

30CrMnSiA 钢电子束焊接接头低周疲劳性能研究

Study on Low-Cycle Fatigue Behavior of Electron Beam Welding Joint of 30CrMnSiA Steel

成都飞机工业(集团)有限责任公司 虞文军 李 飞 邵绪分

[摘要] 本文对 30CrMnSiA 电子束焊接接头低周疲劳寿命进行了试验, 得出了试样在载荷 700MPa 的平均疲劳寿命, 并对焊接接头的疲劳断口形貌进行研究, 分析了影响 30CrMnSiA 电子束焊接接头低周疲劳寿命的因素。

关键词: 30CrMnSiA 电子束焊接 低周疲劳寿命 疲劳断口

[ABSTRACT] Low-cycle fatigue life test of 30CrMnSiA steel welded by EB welding is experimented, and the average fatigue life of sample under the stress levels of 700MPa is obtained. The microstructure of joint fracture features is researched. The factors influencing low-cycle fatigue life of electron beam welding joint of 30CrMnSiA steel are analyzed.

Keywords: 30CrMnSiA steel EB welding Low-cycle fatigue life Fracture of fatigue

某机型轴类零件材料为 30CrMnSiA 钢, 30CrMnSiA 具有良好的力学性能, 既有较高的强度、较好的塑性, 又有较低的成本, 但其具有较大的淬透性^[1], 因此焊接性能较差, 在焊接过程中容易出现质量问题(如焊缝的气孔、冷裂纹、热裂纹等), 特别影响零件的疲劳寿命。

电子束焊接热源能量密度高、加热面积小, 已成为航空航天厚壁结构的主要焊接技术, 焊接精度高, 生产效率高, 特别是厚板焊接, 一次成型, 焊缝质量高, 力学性能良好, 设计选用电子束焊接此轴类零件, 要求重要疲劳焊接关键件在载荷 700MPa 的平均疲劳寿命 $\geq 10^5$ 次。

零件焊接之前, 30CrMnSiA 钢焊接试验件的疲劳性能应达到设计要求。本课题选取了 30CrMnSiA 厚管材进行电子束锁底焊接, 研究焊接接头的疲劳寿命和疲劳断口。

1 试验方法与试验条件

1.1 试验材料

本试验材料为 30CrMnSiA 钢板材和管材, 厚度为 12mm 和 16mm, 材料的成分见表 1。

1.2 试验设备及方法

表1 30CrMnSiA化学成分

w/%

C	Mn	Si	Cr	Ni	Fe
0.28~0.35	0.80~1.19	0.90~1.20	0.80~1.10	≤ 0.40	余量

本试验在北京航空制造工程研究所制造的 ZD150-30C CV65M 高压电子束焊机上进行, 其加速电压为 150kV, 功率为 30kW。

试片的焊接工艺参数见表 2, 焊接过程中加偏摆扫描, 热处理温度为 890℃, 540℃回火, 保温 1h, 油冷。

表2 30CrMnSiA电子束焊接焊接工艺参数

加速电压 /kV	聚焦电流 /mA	电子束流 /mA	焊接速度 /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
120	1 750 ~ 1 765	42 ~ 46	8

疲劳性能试验测定焊接接头在对称交变载荷下的疲劳寿命, 设备型号 INSTRON1332, 载荷采用等幅对称载荷 $\sigma_{\text{MAX}} = 700\text{MPa}$, 试验频率为 10Hz。试验按照 GB 2656《焊缝金属和焊接接头的疲劳实验法》标准执行。

2 疲劳试验

2.1 疲劳寿命测试结果

疲劳寿命测试结果及疲劳断口位置见表 3。试验过程中试样件的温度要求不超过 200℃。试验焊接了 2 批试样, 每批试样上取 10 件疲劳试样, 试验进行至 26 万次时停止。两批试样件的平均疲劳寿命均达到设计要求 $\geq 10^5$ 次。其中, 第一批疲劳试样件均在 10^5 以上, 只有 2 件试样在 26 万次以下断裂, 疲劳寿命分散性较好; 第二批试样平均寿命在 10^5 以上, 但有 3 件疲劳寿命 $\leq 10^5$, 疲劳寿命分散性较大, 见图 1^[2]。

