

基本参数值,损伤准则选择 Maxps 损伤准则,场变量的输出中勾选水平集参量 PHILSM、裂纹朝向参量 PSILSM 以及裂纹状态参量 STATUS XFEM,以保证最终模拟结果的输出;在相互作用(interaction)模块中创建裂纹并指定裂纹类型为 XFEM,同时分别在上下加载孔中心同上下加载孔圆柱面添加耦合约束(coupling)关系,设置耦合约束自由度;在载荷(load)模块中对上加载孔耦合点设定边界条件:锁定 x、z 方向位移 U1、U3 和沿 x、y 轴方向的转动约束 UR1、UR2,释放 y 方向位移 U2 和沿 z 轴方向的转动约束 UR3;同时在下加载孔中心耦合点设定边界条件:仅释放沿 z 轴方向的转动约束 UR3,对垂直于 z 轴的两表面施加不可变形的约束 U3;设置大小为 7500N 的加载力在上加载孔耦合点,方向与 U2 一致,如图 2(b):

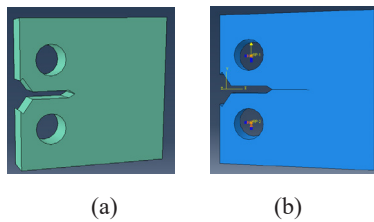


图 2 CT 试样有限元模型

然后通过网格划分(mesh)模块对整个实体模型进行网格划分,单元网格尺寸为 0.5 mm,检查并优化该模型及模拟过程后提交计算,在计算完成后生成的 .dat 文件中提取应力强度因子 K 的计算结果值。

4 结果及分析

4.1 应力强度因子 K 的结果

本工作分别通过裂纹扩展试验、XFEM 裂纹扩展模拟两种方式得到了对应裂纹长度 a 分别为 15.0mm、17.5mm、20.0mm、22.5mm、25.0mm、27.5mm、30.0mm 时的最大应力强度因子 K_{max} 的结果值如下表 2 所示:

表 2 最大应力强度因子 K_{max} 结果表

裂纹长度 a(mm)	理论 K_{max} 值 (MPa · mm ^{1/2})	裂纹扩展模拟 K_{max} 均值 (MPa · mm ^{1/2})	模拟值偏差 (%)
15.0	596.19	617.58	3.59
17.5	677.96	685.86	1.16
20.0	772.03	808.07	4.67
22.5	884.55	920.80	4.10
25.0	1024.50	1057.91	3.26
27.5	1205.36	1205.86	0.04
30.0	1448.24	1484.62	2.51

4.2 结果分析

根据以上结果可以发现:通过裂纹扩展数值模拟和应力强度因子经验公式理论计算得到相同裂纹长度下最大应力强度因子 K_{max} 值非常接近,相同裂纹长度下模拟结果最大应力强度因子 K_{max} 值与理论值最大偏差仅 4.67%。

同时,在准静态 XFEM 裂纹扩展模拟下,由于沿厚度方向网格间隔为 0.5mm,通过模拟可以得到裂纹前缘延厚度方向不同深度处的 21 个应力强度因子值,可以准确反映裂纹前缘延厚度方向不同深度处的应力强度因子分布情况,将不同裂纹长度下分别得到的应力强度因子数组绘制在图 3 中:

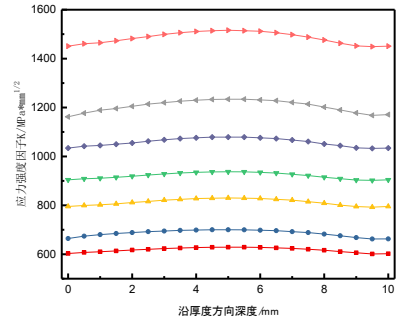


图 3 厚度方向 K_{max} 分布

通过图 3 可以看出不同裂纹长度 a 下模拟得到的最大应力强度因子 K_{max} 值均沿厚度方向中线对称分布,且越接近两侧表面的最大应力强度因子 K_{max} 值越小,其值约等于理论计算值,厚度中间区域的最大应力强度因子 K_{max} 值越大,表明裂纹扩展过程中裂纹前缘有向前突出的“隧道效应”,即内部裂纹扩展速率往往大于表面裂纹扩展速率。

