

文章编号: 1003-1480 (2021) 01-0019-04

爆炸焊接法制备不锈钢-铝的拉伸性能研究

刘鲜鲜, 王凤英, 刘迎彬, 胡晓艳, 王佩

(中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原, 030051)

摘要: 为探究不同炸药厚度、靶材间距及基座类型对爆炸焊接复合板抗拉性能的影响, 通过平行爆炸焊接法制备了不锈钢/铝/不锈钢/铝/不锈钢 5 层复合板, 使用万能试验机测试了复合板准静态拉伸性能。研究表明: 通过爆炸焊接法使材料屈服强度提高了 1.34 倍; 20mm 装药厚度已达到爆炸焊接能量上限, 继续提升装药厚度不影响复合板抗拉性能; 使用砂土作为基座不影响复合板的抗拉性能; 提升靶材间距使复合板屈服强度和抗拉强度分别提高了 24.3% 和 11.3%。研究表明爆炸焊接法是一种良好的提升材料抗拉性能的手段。

关键词: 爆炸焊接; 不锈钢; 铝; 拉伸强度

中图分类号: TJ45⁺9 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.01.006

Study on Tensile Properties of Stainless Steel-Aluminum Prepared by Explosive Welding

LIU Xian-xian, WANG Feng-ying, LIU Ying-bin, HU Xiao-yan, WANG Pei

(Department of Environmental and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051)

Abstract: In order to explore the influence of different charge heights, target spacing and pad types on the tensile properties of explosive welded composite plates, a five-layer composite plate made of stainless steel/aluminum/stainless steel/aluminum/stainless steel was prepared by parallel explosive welding method, and the quasi-static tensile properties of the composite plate were tested by universal testing machine. The results show that the yield strength of the material is increased by 1.34 times by explosive welding. The charge height of 20 mm has reached the upper limit of explosive welding energy, and the tensile property of composite plate will not be affected by increasing the charge height. The use of sand as backing plate does not affect the tensile properties of composite plates. The yield strength and tensile strength of the composite plate are increased by 24.3% and 11.3% respectively by increasing the target spacing. Explosive welding is a good method to improve the tensile properties of materials.

Key words: Explosive welding; Stainless Steel; Aluminum; Tensile strength

爆炸焊接是一种固态焊接技术, 在高压下通过采用一种可控的炸药引爆使两种金属相互结合, 其特点为可以直接连接各种相似和不同的材料^[1-4]。不锈钢-铝复合材料具有优异的抗氧化、抗腐蚀能力和机械性能, 在船舶设计建造、核能设计等领域已得到大规模应用且效果良好^[5-6]。国内外开展了大量不锈钢-铝复合材料爆炸焊接技术研究, Zhang 等^[7]通过采用爆炸

焊接得到铜-钢复合材料, 并观察组织和力学性能, 发现界面呈现出周期性的波浪形图案, 并且热处理后可见过渡层; Elango E 等^[8]研究了载荷比对铝-钢爆炸焊接界面的性质、压力和温度的影响, 结果表明爆炸冲击点的压力、动能会随着载荷比的增大而增大。

尽管目前国内外已有相当多的文献对不锈钢-铝爆炸复合板的性能进行了研究, 但对不锈钢-铝爆炸

收稿日期: 2020-09-05

作者简介: 刘鲜鲜 (1995 -), 女, 硕士研究生, 从事爆炸焊接的力学性能研究。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11802274)。

焊接技术的研究还是不够系统和完善。本研究针对不同炸药厚度、靶材间距及基座类型,研究在相同接触面积下爆炸焊接法制备的不锈钢-铝复合材料的拉伸性能,为爆炸焊接技术提供支持。

1 准静态拉伸试验

1.1 不锈钢-铝复合板制备

采用平行爆炸焊接法制备不锈钢/铝/不锈钢/铝/不锈钢5层复合板,其中纯铝板(1060)和不锈钢(304)厚度均为1mm,爆炸焊接装置如图1所示。分别采用45#钢或砂土作为基座,厚度均为25mm。在药框中铺放2#岩石硝铵炸药,通过不同的炸药厚度控制面装药密度,同时为防止炸药烧蚀待焊接靶材,在最上层靶材表面涂抹一定质量的黄油。采用8#导爆管雷管引爆导爆索从而引爆炸药进行焊接,焊接所得5层复合板炸药厚度、靶材间距及基座类型如表1所示,其中靶材间距1/1.5/1.5表示从上至下靶材间距依次为1.5mm、1.5mm、1.0mm、1.0mm。



