

6 结 论

(1) 低温再热器中 R102 钢焊接接头裂纹的性质为再热裂纹;

(2) R102 钢含有较多的沉淀强化元素,粗晶区中沉淀相的析出硬化是产生再热裂纹的内因,长期高温运行是产生再热裂纹的外部条件;

(3) 为了防止再热裂纹,应考虑采用小热输入、预热和合适的焊后热处理等工艺措施。

参 考 文 献

- 1 张文钺.焊接冶金学(基本原理).北京:机械工业出版社,1996.
- 2 陈伯鑫.焊接冶金学原理.北京:清华大学出版社,1991.

(收稿日期 2005 04 11)

作者简介: 葛兆祥,1951 年出生,高级工程师,主要研究方向为电站设备部件焊接修复。

内爆炸法制备铝/不锈钢细长双金属复合管的研究

西北有色金属研究院(西安市 710016) 王宝云 马东康 李争显 杜继红

摘要 通过调整爆炸物的爆速、松装密度等参数,采用内爆炸法对铝/不锈钢细长双金属复合管($L/D \approx 60$)的爆炸焊接进行初步的研究。结果表明:细长管的内爆炸焊接受管道效应的影响明显,从爆轰起始端到结束端,复合管的界面附近金属的塑性畸变有加重的趋势。结合界面金相等分析手段,发现使用低能量的炸药制备出的复合管在爆轰结束端存在 Al-Fe 化合物相。

关键词: 内爆法 爆炸焊接 复合管 铝/不锈钢

RESEARCH OF PRODUCING Al/STAINLESS STEEL THIN WALLED CLAD TUBE BY INTERIOR EXPLOSION WELDING

Northwest Institute for Nonferrous Metal Research

Wang Baoyun, Ma Dongkang,
Li Zhengxian, Du Jihong

Abstract By adjusting explosion speed and density, interior explosion welding of the Al/stainless steel thin walled clad tube was researched ($L/D \approx 60$). The result indicates that there is effect of the pipeline on the interior explosion welding of long and thin clad tube. From the beginning of explosion to the end, the plastic deformation is aggravated on the interface of clad tube. According to the metallographic analysis, there is Al-Fe compound formed on the end of explosion when using low-energy explosives.

Key words: interior explosion, explosion welding, clad tube, Al/stainless steel

0 前 言

爆炸焊接是利用炸药爆炸产生的可控巨大能量和冲击波,使不同金属在一定碰撞角度下高速碰撞,在碰撞点产生高温、高压,碰撞点附近金属产生强烈塑性变

形,而实现不同金属材料组合的高质量冶金结合的技术^[1,2]。采用内爆炸的方法可在金属管的内表面焊上另一种金属材料的管材,且焊接界面处强度大于基体材料的强度,这是其他方法不能比拟的。316L 奥氏体不锈钢作为结构材料,具有塑性好,强度高的优点。铝

具有比重小,塑性高,抗氧化和耐腐蚀性好等特点,将薄壁铝管爆炸复合于不锈钢管内壁,制备双金属复合管,可以满足某些特殊用途。采用内爆炸法,得到长度1 000 mm以上的薄壁铝/不锈钢复合管,这样的工作国内未见相关报道。本文结合界面组织形态和微区成分进行分析,确定了铝/不锈钢薄壁复合管的爆炸复合工艺参数。

表1 材料的规格与力学性能

材料	牌号	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta(\%)$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	直径 D/mm	壁厚 T/mm	平直度/ $(\text{mm}\cdot\text{m}^{-1})$
纯铝	L2	2.8	75	39	2.705	11	1	≤ 1
不锈钢	00Cr17Ni14Mo2	289.6	558.2	50	7.8	15	1	≤ 1

去除复合面上各种表面缺陷,得到洁净的待复合表面。

1.2 爆炸焊接工艺、装置

内爆炸法焊接工艺过程为铝管内孔装填炸药,再装入不锈钢管内,不锈钢管外紧套模具,限制其径向变形,爆炸焊接装置见图1。试验时,按图依次在模具中放入下定位环、不锈钢管、铝管和上定位环,并在铝复管内部装填炸药,起爆雷管装入铝复管顶端,各部分安装正确后可进行起爆。