5 结语

本文针对 TC21 钛合金裂纹扩展过程中的应力强度因子 K 这一重要参数,分别进行了理论计算、和基于 Abaqus 数值模拟软件 XFEM 模块的裂纹扩展数值模拟;对比和分析结果得到以下结论和结果:

基于本工作的 TC21 钛合金应力强度因子数值模拟结果与理论计算结果较为接近, K_{max} 值偏差在 5% 以内,表明该模拟过程可以相对准确的描述裂纹扩展过程;通过模拟 K_{max} 在厚度方向上的分布规律表明裂纹扩展过程中裂纹前缘有向前突出的“隧道效应”,即内部裂纹扩展速率往往大于表面裂纹扩展速率。

参考文献

- [1] 何蕾.钛合金在航空领域的市场展望[J].金属世界,2015,(05):4-7.
- [2] 邹武装.钛及钛合金在航天工业的应用及展望[J].中国有色金属,2016,(01):70-71.
- [3] ASTM E647-15, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates[M].ASTM International, West Conshohocken. PA.2015.
- [4] 中国国家标准化管理委员会 GB/T6398—2017金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法[S].北京:中国标准出版社.2017.
- [5] 余建星等.基于三维CT试样的X65钢裂纹扩展规律研究[J].兵器材料科学与工程,2021,44(01):1-7.
- [6] 白树伟等.疲劳裂纹扩展前缘形貌分析及数值模拟[J].科学技术与工程,2019,19(01):256-260.

Analysis of Microstructure and Properties of 304 Stainless Steel TIG Welded Joints

Yixing Huang

Nanchang Institute of Communications, Nanchang, Jiangxi, 33010, China

Abstract

This paper systematically studies the influence of TIG welding process parameters on the microstructure and properties of 304 stainless steel welds. By designing three heat input parameters of 8.5, 10.5, and 12.5 kJ/cm, and using metallographic microscopes, scanning electron microscopes, and other detection methods, the microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of the joints were mainly investigated. The research results show that when the heat input is 10.5 kJ/cm, the weld zone obtains fine and uniform solidification structure, with δ -ferrite content of 5.8%, and the comprehensive performance of the joint is the best. The tensile strength reaches 625 MPa, the elongation is 35%, and the corrosion rate is the lowest (0.85 mm/a). Excessive or insufficient heat input will cause coarse grains or performance degradation. From the conclusion, it can be drawn that when the heat input is controlled within the range of 10-11 kJ/cm, better comprehensive performance of 304 stainless steel welded joints can be obtained, providing an important process basis for engineering applications.

Keywords

304 stainless steel; TIG welding; microstructure; mechanical properties; corrosion resistance; welding process optimization

304 不锈钢 TIG 焊接接头组织与性能分析

黄逸兴

南昌交通学院, 中国 · 江西 南昌 330100

摘要

本文就304不锈钢TIG焊接工艺参数对焊缝组织性能的影响规律展开系统的研究。通过设计8.5、10.5、12.5kJ/cm三种热输入参数,用金相显微镜,扫描电镜等检测方式,着重考察了接头的微观组织情况,力学性能,耐腐蚀性能。研究结果表明:当热输入为10.5kJ/cm时,焊缝区获得细小均匀的凝固组织, δ -铁素体含量为5.8%,接头综合性能最好,抗拉强度达到625MPa,伸长率35%,腐蚀速率最低(0.85mm/a),过高或过低的热输入都会造成晶粒粗大或性能降低。从结论可以得出,在热输入控制在10-11kJ/cm范围内,可以获得较好的304不锈钢焊接接头综合性能,为工程应用提供了重要工艺依据。

