

爆炸焊接316L不锈钢/Al复合管的界面及性能研究

郭训忠 陶杰 孙显俊 张立伍

(南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京, 210016)

摘要:采用爆炸焊接工艺对316L不锈钢管及铝管进行了爆炸复合。利用SEM, XRD对复合管结合区形貌及相组成进行了研究;测试了复合管的结合强度及过渡区的显微硬度,并进行了径向压扁及弯曲成形试验。结果表明:直线状及波状界面同时存在;过渡区域出现了明显的元素扩散现象并形成了金属间化合物;结合强度为75 MPa,过渡区的显微硬度最高;压扁及推弯试验后的复合管未出现分层,制备出的复合管结合性能优异,可以承受大的塑性变形。

关键词:爆炸焊接;316L不锈钢/Al复合管;界面;结合性能

中图分类号: TG456.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2010)05-0641-04

Investigation on Interface and Performance of Explosive Welded SS316L/Al Clad Tube

Guo Xunzhong, Tao Jie, Sun Xianjun, Zhang Liwu

(College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics
& Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Aluminum and 316L steel tubes are clad by explosive welding. The morphology and phases at the bonding interface are studied by SEM, EDS and XRD, respectively. Then, this paper investigates the bonding strength and the microhardness distribution of the transition region. The flattening test and the push-bending experiment are carried out. Results indicate that linear and wavy bonding interfaces coexist. Meanwhile, the element diffusion and the generation of intermetallic compound occur in the interfacial zone. In addition, the bonding strength is 75 MPa, and the microhardness on the bonding interface is maximum. No separation after flattening and push-bending tests shows that the clad tube has the excellent bonding properties and can endure the plastic deformation.

Key words: explosive welding; SS316L/Al clad tube; interface; bonding properties

将铝或铝合金与钢复合制备铝-钢层状复合板材或复合管材,可以充分利用组分金属的各自特性,以使之广泛应用于石化、核电、海洋平台及航空航天等领域。在钢表面形成铝层的方法有粉末包埋渗铝和热浸镀渗铝等。形成的铝层均可显著提高钢材的抗氧化及抗腐蚀性能^[1-2]。若对铝层进行进一步氧化,还可以制备具有优异的耐磨损及耐腐蚀性

能的多层复合材料。

爆炸焊接是一种制备铝/钢层状复合材料的极为有效的手段,可以将性能差异极大的不同材料瞬间复合,可以充分发挥组分材料的各自优点,有效拓展单一金属材料的应用空间,在实际工程应用中具有极其重要的价值^[3-4]。对于铝/钢复合板的爆炸复合,有学者已经开展了一些研究工作。王建民

基金项目:江苏省重大成果转化专项基金(BA2006067)资助项目;江苏省博士生创新基金(CX09B-077Z)资助项目。

收稿日期: 2009-11-11; **修订日期:** 2009-12-09

作者简介:郭训忠,男,博士研究生,1981年3月生;陶杰(联系人),男,教授,博士生导师, E-mail: taojie@nuaa.edu.cn。

等^[5]对于铝/钢复合板的界面的研究认为,铝、钢因密度及熔点相差较大,界面不易产生波状结合,界面处的组织存在着严重的塑性变形;李建智等^[6]研究了铝/钢复合板界面的成分扩散,并通过剪切试验认为,铝、钢结合良好,试样在铝母材上断裂;HAN等采用AA1050铝合金作为夹层,对AA5083铝合金和SS41钢进行爆炸复合,研究发现界面存在金属间化合物 FeAl_3 ^[7]。目前,对于铝/钢复合管的爆炸焊接研究非常少。王宝云等^[8-9]对铝/不锈钢复合管的界面进行了分析,研究认为,结合区界面形状主要是平直界面和平直至波形过渡的非稳态波形界面组成,结合区界面附近主要是Fe元素向铝层进行扩散,Al元素向不锈钢层内扩散量极少。

表1 316L 不锈钢基管的化学成分(质量百分数) %

Mo	Cr	Ni	Si	C	Mn	N	P	S	Fe
2.215	16.936	10.128	0.229	0.027	1.176	0.046	0.032	0.001	余量

表2 基管与覆管的性能

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	热膨胀系数/ K^{-1}	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
316L	8 000	200	0.28	1.73×10^{-5}	20	535
Al	2 710	68.9	0.33	2.36×10^{-5}	221.5	921

