

# 超高强度钢电阻焊裂纹修复技术研究

## Analysis on Re-Welding of Resistance Welding Crack of Ultra-High Strength Steel

中国空空导弹研究院 李 川 王攀锋 郝志锋 樊兆宝

**[摘要]** 根据壳体的结构特点,选用电阻焊和氩弧焊 2 种方式进行了焊点修复研究,通过对修复后焊点性能进行综合分析对比,确定选用氩弧焊方式修复焊点裂纹。

**关键词:** 超高强度钢 电阻焊 裂纹修复

**[ABSTRACT]** According to the structure characteristics of shell, the solder joint re-welding is studied by selection of resistance welding and argon arc welding. Through the comparison and analysis of solder joint properties after re-welding, argon arc welding is determined to re-weld the cracks.

**Keywords:** Ultra-high strength steel Resistance welding Re-welding of crack

### 1 超高强度钢

#### 1.1 超高强度钢简介

超高强度钢由于其高强度、高韧性、低的加工硬化率、优良的冷变形和切削加工性能等特性,在航空航天领域得到广泛应用。常用的超高强度钢为马氏体时效钢,其屈服强度可达 2400MPa 以上,而不失韧性,且具有优良的焊接性能。我国已成功研制 18Ni、7021 等一系列马氏体时效钢并获得广泛应用<sup>[1]</sup>。

表1 马氏体时效钢的化学成分(质量分数) %

C	Si	Mn	Ni	Co
0.01~0.027	<0.05	0.034~0.05	17.33~18.23	7.56~8.11
Mo	Ti	Al	S	P
4.73~5.10	0.45~0.55	0.045~0.14	0.005~0.008	0.005~0.007

此次研究所选材料为马氏体时效钢(250级),其化学成分如表1所示。

#### 1.2 焊接结构及焊点裂纹情况

某型壳体由翼肋和壳体圆筒等多个部件,通过多种焊接方法连接。其中翼肋和壳体通过电阻焊方式连接,每台壳体上有 144 个焊点(见图 1)。在焊接生产中,焊点内部容易产生缩孔,并在缩孔的尾部产生裂纹或

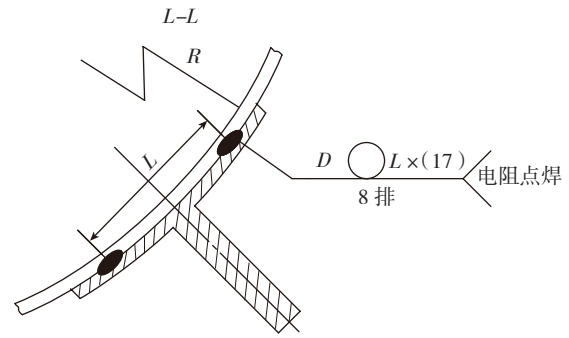


图1 翼肋点焊示意图

Fig.1 Diagram of wing-rib of spot welding

者疏松。

裂纹(见图 2)是电阻焊接头中最为严重的缺陷,裂纹易形成应力集中且易形成断裂源,大大削弱焊缝抗拉强度,其危害性极大。

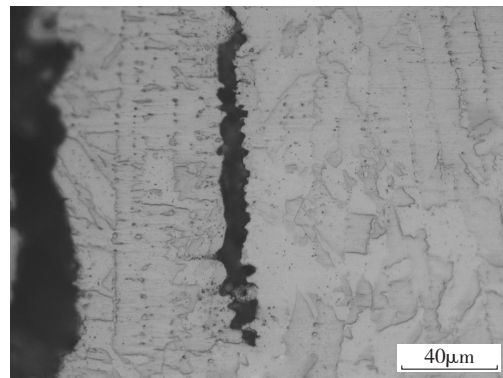


图2 焊点裂纹金相图

Fig.2 Metallographic picture of solder joint cracking

设计文件要求焊缝达到 QJ1289-95《结构钢、不锈钢电阻点、缝焊技术条件》II 级焊缝。按表 2 要求,焊点不允许存在裂纹。据统计,目前每年约有 10~15 台壳体

