

ZChSnSb11-6/20 钢复合材料结合界面影响因子研究

李淑君¹, 王尧¹, 项丹^{1,2}, 孟文俊¹

(1. 太原科技大学, 山西 太原 030024)

(2. 太重集团油膜轴承分公司, 山西 太原 030024)

摘要: 针对巴氏合金与钢体组成的复合材料, 提出并推导了结合界面影响因子 λ 计算公式。采用电弧喷涂技术制备了有无镀锡层工艺处理 ZChSnSb11-6/20 钢复合材料, 研究了材料的力学性能, 得到了结合界面影响因子 λ 关于巴氏合金比重 ζ 的数学关系式。结果表明: 无镀锡层处理的复合材料结合界面影响因子 λ_1 随巴氏合金比重 ζ 的增加而单调递减; 而有镀锡层处理的复合材料 λ_2 与 ζ 的函数关系存在拐点 $\zeta=0.597$, 即巴氏合金层存在最佳厚度, 使巴氏合金与 20 钢的结合达到一种平衡, 结合性能最佳。经验证, 镀锡层工艺处理增强了复合材料的界面结合性能, 而且当 $\zeta=0.6$ 时, 其界面结合力最大。

关键词: ZChSnSb11-6; 结合界面; 巴氏合金比重; 界面影响因子; 结合强度

中图分类号: TB331; TG115.5⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)10-2555-06

巴氏合金具有良好的减摩性与镶嵌性, 通过浇铸或喷涂在钢等基体上使用, 主要应用于钢铁冶金、核电、航空航天、汽轮机、船舶等大型高、精、尖关键设备轴瓦生产制造中^[1,2]。其中, 锡基巴氏合金 ZChSnSb11-6 以其强度和硬度较高、耐腐蚀性强、环保性高等特点得到了较为广泛的应用^[3]。在大型热连轧机组生产中, ZChSnSb11-6/20 钢复合材料被用于关键零部件油膜轴承衬套的设计制造。工程实践中, 由于承受重载和较大的冲击载荷, 巴氏合金往往是薄弱易损工作零件。巴氏合金与基体 20 钢的结合界面能否良好结合及其结合强度将直接关系到油膜轴承的使用性能。同时, 近年来表面工程技术和纳米技术的发展^[4], 对其结合界面的要求也越来越苛刻。因此, 为满足各种性能要求及工程应用, 有必要针对 ZChSnSb11-6/20 钢复合材料的界面影响因子进行深入研究。

国内外学者对巴氏合金材料性能做了大量研究, 王建梅等^[5]通过蠕变实验获得了 ZChSnSb11-6 的蠕变特征; 张忠礼等^[6]借助扫描电子显微镜、能谱分析和 X 射线衍射分析了电弧喷涂巴氏合金涂层组织与铸造组织的差异; Kamal 等^[7]通过熔融纺丝技术修改了巴氏合金中铜含量(5%), 对其 2.11~2.75 应力指数范围内的晶界滑移进行了研究; Feyzullahoglu 等^[8]研究了油润滑条件下 2 种巴氏合金的摩擦学性能; Zeren 等^[9]研究了干摩擦条件下锡基巴氏合金的嵌入性性能; Diouf 等^[10]

使用 Chalmers 结合强度方法对离心浇铸和静态铸造的巴氏合金结合强度进行了研究。以上研究表明, 对巴氏合金材料性能的研究受到了研究人员的广泛关注, 然而, 尚无关于不同巴氏合金比重与其复合材料结合界面影响因子关系的报道。

本实验通过电弧喷涂技术制备有无镀锡层工艺处理 ZChSnSb11-6/20 钢复合材料, 研究材料的力学性能, 提出并推导结合界面影响因子 λ 计算公式, 旨在了解其内在机理, 理解其物理意义, 并通过实验得到结合界面影响因子 λ 关于巴氏合金比重 ζ 的数学关系式, 为解决实际界面结合问题提供有力的理论依据和科学保证。

