 4.43 | 4.09 | 36.3 |
| 45D\_6 | 5.62 | 3.95 | 2.89 | 29.0 | 5.66 | 4.38 | 2.08 | 19.0 |

* + 1. 承载能力和变形能力
       1. 单边单条角焊缝试件

试件的承载能力和变形能力可以通过试件的荷载位移曲线得到，采用DIC全场应变测量系统可以得到测量面内（图 3.31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 3.31 测点选取位置（试件90\_5） |

从图 3.33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 3.32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 3.34中。

|  |
| --- |
|  |
| 图 3.32 各测点应变随加载时间的发展历程 |

|  |
| --- |
|  |
| 图 3.33 各测点绝对位移随加载时间的发展历程 |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  | |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  | |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  | |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  | |
| 图 3.34 单边单条角焊缝试件荷载位移曲线 | |

从试件的荷载位移曲线图可以观察到如下现象：

1）单边单条角焊缝试件的荷载位移曲线呈现“上升趋势”。

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

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

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

表 3.8 单边单条角焊缝试件承载能力和变形能力汇总

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

表 3.9 承载能力和变形能力平均值汇总

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

从单边单条角焊缝试件的承载能力和变形能力汇总表 3.8和表 3.9得知：

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

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

* + - 1. 单边双条角焊缝试件

单边双条角焊缝试件荷载位移曲线的获取方式和单边单条角焊缝试件没有差异，此处不再赘述，单边双条角焊缝试件的荷载位移曲线汇总在图 3.35中。

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

从试件的荷载位移曲线图可以观察到如下现象：

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

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

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

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

表 3.10 单边双条角焊缝试件承载能力和变形能力汇总

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

表 3.11承载能力和变形能力平均值汇总

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 加载角度（°） | 极限荷载（kN） | 断裂荷载（kN） | 极限位移（mm） | 断裂位移（mm） | 荷载比 | 变形比 |
|
| 0 | 536.23 | 435.11 | 0.38 | 0.83 | 0.81 | 2.16 |
| 15 | 776.49 | 702.84 | 0.32 | 0.43 | 0.91 | 1.37 |
| 30 | 1079.01 | 1006.05 | 0.40 | 0.46 | 0.93 | 1.16 |
| 45D | 959.23 | 878.63 | 0.27 | 0.29 | 0.92 | 1.05 |

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

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

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

* + 1. 极限强度和平均变形能力
       1. 单边单条角焊缝试件

单边单条角焊缝试件的极限强度按照如下步骤计算：

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

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

（3）计算极限强度：由于确定破坏面积的方法有两种，因此极限强度也有两个取值，分别按照与计算。但无论采用哪种方法进行求解，得到的强度都是正应力和剪应力的组合。两种确定焊缝强度的方法都有各自的优缺点，按照计算，可以提供一个标准值，对于不同情况的焊脚尺寸或者不同加载角度的试件在试验前就可以预测焊缝强度，但是很多情况下，破坏不是沿着截面最小的焊喉截面进行，将导致预测结果偏低；按照计算，对于相同条件下的不同试件，计算结果可能有很大不同，但是强度结果更加接近真实值。

单边单条角焊缝试件极限强度和平均变形能力汇总在表 3.12中。由于不同加载角度下角焊缝试件的焊缝实际长度设计不同，表中的平均变形能力以无量纲化的形式给出，定义为极限荷载对应的位移与焊缝长度的比值。

表 3.12 单边单条角焊缝极限强度和平均变形能力汇总

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

表 3.13 单边单条角焊缝极限强度和平均变形能力均值

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

单边单条角焊缝试件的极限强度和平均变形能力的平均值汇总在表 3.12和表 3.13中，从中得知：

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

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

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

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

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

* + - 1. 单边双条角焊缝试件

单边双条角焊缝试件的极限强度按照如下步骤计算：

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

（2）确定焊缝长度：该部分使用两种方法：a）将焊缝的起弧和灭弧区域的长度都算进来，对于单边双条角焊缝，起弧和灭弧难以通过机加工消除，此方法得到的焊缝长度认为是实际焊缝长度，记为；b）仅考虑工作焊缝处主板和搭接板的搭接长度，此方法得到的焊缝长度认为是有效焊缝长度，记为。

