

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.04.013

金属塑料复合材料的压制成型及结合强度

杨超,戴亚春,王海,骆志高

(江苏大学机械工程学院,江苏镇江 212013)

摘要:以提高金属与塑料之间的结合强度为目标,对金属基体进行高能喷丸处理,使其表面自纳米化,并以高能喷丸和喷涂的工艺参数为试验变量,设计了正交试验方案,同时设计了压制成型模具并压制成型,最后采用垂直拉伸法对金属塑料复合材料的结合强度进行了测试,并研究了铸钢丸直径、喷丸压力、喷丸时间以及塑化温度对复合材料结合强度的影响规律,确定了使结合强度达到最佳的工艺参数组合。再运用数值拟合的方法,预测出结合强度最高的工艺参数组合,并对优化结果进行实验验证分析。结果表明,铸钢丸直径为 4.96~5.04 mm,喷丸压力为 0.49~0.51 MPa,喷丸时间为 10.9~11.08 min,塑化温度为 278.2~282℃时制得的复合材料的结合强度最佳。

关键词:金属塑料复合材料;高能喷丸;压制成型;结合强度;工艺优化

中图分类号:TQ325.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2019)04-0064-06

Press Forming and Bonding Strength of Metallic Plastic Composites

Yang Chao, Dai Yachun, Wang Hai, Luo Zhigao

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract : In order to improve the bonding strength between metal and plastic, the high-energy shot peening of the metal substrate is carried out to make the surface self-nanochemical, and the orthogonal experimental scheme was designed based on the process parameters of high-energy shot peening and spraying. At the same time, the press forming mold was designed and pressed. Finally, the bonding strength of the metal matrix composite was tested by vertical stretching method, and the diameter of the cast steel shot, the shot peening pressure, the shot peening time and the plasticizing temperature were studied. The influence of the bonding strength determines the combination of process parameters when the bonding strength was optimized. Then, using the numerical fitting method, the combination of process parameters with the highest bonding strength was predicted, and the optimization results were verified by experiments. The results show that the diameter of the cast steel pellet is 4.96-5.04 mm, the shot peening pressure is 0.49-0.51 MPa, the shot peening time is 10.9-11.08 min, and the plasticizing temperature is 278.2-282℃. The composite material has the best bonding strength.

Keywords : metallic plastic composite ; high-energy shot peening ; press forming ; bonding strength ; process optimization

随着我国制造业的发展,传统的金属材料已经无法满足我国高端武器装备、航空航天、军事科技等顶尖科技的要求,顺应时代发展的金属基复合材料逐渐在各个领域占据着至关重要的地位^[1-2]。

金属基复合材料兼具金属材料 and 塑料自润滑的优点,因此广泛运用于航空航天、交通、化工等各大工业领域,但是,金属基复合材料在实际运用中,

金属基体与塑料层的结合力并不高,塑料层易脱落,进而导致金属基复合材料的性能缺陷^[3]。

因此,笔者研究的目的是在良好的摩擦磨损性能基础上,研究一种高结合强度的金属基复合材料。金属基复合材料是由金属基体、中间结合层以及塑料工作层材料压制成型而成,其中,金属基体采用具有一定韧性、刚性、热传导性的 25[#] 钢,并对钢基

基金项目:镇江市产学研项目 (1721110159)

通讯作者:戴亚春,副教授,主要从事金属基复合材料成型、陶瓷注射模、塑料注射模具等方面的研究 E-mail : yc726@sina.com

收稿日期:2019-01-20

引用格式:杨超,戴亚春,王海,等.金属塑料复合材料的压制成型及结合强度[J].工程塑料应用,2019,47(4):64-69.

Yang Chao, Dai Yachun, Wang Hai, et al. Press forming and bonding strength of metallic plastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(4) : 64-69.