表2 电阻点焊达到的主要技术指标

项目	标准要求
表面质量	压痕深度 0.2max 不允许出现裂纹、烧穿、烧伤、飞溅、铜迹和沿焊点边沿的胀裂等表面缺陷
内部质量	熔核直径不小于 6.5mm,缩孔尺寸不大于 0.2 倍熔核直径,且在熔核内无裂纹焊透率为 30%~80%
单点抗剪力	不小于 xkN

因为焊点裂纹而降级,损失较大,且随着壳体生产批量的扩大,造成的经济损失将会更大,且严重影响壳体的正常交付。标准同时规定电阻焊裂纹允许一次返修,修复方法如下:允许用机械方法剔除缺陷,用氩弧焊、电弧焊、点焊、缝焊及铆接方法修复缺陷。

### 1.3 修复难点

根据标准要求的返修方案,结合壳体的结构特点,焊点修复存在以下难点:

#### (1) 剔除材料较难。

由于所用材料为超高强度钢,点焊后焊点强度更高,采用常规方法剔除缺陷较难。

#### (2) 裂纹位置判定。

裂纹形成原因较复杂,且在核内。目视无法判定,只能通过 X 射线照片间接判断二维位置,深度难以判定。

#### (3) 壳体结构特殊要求。

由于壳体内壁需要避免焊接熔透造成的凸起。而标准规定的氩弧焊等大多数修复方案的热容量较大,壳体易熔透。

鉴于以上难点,壳体电阻焊焊点裂纹的修复一直未深入研究,且目前国内外对超高强度钢电阻焊焊点裂纹的返修方法无参考文献。为提高壳体电阻焊合格率,降低经济损失,保证壳体的正常交付,我们开展了超高强度钢电阻焊焊点裂纹修复技术研究。

## 2 修复方法

根据标准要求的裂纹修复方案,电弧焊、缝焊及铆接等方法由于壳体结构的限制无法修复、排除。本项目选用电阻焊和氩弧焊 2 种方式修复裂纹,并综合评定修复后焊点的性能,以确定较优的修复方法。

### 2.1 电阻焊修复

电阻焊修复为在带裂纹的焊点上通过二次点焊,利用电阻焊热量对焊点重熔的方法消除裂纹。电阻焊修复后的焊点应满足表 2 要求。

#### 2.1.1 电阻焊修复过程

电阻焊是通过电极对工件施加压力,利用电流流过工件焊接区域产生的电阻热进行焊接的方法。电阻焊热量满足焦耳定律:

$$Q=I_A^2 R_c t, \quad (1)$$

式中,  $I_A$  为回路电流,  $R_c$  为接触电阻,  $t$  为焊接时间。

由于电阻焊修复方法是在焊点形成后进行,因此 2 工件接触电阻  $R_c$  较小。根据焦耳定律,为保证重熔所需热量,需增加焊接电流和焊接时间。但同时电流过大易形成飞溅和新裂纹等缺陷,且同时需保证压痕深度不大于 0.2,因此焊接电流的选择不是越大越好,需适当增

加焊接时间(weld#1)。同时,为使电阻焊重熔时消除裂纹,应适当增加锻压力。

经过大量试验,摸索出较合适的电阻焊修复参数,在实际操作中应根据缩孔和裂纹的大小,适当对点焊参数进行微调。一般来说,焊点缩孔和裂纹尺寸越大,焊接时间(weld#1)和锻压力、保压时间也应适当增大,不建议增加焊接电流。

#### 2.1.2 修复情况

利用以上方法,电阻焊修复了 10 个焊点经 X 射线检测 8 个焊点合格。随机抽 6 个合格试片,用于后续试验分析。

### 2.2 氩弧焊修复

氩弧焊修复为采用机械方法剔除缺陷后,用氩弧焊修复缺陷。因此氩弧焊修复分为机械方法剔除裂纹和氩弧焊焊接 2 步。

#### 2.2.1 剔除裂纹缺陷

##### (1) 裂纹位置判定。

判定裂纹位置是氩弧焊修复剔除裂纹的前提,但由于超高强度钢电阻焊裂纹形成原因复杂,且裂纹多发生在核内,判定裂纹的准确位置较难。裂纹的二维位置可以通过 X 射线底片进行观察,较简单。操作者只需根据 X 射线底片结合实际焊点位置就可以判定裂纹的具体位置。