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

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

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

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

表 3.14 单边双条角焊缝极限强度和平均变形能力汇总

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

表 3.15 单边双条角焊缝极限强度和平均变形能力均值

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

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

（1）四种极限强度的计算方法中，加载角度为15°、30°、45°D的角焊缝试件＞＞＞，原因是焊喉截面是理想的破坏面，即截面面积最小的截面，并且焊缝处主板和搭接板的搭接长度测得的有效焊缝长度比实际焊缝长度小。但是加载角度为0°的侧面角焊缝试件＞＞＞，原因是对于侧面角焊缝实际焊缝长度对于计算极限强度的影响远超过焊喉截面对于计算极限强度的影响。

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

（3） 随着加载角度的降低，通过四种方法计算出来的极限强度都逐渐降低，侧面角焊缝极限强度最低。

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

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

## 不同加载角度下焊缝性能对比

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

* + 1. 承载能力与变形能力

不同加载角度下角焊缝试件的承载能力和变形能力的平均值汇总在表 3.16中。从

表 3.16 角焊缝试件承载能力和变形能力平均值汇总

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 加载角度（°） | 极限荷载（kN） | 断裂荷载（kN） | 极限位移（mm） | 断裂位移（mm） | 荷载比 | 变形比 |
|
| 0 | 536.23 | 435.11 | 0.38 | 0.83 | 0.81 | 2.16 |
| 15 | 776.49 | 702.84 | 0.32 | 0.43 | 0.91 | 1.37 |
| 30 | 1079.01 | 1006.05 | 0.40 | 0.46 | 0.93 | 1.16 |
| 45D | 959.23 | 878.63 | 0.27 | 0.29 | 0.92 | 1.05 |
| 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 |

* + 1. 极限强度与平均变形能力

表 3.17角焊缝试件极限强度和平均变形能力汇总

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 加载角度（°） | 极限荷载（kN） | 每条焊缝的承载力（kN） | （N/mm2） | （N/mm2） | 断裂角度B（°） |  |  |
| 0 | 536.16 | 134.04 | 1213.48 | 933.40 | 54.90 | 0.0120 | 0.0258 |
| 15 | 776.49 | 194.12 | 1297.18 | 891.42 | 39.49 | 0.0064 | 0.0087 |
| 30 | 1079.01 | 269.75 | 1418.20 | 964.59 | 27.75 | 0.0065 | 0.0075 |
| 45D | 959.43 | 239.86 | 1484.29 | 1048.61 | 24.83 | 0.0054 | 0.0057 |
| 45S | 665.54 | 332.77 | 1411.98 | 919.11 | 17.95 | 0.0054 | 0.0058 |
| 60 | 605.67 | 302.84 | 1499.84 | 1029.28 | 17.56 | 0.0052 | 0.0054 |
| 75 | 558.80 | 279.40 | 1595.48 | 1024.28 | 16.25 | 0.0065 | 0.0071 |
| 90 | 556.46 | 278.23 | 1608.17 | 1032.76 | 17.25 | 0.0067 | 0.0072 |

* + 1. 断裂角度

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，尤其对正面角焊缝和十字接头角焊缝而言，破坏角度接近20°左右，对于侧面角焊缝，破坏角度接近50°。图 5.47 给出了三种角焊缝对应不同焊缝金属的破坏角度，从图中可以看出：1）正面角焊缝及十字接头角焊缝的破坏角度更集中，基本都分布在15°-25°之间，相反，侧面角焊缝的破坏角度较为离散，从40°-70°均有试件分布其中；2）正面角焊缝、十字接头角焊缝和侧面角焊缝的平均破坏角度分别为20.1°、18.5°和51.5°，正面角焊缝和十字接头角焊缝的破坏角度比较接近，远低于理论破坏面（45°），侧面角焊缝实际破坏面稍高于理论破坏面；3）焊材的强度等级对破坏角度没有影响；4）正面角焊缝强度较侧面角焊缝高的其中一个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。

|  |
| --- |
|  |
| 图 3.36 断裂角度与加载角度的关系 |

## 本章小结

# DIC测量系统监测下的试件应变分布特征

## 引言

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

相对于传统的应变片和位移计（或者引伸计）测试手段，该技术可以追踪至关键点直到破坏为止的应变，并且各个关键点的应变数据无距离限制。在位移测量中，标距长度不再有限制，并且可以跟踪至试件破坏，中间无须暂停（取下引伸计等）。该测试系统可以测得全场任意位置的平均应变和任意两点的相对位移，这大大扩充了单次试验的数据量。