1 结合界面影响因子

1.1 影响因子计算公式

本研究提出结合界面影响因子 λ 计算公式为:

$$\frac{1}{E} = \lambda \frac{1}{E_2} + (1 - \lambda) \frac{1}{E_1} \quad (1)$$

式中: E 为复合材料弹性模量, GPa; E_1 为 ZChSnSb11-6 弹性模量, GPa; E_2 为 20 钢弹性模量, GPa。

1.2 计算公式推导

图 1 所示为复合材料在弹性区间内进行拉伸变形时各个材料的变形示意图。对其力学分析为: 各个材料的合变形为复合材料的变形, 满足平行四边形准则。

收稿日期: 2015-10-18

基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目 (2013-093); 校青年科技研究基金项目 (20133001)

作者简介: 李淑君, 女, 1975 年生, 博士生, 太原科技大学机械工程学院, 山西 太原 030024, 电话: 0351-6998115, E-mail: 442831241@qq.com

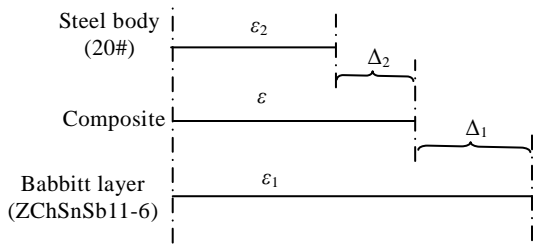


图 1 复合材料变形示意图

Fig.1 Schematic diagram of deformation for composites

(1) 假定复合材料所受拉伸应力为 σ ，设复合材料的变形为 ε ，20 钢的变形为 ε_2 ，巴氏合金的变形为 ε_1 。巴氏合金易变形，对复合材料变形起促进的作用，变形伸长为 Δ_1 ，20 钢变形较难，对复合材料变形起抑制作用，变形缩短为 Δ_2 。则根据应力-应变公式及几何关系可得如下方程组：

$$\begin{cases} \varepsilon_i = \sigma / E_i \quad (i = 1, 2) \\ \varepsilon = \sigma / E \\ \varepsilon_1 - \Delta_1 = \varepsilon \\ \Delta_1 + \Delta_2 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \end{cases} \quad (2)$$

求解方程组(2)可得：

$$\frac{1}{E} = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} \cdot \frac{1}{E_2} + \left(1 - \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2}\right) \cdot \frac{1}{E_1} \quad (3)$$

定义结合界面影响因子 λ 为：

$$\lambda = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)即可得结合界面影响因子 λ 计算公式(1)。

(2) 设复合材料截面面积为 A ，其中巴氏合金面积为 A_1 ，如图 2 所示。

令巴氏合金比重 $\xi = A_1 / A$ ，则结合界面影响因子 λ 关于巴氏合金比重 ξ 的数学模型如下：

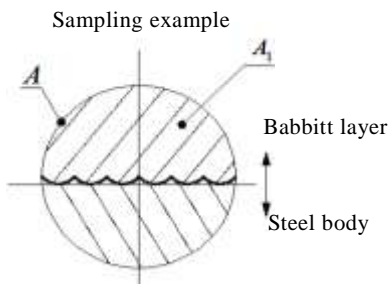


图 2 巴氏合金比重示意图

Fig.2 Schematic diagram of Babbitt proportion

$$\lambda_i = f(\xi_i) \quad (5)$$

式中： ξ_i 为不同的巴氏合金比重取值， $0 \leq \xi_i \leq 1$ ； λ_i 为不同的 ξ_i 对应值。

2 实验

通过电弧喷涂技术制备了有无镀锡层工艺处理 ZChSnSb11-6/20 钢复合材料。具体步骤如下：(1) 工件表面预处理。首先使用丙酮或汽油将 20 碳素钢进行除油处理，随后放置在烘箱中 100 °C 条件下进行烘干 2 h。之后，对试件金属基体的表面采用 20 号棕刚玉磨料进行喷砂处理，采用的砂粒粒度为 16 号砂，喷砂压力为 0.4 MPa。(2) 制备 $\phi 3.2$ mm 电弧喷涂用锡基巴氏合金丝材。(3) 控制温度在 60~120 °C^[11]对工件进行预热。(4) 镀锡层工艺处理。文献[12]通过多因素水平的正交试验得到了镀锡层厚度的工艺控制公式，选定合理的镀锡层工艺参数(表面粗糙度、镀锡温度、镀锡时间、搪锡次数等)对工件进行镀锡处理，使得镀锡层最佳厚度为 40 μm ^[12]。(5) 喷涂及后处理。采用 FLEXI ARC 300 型电弧喷涂设备，控制电弧喷涂工艺参数^[13]对经过喷砂和有无镀锡处理的工件喷涂巴氏合金工作层。预处理好的工件要在尽可能短的时间内进行喷涂，制备过程中对经喷砂处理的基体通常要求在 2 h 内进行喷涂。后处理过程示意图，如图 3 所示。

