

304/304L 不锈钢 TIG 焊两种搭接接头的组织及力学性能



金雪^{1,2}, 朱平^{1,2,*}, 李晗^{1,2}, 秦兴元^{1,2}

- (1. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240
2. 上海交通大学 上海市复杂薄板结构数字化制造重点实验室, 上海 200240)

摘要: 搭接接头焊缝在实际工况中存在受拉力和剪切力两种受力状态, 其力学性能的差异对工程应用中选取焊缝形式有重要意义。对不锈钢 304 及 304L 进行钨极惰性气体保护焊 (TIG 焊), 研究了两种样件焊接接头的显微组织、硬度、拉伸性能和疲劳特性。结果表明: 两种搭接形式下的焊接接头从母材到焊核, 可根据晶粒类型和大小分为 7 个区域。焊缝受拉力样件的断裂延伸率为 19.3%, 在接头区域两种组织过渡处断裂; 受剪切力样件的断裂延伸率为 12.7%, 在材料尺寸变化、应力集中处断裂。焊缝受拉力样件断裂韧性、抗拉强度和疲劳性能更强, 结构尺寸变化和应力集中对受剪切力样件力学性能的影响较大。

关键词: 304L 不锈钢; 搭接接头; 微观组织; 拉伸试验; 疲劳试验

中图分类号: TG407/TG457.6

文献标识码: A

文章编号: 1003-8728(2018)03-0456-05

Microstructure and Properties of Different TIG Lap Joint of 304/304L

Jin Xue^{1,2}, Zhu Ping^{1,2,*}, Li Han^{1,2}, Qin Xingyuan^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China
2. Shanghai Key Laboratory of Digital Manufacture for Thin-walled Structures, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: There exists two stress state by the tensile force and shear force of lap joint weld, the differences of mechanical performance make sense for choosing weld form in engineering application. Tungsten inert gas (TIG) is used to weld 304 and 304L stainless steel. With metallographic, hardness, quasi static tensile and fatigue experiments, the structure microstructure, hardness distribution and mechanical properties of two different laps are obtained. The results show that the lap weld joint from the parent metal to the welding is divided into seven areas for the difference of microstructure. Besides, the tensile sample's elongation rate is of 19.3% and fructures at differences in the organization, while the shear sample's elongation rate is of 12.7% and fructures for size changing and stress concentration. The tensile sample has higher fracture toughness, tensile strength and fatigue damage properties, while joint strength of shear sample is significantly affected by the change in structure size and the stress concentration.

Keywords: lap weld; microstructure; experiments; mechanical properties; fatigue damage

收稿日期: 2017-02-17

作者简介: 金雪 (1991-), 硕士研究生, 研究方向为金属结构焊接及疲劳性能, jinxue0927@sjtu.edu.cn

* 通讯作者: 朱平, 教授, 博士生导师, 博士, pzhu@sjtu.edu.cn

焊接是工程中最重要加工技术之一, 钨极惰性气体保护焊 (TIG 焊) 由于操作方便、熔渣较少、气密性好, 常应用于压力容器焊接^[1-2]。搭接是常见的接头形式, 其焊缝在实际工况中存在受拉力和剪切力两种受力状态^[3], 研究两种状态下接头的组

组织和力学性能对接头形式选择和工程应用具有重要意义。Lin 等^[4]采用光学显微观察、扫描电镜的方法观察了 304L 不锈钢焊接对接接头微观组织,提供了相关试验的设计 and 操作方法。Wei 等^[5]通过金相试验、硬度试验以及扫描电镜观察的方法,研究了镀锌双相钢和高强钢焊接接头的微观组织性能,介绍了试验过程中样件制备、清理的方法,以及观测时试样位置和放大倍率选择等注意事项。石青^[6]通过金相试验观察了 443 铁素体和 304 奥氏体不锈钢异种钢焊接区域的组织成分,通过硬度试验获取了硬度分布,结果表明,采用不同材料作填充焊丝,对其显微组织、力学性能和腐蚀性能均有影响。Amodeo 等^[7]针对搭接样件,研究了焊缝长度对拉伸断裂和疲劳失效位置的影响。Kim 等^[8]将疲劳试验数据拟合成 S-N 曲线,对铁素体进行了不锈钢搭接焊缝疲劳寿命预测,利用有限元方法研究了搭接尺寸和间隙尺寸对疲劳寿命的影响。学者在研究搭接接头时,样件以焊缝受拉力的工况为主^[9-11],针对焊缝受剪切力的情况则关注较少。为了研究不同受力形式