表面进行高能喷丸处理,使其表面自纳米化^[4],进一步提高钢基和塑料复合层的结合强度,塑料工作层采用塑料中黏性强、与金属基体结合性能好的聚苯硫醚 (PPS)、摩擦系数最低的聚四氟乙烯 (PTFE)、聚醚砜 (PES) 为主,以液晶聚合物 (LCP) 和二硫化钼 (MoS₂) 为辅,为了增强金属基与塑料工作层的结合力,还增加了由 PPS, PES 以及苯乙烯马来酸酐共聚物混合材料作为中间结合层材料,在成型工艺上,设计压制成型模具,结合正交试验设计和数值拟合的方法,对中间结合层喷涂工艺和高能喷丸工艺进行优化,得出结合强度最佳的工艺参数,最终成型一种结合强度高、摩擦系数低,磨损率低的金属基复合材料。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PPS : 粒度 30 μm, 密度 1.36 g/cm³, 苏州迪捷塑化有限公司;

PES : 粒度 30 μm, 密度 1.2 g/cm³, 苏州迪捷塑化有限公司;

PTFE : 粒度 10 μm, 密度 2.2 g/cm³, 苏州迪捷塑化有限公司;

LCP : 粒度 30 μm, 密度 1.78 g/cm³, 东莞市家凯塑胶原料有限公司;

MoS₂ : 粒度 30 μm, 密度 4.8 g/cm³, 东莞市家凯塑胶原料有限公司;

25[#] 碳素结构钢: 尺寸为 120 mm × 30 mm × 3 mm, 江苏锡钢集团有限公司;

硅烷偶联剂: 密度 1.005 ~ 1.025 g/cm³, 广州市壹诺化工科技有限公司;

苯乙烯马来酸酐共聚物: 马来酸酐含量 10%, 重庆赛普那斯科技有限公司。

1.2 主要设备及仪器

真空烘干机: 5L-ZDW 型, 常州尔乐干燥设备有限公司;

球型研磨机: YM-400A 型, 山东桑泽仪器仪表有限公司;

超声波清洗机: KH-500DE 型, 无锡市美极超声设备有限公司;

自回收式多功能抛丸机: PW-700-01 型, 镇江蓝舶科技有限公司;

热压烧结炉: SF500 型, 上海全硕电炉有限公司;

静电喷涂装置: WL-2 型, 苏州南鑫自动化设备

有限公司;

微机控制电子万能试验机: UTM4140 型, 济南美特斯测试技术有限公司;

压制成型模具: 自制。

1.3 试样的制备

金属基复合材料压制成型工艺流程图如图 1 所示。

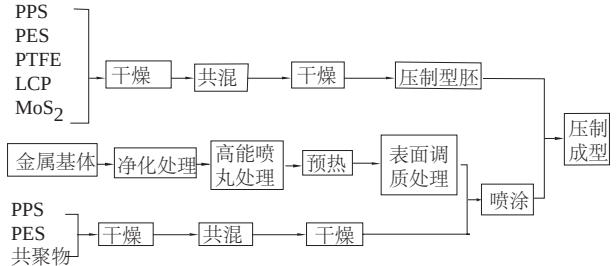


图 1 金属基复合材料压制成型工艺流程图

(1) 金属基体表面处理。

金属基体净化处理。具体的清洗步骤为: 超声波清洗→碱洗除油→水洗→酸洗除锈→中和→水洗→表面调质处理→磷化→水洗→烘干→备用。通过净化处理可以去除金属基体表面污质、氧化物等, 以此来消除它们对材料整体性能的影响^[5]。

金属基体表面纳米化处理。用高能喷丸方法, 实现表面自纳米化, 将铸钢丸直径 (A)、喷丸压力 (B)、喷丸时间 (C)、塑化温度 (D) 4 个工艺参数作为试验因素, 并用均衡抽样方法建立正交试验表, 确定试验过程中各个工艺参数的水平值^[6], 如表 1 所示。

表 1 正交试验的因素及水平

水平	因素			
	A/mm	B/MPa	C/min	D/℃
1	1	0.3	5	250
2	3	0.4	7	280
3	5	0.5	9	310
4	7	0.6	11	340