注: 1为地面; 2为铝板; 3为间距柱; 4为不锈钢板; 5为雷管; 6为炸药; 7为药框; 8为基座。

图1 爆炸焊接装置

Fig.1 Explosive welding device

表1 不锈钢/铝/不锈钢/铝/不锈钢5层复合板参数
Tab.1 Parameters of stainless steel/aluminum/stainless steel/aluminum/stainless steel 5-layer composite plates

复合板编号	炸药厚度/mm	靶材间距/mm	基座类型
1#	20	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板
2#	24	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板
3#	28	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板
4#	24	1.0/1.0/1.0/1.5	钢板
5#	24	1.0/1.0/1.5/1.5	钢板
6#	24	1.0/1.0/1.0/1.0	砂土

1.2 准静态拉伸试验方法

沿爆轰方向对所得到的不锈钢/铝/不锈钢/铝/不锈钢5层复合板进行线切割,制备复合板拉伸试样,试样尺寸如图2所示。在室温下使用万能试验机对试样进行拉伸强度性能试验,加载速率2mm/min,并通过公式(1)~(2)计算试样的抗拉强度及应变。

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1)$$

式(1)中: σ 为抗拉强度, Pa; F 为加载载荷,

N ; S 为试样受力面积, m^2 。

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

式(2)中: ε 为应变; L_0 为试样初始长度, m; L 为试样拉伸长度, m。

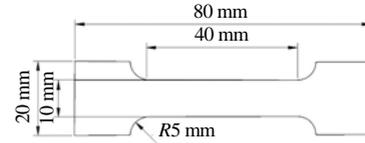


图2 拉伸试样尺寸

Fig.2 Dimension of tensile sample

2 结果与讨论

2.1 复合板的屈服强度

金属的屈服强度标志着金属对塑性变形的抗力,是工程技术上最为重要的力学性能指标之一。表2为爆炸焊接前后复合板的屈服强度 $S_{p0.2}$ 。

表2 不锈钢/铝/不锈钢/铝/不锈钢5层复合板爆炸焊接前后屈服强度

Tab.2 Yield strength of stainless steel/aluminum/stainless steel/aluminum/stainless steel 5-layer composite plates before and after explosion welding

试样	装药厚度/mm	靶材间距/mm	基座类型	屈服强度 $S_{p0.2}$ /MPa
1060 纯铝	-	-	-	39.0
304 不锈钢	-	-	-	226.0
1#	20	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板	507.8
2#	24	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板	426.1
3#	28	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板	509.2
4#	24	1.0/1.0/1.0/1.5	钢板	479.4
5#	24	1.0/1.0/1.5/1.5	钢板	529.6
6#	24	1.0/1.0/1.0/1.0	砂土	431.5

从表2可以看出,随着炸药厚度从20mm增加到28mm,复合板的屈服强度呈现先降低后升高的趋势,装药厚度为24mm(2#)时复合板屈服强度达到最小为426.1MPa,装药厚度为20mm(1#)和28mm(3#)时屈服强度相当,可见提升炸药厚度没有明显增加复合板屈服强度。对比2#和6#试件,发现使用钢板或砂土作为基座对复合板屈服强度几乎没有影响。对比2#、4#和5#试验数据,发现提高靶材间距可有效提高复合板的屈服强度,最上层靶材间距由1.0mm(2#)调整为1.5mm(4#)时,相同装药厚度下焊接所得复合板屈服强度提升了12.5%,同时,当第2层与第3层靶材间距也调整为1.5mm(5#)时,所得复合板屈服强度较4#板又提升了10.5%,较2#板提高了24.3%,可见靶材间距对复合板屈服强度影响较大。

提升靶材间距,在爆炸载荷作用下,复板可以获得更高的速度。靶材间距为 1.0mm 时由于距离太近导致复板在速度还未充分提升时就撞击到基座,导致焊接效果较差;靶材间距调整为 1.5mm 后,复板得以提升到更高的速度,增加了爆炸焊接界面的碰撞能量,因此所得复合板具有更好的抗拉性能。此外,无论在何种条件下焊接,得到复合板的屈服强度都比初始靶材(1060 铝和 304 不锈钢)的屈服强度高。

