

文章编号: 1004- 0609(1999)04- 0728- 04

# 钢-半固态铝熔体压力复合板的界面力学性能与结构<sup>①</sup>

张 鹏<sup>1</sup> 杜云慧<sup>1</sup> 任学平<sup>1</sup> 康永林<sup>1</sup> 刘汉武<sup>2</sup> 崔建忠<sup>2</sup> 巴立民<sup>3</sup>

(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 东北大学 金属压力加工系, 沈阳 110006;  
3. 鞍山汽车配件厂, 鞍山 114014)

**摘 要:** 采用压力复合方法实现了钢-半固态铝熔体复合, 对复合板的界面剪切力学性能和界面结构进行了研究, 确定了半固态铝熔体固相率与复合板界面剪切强度之间的关系以及钢-半固态铝熔体复合板的界面结构。结果表明: 铝熔体固相率为 32.2% 时, 复合板界面剪切强度最大, 为 69.7 MPa, 其界面是由铁铝化合物和铁铝固溶体交替构成的新型结构。

**关键词:** 钢; 半固态铝; 压力复合; 固相率; 界面剪切强度; 界面结构

**中图分类号:** TG113.22

**文献标识码:** A

钢-铝复合板具有优良的综合性能, 从航空航天领域到显微测试设备均有应用<sup>[1]</sup>。长期以来, 科技工作者们已经分别针对钢-铝固相复合<sup>[2]</sup>、钢-铝固液相复合<sup>[3,4]</sup>进行了成功的、深入的研究。但是由于这些复合方法还存在不足, 使得复合板的性能还没有达到其应有的水平。在钢-铝固相复合中, 由于钢和铝之间形成的是机械咬合和部分物理结合<sup>[5]</sup>, 因此固相复合板的界面力学性能很差, 界面剪切强度一般在 40 MPa 左右; 在钢-铝固液相复合中, 钢和铝之间形成的是最牢固的冶金结合<sup>[6]</sup>, 但是由于复合温度高, 液态铝和钢板之间极易形成铁铝化合物层, 从而使得本已十分牢固的固液相复合板的界面发生脆化<sup>[7]</sup>, 其界面剪切强度一般在 60 MPa 左右。所以开发和研究新技术、新方法来破坏钢-铝复合界面铁铝化合物的层状结构, 就可以消除界面脆化, 进一步提高钢-铝复合板的界面力学性能。

本研究首次采用压力复合方法实现了钢-

半固态铝熔体复合, 并且对复合板的界面剪切力学性能和界面结构进行了研究, 确定了半固态铝熔体固相率与复合板界面剪切强度之间的关系以及钢-半固态铝熔体复合板的界面结构。

## 1 实验方法

先将营口轴瓦厂生产的 1.2 mm 厚 08Al 钢板进行脱脂、除锈等处理, 利用电磁搅拌法制备工业纯铝(99.99%)半固态熔体(熔体固相率是采用快淬法利用图像分析确定的), 在压力复合设备(如图 1 所示)上进行钢-半固态铝熔体压力复合实验。实验步骤为: 将下模置于压力机的平台上, 将钢板从保温炉内取出, 迅速放入下模; 通过熔体输送器向下模内钢板上输送半固态铝熔体; 移走输送器, 盖上压盖, 降下压力机压头, 实施压力复合。由于复合温度很高, 所以整个过程都是在氮气保护下进行的。压力设备为 100 t 油压机。具体实验参数

① 国家“八六三”计划资助项目 863-715-009-060 及博士后基金资助项目

收稿日期: 1998-10-07; 修回日期: 1999-05-26 张 鹏(1967-), 男, 博士后

为: 钢板预热温度为 400 ℃, 压盖和下模预热温度为 200 ℃, 控温精度为  $\pm 1$  ℃, 压力为 50 MPa, 压力精度为  $\pm 0.1$  MPa, 复合板的固态铝层厚度为 4.0 mm。

复合实验完成后, 利用线切割加工方法将复合板分别制成剪切强度测试试样和 10 mm × 10 mm 大小的电子探针观测试块。将剪切强度测试试样在万能材料试验机上进行界面剪切强度测量, 实验结果如表 1 所示。电子探针观测试块的侧壁断面经过磨制、抛光、清洗和干燥后, 用脱脂棉蘸腐蚀液(体积成分分别为: 0.5% HF, 1.5% HCl, 2.5% HNO<sub>3</sub> 和 95.5% H<sub>2</sub>O) 进行表面腐蚀, 经清洗和干燥制得电子探针试样后, 进行电子探针界面观测和成分分析, 以确定钢-半固态铝熔体复合板的界面结构。