此外, 喷丸距离控制在 200 ~ 400 mm 的范围以内; 喷丸角度保持在 60° ~ 80° 的范围内, 以防钢丸嵌入工件表面^[7]。

图 2 ~ 图 4 分别为抛丸实验机、喷丸后的试样、高能喷丸设备示意图。

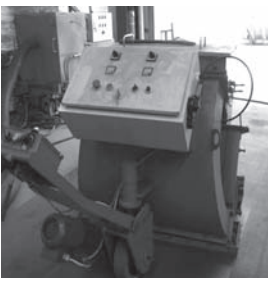


图 2 抛丸实验机

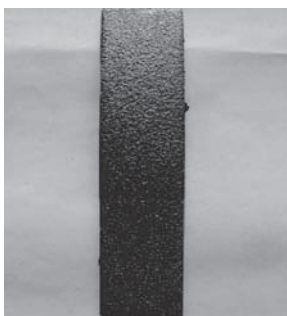


图3 喷丸后的试样

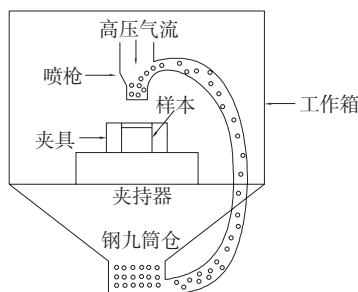


图4 高能喷丸设备示意图

金属基体的预热处理和调质处理。高能喷丸处理结束后,将金属基体放入炉中均匀预热处理,温度控制在 $70 \sim 110^{\circ}\text{C}$,通过预热处理,可以去除金属基体中的水分,减小中间结合层的内应力,提高了金属基体与中间结合层的结合强度;预热处理结束后,再对金属基体表面用硅烷偶联剂溶液进行调质处理,能够改变金属基体表面的活性,增强化学结合力^[8]。

(2) 中间结合层的喷涂工艺。

中间结合层材料的预处理。中间结合层的材料预处理步骤如下:首先将材料按质量比进行称重配比,其中 PPS 质量分数为 60%, PES 质量分数为 35%,苯乙烯马来酸酐共聚物质量分数为 5%;然后将各材料分别放入真空烘干机中烘干;再用球型研磨机对所有材料进行共混,同时加入酒精;最后将材料加入真空烘干机中以去除酒精。

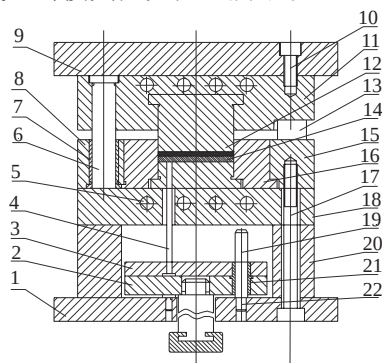
中间结合层材料的静电喷涂。采用静电喷涂装置对金属基体进行喷涂,设定电压为 $40 \sim 90 \text{ kV}$,电流强度为 $10 \sim 20 \mu\text{A}$,雾化压力为 $0.30 \sim 0.50 \text{ MPa}$,供粉压力为 $0.1 \sim 0.3 \text{ MPa}$,喷涂距离为 $120 \sim 300 \text{ mm}$,喷涂厚度约为 $50 \mu\text{m}$ ^[9]。金属基体静电喷涂后,形成的中间结合层厚度约为 1 mm 。

涂层的塑化工艺。粉末静电喷涂过程中,对涂层的塑化工艺控制是一个关键控制点,会直接影响粉末涂层的结合性能。由于 PPS 一般的加工温度为 $280 \sim 330^{\circ}\text{C}$,热交联的交联温度为 150

$\sim 350^{\circ}\text{C}$ ^[10]。所以塑化温度分别为 $250, 280, 310, 340^{\circ}\text{C}$,另外,塑化时间选取 60 min 。

(3) 压制成型模具的设计。

压制成型的模具图如图 5 所示。



1—动模座板;2—推板;3—固定板;4—推杆;5—加热棒;6,19—导柱;
7,21—导套;8,15—动模板;9—定模座板;10,17—内六角螺栓;
11—定模板;12—凸模;13—定位块;14—金属基体;16—型芯;
18—支撑板;20—垫块;22—限位钉

图5 模具结构图

(4) 塑料工作层材料处理。

将塑料工作层的材料分别放入真空烘干机中进行烘干,其中 PPS 质量分数为 45%, PES 质量分数为 25%, PTFE 质量分数为 20%, LCP 质量分数为 5%, MoS_2 质量分数为 5%。然后将表面层各材料加入酒精中,用球型研磨机对它们进行共混,再将共混后的材料放入真空烘干机中去除酒精,最后将混合后的材料放入模具中,用热烧结炉在温度 $200 \sim 220^{\circ}\text{C}$ 、压力 $5 \sim 6 \text{ MPa}$ 的条件下,压制 30 min 制成型胚。