2.2 复合板的抗拉强度

爆炸焊接复合板的抗拉强度如表 3 所示。

表 3 不锈钢/铝/不锈钢/铝/不锈钢 5 层复合板爆炸焊接前后抗拉强度

Tab.3 Tensile strength of stainless steel/aluminum/stainless steel/aluminum/stainless steel 5-layer composite plates before and after explosion welding

试样	装药厚度/mm	靶材间距/mm	基座类型	抗拉强度 S_p /MPa
1060 纯铝	-	-	-	82.0
304 不锈钢	-	-	-	534.0
1 [#]	20	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板	599.5
2 [#]	24	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板	562.5
3 [#]	28	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板	596.7
4 [#]	24	1.0/1.0/1.0/1.5	钢板	626.1
5 [#]	24	1.0/1.0/1.5/1.5	钢板	562.9
6 [#]	24	1.0/1.0/1.0/1.0	砂土	558.6

由表 3 可见,靶材间距和基座材料不变时,随着装药厚度的增加,抗拉强度与屈服强度呈现相同的变化趋势,即在 20 mm (1[#]) 和 28 mm (3[#]) 装药厚度时抗拉强度相当,分别为 599.5MPa 和 596.7MPa, 24 mm (2[#]) 装药厚度时的抗拉强度为 562.5MPa,可见提升装药厚度没有明显增加复合板抗拉强度。对比 2[#]和 6[#]试件,发现基座为钢板或砂土对复合板抗拉强度几乎没有影响。分析 2[#]、4[#]和 5[#]试验数据可知靶材间距对爆炸焊接影响较大,最上层与次上层靶材间距由 1 mm (2[#]) 调整为 1.5mm (4[#]) 时,复合板抗拉强度由 562.5 MPa 提升到 626.1MPa,提高了 11.3%。同时当第 2 层与第 3 层靶材间距也调整为 1.5mm (5[#]),复合板抗拉强度与 2[#]板相当,仅为 562.9MPa,因此第 2 层与第 3 层靶材间距对爆炸焊接复合板抗拉强度几乎没有影响,但最上层板与次上层靶材间距对抗拉强度具有显著影响。这是由于最上层板是爆轰波直接作用区,爆炸载荷作用到最上层板后,当具有足够的加速距离时,靶材间才能有足够的界面能量用于靶材之间发生碰撞。

2.3 复合板的延伸率

延伸率是衡量复合板塑性性质的一项主要指标。

延伸率越大,表示材料破断前产生永久变形和吸收能量的能力越强,延性和塑性越好。对不同条件下爆炸焊接所得复合板根据断裂前后标距 L_0 的变化计算得到试样延伸率,如表 4 所示。

表 4 不锈钢/铝/不锈钢/铝/不锈钢 5 层复合板爆炸焊接前后延伸率

Tab.4 Elongation of stainless steel/aluminum/stainless steel/aluminum/stainless steel 5-layer composite plates before and after explosion welding

试样	装药厚度/mm	靶材间距/mm	基座类型	延伸率 s /%
1060 纯铝	-	-	-	80.0
304 不锈钢	-	-	-	55.2
1 [#]	20	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板	42.8
2 [#]	24	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板	44.8
3 [#]	28	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板	46.2
4 [#]	24	1.0/1.0/1.0/1.5	钢板	50.2
5 [#]	24	1.0/1.0/1.5/1.5	钢板	45.1
6 [#]	24	1.0/1.0/1.0/1.0	砂土	43.7

由表 4 可见,所有条件下焊接所得复合板的延伸率 s 都比原始态的不锈钢、铝小。其中,1[#]、2[#]、3[#]、5[#]、6[#]的延伸率基本相等,说明装药厚度、基座类型和靶材间距对 5 层爆炸焊接复合板的延伸率几乎没有影响。但最上层与次上层靶材间距却对复合板的延伸率有显著影响,当最上层板与次上层板距离由 1mm (2[#]) 调整为 1.5mm (4[#]) 时,复合板延伸率由 44.8% 变为 50.2%,延伸率提升了 12.05%。这是由于在爆炸荷载作用下,复板获得较高的速度,最上层与次上层靶材间距调大后,复板有了较大加速距离,从而使得靶材间有足够能量相互渗透,并生成对延伸率有增强作用的金属物质,以提高复合板的延伸率。