下的搭接接头组织和力学性能,本文对工程中常用的含碳量较低、断裂韧性和焊接性较好的 304 及 304L 不锈钢^[12]板进行 TIG 焊。通过金相和硬度试验获取接头区域组织成分和硬度分布;分析拉伸断裂后的延伸率、断口位置和微观形貌;通过疲劳试验拟合出疲劳寿命 S-N 曲线,比较两种样件的失效形式。为今后选择搭接接头焊缝形式和结构疲劳寿命预测提供参考。

1 样件制备与试验方法

1.1 样件制备

焊接母材为 304 和 304L,此系列奥氏体不锈钢耐腐蚀性强,选用含碳量不高于母材的焊丝材料 ER308L。两种母材和焊丝材料的组织成分如表 1 所示。依据“GB/T 19867.1 电弧焊焊接工艺规程”,采用 TIG 焊,保护气体为“85%Ar+15%CO₂”,起弧电流 30~40 A,焊接电流 45 A,收弧电流 10 A,脉冲占空比 10~20,提前送气 10 s,带压关气保留 5 s。

表 1 母材 304、304L、焊丝材料 ER308L 的化学成分 %

材料 牌号	元素						
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
304	≤0.08	≤2.00	≤0.045	≤0.030	≤1.00	18.0~20.0	8.0~10.5
304L	≤0.03	≤2.0	≤0.035	≤0.03	≤1.0	18.0~20.0	8.0~12.0
ER308L	≤0.03	1.0~2.5	≤0.025	≤0.02	≤0.60	18.5~21.5	9.0~11.0
							≤0.50

根据“GB/T2651-2008 焊接接头拉伸试验方案”以及实际受力工况,设计焊缝受拉力和受剪切力两种样件,尺寸参数如图 1 所示。

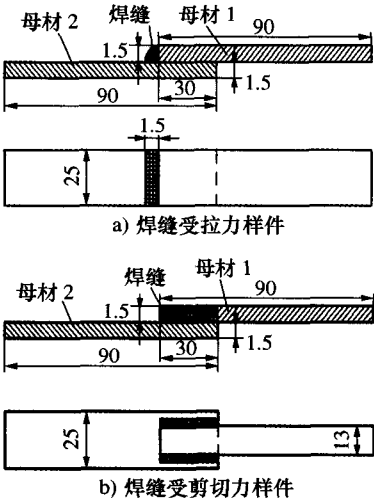


图 1 样件尺寸参数

1.2 试验方法

焊接接头材料组织存在不均匀性。采用金相试验、硬度试验、准静态拉伸试验和疲劳试验,获取焊缝区域的组织结构及材料力学性能。

金相试验样件经过打磨和抛光之后,采用凯勒试剂腐蚀 60 s,试剂成分为 1 ml HF+5 ml HNO₃+44 ml H₂O,并在 LEICA 光学显微镜下观察宏观形貌和微观金相组织。维氏硬度值通过数字式显微硬度计得出,实验过程中以一定载荷保压 10 s,读取该区域硬度。在工程应用中,拉伸性能是结构静强度设计的主要依据。为保证试验时的对中条件,样件两端设置等厚搭接片。采用位移加载,速度设置为 2 mm/s,测定过程中载荷和位移的变化,进行 3 次试验以保证结果的重复性和稳定性。

疲劳寿命指零件疲劳失效时经历的应力或应变循环数,疲劳试验和拉伸试验均在岛津材料力学试验机(EHF-U series)上进行。将不同应力下的疲劳寿命在对数坐标下绘制成 S-N 曲线,该曲线反映了

疲劳载荷的应力范围与循环次数之间的关系,是用于预测疲劳寿命和进行结构疲劳设计的重要参考指标。目前常用 Basuqin 形式两参数 S-N 方程来描述,即

$$\sigma = \sigma_f (2N_f)^b \quad (1)$$

式中: σ 为循环应力幅; N_f 为疲劳寿命值; σ_f 为疲劳强度系数; b 为疲劳强度指数。通过线性回归分析可得到 σ_f 和 b 这两个方程参数。

2 试验结果与分析

2.1 焊接接头显微组织

根据金相试验宏观显微观测(放大倍率为 100 倍),两种样件接头区域的组织类型和分布规律相同。选取焊缝受拉力样件为分析对象,可以看出沿着明显的熔合线两侧,焊接接头包括 7 个不同的区域,如图 2 所示,分别命名为:焊核区 1(Nugget 1),粗晶区 2(CGHAZ 2),细晶区 3(FGHAZ 3),母材 4(304 4),粗晶区 5(CGHAZ 5),细晶区 6(FGHAZ 6),母材 7(304L 7)。