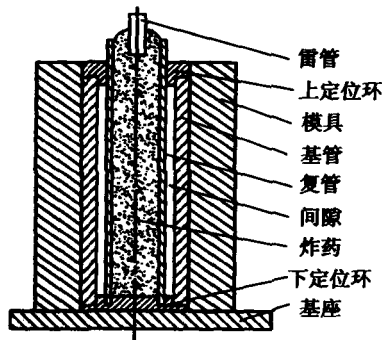


图1 爆炸焊接装置

进行内爆炸焊接时,铝管内的炸药被雷管引爆产生高温高压气体,使铝管高速变形膨胀,直径增大。当铝管外径扩大到与不锈钢管内径相同时,与不锈钢管内壁进行碰撞,见图2。受爆轰冲击,在内管、外管碰撞前,只有内管发生塑性变形,碰撞发生后,内、外管会整体发生变形。在碰撞产生的高温高压作用下,两种材料的管材焊合在一起。圆管内爆炸焊接的条件,可通过调整炸药类型、爆速和装填密度等静态参数进行调整。

1.3 炸药类型及试样处理

选用的炸药是以性质稳定的TNT炸药为基,添加

1 实验材料及方法

1.1 材料基本参数

实验采用的基管为316L奥氏体不锈钢,复管为牌号L2的纯铝管,基管、复管的基本参数见表1。所用铝复管经完全去应力热处理,316L基管经固溶稳定化处理。基管、复管均经机械抛光、化学侵蚀处理,用于

高能爆炸物和分散稀释剂来调整炸药的密度、爆速。使用BSW-3型智能五段爆速仪对炸药爆速进行测试。

制备样品方法如下:复合管在起爆端、300 mm、700 mm和末端处取样,样品沿爆轰方向用电火花线切割机纵向切开,对复合界面机械抛光至镜面。样品分别在JSM-6460扫描电镜及INCAx-sight 7574能谱仪上进行结合区界面微区成分、组织状态分析。

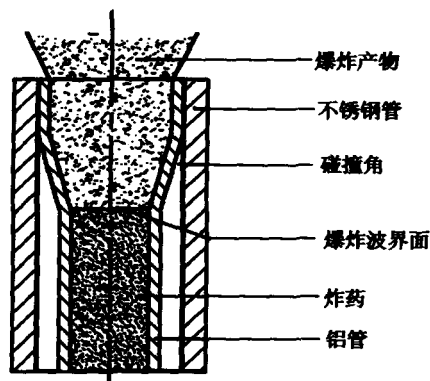


图2 内爆炸法示意图

2 实验结果及分析

2.1 炸药参数的确定

加入不同高能爆炸物的TNT炸药为三种炸药,其爆速分别为2 500 m/s、2 720 m/s和3 000 m/s,炸药再分别加入分散稀释剂调整炸药松装密度,成为三系列炸药。其爆速与分散剂含量的关系见图3。在三系列炸药中选取松装密度为0.5~0.6 g/cm³的部分来进行爆炸焊接试验。其爆速分别为:A系列2 000~2 100 m/s,B系列2 200~2 350 m/s,C系列2 300~2 500 m/s。

由于 TNT 基炸药的爆压 P 、爆速 v_d 与装药密度 ρ 有很大关系^[2], 见式(1)

$$P = \frac{\rho \cdot v_d^2}{K_r + 1} \quad (1)$$

式中: K_r 为爆炸产物绝热指数。

炸药装填密度不同, 将会对炸药爆速和爆轰压力造成较大的影响。所以, 试验中所使用的爆炸物均经过标准筛筛分, 平均粒度为 $300 \mu\text{m}$ 。爆炸焊接试验时, 炸药装填均按炸药自然松装密度进行, 减少因装药密度不同而对试验结果带来影响。

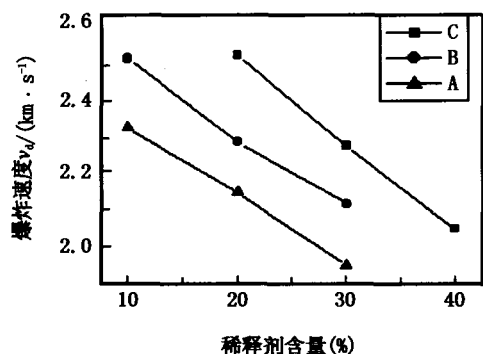


图3 三个系列炸药的爆速

2.2 复合管界面分析

在试验中, 当模具壁厚大于 100 mm 时, 可有效约束复合管的径向变形, 复合管扩径量小于 0.2 mm 。使用水浸聚焦探头, 调整探伤仪参数使之能探出结合界面 $\phi 1 \text{ mm}$ 以上缺陷, 对使用三个系列炸药制备的样品进行超声探伤。经超声探伤检测和外观尺寸检查, 可得到长度为 1000 mm , 焊合率 100% , 沿轴线方向上径向差小于 0.15 mm 的复合管。