2.1 力学性能实验

实验试样为圆形试样，所用测量工具为引伸计。使用能测量试样相对两侧平均变形的轴向均值引伸计来测量试样轴向变形。试件加工尺寸如图 4 所示。按照图 4 试件尺寸与表 1 试件规格进行试件加工。

试件分为 2 组，区别在于结合界面有无镀锡层工艺处理。每组 5 个，按照巴氏合金比重进行划分，试样标距内直径公差为 ± 0.02 mm，表面粗糙度 R_a 要求为 1.6 μm 。试样在车床上加工好之后，表面粗糙度基本上可以满足要求，但需要彻底清洗并烘干(清洗液用乙醇)，同时贴上标签以进行区分。

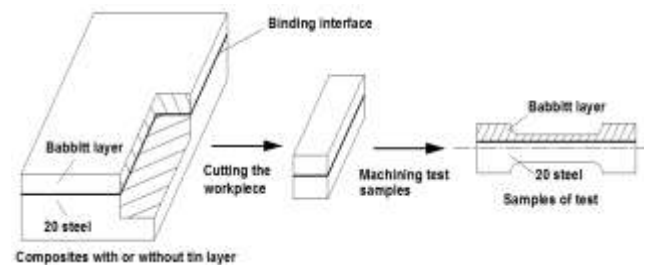


图 3 复合材料后处理过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of after-processing for composites

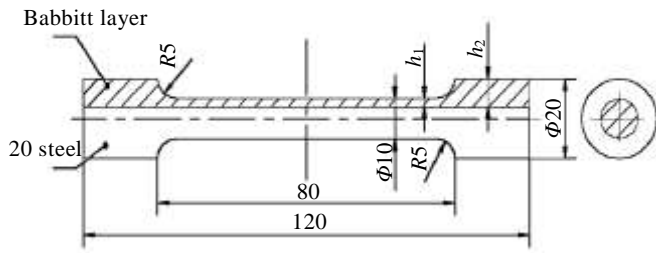


图 4 试件尺寸

Fig.4 Dimension of specimen

表 1 试件规格

Table 1 Specimen specification

Specimen	No.	h_1/mm	h_2/mm
Composites	1	1.83	6.83
	2	2.98	7.98
	3	5	10
	4	7.02	12.02
	5	8.17	13.17

测试仪器为 WDW-E100D 型电子万能材料试验机, 将引伸计与电脑 PC-Control 相连接, 直接在拉伸测试软件中进行数据的存储。选用引伸计的标距为 50 mm。手动数据采集范围为 0~20 kN (或 0~6 kN), 每隔 2 kN (或 0.5 kN) 一次读数, 既可以对加载过程进行监控, 也可以根据逐差法初步估算被测数据的稳定与否。

图 5 所示为复合材料试件的微观表征。对比图 5a 和图 5b 可以发现, 在 20 钢与巴氏合金之间, 无镀锡处理试件有一条明显的界限, 其结合机理主要是机械结合方式, 而有镀锡处理的试件在锡层区域形成了一条扩散互溶区, 说明对 ZChSnSb11-6/20 钢复合材料进行镀锡工艺处理, 提高了 20 钢与巴氏合金之间的冶金结合效果, 增强了复合材料界面结合强度。

2.2 结合强度验证实验

实验试样按有无镀锡层处理分为 2 类, 每类按巴氏合金比重 $\xi \in \{0.5, 0.6, 0.75\}$ 划分 3 组, 每组 2 个, 实验样品如图 6 所示。实验过程中应力增值为 10 N/(mm² s), 平稳而缓慢施加试验载荷, 直到试件发生断裂为止。