## DIC测量系统简介

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

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

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

（1）材料测试：

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

（2）三维实时测量：

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

（3）零件测试和分析：

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

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

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

振动分析、耐久性分析、碰撞试验。

（4）有限元分析：

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

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

* + 1. DIC测量系统的工作原理

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

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

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

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

* + 1. DIC测量系统的精度校核
    2. 变形载体制备

变形信息载体是 DIC 方法进行变形测量的重要媒介，其质量的好坏关系到变形测量结果的准确性。因此制备小尺度散斑是实现裂纹萌生阶段应变测量的关键[8] 。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[11] 。图 4.2和图 4.3所示的用于制作散斑的图案刷子和喷雾模板使用起来方便快捷且高效。

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1551504887(1).png | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1551504981(1).png |
| 图 4.2 图案刷子 | 图 4.3 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[12] 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[13] 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 4.4所示。第二种方法如图 4.5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[14] 。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 4.4 油漆笔画出图案 | 图 4.5 白漆打底黑漆散斑 | |

## DIC监控下的角焊缝试件应变发展特征

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

* + 1. 正面角焊缝试件焊缝区域应变发展特征

本小节以正面角焊缝试件90\_5为例对正面角焊缝焊缝区域的应变发展过程进行分析，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 4.6所示。

|  |
| --- |
|  |
| 图 4.6 试件90\_5焊缝区域应变测点和分区布置 |

|  |
| --- |
|  |
| 图 4.7 焊缝区域应变随时间的发展历程 |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 4.8 t1=475s时，试件处于弹性阶段 | |

|  |  |
| --- | --- |
|  | C:\Users\ADMINI~1\AppData\Local\Temp\1551356563(1).png |
| 图 4.9 t2=600s时，试件处于弹塑性阶段 | |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 4.10 t3=659s时，试件达到极限荷载的应变分布 | |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 4.11 t4=663s时，试件达到断裂荷载的应变分布 | |

|  |
| --- |
|  |
| 图 4.12 t5=664.5s时，试件突然断裂，未捕捉到应变场 |

* + 1. 侧面角焊缝试件焊缝区域应变发展特征

|  |
| --- |
|  |
| 图 4.13 试件00\_1焊缝区域应变测点和分区布置 |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 4.14 试件00\_1力位移曲线 | 图 4.15试件00\_1焊缝区域应变发展规律 |
|  |  |
| 图 4.16 试件00\_2力位移曲线 | 图 4.17试件00\_2焊缝区域应变发展规律 |

* + 1. 不同加载角度下试件焊缝区域应变发展特征

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| （a）75\_3试件 |  |
|  |  |
| （b）60\_2试件 |  |
|  |  |
| （c）45S\_1试件 |  |
|  |  |
| （d）45D\_3试件 |  |
|  |  |
| （e）30\_4试件 |  |
|  |  |
| （f）15\_2试件 |  |
| 图 4.18 试件00\_1焊缝区域应变测点和分区布置 | |

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 | B | 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 | 10，6，7 | 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 | 19，20，18，17 | --- | 9.22 | 512 |

## 本章小结

# 不同加载角度下角焊缝有限元分析

## 引言

试验研究和有限元分析是目前结构工程研究的两个重要方法，试验分析的结果相比有限元真实直观，可为实际工程中的应用提供最可靠的数据支持，但由于目前试验水平和条件的限制，完全依靠试验来解决实际问题则不太可行。有限元软件省时省力，且可以得到在试验中难以实现的困难数据的获取，因此，近年来有限元分析显得愈发重要[51]。

本章通过ABAQUS有限元软件建立本文试验研究试件的有限元模型，进行了数值模拟验证。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[52]。