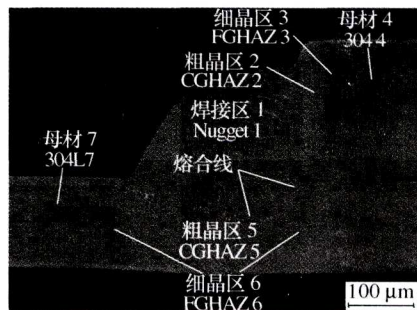
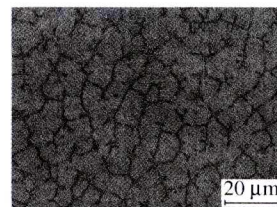


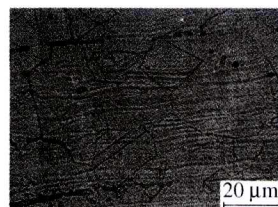
图2 搭接接头的宏观形貌

如图 3 所示,按宏观观测分区顺序排布。母材 4 和母材 7 的基本组成相同,都是由粗大的奥氏体和少量铁素体组成,但 304L 的晶粒尺寸更小;熔合线以内是焊核区 1,主要结构是快速冷却过程中从奥氏体晶内析出的大量骨架状铁素体;粗晶区 2 和粗晶区 5 是粗大的热影响区组织,主要为奥氏体和铁素体;细晶区 3 和细晶区 6 由于加热和冷却速度快,高温停留时间短,故形成的晶粒相对细小,除奥

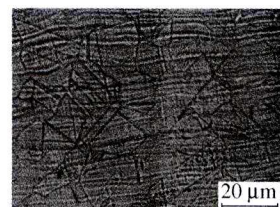
氏体和铁素体外,还生成了少量马氏体组织。



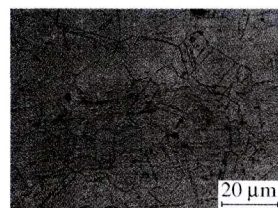
a) Nugget 1



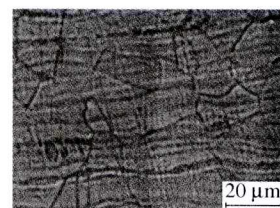
b) CGHAZ 2



c) FGHAZ 3



d) 304 4



e) CGHAZ 5



f) FGHAZ 6



g) 304L 7

图3 焊接接头 7 个不同区域的微观组织

2.2 焊接区域硬度测试

对焊接接头 7 个不同区域进行维氏硬度测量,每个位置重复 3 次并取平均值。根据“GB/T 1172-1999 黑色金属硬度及强度换算值”,计算得到 7 个区域的抗拉强度,结果见表 2。可知,细晶区由于晶粒细化且均匀,强度最高,其余区域从焊核到母材强度逐渐降低,满足了焊缝强度不低于母材的设计要求。

表2 焊缝 7 个不同组织区域的硬度和抗拉强度

力学参数	Nugget 1	CGHAZ 2	FGHAZ 3	304 4	CGHAZ 5	FGHAZ 6	304L 7
维氏硬度/HV	190.5	187.2	193.6	186.4	188.6	195.2	182.7
抗拉强度/MPa	644.3	631.8	652.9	628.9	637.4	658.8	616.2