使用 A 系列炸药得到的复合管不同位置结合区界面形貌见图 4。图 4a 显示的爆轰起始端的是平直型界面形貌, 说明起始端爆轰能量低, 结合界面附近的金属没有发生明显的塑性畸变。图 4b, 图 4c 显示的是复合管中部的结合界面形貌, 界面形态属于平直型界面到波型界面的过渡状态, 可看到不锈钢微粒随漩涡卷入铝层内的现象。界面形貌差别不大, 可得出距离复合管端部 300 mm 左右的部分爆轰已进入稳定段。图 4d 显示的是爆轰结束端的结合界面形貌, 结合界面带有波形特征, 波形明显, 波幅大。显示出在爆轰结束端结合区界面的塑性畸变有加强的趋势, 同时存在 Fe-Al 反应相区, 通过能谱分析, 反应相区 Al、Fe 元素质量分数分别为: (Al) 69.96% , (Fe) 14.01% , 较接近 Al_3Fe 的原子比。其分布与界面形态有关, 在波峰和波脊处含

量极少, 波谷凹陷处存在间断不连续的反应相区。

爆炸焊接结合界面形态主要取决于炸药爆炸时的瞬时动态参数, 界面波形参数也与工艺中施药量、复材加速距离、材料的尺寸、力学性能等有关, 相对于工艺实施时炸药质量比大, 爆炸能量高, 易形成明显波形界面的大尺寸厚板铝/钢爆炸焊接和高强度材料钛/钢板、棒材料的爆炸焊接工艺^[3-6]而言, 本试验所形成线状和

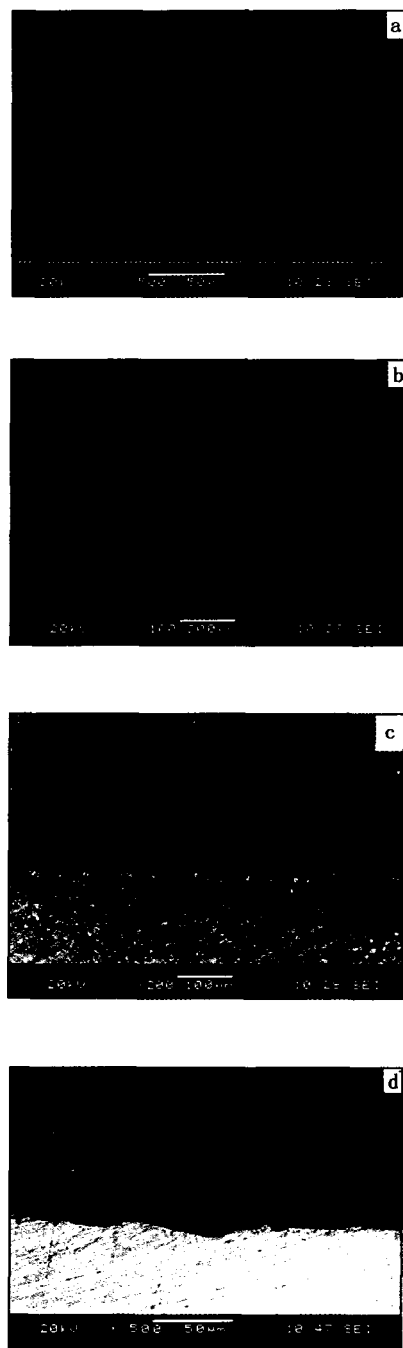


图4 A 系列炸药复合管不同位置

线-波状过渡型的结合界面,主要是由于不锈钢、铝管材料壁薄,尺寸小,炸药爆速低,复管碰撞能量小,爆轰时仅破坏了碰撞点附近的金属氧化膜而实现的冶金结合。在爆轰结束端,界面出现的 Al-Fe 反应相区说明爆炸结束端的爆轰能量远高于起爆端,结合界面附近的金属受冲击绝热带和金属强烈畸变作用,在微秒级时间内碰撞点温度可以高达数百度到上千度^[7,8]。对于易形成 Al-Fe 反应相的铝-不锈钢材料,虽然热影响区很小,影响时间很短,也会对结合区界面产生作用,形成间断分布的 Al-Fe 反应相区。由复合管不同部位结合界面不同特征也说明,铝/不锈钢薄壁复合管的内爆炸复合工艺范围狭窄。Al-Fe 化合物多属于脆性相,含量过多会弱化界面强度,需要严格控制爆炸静态参数,尽量减少 Al-Fe 化合物脆性相生成量。