1.2 爆炸焊接试验

根据复合管的爆炸焊接原理^[4],将纯铝覆管装入316L 不锈钢基管内,并与基管保持合理间隙,将炸药以松装方式置入覆管。然后将双层管放入内模中。使用电雷管引爆炸药,在爆轰波的作用下,沿着爆轰方向,覆管与基管依次产生撞击,并在两种材料表面产生塑性变形,另外,由于动能转化成热能,塑性变形后还会产生薄层金属熔化。由于界面上的高温、高压、金属塑性变形及熔化等条件的综合作用,导致了基管与覆管之间的原子相互扩散,从而在界面上形成包括金属塑性变形特征、熔化特征和原子间相互扩散特征的结合区^[7]。

2 试验结果及分析

2.1 界面的形貌及物相分析

图1(a)所示的是复合管的结合界面形貌。从图中可以看出,爆炸焊接完成后的316L/Al 复合管结合界面主要近似于平直状。在不锈钢基体与铝基体之间明显存在过渡区域,但过渡区域的宽度呈不均匀分布。另外,复合管中部的过渡区域沿爆轰方向并非连续分布,且爆炸焊接316L/Al 复合管的结合界面的极少部位出现了大波状结合,并出现了不锈

钢基体颗粒被铝基体或过渡区卷入的情况,但未发现铝颗粒进入不锈钢基体现象。在波谷G处的过渡区域宽度较大,约20 μm ;在波峰E、F处的过渡区域相对狭窄,如图1(b)所示。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

基管为 $\Phi 18 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ 的316L 无缝不锈钢管,覆管为 $\Phi 13 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ 的纯铝管。基管的化学成分见表1,基管与覆管性能见表2。试验所用炸药为乳化炸药。

钢基体颗粒被铝基体或过渡区卷入的情况,但未发现铝颗粒进入不锈钢基体现象。在波谷G处的过渡区域宽度较大,约20 μm ;在波峰E、F处的过渡区域相对狭窄,如图1(b)所示。

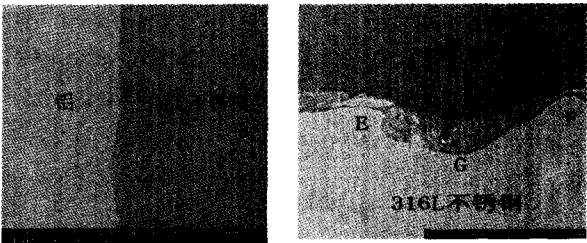


图1 316L/Al 爆炸焊接复合管的界面SEM 照片

为进一步表征316L/Al 爆炸焊接复合管的界面结合情况,选择复合管的中部位置A-A处(此处过渡区域较宽)利用SEM对过渡区域进行了线扫描,结果如图2所示。可以看到,铁元素的含量在过渡区域左侧非常高,在过渡区右侧基铝基体中急剧下降。而过渡区域的铁元素含量从左往右不断降低,呈梯度分布。铝元素的线扫描结果显示分布的趋势和铁元素刚好相反。扫描结果说明,基管与覆管之间发生了化学成分的互扩散。元素在结合面处呈梯

度分布,因而形成了冶金结合。另外,这一扩散行为也说明在界面附近的熔合层可能生成了铁铝金属间化合物。鉴于文献[8]中对于铝/钢爆炸焊接复合管的相分析只是根据能谱分析的大概的原子比来推断具体物相 FeAl_3 ,而铁铝元素形成的金属间化合物种类较多,极有可能出现多相混合。所以,为深入研究 316L/Al 爆炸焊接复合管焊接界面附近元素的扩散行为,并确定界面附近熔合层的具体脆性相,对 316L/Al 爆炸焊接复合管焊接界面进行 XRD 物相分析。图3所示的是 316L/Al 爆炸焊接复合管界面XRD 图谱。从图中可以看出,在爆炸焊接过程中,高温、高压的作用使界面生成了 FeAl , FeAl_3 金属间化合物,这与文献[4] 在铝/钢爆炸焊接复合板中根据铁-铝相图和过渡区成分所作出的结论是吻合的。