ABAQUS能自动控制结构的收敛情况和分析求解过程，若经过16次迭代计算仍不能满足精度要求，或者后一次迭代比前一次的误差要大，ABAQUS会自动把增量步调整为原来的四分之一再进行迭代计算。如果分析结果仍然不收敛，软件会按照这一方法继续调增量步，直到增量步达到用户预先定义的最小增量步[53]。若连续两个增量步的计算都只用了小于5次迭代，求解结果就收敛了，ABAQUS则将增量步自动调整为原来的1.5倍进行迭代，这些设置均可以设为默认，用户也可以根据具体收敛情况进行相应修改。

ABAQUS/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，所以，本文首先选择了ABAQUS/standard隐式分析来进行有限元模拟。

## 有限元模型

* + 1. 网格划分
    2. 边界条件

## 有限元结果与试验对比

## 本章小结

# 不同加载角度下角焊缝力学性能

## 引言

## 与简化模型对比

* + 1. 断裂角度
    2. 承载能力

## 相关规范对比

## 强度模型修正

## 本章小结

# 高强钢及熔敷金属力学矩形缺口试验研究

## 引言

## 试验概况

* + 1. 试件设计及原始尺寸测量

本次试验针对高强钢Q890，设计缺口处矩形的长宽比为1/1.5/2/3四种试件类型，每种类型进行三组试验，试验设计尺寸如下图 8.1至图 8.4 所示，试件实际测量尺寸如下表 8.1所示。试件编号规则890XN，X（A/B/C/D）分别表示缺口处试件长宽比为1/1.5/2/3，N表示每种类型重复的试件个数。

|  |
| --- |
|  |
| 图 8.1 长宽比为1 |
|  |
| 图 8.2 长宽比为1.5 |
|  |
| 图 8.3 长宽比为2 |
|  |
| 图 8.4 长宽比为3 |

表 8.1 Q890矩形缺口试件实际测量尺寸值

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | Tu1(mm) | Tu2(mm) | Tn1(mm) | Tn2(mm) | 面积(mm2) | Ratio（实测值） | Ratio（名义值） | 加载速率mm/min |
| 890A1 | 19.75 | 19.88 | 8.02 | 8.12 | 65.12 | 1.01 | 1 | 0.5 |
| 890A2 | 19.86 | 19.88 | 7.98 | 8.13 | 64.88 | 1.02 | 1 | 0.5 |
| 890A3 | 19.78 | 20.03 | 8.00 | 8.03 | 64.24 | 1.00 | 1 | 0.5 |
| 890B1 | 19.82 | 19.99 | 6.05 | 9.05 | 54.75 | 1.50 | 1.5 | 0.5 |
| 890B2 | 19.79 | 19.75 | 5.98 | 9.00 | 53.82 | 1.51 | 1.5 | 0.5 |
| 890B3 | 19.81 | 19.82 | 5.94 | 8.97 | 53.28 | 1.51 | 1.5 | 0.5 |
| 890C1 | 19.82 | 20.01 | 5.01 | 10.03 | 50.25 | 2.00 | 2 | 0.5 |
| 890C2 | 19.72 | 19.99 | 5.08 | 10.09 | 51.26 | 1.99 | 2 | 0.5 |
| 890C3 | 19.79 | 19.87 | 5.05 | 9.98 | 50.40 | 1.98 | 2 | 0.5 |
| 890D1 | 19.92 | 19.91 | 3.99 | 11.98 | 47.80 | 3.00 | 3 | 0.5 |
| 890D2 | 19.82 | 19.93 | 3.99 | 12.06 | 48.12 | 3.02 | 3 | 0.5 |
| 890D3 | 19.79 | 19.80 | 4.00 | 11.90 | 47.60 | 2.98 | 3 | 0.5 |

* + 1. 试验现象及试验曲线

试件的力与位移曲线如下图 8.5至图 8.8所示，试验极限荷载及断裂荷载如**错误!未找到引用源。**所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图 8.5 890A | 图 8.6 890B |
|  |  |
| 图 8.7 890C | 图 8.8 890D |