3 结果及讨论

3.1 复合材料弹性模量计算

复合材料弹性模量实验中的相关测试数据见表 2 所示。根据表 2 中的拉伸变形数据, 利用逐差法对复合材料弹性模量进行计算, 计算结果如表 3 所示。

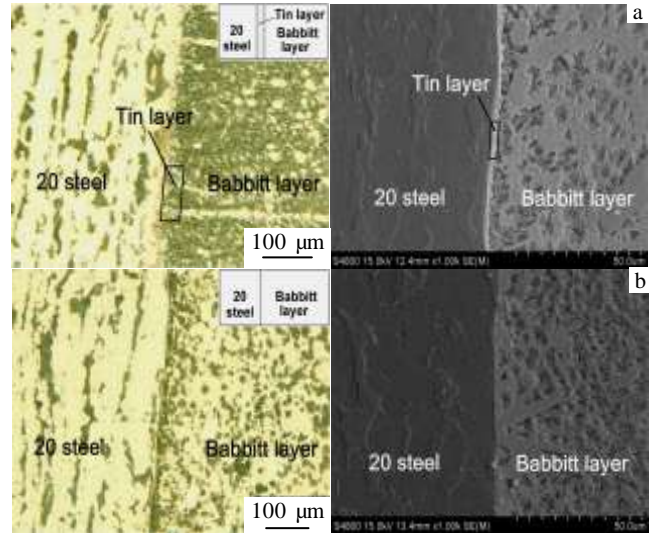


图 5 有无镀锡层复合材料微观表征

Fig.5 Microscopic characterization of composites with (a) and without (b) tin layer

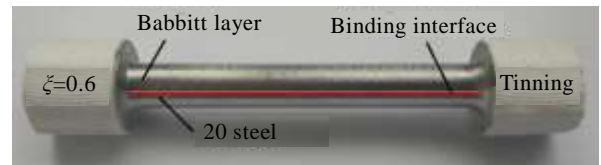


图 6 结合强度实验样品

Fig.6 Samples of binding strength test

基于最小二乘曲线拟合^[14]的思想, 利用商业数学软件 MATLAB 对复合材料弹性模量 E 关于巴氏合金比重 ξ 的数学关系进行曲线拟合, 如图 7 所示。

复合材料弹性模量 E 与巴氏合金的比重 ξ 的数学关系式为:

$$\begin{cases} E^1 = 209.07 - 760\xi + 1388.4\xi^2 - 795\xi^3 \\ E^2 = 213.50 - 45.53\xi - 493.61\xi^2 + 375.93\xi^3 \end{cases} \quad (6)$$

式中: E^1 、 E^2 分别为有镀锡、无镀锡层复合材料的弹性模量; ξ 为巴氏合金比重。

分析图 7c 可得, 有镀锡层复合材料弹性模量与无镀锡层复合材料弹性模量在 $\xi = 0.615$ 时相等; 当 $0 < \xi < 0.615$ 时, $E^1 < E^2$, 说明镀锡处理使得复合材料弹性模量变小, 一定载荷下, 容易产生变形; 而当 $0.615 < \xi < 1$ 时, $E^1 > E^2$, 说明镀锡处理提高了复合材料的弹性模量, 刚性增强。同时, 图形中反映最明显的一点是 $\xi = 0.615$, 是各自函数关系的拐点, 其二阶导数为零。

3.2 结合界面影响因子计算

表 2 复合材料试件测试数据

Table 2 Testing data of composites' samples (mm)

Load, <i>F</i> /kN	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	Cross-sectional area, <i>A</i> /mm ²	
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5		
Tinning samples	1	0.020	0.029	0.037	0.046	0.057	0.061	0.068	0.075	0.082	0.090	78.38
	2	0.012	0.023	0.033	0.042	0.051	0.061	0.071	0.080	0.089	0.099	78.13
	3	0.027	0.032	0.038	0.045	0.053	0.061	0.070	0.079	0.087	0.096	78.54
	4	0.006	0.009	0.012	0.015	0.019	0.022	0.025	0.028	0.032	0.036	77.91
	5	0.015	0.020	0.026	0.030	0.035	0.041	0.046	0.051	0.057	0.063	77.91
No tinning samples	1	0.002	0.007	0.012	0.018	0.023	0.030	0.035	0.041	0.047	0.053	77.44
	2	0.015	0.026	0.035	0.042	0.048	0.054	0.060	0.068	0.075	0.085	77.60
	3	0.024	0.029	0.033	0.036	0.040	0.046	0.052	0.059	0.067	0.075	77.91
	4	0.007	0.010	0.013	0.017	0.022	0.027	0.032	0.037	0.044	0.052	77.29
	5	0.019	0.024	0.030	0.035	0.041	0.047	0.052	0.059	0.065	0.075	74.66

