

TIG 粉末堆焊反应合成 FeAl 金属间化合物层的工艺优化

刘长清¹, 单际国^{1,2}, 任家烈¹

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要:采用正交试验法研究了堆焊工艺对 FeAl 金属间化合物堆焊层成形质量的影响, 通过极差分析和方差分析, 评价了堆焊工艺参数对成形质量影响的显著程度, 并对堆焊工艺参数进行了优化。结果表明, 堆焊电流、堆焊速度与电流之间的交互作用对堆焊层成形的影响最显著, 堆焊速度对堆焊层成形质量影响较小, 而粉末涂敷厚度的影响程度最小。对于 Fe: Al(原子比)为 1:2 的混合粉末而言, 本试验条件下能够获得较好成形的堆焊工艺参数是电流 130 A、堆焊速度 0.9 mm/s、粉末涂敷厚度 2 mm。

关键词: FeAl 金属间化合物; 堆焊层成形; 钨极惰性气体保护(TIG)堆焊; 工艺优化; 正交试验

中图分类号: TF124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-6051(2007)01-0033-03

Process Optimization for TIG Powder Overlaying Reaction Synthesis of FeAl Intermetallic Compounds

LIU Chang-qing¹, SHAN Ji-guo^{1,2}, REN Jia-lie¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The influence of overlaying technology on the performance of FeAl intermetallic compound overlaying shaping was studied by orthogonal experiment, the extent of influence on the performance of overlaying shaping was evaluated through the range analysis and variance analysis, and the technologic parameters of the overlaying technology were optimized. The results show that the electric current, the interaction of overlaying velocity and electric current affect the performance of overlaying shaping significantly, while overlaying velocity has less influence on shaping and effect of the thickness of powder overlaying coating is the least. Under the experimental conditions and when Fe: Al proportion is 1:2 (atom rate), the optimized parameters are as follows: electric current is 130 A, overlaying velocity is 0.9mm/s, powder thickness is 2 mm.

Key words: FeAl intermetallic compound; overlaying shaping; TIG(tungsten inert gas) overlaying; process optimization; orthogonal experiment

由于 FeAl 金属间化合物成本低廉、密度低、抗氧化性及抗蚀性能好, 使其可能成为中温或高温腐蚀环境中使用的新型结构材料。但与 Al 含量较低的铁铝化合物(如 Fe₃Al)相比, FeAl 金属间化合物在室温下韧性更差、高温强度也低, 作为结构材料尚缺乏竞争力^[1]。目前较多的研究集中在将 FeAl 作为涂层材料, 用于锅炉及管道等压力容器制造行业及石油工业炼油厂的催化裂化装置上^[2-3]。制备 FeAl 涂层多采用热喷涂方法, 也有用激光和聚焦光束制备 FeAl 层^[4-6]。由于 Al 为活泼元素, 在涂层制备过程中烧损严重, 涂层的组织难以控制。采用 TIG 堆焊可以对 Al 元素进行很好的保护, 在制备 FeAl 涂层方面有较好的应用前

景^[7-8]。目前研究用的堆焊材料为 Fe-Al 系金属间化合物焊条^[2,8-9], 由于 FeAl 焊芯韧性低而拉拔困难, 导致焊条制备工艺十分复杂。因此用 Fe、Al 粉末堆焊反应合成 FeAl 金属间化合物层是值得研究的方向。本文通过正交试验法来优化堆焊工艺参数, 以获得良好的成形, 期望为 TIG 粉末堆焊合成 FeAl 涂层的工艺设计提供参考依据。

1 试验材料和方法

试验用母材为热轧 Q235A 钢板, 试样尺寸为 100 mm × 100 mm × 5 mm; 堆焊材料为 150 ~ 300 目的 Fe313 粉末(15wt% Cr, 1.5wt% B, 余量为 Fe)和纯度为 99wt% 的 Al 粉的混合粉, 考虑到堆焊过程中 Al 比 Fe 的氧化烧损更严重, 取 Fe: Al(原子比)为 1:2, 用有机粘结剂将其预置在试样表面, 预涂宽度为 5 mm, 保护气体为氩气, 气体流量为 12.5 L/min, 钨极直径为 2 mm。晾干后, 使用直流正接 TIG 电弧进行堆焊。以堆焊层表面成形质量为正交试验指标, 将获得的堆焊