2.3 焊接件拉伸性能

对焊缝受拉力和剪切力两种样件进行拉伸试验。两种样件拉伸曲线如图4所示,宏观断裂位置和断口形貌如图5所示。

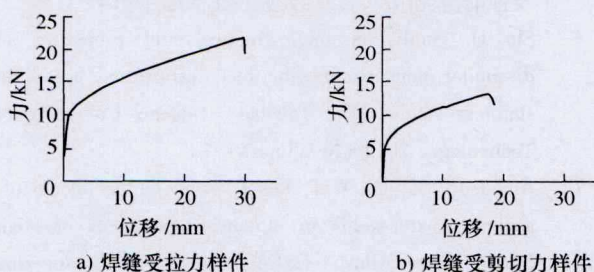


图4 拉伸力-位移曲线

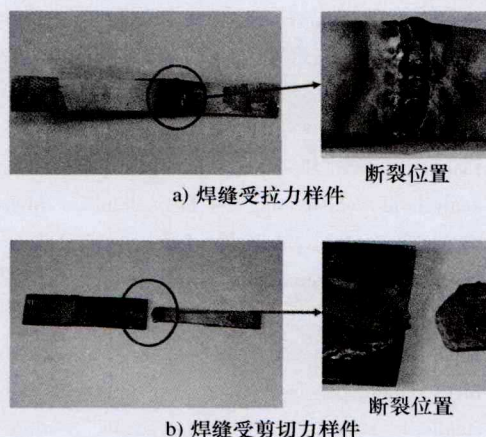


图5 拉伸试验断口形貌

由图5可知,受拉力样件由于加载力方向垂直于组织变化方向,断裂位置与接头组织分布和强度有关,在两种组织的交接过渡处,且焊缝长度等于母材宽度,接头区域受力均匀,断口裂纹平整。受剪切力样件焊缝强度满足要求,加载力方向与组织变化方向一致,断裂位置与接头组织分布无关,断裂于母材结构尺寸变化、应力集中处,断口裂纹不平整。测量试验后样件长度,计算可得,焊缝受拉力样件断裂延伸率为19.3%,受剪切力样件断裂延伸率为12.7%。焊缝受拉力样件的断裂延伸率更大,抗拉强度更高。

2.4 疲劳性能及寿命

基于“JIS Z 3198-5:2003”,进行应力控制的疲劳试验。加载时应力比 $R=0.1$,加载频率 $f=20\text{ Hz}$ 。焊缝受拉力和受剪切力样件疲劳试验结果如图6、图7所示,试验数据经最小二乘法拟合,在对数坐标下得到两种样件的S-N曲线方程分别为:

$$\sigma = 1\,160.78(2N)^{-0.272\,0} \quad (2)$$

$$\sigma = 916.47(2N)^{-0.221\,6} \quad (3)$$

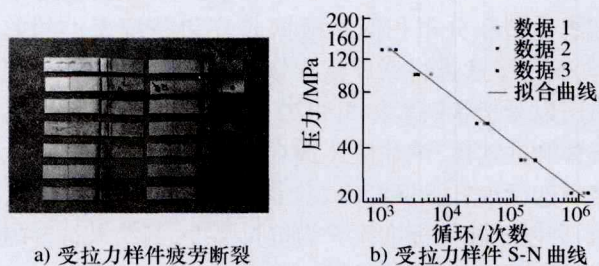


图6 受拉力样件疲劳试验

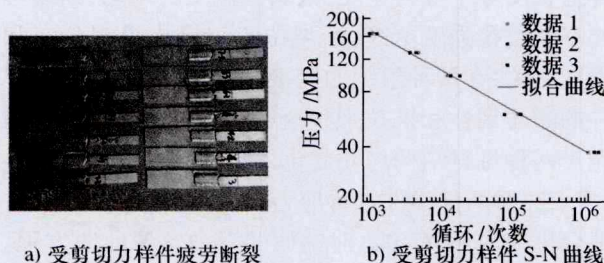


图7 受剪切力样件疲劳试验

从S-N曲线方程可以看出,焊缝受拉力样件疲劳强度系数更大,焊缝受剪切力样件由于结构尺寸变化导致应力集中较大,降低了其疲劳强度。选取焊缝受拉力样件代表性的样件断口,先用酒精、丙酮清洗,再利用超声波清洗掉附着的脏物和灰尘,然后经干燥气流吹干后,置于电子显微镜下观测断口组织形貌,分析其断裂机理。如图8所示,裂纹尖端处于粗晶区5和细晶区6的交接位置,与硬度试验根据强度分布规律预测的结果一致。样件最大主应力方向为长度方向,裂纹垂直于此方向,也即母材厚度方向拓展直至试验片断裂。



图8 焊缝受拉力样件疲劳断口

3 结论

本文针对搭接焊缝在实际工况中存在的两种受力状态,以不锈钢板304/304L为母材,根据相关试验标准,设计了焊缝受拉力和受剪切力两种样件。通过一系列力学试验,对比分析了两种样件的组织分布、拉伸断裂和疲劳性能,为今后选择搭接接头焊缝形式和结构疲劳寿命预测提供参考。