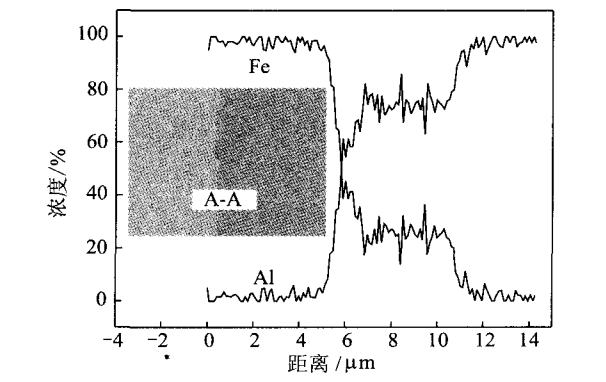


图2 316L/Al 爆炸焊接复合管的界面线扫描

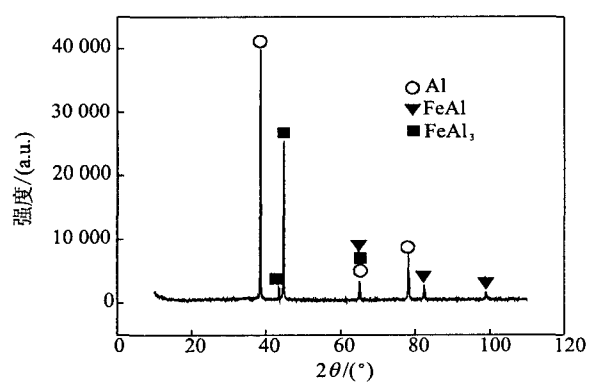


图3 316L/Al 爆炸焊接复合管界面 XRD 图谱

2.2 复合管界面结合强度及显微硬度

采用CMT5707 型SANS 电子万能试验机及剪切强度测试装置测试316L/Al 复合管,其界面结合强度约为75 MPa。图4所示的是316L/Al 爆炸焊接复合管界面的显微硬度分布图。从图中可以看出,爆炸后的 316L 不锈钢组分和纯铝组分相对于原始

的管材,硬度均有增加。对于316L 不锈钢来说,管内侧与铝管发生强烈碰撞,塑性变形程度剧烈,其塑性变形速率可达 $10^6\sim10^8\text{ s}^{-1}$ [10],材料产生的高密度位错将导致硬度的提高[11]。另外如前所述,界面处生成了金属间化合物,所以显微硬度值最大。随着远离复合界面的距离增大,硬度相对于界面处有所降低,同时在 316 L 不锈钢壁厚约中部位置降至最低。因在爆炸焊接过程中,316 L 不锈钢管与内模壁留有一定的间隙,造成爆炸过程中 316 L 不锈钢管与内模因约束作用而产生相撞现象,所以在 316L 不锈钢管在接近内模壁的位置显微硬度增大;对于纯铝组分来说,爆炸过程中同样存在加工硬化的现象。但近似绝热的环境所形成的高温会使低熔点金属的硬化现象得以部分消除。虽然,高温环境也会对 316L 不锈钢产生部分消除加工硬化现象,但由于铝、不锈钢两种组分的熔点相差较大,故消除硬化程度存在一定差异。铝组分虽然相对于原始铝管硬度整体有所上升,但是其硬度分布相对均匀。

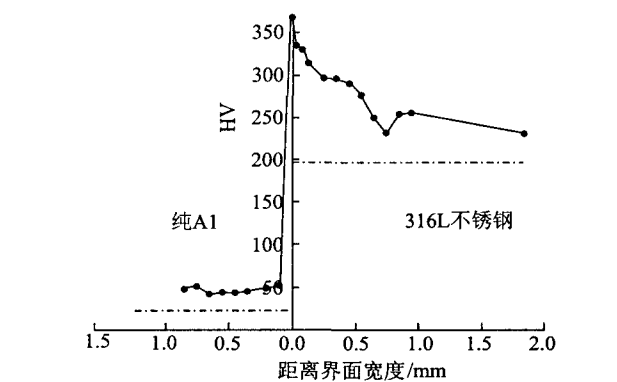


图4 316L/Al 爆炸焊接复合管界面显微硬度分布

2.3 复合管压扁及弯曲成形试验

在CMT5707 型SANS 电子万能试验机上采用压扁试验[7]评价 316L/Al 复合管承受大变形的能力。压扁试验的复合管试样,其轴向长度等于1 倍复合管之外径。当径向压下量为11.2 mm 即压扁率(压下量与复合管初始外径的比值)为57.4%时,压缩后的复合管截面呈近椭圆状,对压缩后的截面使用扫描电镜观察,端部未出现任何裂纹,整个截面双层金属结合良好,如图5 所示。

采用推弯方法对 316L/Al 爆炸焊接复合管进行弯曲试验,用以评价复合管承受弯曲变形的能力。将管坯表面涂抹二甲苯作为润滑剂,放入冷顶推模具(图6(a))中进行弯曲试验,凸模压入速度约