Note: (i) The D-value of load for specimens numbered 1 and 2 is 2 kN, but it is 0.5 kN for specimens numbered 4 and 5. And the data collected by initial load 0.5 kN was taken away, because the initial data is obvious instability when the load change is small. The D-value of load for specimens numbered 3 is 1 kN, and the load interval ranges from 1 to 14 kN, remove two sets of data at the beginning and end; (ii) The load interval of each set of data is not necessarily the same, because the Young's modulus for composites (*E*) will change obviously with the increase of the proportion of Babbitt (ξ). The value of load interval depends on the visual Stress-strain curve of WDW-E100D; (iii) Each set of data was tested at least twice, and the most stable group was selected as the data in the table.

表 3 复合材料弹性模量计算结果

Table 3 Results of Young's modulus for composites

Samples	<i>l</i> =50 mm				
	ΔF /kN	<i>A</i> /mm ²	Δl /mm	<i>E</i> /GPa	
Tinning	1	2	78.38	0.007778	164.03
	2	2	78.13	0.009889	129.43
	3	1	78.54	0.007667	83.03
	4	0.5	77.91	0.003333	96.27
	5	0.5	77.91	0.005333	60.17
No tinning	1	2	77.44	0.005945	217.20
	2	2	77.6	0.007777	165.70
	3	1	77.91	0.005667	113.25
	4	0.5	77.29	0.005000	64.69
	5	0.5	74.66	0.006222	53.82

Note: ΔF —D-value of load; *l*—gauge length of extensometer; Δl —mean of D-value of deformation

由表 3 及公式(1)对结合界面影响因子 λ 关于巴氏合金比重 ξ 的函数关系进行求解,求解结果如表 4 所示,函数关系如图 8 所示。

结合界面影响因子 λ 与巴氏合金的比重 ξ 的数学关系式为:

$$\begin{cases} \lambda_1 = 0.99 + 0.571\xi - 7.495\xi^2 + 13.8\xi^3 - 7.899\xi^4 \\ \lambda_2 = 1.002 + 0.306\xi - 2.306\xi^2 + 0.982\xi^3 \end{cases} \quad (7)$$

式中: λ_1 、 λ_2 分别为有镀锡、无镀锡层结合界面影响因子; ξ 为巴氏合金比重。

分析图 8c 可得,有镀锡层与无镀锡层复合材料结合界面影响因子在 $\xi = 0.597$ 时相等;当 $0 < \xi < 0.597$ 时, $\lambda_1 < \lambda_2$,当 $0.597 < \xi < 1$ 时, $\lambda_1 > \lambda_2$,说明镀锡层工艺处理对结合界面影响因子的影响并不是单调一致的,对变形的贡献既表现抑制,又表现促进。有镀锡层与无镀锡层结合界面影响因子曲线相比较,其函数存在拐点,函数变化率波动比较明显。

不同巴氏合金比重实际反映的是不同巴氏合金层厚度,对结合界面影响因子的研究可得:

(1) 有无镀锡层处理对巴氏合金与钢套的结合强度有一定影响,主要表现在受力变形方面以及复合材料弹性模量大小方面,但镀锡层处理对其影响不单调一致。工程实践中,可根据对巴氏合金具体使用性能的要求选择合适的结合界面影响因子来确定其厚度。

(2) 巴氏合金层越厚,复合材料越体现巴氏合金的力学性能, λ 越小,钢套抑制变形大于巴氏合金促进变形;反之,合金层越薄, λ 越大,复合材料越体现钢体力学性能,钢套抑制变形小于巴氏合金促进变形,但均不能完整体现对复合材料使用性能的最佳效果。换言之,巴氏合金层存在最佳厚度,使得两者的结合达到一