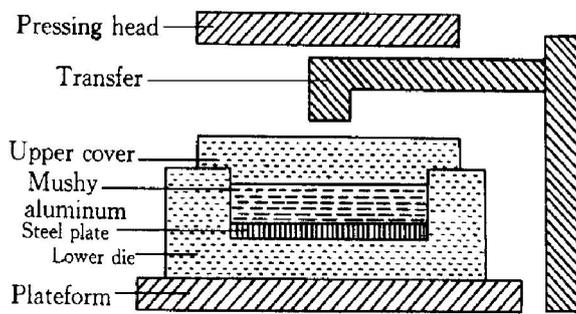


图 1 钢-半固态铝熔体压力复合示意图

Fig. 1 Schematic of steel-mushy aluminum pressing bonding

## 2 结果与讨论

将表 1 中的测试数据进行非线性回归分析, 可得到钢-半固态铝熔体压力复合中铝熔体固相率与复合板界面剪切强度之间的关系, 得到回归方程为:

$$y = 61.8 + 0.49x - 0.0076x^2 \quad (1)$$

式中  $x$  为铝熔体固相率,  $y$  为复合板界面剪切强度。回归相关系数  $R_1$  为 0.98929。回归理论值与实验数据的相对误差(相对误差为实验值和回归值之差的绝对值与实验值的比值)见表 1, 可见最大相对误差稳定在 1.2%, 说明回

表 1 铝熔体固相率和界面剪切强度的实验结果

Table 1 Relationship between aluminum solid fraction and interfacial shear strength

Solid fraction / %	Interfacial shear strength/MPa		Relative error / %
	Tested data	Regressive data	
0	62.2	61.8	0.6
5	63.3	64.1	1.2
10	66.3	65.9	0.6
15	67.8	67.4	0.6
20	68.1	68.6	0.7
25	68.7	69.3	0.8
30	69.5	69.7	0.3
35	69.5	69.6	0.1
40	69.4	69.2	0.3
45	68.3	68.5	0.3
50	67.2	67.3	0.1
55	66.3	65.8	0.8
60	63.2	63.8	0.9
65	61.2	61.5	0.5

归方程(1)能正确地反映钢-半固态铝熔体压力复合中铝熔体固相率与复合板界面剪切强度的关系。对该方程求导并令其导数为零, 得到界面剪切强度取最大值的条件为  $x = 32.2\%$ , 此时  $y = 69.7$  MPa。即当采用铝熔体固相率为 32.2% 进行压力复合时, 可得到钢-半固态铝熔体压力复合板的最大界面剪切强度为 69.7 MPa, 这高出钢-铝固液相复合板的界面剪切强度 5 MPa 左右。

图 2 为钢-半固态铝熔体压力复合板界面电子探针 SEM 照片。由图可见, 钢-半固态铝熔体压力复合板界面是由 1, 2, 3, 4 等区域构成的, 对 1, 3 等区域进行多点成分分析, 结果与正常的钢-铝固液相复合的一致, 为铁铝化合物  $FeAl_3$  和  $Fe_2Al_5$ ; 对 2, 4 等区域进行多点成分分析, 证明其为含铝量小于 3% 的铁铝固溶体, 所以钢-半固态铝熔体压力复合板的界面是由铁铝化合物和铁铝固溶体交替构成的。

在钢板与半固态铝熔体进行压力复合时, 在下模内, 当钢板表面与半固态铝熔体接触后, 在钢与铝的接触面上, 固态铝和液态铝分别按一定的比例与钢板表面接触。因为液态高能铝原子的扩散反应能力大于固态低能铝原子