裂纹的纵向位置通过 X 射线底片无法判定,因此需做金相分析。经过大量焊点裂纹金相分析,裂纹起始端为缩孔尾部且沿纵向分布,如图 3 所示,深度方向为  $2.5 \pm 0.5$ 。

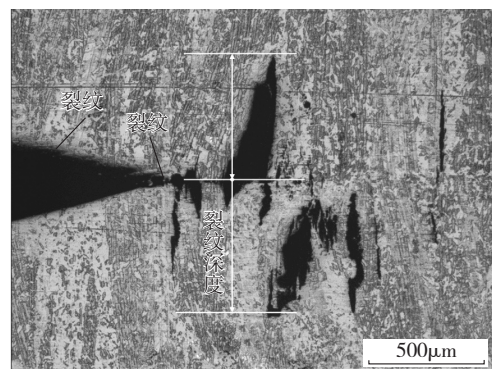


图3 超高强度钢点焊裂纹位置

Fig.3 Diagram of spot welding crack depth position on ultra-high strength steel

##### (2) 裂纹剔除方法。

由于焊点处硬度较高且不均匀以及壳体背面不允许凸起,如何采用机械方法彻底剔除裂纹,且满足壳体使用要求成为氩弧焊修复过程的难点。针对难点采取的主要措施为:

· 机械方法选取。

由于壳体结构限制及焊点处材料硬度限制,在剔除裂纹时若选用普通砂轮打磨方法剔除焊点,则排出材料较困难且不方便控制剔除深度。因此,选择钻床剔除焊点裂纹。

· 钻头形状的选取。

为方便后续氩弧焊焊接,在钻头形状的选取上也应特别注意。若选用普通麻花钻,在剔除裂纹后孔内存锐边,氩弧焊修复时在锐边处易形成根部未熔合等缺陷,因此应选用球头钻,如图4所示。

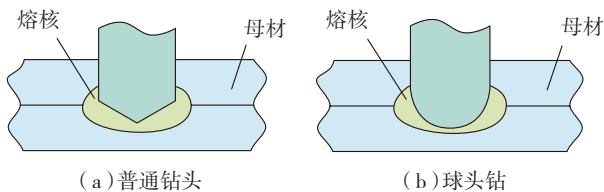


图4 钻头的选取示意图

Fig.4 Diagram of selection of drill bit

· 钻头直径  $D$  的选择。

根据表2要求,壳体电阻焊形成焊点熔核直径  $d$  不小于熔核直径,钻头直径应选择  $D=6d$ ,即选择R3的钻头。

· 钻孔深度选择。

根据图5所示,电阻焊裂纹多发生在缩孔尾部,在深度方向为2板结合部位。为保证彻底剔除裂纹,钻孔深度最少应保证钻头能剔除缩孔边沿0.5mm区域,根据钻头形状计算  $h'_{min}=2.8mm$ 。同时为满足壳体的指标要求,剔除裂纹时钻孔深度应保证氩弧焊后对壳体内侧影响最小,理想状态下氩弧焊熔深不应超出电阻焊焊透率最大值要求  $A_{max}=80%$ 。因此钻孔深度的最大值为:

$$h'_{max} = \delta + (\delta - c') \times A_{max} - S_{熔深} = 3.5 \quad (S_{熔深} \text{取} 1) \quad (2)$$

根据以上计算,钻孔深度为  $h'$  为 2.8~3.5。但在实际剔除裂纹过程中,钻孔深度应控制在  $3.2 \pm 0.2$ 。

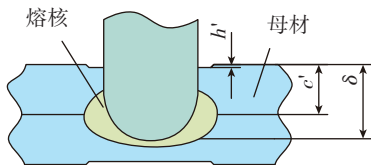


图5 钻头深度计算示意图

Fig.5 Calculation diagram of drill bit depth

· 剔除裂纹过程。

为方便焊前清理,用钻床剔除裂纹时应避免采用冷却液(特别是油性冷却液),故应采用较小的转速。控制深度时,  $h'$  应注意减去压痕深度  $c'$ 。

经验证,采用R3的球头钻,钻孔深度  $h'$  控制在  $3.2 \pm 0.2$ ,能彻底剔除裂纹,且方便氩弧焊修复。

### 2.2.2 氩弧焊焊接过程

在氩弧焊焊接时,由于孔内焊接条件较差,较易产生新缺陷。经过摸索,需注意以下事项:

(1) 焊前清理。

超高强度钢氩弧焊对杂质较敏感,易形成热裂纹等缺陷。因此,焊前清理尤为重要。清理方法为采用气枪清理完孔内留下的铁屑,然后再用丙酮反复清理,确保无油污等影响焊接质量的杂物,清理完后焊接前严禁用裸手触摸待焊区。

(2) 焊丝选择。

选用直径为  $\phi 1.2$  的焊丝,焊丝须经过表面清理,避免对焊缝进行二次污染。

(3) 焊接过程。

由于超高强度钢结晶时奥氏体向马氏体转变的温度范围较窄,仅为  $100\sim 155^\circ\text{C}$ ,故应尽可能采用小电流焊接,不预热,层间温度不大于  $100^\circ\text{C}$  [2]。故在焊接时,电流不宜过大,连续送丝以控制层间温度。为降低氩弧焊对壳体内侧的影响,需在壳体内侧垫铜板增强散热。用氩弧焊修复壳体裂纹时,根据结构特征需在内侧增加焊接热平衡工装,方便散热。如图6所示。



图6 热平衡工装

Fig.6 Tools for heat balance

(4) 焊后打磨清理。

对氩弧焊修复后高出基体的部分采用百叶轮打磨平整,注意打磨过程中不允许损伤基体。

### 2.2.3 修复情况

本试验采用氩弧焊方法修复了10个焊点,经X射线检测全部合格。

## 3 性能测试

### 3.1 单点抗剪力测试

力学性能试验采用试验设备为WE-30,试片为合格点焊试片、裂纹点焊试片、电阻焊修复试片、氩弧焊修复试片各5对。

将以上4组试片同炉热处理后进行拉伸试验,测单点抗剪力。试验结果如表3所示。

通过抗剪力对比可知(见图7),2种修复方式均能满足设计要求。但采用电阻焊修复的试片抗剪力较不

表3 试片拉伸试验结果 (采用与零件相同的热处理制度) kN

编号	合格点焊试片	带裂纹点焊试片	电阻点焊修复试片	氩弧焊试片
1#	43.1	40.9	41.7	50.8
2#	41.8	47.2	49.2	49.5
3#	39.7	50.1	43.6	49.6
4#	41.2	39	47.6	49.1
5#	39.4	42.5	49.3	47.9
平均	41.04	43.94	46.28	49.38

稳定,经分析原因为:

(1) 2次电阻焊都会在试片上形成压痕,因此各个试片压痕深度差别较大,使抗剪力变化较大;