2.2 疲劳寿命影响因素分析

第一批断裂的 2 个试样和第二批断裂的 6 个试样的宏观断口见图 2, 断裂位置都是焊缝区, 整个断口呈银灰色, 断口源区处较平整; 瞬断区断口呈剪切唇特征^[3], 断口较粗糙, 其中 1-4, 2-4, 2-6, 2-9 断口源区处可见明显孔洞。

对断口进行扫描电镜观察, 焊缝区存在气孔、夹杂

表3 30CrMnSiA疲劳寿命及断裂位置

第一批 1#	疲劳寿命 / 次	断裂位置	第二批 2#	疲劳寿命 / 次	断裂位置
1-1	270 000	未断	2-1	51 867	焊缝
1-2	260 318	未断	2-2	155 330	未断
1-3	261 000	未断	2-3	316 302	未断
1-4	122 495	焊缝	2-4	40 822	焊缝
1-5	261 000	未断	2-5	260 646	未断
1-6	261 000	未断	2-6	20 300	焊缝
1-7	355 496	未断	2-7	310 429	未断
1-8	261 000	未断	2-8	298 504	焊缝
1-9	261 000	未断	2-9	105 824	焊缝
1-10	147 703	焊缝	2-10	192 919	焊缝
平均值	246 101.2		平均值	175 294.3	

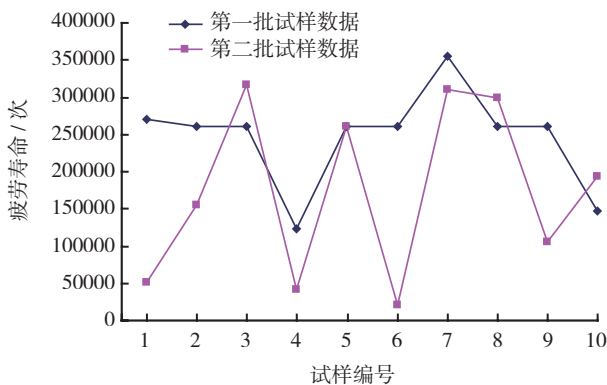


图1 疲劳数据曲线图
Fig.1 Curve of fatigue data

物及微裂纹,并由此形成疲劳源,焊缝热影响区的粗大组织对疲劳寿命影响也非常大。

(1)气孔对焊缝疲劳性能影响很大。如图3(a)、图3(b),1-4和2-6号试样疲劳性能都较低,电子束焊接是在高真空环境下进行的^[4],焊接速度过快,金属熔池在焊接过程中运动剧烈,冷却过程中容易形成真空孔。焊接接头在热影响区附近的微观断裂机制是按微坑聚集型的韧性断裂方式进行的,宏观上属于微孔聚集型断裂,这与工业上多数用来制造重要零件的金属材料的断裂方式一致^[5]。图3(a)为准解理断口,可以观察到明显的粗短放射状河流花样,但其中也夹杂了部分冰糖状形貌的沿晶断裂方式,并可观察到明显的沿晶裂纹。在焊接30CrMnSiA材料的接头时,焊缝表面成形质量对焊接接头的性能影响较大。如图3(a),孔径大约有0.3mm,孔壁粗糙,疲劳寿命只有260646次;