(5) 压制成型工艺。

金属基复合材料的成型采用压制成型,模压模具示意图如图 5 所示,模具采用硅基脱模剂进行脱模,具体模压成型工艺流程图如图 6 所示。

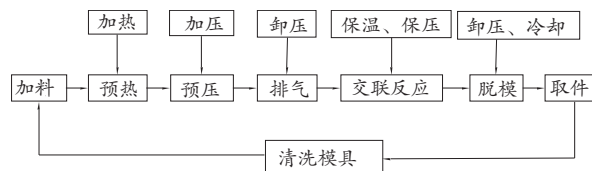


图6 金属基复合材料压制成型工艺流程图

将塑料工作层材料放到模具中,在 5 min 内将模具的温度升高到 85°C 进行预热处理。预热的同时对材料施加 5 MPa 的压力进行预压处理,在 10 min 内将温度升到 240°C 、压力达到 6 MPa ,且材料进入熔融状态之前进行卸压排气。排气动作连续 $2 \sim 3$ 次,每次持续时间为 5 s ,排气后继续加热

且重新加压^[11]。然后将成型温度、成型压力、成型时间分别设定到 330℃,8 MPa,40 min 进行交联固化反应,最后进行卸压脱模处理,冷却到 55℃进行脱模处理,成型的金属基复合材料制品图如图 7 所示。

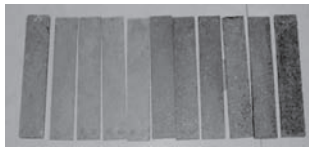


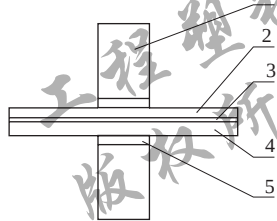
图 7 金属基复合材料制品

1.4 结合强度测试

采用垂直拉伸法测试结合强度,先对金属试柱和材料的两个端面进行打磨处理,再对金属试柱与工作层的接触面进行清洗,并放入烘干机中进行烘干处理,然后用环氧树脂对复合材料和金属试柱进行粘结,最后将粘结好的试样放置在室温环境下 24 h^[12]。通过测试得到拉力 F 的大小,运用公式 $\sigma=F/S$, σ 表示强度; F 表示拉力, S 表示面积。可以求出金属塑料自润滑复合材料结合强度的大小。结合强度性能测试与结构如图 8 所示。



(a)



(b)

1—金属试柱;2—塑料工作层;3—中间结合层;
4—金属基体;5—粘结层
a—测试实体图;b—测试结构图

图 8 结合强度性能测试与测试结构示意图

2 结果与讨论

2.1 工艺参数对结合强度的影响

通过压制成型和性能测试,得到了 4 个工艺参数对金属基复合材料结合强度的影响结果,如表 2 所示。

通过折线图将 4 个工艺参数在不同水平下的均值描绘出来,具体如图 9 所示。

结合表 2 和图 9,可以清楚地看出,中间结合层制备工艺参数对金属塑料自润滑复合材料结合强度的影响大小排序为:铸钢丸直径>喷丸时间>喷丸压力>塑化温度。其中影响材料结合强度最大的因素是铸钢丸直径,随着铸钢丸直径的增大,金属塑料复合材料结合强度先增大后变小,因为当铸钢丸

表 2 正交表及试验结果

试验号	因素				结合强度 / MPa
	A / mm	B / MPa	C / min	D / °C	
1	1	0.3	5	250	7.33
2	1	0.4	7	280	7.53
3	1	0.5	9	310	7.86
4	1	0.6	11	340	8.12
5	3	0.3	7	310	8.21
6	3	0.4	5	340	7.76
7	3	0.5	11	250	8.45
8	3	0.6	9	280	8.76
9	5	0.3	9	340	8.53
10	5	0.4	11	310	9.23
11	5	0.5	5	280	8.65
12	5	0.6	7	250	8.83
13	7	0.3	11	280	9.02
14	7	0.4	9	250	8.84
15	7	0.5	7	340	9.05
16	7	0.6	5	310	8.75