关键词

304不锈钢; TIG焊接; 微观组织; 力学性能; 耐腐蚀性; 焊接工艺优化

1 引言

304 不锈钢由于其良好的耐腐蚀性及可成型性,在石油化工,食品机械等行业中应用较广。TIG 焊接属于高质量连接方式,其工艺参数会直接影响接头组织和性能。焊接接头在实际工程出现一些问题,比如说晶间腐蚀,力学性能降低等,这对设备的使用寿命和安全有很大影响。目前大多数的研究都是对单一工艺参数的影响,缺少对工艺-组织-性能关系的系统研究。尤其是不同的热输入条件下,接头组织演变规律及对力学性能、腐蚀行为的影响机理尚不明确。本次试验通过设计多组对比试验,对 304 不锈钢 TIG 焊接接头微观组织进行系统分析,评价接头的力学性能和耐腐蚀性

能,建立工艺参数与接头性能之间的定量关系,为工程应用提供理论指导和技术支持。

2 研究目的与实验设计

2.1 304 不锈钢焊接接头综合性能优化目标的确立

本研究目的是为了提 高 304 不锈钢 TIG 焊接接头的综合性能,主要解决工程应用中由于焊接工艺不当造成的晶间腐蚀敏感性增加、力学性能下降等问题。通过系统改善焊接工艺参数,以期获得组织均匀、力学性能好、耐腐蚀性强的焊接接头。具体性能指标要求包括:抗拉强度大于等于 600MPa,延伸率大于 30%,显微硬度分布均匀,腐蚀速率小于 1.0mm/a。这些指标保证了接头的服役安全性,又考虑到了生产工艺的经济性和可行性,为后续实验的设计指明了技术方向。

【作者简介】黄逸兴(1980-),男,中国江西南昌人,本科,实验师,从事机械制造、材料成型及控制类研究。

2.2 TIG 焊接工艺参数体系的实验设计方案

本次实验使用了厚度为 3mm 的 304 不锈钢板材，并且选择 ER308L 焊丝作为填充材料。为了对热输入影响接头性能进行深入了解，选取三个不同热输入参数的焊接工艺。通过调节焊接电流 140-180A、焊接电压 12.5—13.5V、焊接速度 120mm/min 等参数，获得 8.5、10.5 和 12.5kJ/cm 三种不同的热输入量。焊接过程采用 99.99% 纯氩气保护，气体流量恒定在 15L/min。所有试件都用 V 型坡口，装配间隙 0.5mm，确保实验结果的可靠性和可比性^[1]。表 1：详细列出了三组实验的具体工艺参数及其对应的热输入值，这些参数设置为后续研究不同热输入条件下接头的组织性能演变规律提供了基础。

表 1 焊接工艺参数

组别	电流 (A)	电压 (V)	速度 (mm/min)	热输入 (kJ/cm)
1	140	12.5	120	8.5
2	160	13.0	120	10.5
3	180	13.5	120	12.5

2.3 组织性能多维度表征方法的确定依据

为确保研究结果的全面和可靠，使用多维度表征法来考察接头性能。微观组织分析用 IE500M 金相显微镜来观察微观组织，用 JSM-7800F 场发射扫描电镜来进行细部结构分析。力学性能测试包含室温拉伸试验（GB/T2651），显微硬度测定，腐蚀性能测试使用晶间腐蚀试验（GB/T4334），点腐蚀试验。每个参数组取 3 个平行试样，实验结果取平均值，保证数据的统计性。利用 ImageProPlus 软件对组织进行定量分析，保证数据处理的准确性与科学性。

3 微观组织结构特征分析

3.1 焊缝区域凝固组织形貌与相组成演变规律

不同热输入条件下的焊缝组织呈现显著差异。当热输入为 8.5kJ/cm 时，焊缝中心形成细小的胞状晶和树枝晶组织，一次枝晶臂间距约为 15μm。随着热输入增加至 10.5kJ/cm，枝晶尺寸略有增大，但组织仍保持较好的均匀性。当热输入达到 12.5kJ/cm 的时候，枝晶臂间距就会变大到 25um 而且有明显的粗化。通过 EDS 分析可知，焊缝中以奥氏体相为主，δ - 铁素体随着热输入的增大而减小，从 8.5kJ/cm 时的 6.2% 降到 12.5kJ/cm 时的 4.5%。这种组织的变化对于焊缝的抗热裂性和耐腐蚀性有很大的影响。