2.4 复合板的断面收缩率

断面收缩率是衡量复合板在该拉伸应力状态下发生永久塑性变形而不致断裂的一项指标。平均值越大,表明塑性越好。表 5 为通过测量复合板断面尺寸计算得到的断面平均收缩率。

表 5 不锈钢/铝/不锈钢/铝/不锈钢 5 层复合板爆炸焊接前后断面收缩率

Tab.5 Cross-sectional shrinkage of stainless steel/aluminum/stainless steel/aluminum/ stainless steel 5-layer composite plates before and after explosion welding

试样	装药厚度/mm	靶材间距/mm	基座类型	断面平均收缩率
1060 纯铝	-	-	-	80.0
304 不锈钢	-	-	-	64.7
1 [#]	20	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板	16.8
2 [#]	24	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板	17.2
3 [#]	28	1.0/1.0/1.0/1.0	钢板	16.7
4 [#]	24	1.0/1.0/1.0/1.5	钢板	18.0
5 [#]	24	1.0/1.0/1.5/1.5	钢板	16.0
6 [#]	24	1.0/1.0/1.0/1.0	砂土	17.2

由表 5 可见,爆炸焊接后复合板的断面收缩率较原始材料都要小,且只有原始材料断面收缩率的 22%

左右。此外,装药厚度、基座类型、靶材间距几乎都对爆炸焊接复合板的断面收缩率没有影响。

金属爆炸焊接复合材料中普遍存在着强化,主要体现在总体强度高于基材原始的强度,但塑性严重降低^[9]。金属爆炸复合材料的爆炸强化的原因是在爆炸载荷下金属材料发生了不同形式和不同程度的塑性变形及组织变化,这种强化的程度与爆炸焊接工艺参数和基材的强化趋势密切相关,一般随着药量的增大而增强,并且不同的材料有着不同的强化趋势。金属爆炸复合材料的强化在一定的范围内应当充分利用,超过这个范围就需要设法减轻和消除。

3 结论

(1) 使用平行爆炸焊接法可制备拉伸性能良好的不锈钢/铝/不锈钢/铝/不锈钢5层复合板,屈服强度较304不锈钢提高了1.34倍,抗拉强度提高了17.2%,分别达到529.6MPa、626.1MPa。

(2) 提升炸药厚度没有明显增加复合板抗拉性能,故炸药厚度20mm已达到能量上限。而提升靶材间距可较大幅度提高复合板屈服强度,但对抗拉强度提升不大。使用砂土或钢板作为基座对复合板抗拉强度影响不大。

(3) 使用爆炸焊接法得到的复合靶材延伸率及断面收缩率均低于未焊接靶材。

参考文献:

[1] Grignon F, Benson D, Vecchio K S, et al.. Explosive welding

of aluminum to aluminum: analysis, computations and experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(10): 1 333-1 351.

[2] Durgutlu A, B Gulenc, F Findik. Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding[J]. Materials and Design, 2005, 26(6): 497-507.

[3] Kwiecien I, Bobrowski P, Janusz-Skuza M, et al.. Micro-structure of the interface zone after explosive welding and further annealing of A1050/Ni201 clads using various joining conditions[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(22): 9 163-9 172.

[4] Zhang T T, Wang W X, Zhou J, et al.. Molecular dynamics simulations and experimental investigations of atomic diffusion behavior at bonding interface in an explosively welded Al/Mg alloy composite plate[J]. Acta Metallurgica Sinica-English Letters, 2017, 30(10): 983-991.

[5] 刘红兵, 陶杰, 张平则, 等. 防氚渗透涂层制备技术的研究进展[J]. 材料导报, 2006 (9): 47-50.

[6] 闫晋辉, 刘金涛, 王显正. 国内船用铝-钢爆炸复合过渡接头应用现状及展望[J]. 材料开发与应用, 2020, 35(02): 75-81.

[7] Zhang Heng, Jiao Ke-in, Zhang Jian-liang, et al.. Micro-structure and mechanical properties investigations of copper-steel composite fabricated by explosive welding[J]. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2018(731): 278-287.

[8] Elango E, Saravanan S, Raghukandan K. 铝钢爆炸焊接的实验与数值研究[J]. 中南大学学报(英文版), 2020, 27(6): 1 742-1 753.

[9] 郑远谋, 黄荣光, 陈世红. 爆炸复合材料中金属的强化[J]. 工程爆破, 2000, 6(1): 25-31.