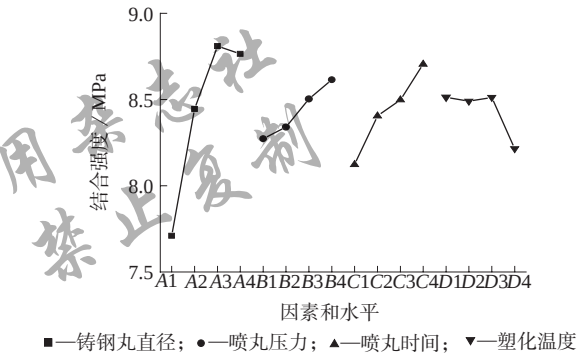


图 9 4 个工艺参数对结合强度的影响

直径逐渐增大时,表面纳米层逐渐增多,粗糙度逐渐增大,导致金属与塑料之间的接触面积增加,使得金属与塑料之间的物理结合力增加,但是当表面粗糙度超过一定值时,金属表面凹凸不平的程度加强,使得涂层附着不连续,同时金属基体表面弹坑的数量增多,在弹坑处很容易残留污物和空气而产生气泡,形成应力集中点,导致复合材料结合强度下降^[13]。其次是喷丸时间对复合材料的结合强度也有较大的影响,随着喷丸时间的增加,结合强度也随之增大,这是因为随着喷丸时间的增加,金属表面塑性变形厚度增大,晶粒不断发生细化,金属基体表层组织的晶体缺陷数量增多,表面原子的活性提高,因而能够促进高温熔融状态的塑料分子不断渗入,提高界面的化学结合力^[14]。

因此,对于结合强度性能指标,往往通过调整铸钢丸直径和喷丸时间来增强金属基复合材料的结合强度。通过极差分析得到了使金属基复合材料结合强度达到最大时的最佳因素水平组合为 A3B4C4D3,即:铸钢丸直径为 5 mm,喷丸压力为

0.6 MPa,喷丸时间为 11 min,塑化温度为 310℃。

2.2 工艺参数对结合强度的函数拟合

(1) 拟合函数的建立。

采用 Matlab 软件的 regress 函数对正交试验结果进行多项式拟合求解^[15],以 x_1 代表铸钢丸直径,以 x_2 代表喷丸压力, x_3 代表喷丸时间, x_4 代表塑化温度,并以 Y_1 代表复合材料的结合强度,从而得出工艺参数与结合强度之间的函数方程式,具体表示为:

$$Y_1 = a_1 + a_2x_1 + a_3x_2 + a_4x_3 + a_5x_4 + a_6x_1^2 + a_7x_2^2 + a_8x_3^2 + a_9x_4^2 + a_{10}x_1x_2 + a_{11}x_1x_3 + a_{12}x_1x_4 + a_{13}x_2x_3 + a_{14}x_2x_4 + a_{15}x_3x_4 \quad (1)$$

式中: $a_1 \sim a_{15}$ ——结合强度函数方程式的系数。

(2) 函数数值拟合分析。

将 Matlab 数值拟合的结果分别代入公式 (1) 中,得到了函数方程式:

$$Y_1 = -2.6931 + 0.2194x_1 - 0.5503x_3 + 0.0793x_4 - 0.0303x_1^2 - 2.4852x_2^2 - 0.0026x_3^2 - 0.0001x_4^2 + 0.01480x_1x_2 + 0.0149x_1x_3 + 0.0004x_1x_4 + 0.6367x_2x_3 - 0.0057x_2x_4 + 0.0012x_3x_4 \quad (2)$$