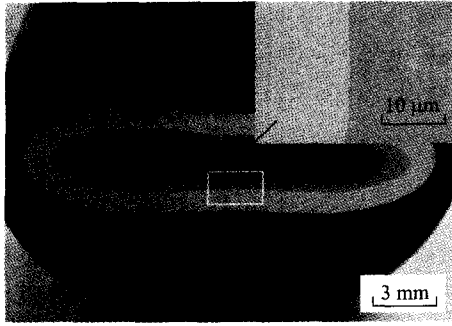


图5 复合管压扁后截面显微扫描电镜照片

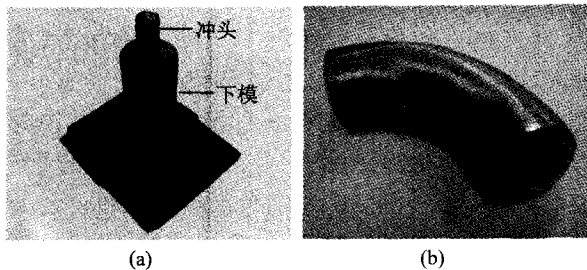


图6 316 L/Al 爆炸焊接复合管弯曲成形试验

为2 mm/s,当将凸模全部压入凹模后,换用直径大于复合管铝管外径的多个钢球相继压入,从而将弯管推出模具,成形后的弯头如图6(b)所示,弯曲后的管件在头尾部均未出现分层开裂现象,说明复合管层间结合良好,能承受较大的弯曲变形。

3 结 论

(1) 316L/Al 复合管界面主要近似于平直状,但过渡区域的宽度不均匀,呈非连续分布。极少部分结合界面呈大波状结合,并存在不锈钢基体颗粒被铝基体或过渡区卷入现象。波谷处过渡区域宽度较大,波峰处的过渡区域狭窄。

(2) 复合管界面上发生了化学成分的互扩散。元素在结合面处呈梯度分布,因而形成了冶金结合。爆炸焊接过程在高温、高压的作用下使界面生成了 FeAl , FeAl_3 金属间化合物。

(3) 316 L 不锈钢随着与界面距离的增大而硬度降低,在中部位置降至最低,但在接近内模壁的位置显微硬度较大,铝管硬度分布相对均匀。

(4) 复合管的结合强度约为75 MPa,压扁率

为57.4%时,截面椭圆长轴的端部未出现任何裂纹;复合管弯曲后未出现分层,复合管可以承受较大的塑性变形。较好的结合强度为后续的二次压力加工制备成更加复杂的管件提供了可能。

致谢 本文感谢解放军理工大学工程兵工程学院军用精确爆炸加工中心在爆炸焊接制备双金属复合管试验中的合作及提供的帮助;感谢江苏省华阳金属管件有限公司在弯曲成形试验过程中提供的帮助和支持。

参考文献:

- [1] Mahieu J, Maki J. Development of aluminized multi-phase steel with dual phase properties for high temperature corrosion resistance applications[J]. Steel Res Int, 2003, 74(4): 225-236.
- [2] Soliman H M, Mohamed K E, Abd El-Azim M E, et al. Oxidation resistance of the aluminide coating formed on carbon steels[J]. J Mater Sci Technol, 1997, 13: 383-388.
- [3] Crossland B. Explosive welding of metals and its applications [M]. New York: Oxford University Press, 1982.
- [4] 郑远谋. 爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用 [M]. 长沙:中南大学出版社, 2002.
- [5] 王建民,朱锡,刘润泉. 铝/钢爆炸复合界面的显微分析[J]. 材料工程, 2006(11): 36-39, 44.
- [6] 李建智,张新华. 铝-钢爆炸焊接试验与分析[J]. 工程爆破, 2006, 12(4): 16-18.
- [7] Han J H, Ahn J P, Shin M C. Effect of interlayer thickness on shear deformation behavior of A5083 aluminum alloy/SS41 steel plates manufactured by explosive welding [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(1): 13-18.
- [8] 王宝云,马东康,李争显. 爆炸焊接铝/不锈钢薄壁复合管界面的微观分析[J]. 稀有金属快报, 2006, 25(2): 26-30.
- [9] 王宝云,马东康,李争显. 内爆炸法制备铝/不锈钢细长双金属复合管的研究[J]. 焊接, 2005(9): 54-57.
- [10] Meyers M A. 材料的动力学行为 [M]. 张庆明,刘彦,黄风雷,等,译. 北京:国防工业出版社, 2006.
- [11] 王建民,朱锡,刘润泉. 铝合金-纯铝-钢复合板爆炸焊接试验及性能研究[J]. 海军工程大学学报, 2008, 20(2): 105-108.