(2) 2次电阻焊都形成缩孔,2次点焊对中情况对缩孔尺寸影响较大,故抗剪力差别较大。

根据拉伸试验结果,氩弧焊修复方式较理想。

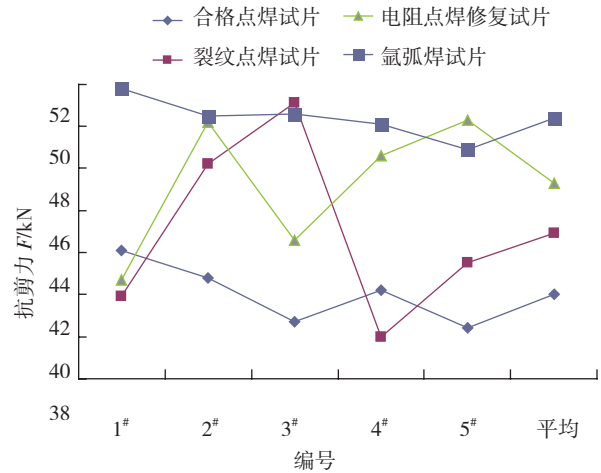


图7 抗剪力对比

Fig.7 Comparison of shear forces

### 3.2 显微组织

将电阻焊合格试片、电阻焊修复试片、氩弧焊修复试片进行焊缝接头金相分析。金相分析结果如图8所示。

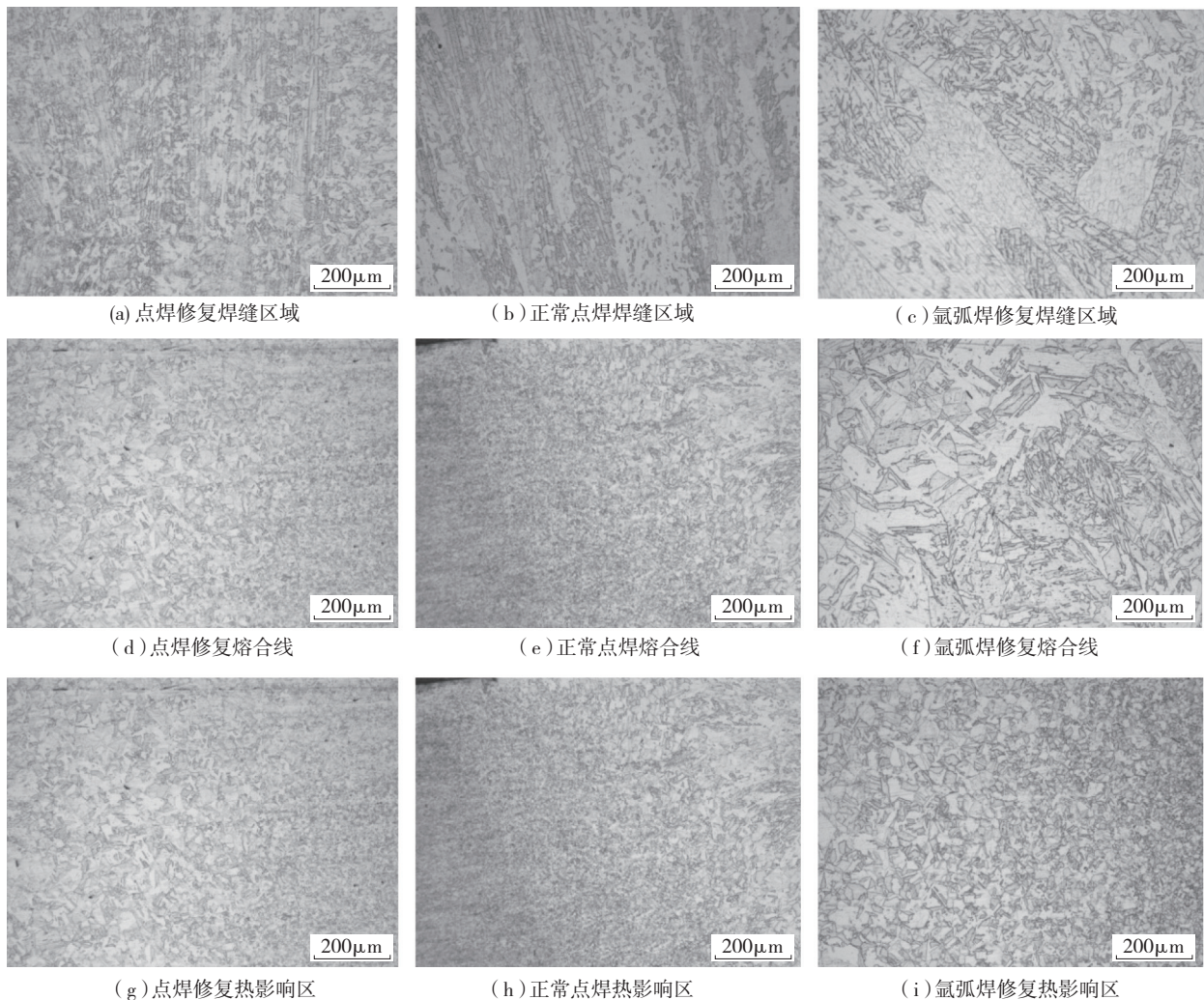


图8 焊接组织金相图

Fig.8 Metallographic picture of welding organizations

(下转第 100 页)