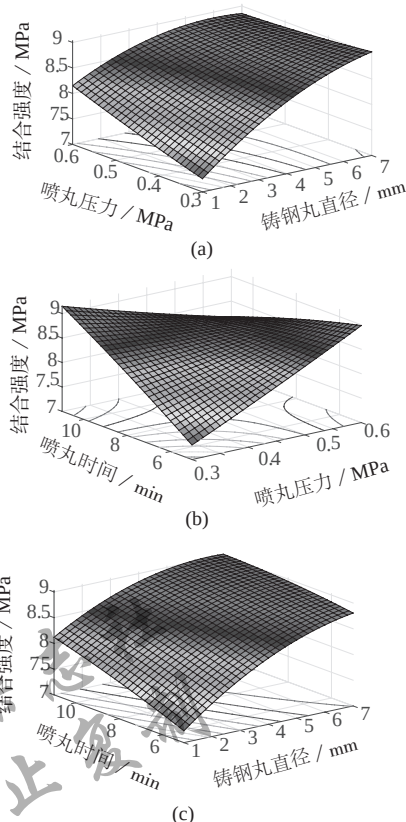
将测试数据与数值拟合结果进行误差对比分析,数值拟合结果与测试结果的吻合度很高,所以建立的拟合函数方程组具有一定的可靠性。

(3) 工艺参数之间交互作用对结合强度的影响分析。

由于单个工艺参数对质量指标的影响并不能反映参数间的交互作用所产生的影响,并且不同参数间的交互作用对不同质量指标的影响也有所不同。通过建立的铸钢丸直径、喷丸压力、喷丸时间、塑化温度和结合强度之间的拟合函数式,绘制了拟合曲线的三维图,并分析了几组工艺参数间的交互作用对复合材料的结合强度的影响规律。图 10 为工艺参数之间的交互作用对结合强度的影响。图 10a 为铸钢丸直径和喷丸压力对金属塑料复合材料结合强度的影响,图 10b 为喷丸压力和喷丸时间对金属塑料复合材料结合强度的影响,图 10c 为铸钢丸直径和喷丸时间对金属塑料复合材料结合强度的影响。其中,图 10a,图 10b,图 10c 中的等高线在左下方的部分比较密集,右上方的部分比较稀疏,这表明两因素的交互作用在不同条件下对结合强度的影响程度不同。

(4) 拟合函数优化求解。

根据正交试验设计的结果,对 4 个工艺参数



a—铸钢丸直径和喷丸压力; b—喷丸压力和喷丸时间;
c—铸钢丸直径和喷丸时间

图 10 工艺参数之间的交互作用对结合强度的影响

设置约束条件,其中铸钢丸直径范围为 3~7 mm,即 $3 \leq x_1 \leq 7$; 喷丸压力范围为 0.4~0.6 MPa,即 $0.4 \leq x_2 \leq 0.6$; 即喷丸时间范围为 7~11 min,即 $7 \leq x_3 \leq 11$; 塑化温度范围为 250~310℃,即 $250 \leq x_4 \leq 310$ 。并利用 Matlab 软件对结合强度函数进行优化求解,结果显示结合强度的最大值为 9.8613,此时的 x_1, x_2, x_3, x_4 的值分别为 5, 0.5, 11, 280,但是由于拟合出的结合强度最大值与 x_1, x_2, x_3, x_4 的值都为逼近值,存在一定的误差,而数值拟合中结合强度的最大误差为 -0.647%,因此按最大拟合误差计算出工艺参数组合,其中,工艺参数范围的端值 = 程序运行结果 / (1 ± 0.00647) ,得出铸钢丸直径为 4.96~5.04 mm,喷丸压力为 0.49~0.51 MPa,喷丸时间为 10.9~11.08 min,塑化温度为 278.2~282℃,在此工艺参数范围内成型的金属塑料自润滑复合材料的结合强度最佳,对所得的最佳工艺参数组合进行了实验验证,结果显示结合强度值为 9.57 MPa,与数值拟合的结果相比,误差仅为 3.04%,从而证明了数值拟合的可行性。

3 结论

(1) 先设计了正交试验和压制成型模具,然后进行压制成型和结合强度检测,运用数值分析研究了铸钢丸直径、喷丸压力、喷丸时间以及塑化温度 4 个工艺参数对结合强度的影响规律,确定了使结合强度达到最佳时的工艺参数组合,即:铸钢丸直径为 5 mm,喷丸压力为 0.6 MPa,喷丸时间为 11 min,塑化温度为 310℃

(2) 最后采用数值拟合方法拟合 4 个工艺参数与复合材料结合强度之间的函数方程式,分析了工艺参数之间的交互作用对结合强度的影响规律,并以最大结合强度为目标进行预测优化,结果表明:铸钢丸直径为 4.96~5.04 mm,喷丸压力为 0.49~0.51 MPa,喷丸时间为 10.9~11.08 min,塑化温度为 278.2~282℃,结合强度最佳,并对此进行实验验证,结果显示结合强度值为 9.57 MPa,与数值拟合的结果相比,误差仅为 3.04%,从而证明了数值拟合的可行性。