3.2 热影响区晶界特性与析出相分布特征

热影响区（HAZ）的组织变化最为显著。在低热输入（8.5 kJ/cm）条件下，HAZ 宽度较窄，约为 0.8mm，晶粒尺寸保持在 25μm 左右。当中等热输入（10.5kJ/cm）时，HAZ 宽度扩大至 1.0mm，晶粒尺寸增加至 35μm。当采用高热输入（12.5kJ/cm）时，HAZ 宽度进一步扩大至 1.2mm，晶粒发生明显粗化，最大晶粒尺寸达到 50μm。通过 TEM 观察发现，在 650-850℃敏化温度区间，晶界处有 M₂₃C₆ 型

碳化物析出，且析出物数量与热输入量呈正相关关系，这对材料的耐腐蚀性能产生不利影响。

3.3 母材 / 焊缝界面组织梯度变化规律研究

熔合线附近的组织有明显的梯度变化。母材侧是轧制态的等轴奥氏体晶粒，平均尺寸为 20μm。靠近熔合线的地方，因为温度梯度大，所以形成外延生长的柱状晶区。从元素分布分析中可以看出，熔合线附近存在 Cr，Ni 等重要的合金元素的扩散层，扩散层的宽度大约为 50μm。Cr 元素在熔合线上有轻微的贫化，最低含量为 17.5%，这就使得界面区域的耐腐蚀性变差^[2]。界面区域显微硬度测试发现该处有明显的硬度梯度，从母材的 210HV 到焊缝区的 230HV 逐渐过渡，这种硬度变化和组织梯度特征密切相关。

4 力学性能测试结果与讨论

4.1 接头强度特性与断裂行为关联性分析

拉伸试验结果说明焊接接头的力学性能与热输入参数存在一定的相关性。当热输入为 10.5kJ/cm 时，接头的综合性能最好，抗拉强度达到 625MPa，屈服强度为 325MPa，延伸率为 35%，比母材强度低 8.7%。低热输入（8.5kJ/cm）条件下，由于冷却速度快，接头强度为 605MPa，但是塑性差；高热输入（12.5kJ/cm）时，由于晶粒粗化严重，强度降低到 595MPa。所有试样断裂位置都在热影响区，断口分析可知低热输入试样为韧性断裂，有大量的韧窝；高热输入试样为准解理断裂，与晶界碳化物析出、晶粒粗化有关。这表明优化热输入可有效改善接头强塑性匹配。表 2 数据清晰地展示了不同热输入参数下接头力学性能的量化对比，为后续分析与讨论提供了重要依据。

表 2 拉伸性能测试结果

热输入 (kJ/cm)	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	延伸率 (%)
8.5	605	310	32
10.5	625	325	35
12.5	595	295	28

4.2 显微硬度分布梯度与组织演变对应关系

显微硬度测试结果中可以看出，接头硬度分布具有明显的不均匀性。母材区硬度保持在 210HV 左右，焊缝区由于快速凝固产生细晶强化，硬度可高达 230HV。热影响区软化，最低硬度为 185HV，与该区域晶粒长大及回复再结晶有关。硬度分布曲线显示，软化区宽度随着热输入的增大而增大，在 8.5kJ/cm 时宽度为 0.6mm，在 10.5kJ/cm 时宽度为 0.8mm，在 12.5kJ/cm 时宽度为 1.0mm。这种变化是硬梯度和微观组织非常吻合的证明，证实了焊接热循环对局部力学性能的显著影响。

4.3 塑性变形能力与界面协调性研究

弯曲试验结果显示所有的试样都能通过 180° 的弯曲试验，但是性能方面存在差别。热输入为 10.5kJ/cm 的试样弯曲性能最好，表面没有产生裂纹；而高热输入试样的弯曲时