采用 A 系列炸药得到的复合管,由于金属碰撞能量小,所以形成线状和线-波状过渡型的结合面,说明此时爆炸参数属于爆炸窗口下限。但由于 Al、Fe 元素亲和力大,极易形成金属间化合物,图 4d 界面出现的 Al-Fe 中间相说明此复合管的爆炸复合工艺范围狭窄。需要严格地控制爆炸静态参数,尽量减少 Al-Fe 化合物脆性相生成量。

采用 B、C 系列的炸药制备的复合管距离起爆端 300 mm 处结合区界面形貌见图 5,由图可看出在结合

区界面存在着大量的不连续分布或连续分布的厚度约 7~8 μm 的 Al-Fe 反应相层,说明 B、C 系列的炸药爆速高,爆炸时爆轰能量大,造成碰撞点附近金属受强烈畸变和温度升高作用,形成大量的脆性 Al-Fe 反应相区。由于 Al-Fe 反应相多属于脆性相,含量多会弱化界面强度,所以 B、C 系列的炸药爆轰能量高,不适合铝/不锈钢复合管的内爆炸焊接工艺。

3 结 论

(1) 采用内爆炸法,通过控制爆炸物爆速、装填密度等参数可以制备出长度 1 000 mm 以上的细长薄壁 ($L/D \approx 60$) 铝/不锈钢复合管。

(2) 细长管的内爆炸焊接受管道效应的影响明显,从爆轰起始端到结束端,复合管的界面附近金属的塑性畸变有加强的趋势。

(3) 焊接良好的铝/不锈钢复合管结合界面形态是由平直界面过渡到非稳态波形界面,复合管在爆轰结束端存在 Al-Fe 化合物相,界面附近元素扩散主要是 Fe、Cr、Ni 元素向铝层进行扩散,Al 元素向不锈钢层内扩散量极少,存在不锈钢微粒进入铝层的现象。

参 考 文 献

- 1 熊自立,张新华,刘 永.金属爆炸焊接的原理和金属应用.中南工学院学报,1999,13(6):59~63
- 2 郑远谋.爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用.长沙:中南大学出版社,2002.
- 3 李 炎,肖宏斌,赵 萍.爆炸焊接 L2/16MnR 界面反应区显微结构.洛阳工学院学报,1997,18:12~17
- 4 李选明,李平仓,裴大荣.爆炸焊接工艺参数与波形参数的关系.焊接,2000(3):18~20
- 5 马东康,周金波.钛/钢爆炸焊接界面区形变特征研究.稀有金属材料与工程,1999,28(1):26~29
- 6 裴大荣,郭悦霞,马东康,等.钛-不锈钢复合棒结合强度评价.稀有金属材料与工程,1997,26(5):51~53
- 7 史长根,王耀华,蔡立良,等.爆炸焊接界面的结合机理.焊接学报,2002,23(2):55~58
- 8 闫鸿浩,李晓杰,贾宏志,等.爆炸焊界面附近熔化层厚度估算.高压物理学报,2003,17(2):135~140

(收稿日期 2005 08 05)

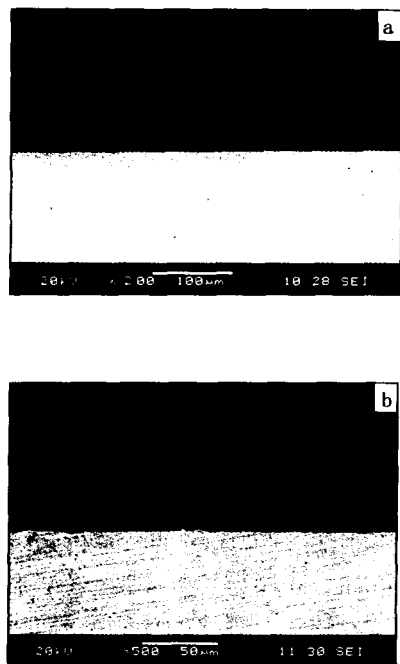


图 5 B、C 系列炸药复合管中部的结合区形貌

作者简介: 王宝云,1974 年出生,助理工程师,主要研究方向为稀有金属表面处理及爆炸焊接。