* + 1. 极限荷载及断裂荷载

表 8.2 矩形缺口试验承载力总结

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 极限荷载(KN) | 极限荷载对应的位移(mm) | 断裂荷载(KN) | 断裂荷载对应的应变(mm) | 断裂荷载/极限荷载 |
| 890A1 | 92.46 | 0.2627 | 82.76 | 0.7067 | 0.90 |
| 890A2 | 91.73 | 0.2757 | 81.81 | 0.7391 | 0.89 |
| 890A3 | 92.39 | 0.2726 | 82.59 | 0.7409 | 0.89 |
| 平均值 | 92.19 | 0.27 | 82.38 | 0.73 | 0.89 |
| 890B1 | 75.36 | 0.2559 | 68.03 | 0.6422 | 0.90 |
| 890B2 | 74.99 | 0.2579 | 66.18 | 0.5887 | 0.88 |
| 890B3 | 74.08 | 0.2554 | 66.06 | 0.6797 | 0.89 |
| 平均值 | 74.81 | 0.26 | 66.75 | 0.64 | 0.89 |
| 890C1 | 68.31 | 0.2365 | 61.06 | 0.5726 | 0.89 |
| 890C2 | 70.85 | 0.2226 | 63.60 | 0.5599 | 0.90 |
| 890C3 | 69.01 | 0.2214 | 62.55 | 0.5600 | 0.91 |
| 平均值 | 69.39 | 0.23 | 62.41 | 0.56 | 0.90 |
| 890D1 | 65.11 | 0.2108 | 60.02 | 0.4543 | 0.92 |
| 890D2 | 65.75 | 0.2091 | 58.96 | 0.5116 | 0.90 |
| 890D3 | 63.39 | 0.1910 | 57.24 | 0.4924 | 0.90 |
| 平均值 | 64.75 | 0.20 | 58.74 | 0.49 | 0.91 |

## 试验有限元分析

* + 1. 有限元模型
    2. 有限元结果

## 本章小结

# 结论与展望

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

## 本文的主要工作

在本文的研究基础上，得到以下结论：

## 本文的主要工作

在本文的研究基础上，得到以下结论：

## 进一步的研究工作

需要进一步研究的问题：

# 参考文献

[1] 韦德香, 崔湘玲, 张元超. 结构被动控制研究进展[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2001,6(06):77-83.

[2] Mualla I H. Experimental and numerical evaluation of a novel friction damper device[J]. Ph.D. thesis, Dept. Of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark., 2000.

1. Kulak L J B G. Strength of fillet welds as a function of direction of load[J]. 1971.
2. 曹良裕, 魏战江. 钢的碳当量公式及其在焊接中的应用[J]. 材料开发与应用, 1999,14(1):39-43.
3. GBT 228.1-2010. 金属材料 拉伸试验第1部分：室温试验方法.
4. GB 16270-2009. 高强度结构用调质钢板.
5. GB 2652-2008T. 焊缝及熔敷金属拉伸试验方法.
6. Matic P , Jolles M I . Defect, Constitutive Behavior, and Continuum Toughness Considerations for Weld Integrity Analysis[J]. 1988.
7. Khoo H A, Cheng J, Hrudey T M. Determine steel properties for large strain from a standard

tension test, 2002.

1. GB50205. 钢结构工程施工及验收规范.
2. GB 50661-2011. 钢结构焊接规范.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 何广龙. 微尺度数字图像相关方法和技术研究[D].
7. Aramis. User manual — software. v6.1 rev.b ed.. Braunschweig, Germany: GOM mbH, 2009

# 致谢

行笔至此，感慨良多。

2017年6月于同济

# 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

**个人简历：**

赵琛，女，1994年1月生，山西运城人。

2012年9月至2016年6月，同济大学，土木工程专业，获学士学位。

2016年9月至今，同济大学，建筑与土木工程专业，攻读硕士学位

**已发表论文：**

[1] 孙飞飞，侯玉芳. 转动型阻尼器及转动型耗能节点研究现状[J]. 建筑钢结构进展，2016，38（6）：1-11.

**参考文献**

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

[2] 曹良裕, 魏战江. 钢的碳当量公式及其在焊接中的应用[J]. 材料开发与应用, 1999,14(1):39-43.

**校对报告**

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

当前文档包含的题录共3条

有0条题录存在必填字段内容缺失的问题

所有题录的数据正常