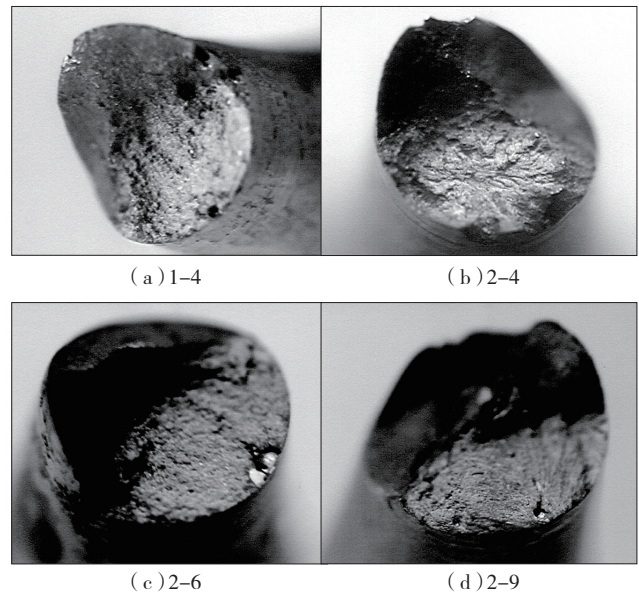


图2 典型宏观疲劳断口形貌
Fig.2 Typical macrostructure of fatigue fracture

如图3(b),2-6试样中孔洞刚好在试样的表面,直径约为0.7mm,极大地影响了试样的疲劳寿命,2-6号试样的疲劳寿命只有20300次。

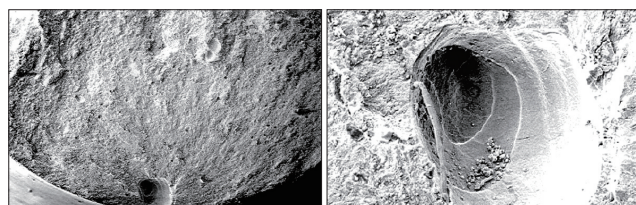
(2)焊缝中粗大的片状马氏体也会对试样的疲劳寿命产生影响。如图3(c),电子束焊接过程中,能量高,容易形成粗大的焊缝组织,焊接件焊后需热处理细化焊缝组织及消除焊接应力来改善零件的力学性能。热处理残存的粗大组织对试样力学性能影响非常大,疲劳试验中,粗大的马氏体区域形成了疲劳裂纹源,使试样脆性断裂。

(3)观察断口微观形貌,瞬断区还发现了一些疏松组织,相对疏松组织,气孔更容易成为疲劳断裂源。如图3(d),疲劳源在气孔区域,瞬断区有较多开裂的不规则的疏松组织。

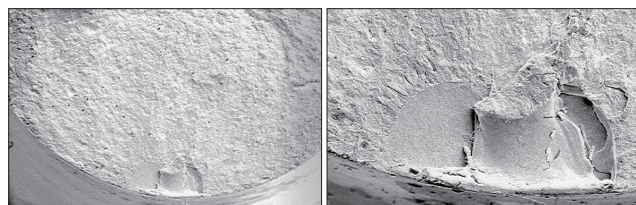
通过以上疲劳试验,电子束焊接30CrMnSiA疲劳平均寿命 $\geq 10^5$ 次,满足设计要求,可以应用于实际的零件生产。焊缝中存在的气孔、疏松组织和粗大组织,可以通过对焊接工艺及焊后热处理进行优化来减少和消除缺陷:(a)焊接过程中加入偏摆扫描,可以减少焊缝中的气孔和疏松组织;(b)焊前清理工作要求严格,减少夹杂物对焊缝的污染;(c)为了消除焊缝中粗大组织,在保证焊透率下,减少焊接时热输入或者改善热处理制度^[6]。