作者简介: 刘长清(1975.04—), 男, 黑龙江鹤岗人, 硕士生, 主要从事 TIG 电弧堆焊合成金属间化合物涂层技术研究。本文联系人: 单际国, 联系电话: 010-62773798 E-mail: shanjig@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2006-09-25

层按其成形质量排队,进行综合评分,成形质量越好,分值就越高,分值在6~20之间,评分标准见表1。

表1 堆焊层成形质量的评价标准

Table 1 Meteward for the performance of overlaying shaping

分值	成形质量
20	堆焊层宽度和厚度均匀,表面光滑
15	堆焊层厚度和宽度比较均匀
12	堆焊层宽度和厚度基本均匀
7	堆焊层宽度和厚度不均匀
6	粉末熔化不充分或堆焊层与母材结合不良

前期试验发现,堆焊电流、堆焊速度和粉末涂敷厚度以及它们的交互作用等都对堆焊层的成形有影响。因此,正交试验中把上述工艺参数均作为被考察的因素,在每一轮试验中选取要考查的因素和各因素的水平,用标准正交表进行两轮试验^[10]。第一轮考虑的因素为堆焊电流、堆焊速度和粉末涂敷厚度,而把它们之间可能存在的交互作用放到第二轮中考查。

2 试验结果与分析

2.1 第一轮试验

堆焊电流、堆焊速度和粉末涂敷厚度3个因素各取三个水平,采用随机方法安排各因素的水平并制成因素水平表,选用 $L_9(3^4)$,表2为各因素标准水平对应的数值。其中均值是指当因素处于某种水平时试验结果的平均值,极差是因素的均值最大值与最小值之差。极差大,说明该因素活泼,它的变化对结果影响很大;极差小,说明该因素保守,它的变化对结果影响较小。但极差分析法不能真正区分某个因素各水平之间所对应的试验结果间的差异究竟是由水平改变引起的,还是由试验误差引起的。方差分析法通过计算各水平平均偏差平方和与误差偏差平方和的比值,然后给定显著性水平,通过查询 F 分布临界值表,得到该

表2 第一轮正交试验工艺参数和试验结果

Table 2 First round orthogonal experiment parameters and results

试验号	电流/A	速度/mm·s ⁻¹	厚度/mm	试验结果(分值)	
TF94	100	0.7	1.0	1	7
TF181	100	1.1	3.0	2	10
TF111	100	1.5	2.0	3	6
TF182	120	0.7	3.0	3	13
TF123	120	1.1	2.0	1	15
TF183	120	1.5	1.0	2	8
TF184	140	0.7	2.0	2	16
TF185	140	1.1	1.0	3	12
TF107	140	1.5	3.0	1	9.5
均值1	7.667	12.000	9.000	10.500	
均值2	12.000	12.333	10.833	11.333	
均值3	12.500	7.833	12.333	10.333	
极差	4.833	4.500	3.333	1.000	

因素对试验结果的显著性程度。根据表2的结果,通过极差分析法可以看出,因素从主到次依次为电流、速度和厚度。而表3所示的方差分析结果表明,电流和速度是控制堆焊层成形的主要因素,对堆焊层成形有显著性(>95%)影响,厚度是控制成形的次要因素,对成形有一定的影响。

表3 第一轮试验方差分析结果

Table 3 First round results of the variance analysis

方差来源	偏差平方和	自由度	$F_{比}$	显著性
电流	42.389	2	24.616	**
速度	37.722	2	21.906	**
厚度	16.722	2	9.711	*
误差	1.722	2	1.000	

注: $F_{0.10}(2,2)=9.00$, $F_{0.05}(2,2)=19.00$, $F_{0.01}(2,2)=99.00$;当 $F_{比}>F_{0.01}$,因素对结果有高度显著影响,记做***;当 $F_{0.01}>F_{比}>F_{0.05}$,因素对结果有显著影响,记做**;当 $F_{0.05}>F_{比}>F_{0.10}$,因素对结果有一定影响,记做*;当 $F_{0.10}>F_{比}$,因素对结果不显著,不做标记。