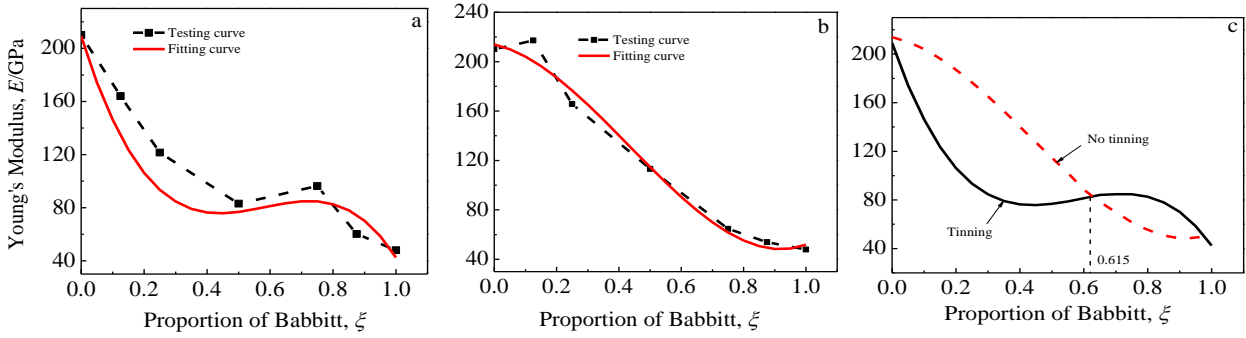


图 7 复合材料弹性模量变化曲线

Fig.7 Variation curves of Young's modulus for composites: (a) with tin layer, (b) without tin layer, and (c) comparison of curves for composites with and without tin layer

表 4 结合界面影响因子计算结果

Table 4 Results of impact factor of binding interface

Impact factor, λ	Tinning					No tinning				
	0.125	0.25	0.5	0.75	0.875	0.125	0.25	0.5	0.75	0.875
	0.9221	0.9260	0.5507	0.6542	0.2648	1.0396	0.8907	0.7514	0.3374	0.1423

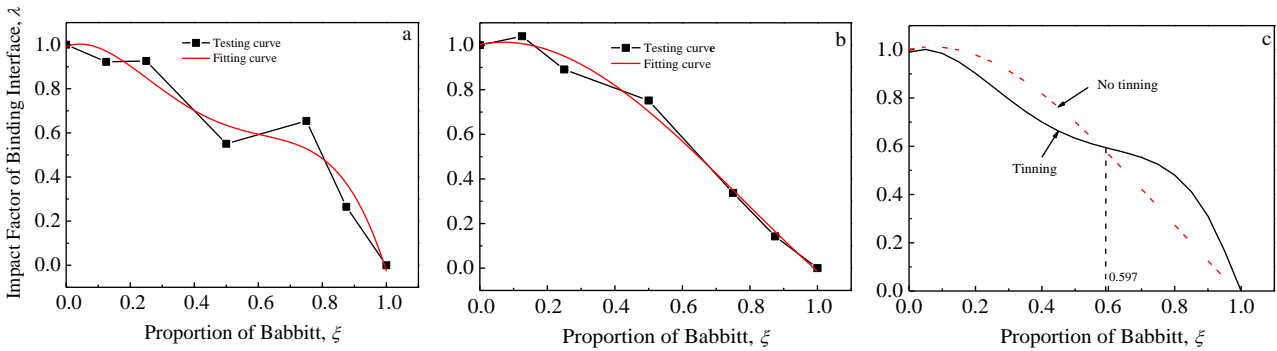


图 8 结合界面影响因子变化曲线

Fig.8 Variation curves of impact factor of binding interface for composites: (a) with tin layer, (b) without tin layer, and (c) comparison of curves for composites with or without tin layer

种平衡, 实现其最佳结合性能。

3.3 结合强度验证结果

基于函数拐点的数学性质, 分析图 7c、图 8c 各函数关系, 经数值修约后猜想: 当 $\xi = 0.6$ 时, 其界面结合性能最佳。因此, 制备结合强度测定试样, 并利用万能材料试验机进行结合强度实验, 测试数据如表 5 所示。

分析表 5 数据可知:

(1) 对于无镀锡层的试件, 其界面结合力随巴氏合金比重的增加而减小; 对于有镀锡层的试件, 不同巴氏合金比重对界面结合性能的影响并不单调一致, 其界面结合力在 $\xi = 0.6$ 时最大, 结合性能最好。