1) 通过金相试验观察到两种样件接头区域的

组织类型和分布相同。根据成分和晶粒大小的差异,确定了从母材到焊核共分为7个区域。其中,焊核区以骨架状铁素体组织为主,粗晶区为粗大的奥氏体和铁素体,细晶区还含有少量马氏体,提高了此区域的硬度;通过硬度试验获取了7个区域的硬度值,并基于相关标准换算为抗拉强度,其结果符合焊缝强度不低于母材的设计要求。

2) 由拉伸试验结果可知:焊缝受拉力样件由于焊缝长度等于母材宽度,接头区域受力均匀,断裂延伸率和抗拉强度更高,断裂位置与接头组织分布和强度有关,在两种组织的交错过渡处;而受剪切力样件的断裂韧性和抗拉强度受焊缝强度影响较小,断裂于两种母材结构尺寸变化、应力集中处。

3) 对两种样件进行应力控制下的疲劳试验,并拟合出应力比 $R=0.1$ 时的疲劳寿命 S-N 曲线方程。可以看出,焊缝受拉力样件疲劳强度更高,裂纹尖端处于粗晶区5和细晶区6的交接位置;受剪切力样件由于结构尺寸变化导致应力集中较大,降低了其疲劳强度。

参考文献

- [1] Lippold J C. Welding metallurgy and weldability [M]. London: John Wiley & Sons Inc., 2014
- [2] 薛小龙,王志亮,桑芝富,等.正交接管焊接残余应力的三维有限元模拟[J].机械科学与技术,2006,25(5):525-529
Xue X L, Wang Z L, Sang Z F, et al. 3-D FEM simulation of welding residual stress of orthogonal nozzles[J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 25(5):525-529 (in Chinese)
- [3] Huang H Y, Shyu S W, Tseng K H, et al. Evaluation of TIG flux welding on the characteristics of stainless steel [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(5):566-573
- [4] Lin C M, Tsai H L, Cheng C D, et al. Effect of repeated weld-repairs on microstructure, texture, impact properties and corrosion properties of AISI 304L stainless steel[J]. Engineering Failure Analysis, 2012, 21:9-20
- [5] Wei S T, Lv D, Liu R D, et al. Similar and dissimilar resistance spot welding of advanced high strength steels: welding and heat treatment procedures, structure and mechanical properties [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(5):427-435
- [6] 石青.铁素体/奥氏体不锈钢异种钢焊接接头的组织及性能研究[D].太原:太原理工大学,2014
Shi Q. Study on microstructure and properties of dissimilar metal welding between ferritic and austenitic stainless steels [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014 (in Chinese)
- [7] Amodeo C M, Lai W J, Lee J, et al. Failure modes of gas metal arc welds in lap-shear specimens of High Strength Low Alloy (HSLA) steel [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 131:74-99
- [8] Kim J, Lee K, Lee B. Estimation of the fatigue life according to lap joint weld profiles for ferritic stainless steel[J]. Procedia Engineering, 2011, 10:1979-1984
- [9] 梁红琴,蔡慧,赵永翔,等.高速客车转向架构架焊接接头疲劳可靠性分析[J].机械科学与技术,2015,34(6):925-929
Liang H Q, Cai H, Zhao Y X, et al. Fatigue reliability analysis of welded joints for bogie frame of high-speed passenger car[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(6):925-929 (in Chinese)
- [10] Khan M M A, Romoli L, Fiaschi M, et al. Experimental investigation on laser beam welding of martensitic stainless steels in a constrained overlap joint configuration [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(10):1340-1353
- [11] 范文学,陈芙蓉,解瑞军,等.基于不同 S-N 曲线的横向十字焊接接头疲劳寿命预测[J].焊接学报,2013,34(11):69-72
Fan W X, Chen F R, Xie R J, et al. Fatigue life prediction of transverse cross welded joint based on different S-N curve [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(11):69-72 (in Chinese)
- [12] 李京龙,李锋,熊江涛,等.Ti-6Al-4V 钛合金板与 304L 不锈钢网的扩散焊[J].机械科学与技术,2006,25(3):301-304
Li J L, Li F, Xiong J T, et al. Diffusion bonding of Ti-6Al-4V plate and 304L wiremesh [J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 25(3):301-304 (in Chinese)