3 结论

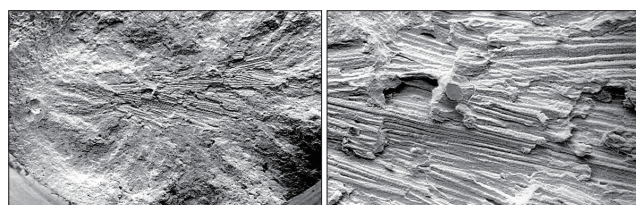
(1)30CrMnSiA钢厚板电子束焊接完全可行,满足



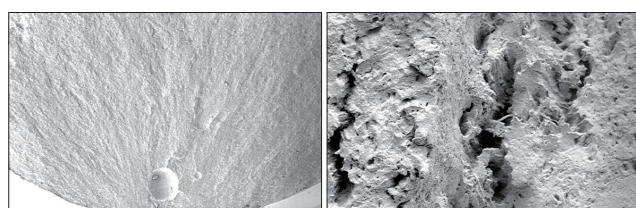
(a) 1-4 试样断口形貌



(b) 2-6 试样断口形貌



(c) 2-4 试样断口形貌



(d) 2-9 试样断口形貌

图3 典型微观组织疲劳断口

Fig.3 Typical microstructure of fatigue fracture

设计要求。

(2) 疲劳断口位置均在焊缝区域,断口特征揭示焊缝中存在的气孔、夹杂物、疏松组织和粗大组织对试样的疲劳寿命有较大影响。

参考文献

- [1] 石德柯. 材料科学基础. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 王向明. TA15 板与电子束焊接疲劳特性研究. 北京航空航天大学学报, 2003(29):808-811.
- [3] 许昌瑜, 管敦惠. 常用结构钢相图谱. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [4] 陶春虎, 赵爱国, 王理. 航空发动机用材料断口分析及断口图谱. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [5] 胡世炎. 机械失效分析手册. 四川: 四川科学技术出版社, 1989.
- [6] 陈芙蓉. 焊后热处理对 30CrMnSiNi2A 钢电子束焊接件疲劳行为的影响. 机械强度, 2002, 24(3):429-432.

(责编 小颖)

(上接第 88 页)

表2 算例2结果

算法	超球近似子空间	动态罚因子	KS 罚函数	动态 KS 罚函数
齿宽系数 x_1	3.5000	3.5000	3.4998	3.5000
齿轮模数 x_2	0.7000	0.7000	0.7000	0.7000
小齿轮齿数 x_3	17.0002	17.0000	17.0002	17.0001
轴承间距 x_4	7.3000	7.3000	7.3000	7.3000
轴承间距 x_5	7.7153	7.7153	7.7153	7.7153
轴承直径 x_6	3.3502	3.3502	3.3498	3.3502
轴承直径 x_7	5.2867	5.2866	5.2857	5.2867
目标函数 y	2994.25	2994.15	2993.44	2994.24
迭代次数 n	8	3	6	3
耗时 /s	1.2194	0.5474	0.5253	0.3726

式是高阶可微的,使得求解过程变得更加简单有效,提高了寻优算法的求解速度和精度。而 M 和 ρ 这个控制参数的联合使用降低了将单个参数设计成最优值的难度,并减弱了单个参数影响,让寻优过程更可靠。可以预测,这种优势还会随着学科的增加和设计参数的增多而越来越明显,因为约束的个数随着学科的增加并没有增多。

但是动态 KS 罚函数和罚因子算法一样都含有设计参数,对于不同的设计问题,都需要单独设置一个合适的设计参数值才能有效地得到精确解,如何更简单地选择设计参数仍是一个需要深入研究的问题。

参考文献

- [1] 王振国, 陈小前, 罗文彩, 等. 飞行器多学科设计优化理论与应用研究. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] Kobayashi T, Kroo I. The New Effective MDO Method Based on Collaborative Optimization. AIAA, 2005.
- [3] Hulme K F, Bloebaum C L. A comparison of solution strategies for simulation based multi-disciplinary design optimization. AIAA, 1998.
- [4] Tedford N P, Martins J R R. A comparison of MDO architectures Within a Universal Framework. AIAA, 2006.
- [5] 李响, 李为吉. 基于超球近似子空间的协同优化方法及应用研究. 西北工业大学学报, 2003, 21(4):461-464.
- [6] 杨维维, 赵勇, 陈小前, 等. 一种改进的协同优化过程研究. 系统工程与电子技术, 2007, 29(9):1564-1567.
- [7] 万朝燕, 兆文忠, 李晓峰, 等. 基于 KS 函数求解多约束优化问题研究. 机械设计, 2003, 20(9):9-11.
- [8] 贾海朋, 万朝燕, 李静, 等. KS 函数混合包络问题的研究及应用. 大连铁道学院学报, 2000, 21(3):32-35.

(责编 良辰)