(2) 镀锡层复合材料的界面结合力明显大于无镀锡层复合材料, 其结合力提高了约 1.25 倍, 说明镀锡层处理增强了复合材料的界面结合性能。

表 5 试样结合强度测试数据

Table 5 Test data of binding strength test data of samples

Proportion of Babbitt, ξ	No tinning			Tinning		
	0.5	0.6	0.75	0.5	0.6	0.75
Binding force/N	7600	7480	6890	16200	17610	15690

4 结 论

1) 采用电弧喷涂技术制备了有无镀锡层工艺处理 ZChSnSb11-6/20 钢复合材料, 通过实验得到了结合界面影响因子 λ 关于巴氏合金比重 ξ 的数学关系式。

2) 不同的巴氏合金比重 ξ 实际反映不同巴氏合金层厚度, 镀锡层处理增强了复合材料的界面结合性能, 其结合力提高了约 1.25 倍, 而且当 $\xi = 0.6$ 时, 其界面

结合力最大, ZChSnSb11-6/20 钢复合材料结合性能最佳, 达到 17 610 N。

参考文献 References

- [1] Hua X U. *Nondestructive Testing*[J], 2011, 10: 035
- [2] He Y, Zhao Z, Luo T *et al. Materials & Design*[J], 2013, 52: 923
- [3] Zhang B, Yang Z Y, Fu D X *et al. Physics Procedia*[J], 2013, 50: 231
- [4] Li Zhongchun(李中春), Luo Shengli(罗胜利), Zhou Quanfa(周全法) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(10): 1863
- [5] Wang Jianmei(王建梅), Xue Yawen(薛亚文), Hou Cheng(侯成) *et al. Journal of Materials Science & Engineering* (材料科学与工程学报)[J], 2013, 31(6): 785
- [6] Zhang Zhongli(张忠礼), Duan Sihua(段思华), Zhang Hongbing(张洪兵) *et al. Transaction of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2010, 31(4): 17
- [7] Kamal M, EI-Bediwi A, Lashin A R *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 530: 327
- [8] Feyzullahoğlu E, Zeren A, Zeren M. *Materials & Design*[J], 2008, 29(3): 714
- [9] Zeren A. *Materials & Design*[J], 2007, 28(8): 2344
- [10] Diouf P, Jones A. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2010, 41(3): 603
- [11] Schein J, Heinrich P, Krömmer W. *U S Patent Application* 13/329,838[P]. 2011
- [12] Wang Yao(王尧). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2014: 60
- [13] Toma S L, Bejinariu C, Baciuc R *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2013, 220: 266
- [14] Zheng Chunxiao(郑春晓), Fan Jinglian(范景莲), Gong Xing(龚星) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(10): 2043

Impact Factor of Binding Interface on ZChSnSb11-6/20 Steel Composites

Li Shujun¹, Wang Yao¹, Xiang Dan^{1,2}, Meng Wenjun¹

(1. Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Taiyuan Heavy Machinery Group Co., Ltd, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The formula for calculating the impact factor of binding interface (λ) was proposed and derived based on the composite of steel body and Babbitt layer. ZChSnSb11-6/20 steel composites with and without tin layer were prepared by arc spraying. The mechanical properties of the composites were investigated. Then the mathematical relationship between the impact factor of binding interface (λ) and proportion of Babbitt (ζ) was obtained. Results reveal that the impact factor of binding interface of the composites without tinning (λ_1) decreases monotonically with the increasing proportion of Babbitt (ζ). However, for the composites with tinning, an inflection point, which is $\zeta=0.597$, exists in the function of λ_2 (the impact factor of binding interface) and ζ . This inflection point suggests that there is an optimal thickness of Babbitt layer to reach the best binding between 20 steel and Babbitt layer. It is validated that the tinning process enhances the interfacial binding properties of the composites, and the binding force of interface is maximum when ζ is 0.6.

Key words: ZChSnSb11-6; binding interface; proportion of Babbitt; interfacial impact factor; binding strength

Corresponding author: Li Shujun, Candidate for Ph. D., School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-351-6998115, E-mail: 442831241@qq.com