为了考查水平和结果的内在联系,探询在试验中并没有选取但可能是更好的水平,一般使用趋势图。由图1可以看到,当初始时堆焊电流值较小时,成形质量较差,随着堆焊电流的加大成形质量得到改善,在120~130 A以后,改善的程度已经很小,总体来说随着电流的增加成形逐渐变好,但成形最好的情况在本轮试验中没有出现。堆焊层成形质量随堆焊速度的增加开始呈缓慢变好的趋势,在1.1 mm/s附近成形质量达到最好,然后随堆焊速度的增加成形质量下降得较快。当粉末涂敷层厚度较小时,成形较差,随厚度的增加,成形质量得到改善,在厚度为2 mm时成形最好。因此,在本试验条件下,堆焊层成形质量最好的粉末涂敷厚度为2 mm;而堆焊电流可能处于120~140 A之间或者在140 A以上,若试验所取水平有遗漏情况发生时,则电流有可能取值在120~140 A之间,若没有遗漏,则电流应当在140 A以上;堆焊速度应该取值在0.7~1.1 mm/s之间。所以,电流和速度的最优取值仍需在第二轮试验来确定。

2.2 第二轮试验

本轮试验时,将堆焊电流、堆焊速度和粉末涂敷厚度的交互作用作为考查因素。按照第一轮试验的分析,本着有利于堆焊层成形的原则,堆焊电流、堆焊速度和粉末涂敷厚度各取两水平,分别为电流130 A、150 A,速度0.9 mm/s、1.1 mm/s,厚度2 mm、3 mm,也采用随机方法安排各因素的水平并制成因素水平表,选用 $L_8(2^7)$,如表4所示。正交表中误差的偏差平方和计算,可用正交表中的空白列的偏差平方和来计算。根据表4的结果可知,由表5极差分析和方差分析可以看出,A×C和B×C的交互作用和空白列相近,说

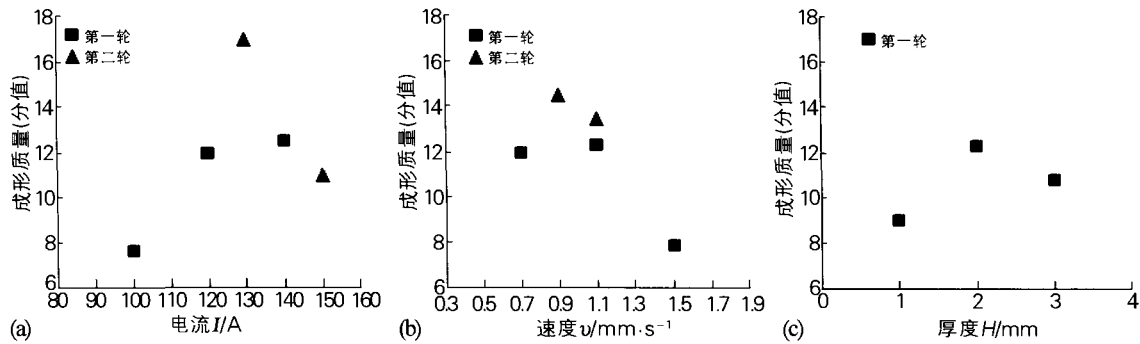


图1 正交试验的水平趋势图

Fig. 1 Graphs of orthogonal experiment

明电流和厚度以及速度和厚度之间不存在交互作用。电流是影响成形的高度显著因素,电流和速度的交互作用(热输入)为次要因素。电流为 130 A,速度为 0.9 mm/s 时的组合最好。

表4 第二轮正交试验工艺参数和试验结果

Table 4 Second round orthogonal experiment parameters and results

试验号	A		B		C			试验结果 (分值)
	(电流 /A)	(速度 /mm·s ⁻¹)	A×B	(厚度 /mm)	A×C	B×C		
TF204	130	0.9	1	3	1	1	1	18.0
TF122	130	0.9	1	2	2	2	2	19.0
TF119	130	1.1	2	3	1	2	2	17.0
TF125	130	1.1	2	2	2	1	1	16.0
TF186	150	0.9	2	3	2	1	2	10.5
TF187	150	0.9	2	2	1	2	1	9.0
TF188	150	1.1	1	3	2	2	1	10.0
TF189	150	1.1	1	2	1	1	2	12.0
均值 1	17.500	14.125	14.750	13.875	14.000	14.125	13.250	
均值 2	10.375	13.750	13.125	14.000	13.875	13.750	14.625	
极差	7.125	0.375	1.625	0.125	0.125	0.375	1.375	