参考文献

- [1] 刘耀,张建波,李勇. MAX/金属基自润滑复合材料的研究现状及进展[J]. 材料导报,2015(z2):517-523.
Liu Yao, Zhang Jianbo, Li Yong. The Status and progress of max / metal matrix self-lubricating composites[J]. Materials Review, 2015(z2):517-523.
- [2] 赵鹏鹏,谭建波. 金属基复合材料的制备方法及发展现状[J]. 河北工业科技,2017,34(3):216-221.
Zhao Pengpeng, Tan Jianbo. Preparation methods and development status of metal matrix composites[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2017, 34(3):216-221.
- [3] Fan Genlian, Xu Run, Tan Zhanqiu, et al. Development of flake powder metallurgy in fabricating metal matrix composites:A review[J]. Journal of Metals, 2014, 27(5):806-815.
- [4] Meredith C S, Khan A S. The microstructural evolution and thermo-mechanical behavior of UFG Ti processed via equal channel angular pressing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219(8):257-270.
- [5] 谢良波. 25Cr₂Ni₄W 和 30CrNi₃ 合金钢高温锰系磷化处理技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
Xie Liangbo. Study on high temperature manganese phosphating treatment technology of 25Cr₂Ni₄W and 30CrNi₃ alloy steel[D]. Chongqing:Chongqing University, 2010.
- [6] Andrew V, Sara T, Klaus K, et al. Orthogonal experimental design of titanium dioxide—poly(methyl methacrylate) electrospun nanocomposite membranes for photocatalytic applications[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 4(3):3151-3158.
- [7] 李进. PES/金属复合自润滑材料的制备及其摩擦磨损性能研究[D]. 镇江:江苏大学,2013.
Li Jin. Preparation and tribological properties of PES / metal self-lubricating composite materials[D]. Zhenjiang:Jiangsu University, 2013.
- [8] 程帅,钱善华,吴越. 硅烷改性椰壳粉对热塑性弹性体表面性能的影响及应用[J]. 表面技术,2018(6):138-144.
Cheng Shuai, Qian Shanhua, Wu Yue. Effect of silane-modified coconut shell powder on surface properties of thermoplastic elastomers and its application[J]. Surface Technology, 2018(6):138-144.
- [9] 王斌,崔沛,戴亚春. 金属塑料复合材料压制烧结成型及性能[J]. 工程塑料应用,2018,46(7):68-73.
Wang Bin, Cui Pei, Dai Yachun. Press-sintering forming and properties of metal-plastics composites[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(7):68-73.
- [10] Faria M C M D, Appezzato F C, Costa M L, et al. The effect of the ocean water immersion and UV ageing on the dynamic mechanical properties of the PPS/glass fiber composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2011, 30(20):1729-1737.
- [11] Han Y, Li J, Huang G, et al. Effect of ECAP numbers on microstructure and properties of titanium matrix composite[J]. Materials & Design, 2015, 75:113-119.
- [12] 简小刚,张允华. 晶向对金刚石涂层膜基界面结合强度的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2014(5):1-5.
Jian Xiaogang, Zhang Yunhua. Influence of crystal orientation on the bond strength of diamond coating film-based interface[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2014(5):1-5.
- [13] 王翔. 不同基底材料与饰面瓷结合界面的实验研究[D]. 大连:大连医科大学,2012.
Wang Xiang. Experimental study on the interface between different base materials and veneer porcelain[D]. Dalian:Dalian Medical University, 2012.
- [14] 田峰,杨辉. 40Cr 钢表面高能喷丸纳米化及其耐磨性能[J]. 表面技术,2013,42(5):52-54.
Tian Feng, Yang Hui. Nano-energy shot peening nanometering and wear resistance of 40Cr steel[J]. Surface Technology, 2013, 42(5):52-54.
- [15] Santos J E, Gauzellino P M. Numerical Simulation in Applied Geophysics[M]. Switzerland:Springer International Publishing, 2016.