直至断裂。首先是材料内部分离形成空洞,在滑移的作用下空洞逐渐长大并和其他空洞连接形成韧窝断口<sup>[3]</sup>。

图7为接头韧性断裂断口形貌,韧窝较母材小,说明其塑性低于母材。韧窝底部普遍存在着第二相粒子,其受到正应力时首先开裂,形成微孔,随后周围塑性较好的基体发生开裂。

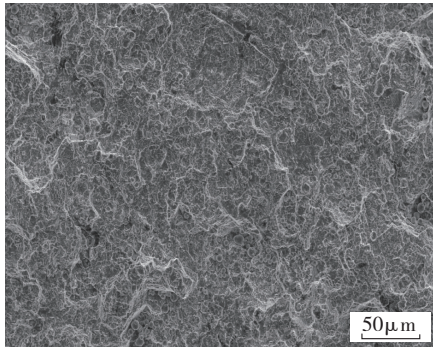


图6 FG96母材韧窝形貌

Fig.6 Dimple pattern of FG96 matrix

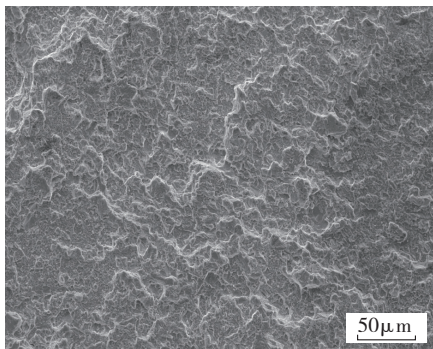


图7 FG96接头韧窝形貌

Fig.7 Dimple pattern of FG96 joint

## 4 结论

(1)粉末高温合金焊接接头 CTOD 值测试结果表明,由于其晶粒尺寸小于母材,其 CTOD 值小于母材。

(2)从宏观断裂形貌可见,母材和接头断口的预制疲劳裂纹区均平整,并且具有清晰的疲劳裂纹前沿。从微观形貌来看,母材和接头在预制裂纹区的微观形貌均出现疲劳条带,在裂纹扩展区均出现韧窝,为典型的韧性断裂,且母材断口韧窝深而多,说明母材的韧性优于接头。

### 参考文献

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册. 粉末冶金材料、精密合金与功能材料. 2版. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [2] 束德林. 金属力学性能. 北京: 机械工业出版社, 1987: 113-117.
- [3] 崔约贤, 王长利. 金属断口分析. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 34-40.

(责编 可岚)

(上接第 83 页)

金相分析结果显示,电阻焊修复焊缝晶粒变化不明显,而氩弧焊修复后焊缝晶粒趋大,分析原因为氩弧焊电弧热量较大且不集中引起。

但通过对壳体内侧修复后晶粒度进行评测,氩弧焊修复后晶粒较电阻焊后晶粒涨大趋势不明显。

### 3.3 试验分析

从以上试验可以看出,2种修复方案均能满足设计要求,但各有优缺点。

(1)电阻焊修复不能添加材料,对于因内部飞溅而引起的裂纹无法修复;另电阻焊参数选择需根据核内缩孔状态进行调试,修复成功率较低(试验中为80%),可操作性较差。

(2)电阻焊修复时,压痕难以避免,因此压痕深度超过0.15max的焊点不能采用电阻焊修复(零件最终要求压痕深度0.2max)。

(3)氩弧焊修复由于其热量较大且分散,修复后晶粒粗大且热影响区扩大,而电阻焊修复则晶粒变化不明显。

综合这2种修复方案的优缺点,氩弧焊修复虽然修复后焊缝区域晶粒趋大,但通过控制钻孔深度和焊接规范选择等手段能使修复焊接对壳体内侧影响较小,满足设计指标要求。因此,建议电阻焊裂纹采用氩弧焊修复。

## 4 结论

电阻焊修复为通过二次点焊,对裂纹重熔的方法消除裂纹。由于电阻焊热量集中修复后焊缝显微组织无涨大趋势且操作过程较为简便。但电阻焊修复后单点抗剪力不稳定且合格率较低,不适合壳体焊点裂纹修复。

氩弧焊修复为用硬质合金R3球头钻剔除裂纹缺陷,选用小规范参数氩弧焊重熔的方法消除裂纹。氩弧焊修复后焊点单点抗剪力较高、稳定且合格率较高,质量稳定可靠。虽然由于氩弧焊本身热源较分散,修复后显微组织趋大,但通过控制钻孔深度、增加内撑热平衡装置和焊接规范的选取能保证壳体内侧无热影响,达到技术指标。

因此在壳体修复方案的选取上,推荐优先选用氩弧焊修复方法。

### 参考文献

- [1] 李亚江. 高硬度材料的焊接. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [2] 孟庆森. 金属焊接性基础. 北京: 化学工业出版社, 2010.

(责编 亦非)