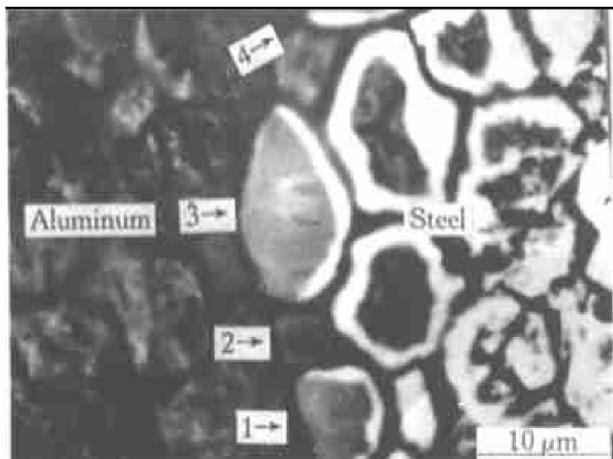


图2 钢-半固态铝熔体界面

Fig. 2 SEM image of interface of steel-mushy aluminum

的扩散反应能力<sup>[8]</sup>, 在钢板表面与液态铝接触处的温度高于铁铝化合物的形成温度 450 °C, 扩散反应剧烈, 所以此处与正常的钢-铝固液相复合一样产生铁铝化合物。而在钢板表面与固态铝接触处, 由于固态铝原子的扩散反应能力差, 再加上固态铝与固态钢之间的接触不象液态铝与固态钢之间接触得那么密切, 所以此时几乎不发生扩散反应; 只有在油压机上压头通过压盖对半固态铝熔体加压后, 固态铝与固态钢之间才能在压力的作用下达到紧密接触, 开始进行大规模的扩散。但是由于此时温度已经下降到 400 °C 以下, 小于铁铝化合物的产生温度 450 °C, 所以只能产生铁铝固溶体。因此对于钢-半固态铝熔体压力复合, 复合板的界面是由铁铝固溶体和铁铝化合物交替构成的新型结构, 如图 2 所示。铁铝化合物形成很强的冶金结合, 而铁铝固溶体形成的结合较弱。但是由于固溶体的存在, 破坏了复合界面处铁铝化合物的层状分布, 从而避免了整个复合界面的脆化。当铝熔体固相率处于 0~ 32.2% 范围内时(如表 1 所示), 随着铝熔体固相率的增大, 复合界面上铁铝化合物层逐渐被固溶体分隔成网状结构, 其对复合界面的脆化作用逐渐减小, 所以界面剪切强度逐渐增大。而当铝熔体固相率大于 32.2% 时, 随着铝熔体固相率增大, 钢板表面上形成的固溶体越来越多, 钢和铝之间的弱结合面积越来越大, 使得复合界面

的结合以铁铝固溶体弱结合为主, 铁铝化合物的钉扎作用越来越小, 所以界面剪切强度逐渐减小。

### 3 结论

在钢-半固态铝熔体压力复合中, 由于半固态铝熔体中固态铝的存在, 使得钢-铝复合板的界面构成发生了变化, 形成了铁铝化合物和铁铝固溶体交替构成的新型结构。这达到了破坏复合界面处铁铝化合物的层状分布, 避免整个复合界面脆化的目的, 所以钢-半固态铝熔体压力复合板的界面剪切强度明显高于钢-铝固液相复合板的界面剪切强度。因此, 钢-半固态铝熔体压力复合是钢-铝复合的一种先进的、有效的新方法。对于钢-半固态铝熔体压力复合, 铝熔体固相率与复合板界面剪切强度之间的关系为:

$$y = 61.8 + 0.49x - 0.0076x^2$$

当采用铝熔体固相率为 32.2% 进行压力复合时, 可得到钢-半固态铝熔体复合板最大界面剪切强度为 69.7 MPa。

### REFERENCES

- 1 Kennis. Matrix Composite(金属基复合材料). Wen Zhongyuan(温中元) transl. Beijing: Defence Industry Press, 1982: 45.
- 2 Mackay M L. Metal Progress, 1977, (6): 32.
- 3 Zhang Peng(张鹏), Cui Jianzhong(崔建忠) and Du Yunhui(杜云慧). Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1996, 32(12): 1275.
- 4 Zhang Peng(张鹏), Cui Jianzhong(崔建忠) and Du Yunhui(杜云慧). Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1997, 33(7): 869.
- 5 Wan Qiuwei(万秋伟). Master Dissertation. Shenyang: Northeastern University, 1993.
- 6 Dybkov V I. Journal of Materials Science, 1990, 25: 3615.
- 7 Zhang Peng(张鹏). PhD Dissertation. Shenyang: Northeastern University, 1998.

- 8 Fang Junxin(方俊鑫). Solid Physics(固体物理学). 1980: 170.  
Shanghai: Shanghai Science and Technology Press,

## Interfacial strength and structure of steel-mushy aluminum pressing bonding plate

Zhang Peng<sup>1</sup>, Du Yunhui<sup>1</sup>, Ren Xueping<sup>1</sup>, Kang Yonglin<sup>1</sup>,  
Liu Hanwu<sup>2</sup>, Cui Jianzhong<sup>2</sup>, Ba Limin<sup>3</sup>

*1. School of Materials Science and Engineering,*

*University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China*

*2. Department of Metal Forming, Northeastern University, Shenyang 110006, P. R. China*

*3. Anshan Automobile Fittings Factory, Anshan 114014, P. R. China*

**Abstract:** By using pressing bonding method, the steel-mushy aluminum bonding was realized. The interfacial shear property and interfacial structure of steel-mushy aluminum bonding plate were studied and the relationship between aluminum solids fraction and interfacial shear strength of bonding plate and also the interfacial structure of the bonding plate were determined. The results showed that when aluminum solids fraction was 32.2%, the maximum interfacial shear strength of bonding plate was 69.7 MPa, and the interface was constructed with Fe-Al compound and Fe-Al solid solution alternately.

**Key words:** steel; semi-solid aluminum; pressure bonding; solid fraction; interfacial shear strength; interfacial structure  
(编辑 袁赛前)