表5 第二轮试验方差分析结果

Table 5 Second round results of the variance analysis

方差来源	偏差平方和	自由度	F _比	显著性
A	101.531	1	115.250	***
B	0.281	1	0.319	
A×B	5.281	1	5.994	*
C	0.031	1	0.035	
A×C	0.031	1	0.035	
B×C	0.281	1	0.319	
误差	4.41	5		

注: $F_{0.10}(1,1) = 4.060$, $F_{0.05}(1,1) = 6.610$, $F_{0.01}(1,1) = 16.300$; $F_{比} > F_{0.01}$, 因素对结果有高度显著影响, 记做 ***; $F_{0.01} > F_{比} > F_{0.05}$, 因素对结果有显著影响, 记做 **; $F_{0.05} > F_{比} > F_{0.10}$, 因素对结果有一定影响, 记做 *; $F_{0.10} > F_{比}$, 因素对结果不显著, 不做标记。

根据两轮正交试验结果可以确定,对于 Fe:Al(原子比)为 1:2 的混合粉末而言,本试验条件下能够获得最好成形的工艺参数是堆焊电流为 130 A,堆焊速度为 0.9 mm/s,粉末涂敷厚度为 2 mm。

3 结论

(1) 在 Q235A 钢板上预置铁铝混合粉末,采用 TIG 反应堆焊合成 FeAl 金属间化合物堆焊层时,堆焊电流、堆焊速度与堆焊速度的交互作用、堆焊速度、粉末厚度都会影响堆焊层成形质量;其中堆焊电流以及电流与堆焊速度的交互作用为显著性因素。

(2) 采用 Fe313 和纯 Al 的混合粉末(Fe、Al 原子比为 1:2)在热轧 Q235A 钢板表面进行直流正接 TIG 堆焊时,获得最好成形的工艺参数是堆焊电流为 130 A,堆焊速度为 0.9 mm/s,粉末涂敷厚度为 2 mm。

(3) 由于堆焊工艺参数中粉末厚度对堆焊层成形的影响程度最小,因此,当为了控制堆焊层的组织而必须改变工艺参数时,推荐优先改变粉末涂敷厚度。

参考文献:

- [1] 张永刚,韩雅芳,陈国良,等. 金属间化合物结构材料[M]. 北京:国防工业出版社,2003:857-894.
- [2] 史春元,柴国明,等. 2. 25Cr-1Mo 钢 TIG 堆焊 Fe₃Al 合金的研究[J]. 大连铁道学院学报,2003,24(1):46-51.
- [3] 武登云,孙扬善. Fe₃Al 金属间化合物堆焊材料的应用[J]. 焊接,2001(12):29-30.
- [4] Pillai S R, Shankar P, Rao RVS, et al, Diffusion annealing and laser surface alloying with aluminium to enhance oxidation resistance of carbon steels [J]. Materials Science and Technology, 2001, 17(10):1249-1252.
- [5] 单际国,任家烈,钟军斌. 光束合金化合成 Fe-Al 系金属间化合物涂层的微观特征[J]. 清华大学学报(自然科学版),2004,44(5):585-588.
- [6] 钟军斌,等. Fe/Al 金属间化合物光束合金化涂层的组织分层现象[J]. 金属热处理,2004,29(11):30-32.
- [7] 丁成钢,陈春焕,从国志,等. Fe-Al 合金 TIG 焊接头组织与性能研究[J]. 应用科学学报,2000,18(4):368-370.
- [8] 夏明生,徐道荣,秦琳. Fe₃Al 基合金的堆焊工艺试验研究[J]. 热加工工艺,2004(1):36-37.
- [9] 闵学刚,余新泉,孙扬善,等. 手弧堆焊 Fe₃Al 堆焊层的组织形貌与抗氧化性能[J]. 焊接学报,2001,22(1):56-58.
- [10] 《正交试验法》编写组. 正交试验法[M]. 北京:国防工业出版社,1976.