

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.07.013

金属塑料复合材料压制烧结成型及性能

王斌¹, 崔沛², 戴亚春², 骆志高²

(1. 盐城工业职业技术学院, 江苏盐城 224005; 2. 江苏大学机械工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 根据金属塑料复合材料结构特点和性能要求, 设计了压制烧结成型模具的整体结构, 并设计了正交试验方案, 然后进行制品的压制烧结成型实验, 通过对成型温度、压力、时间以及升温速率四个工艺参数的控制, 制备了16组不同的结合强度、摩擦系数以及耐磨性的金属塑料复合材料, 并通过拉伸试验、摩擦磨损试验, 研究了四个成型工艺参数对制品三个性能评价指标的影响规律, 确定了使三个性能评价指标分别达到最佳时的三组工艺参数组合。最后运用模糊数学综合评价方法将三个性能评价目标转化为单一目标, 并进行优化研究。结果表明, 当成型温度为330℃、成型压力为9 MPa、成型时间为60 min、升温速率为6℃/min时, 制品的综合性能最高。

关键词: 金属塑料复合材料; 压制烧结; 工艺优化; 模糊数学综合评价

中图分类号: TQ325.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)07-0068-06

Press-sintering Forming and Properties of Metal Plastics Composites

Wang Bin¹, Cui Pei², Dai Yachun², Luo Zhigao²

(1. Yancheng Industrial Career Technical College, Yancheng 224005, China;

2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract : According to the structural characteristics and performance requirements of metal plastics composites, the overall structure of the press-sintering mold was designed, and an orthogonal test scheme was designed. Then the press-sintering molding experiment of the product was conducted, and the molding temperature, pressure, time, and heating rate were determined. With the control of the process parameters, 16 sets of metal plastics composites with different bond strength, friction coefficient, and wear resistance were prepared. Through the tensile test and friction-wear test, three performance evaluations under four molding process parameters were studied. Three sets of process parameters were determined when the three performance evaluation indexes were optimized. At last, the fuzzy mathematics comprehensive evaluation method was used to transform the three performance evaluation goals into a single goal and carry out optimization research. The results show that when the molding temperature is 330℃, molding pressure is 9 MPa, molding time is 60 min, and heating rate is 6℃/min, the overall performance of the product is the highest.

Keywords : metal plastics composite ; press-sintering ; process optimization ; comprehensive evaluation of fuzzy mathematics

随着时代的快速发展, 全世界对于高效、节能以及环保的高科技产品的需求日益增长^[1]。据统计, 全世界工业能源的1/3由于摩擦而损耗掉, 大约有80%的机器零部件由于磨损而失效^[2]。金属塑料复合材料是由润滑性的塑料与金属基体复合而成, 该复合材料不但具有传统金属板材的高强度, 还具有自润滑、耐磨损、高承载、环保、抗冲击以及质量轻等优点, 因而广泛应用于航空航天、国防军工、矿山、交

通、环保、化工、船舶、食品、制药等工业领域^[3]。对于提高复合材料结合强度、摩擦磨损性能方面, 国内外学者的研究主要集中在材料制备与改变材料含量方面, 在成型工艺研究方面也只是单独对某个工艺参数进行研究, 而综合研究成型压力、成型温度以及成型时间等多个工艺参数来提高复合材料结合强度、摩擦磨损性能的较少^[4]。

笔者的研究目的是成型一种结合强度高、摩擦

基金项目: 镇江市产学研项目 (1721110159)

通讯作者: 王斌, 副教授, 主要研究方向为机械设计制造 E-mail: wb680318@126.com

收稿日期: 2018-04-25

引用格式: 王斌, 崔沛, 戴亚春, 等. 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, et al. Press-sintering forming and properties of metal plastics composites[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(7):68-73.

系数低以及耐磨性高的金属塑料复合材料,通过对材料制备工艺进行研究,从而找到结合性能与摩擦磨损性能更加优越的成型工艺。由于塑料工作层材料需要具有摩擦系数低、耐磨性高等性能,因此笔者采用的塑料工作层材料以塑料中摩擦系数最低的聚四氟乙烯 (PTFE) 材料为主,以聚苯硫醚 (PPS) 与聚醚砜 (PESU) 材料为辅,并添加少量的添加剂二硫化钼 (MoS_2)。设计的中间结合层主要起到承上启下的连接作用,这是由于塑料工作层中的材料尤其是 PTFE 与金属基体直接连接时的结合强度低,因此采用结合强度高的 PPS 和 PESU 及苯乙烯马来酸酐共聚物混合材料作为中间结合层材料,并以 45[#] 钢板作为金属基体,设计正交试验方案,进行制品的压制烧结成型实验,最终成型一种结合强度高、摩擦系数低以及耐磨性高的金属塑料复合材料板材。

1 实验部分

1.1 原材料

PTFE: 粒度 10 μm , 密度 2.15 g/cm^3 , 浙江衢州万能达科技有限公司;

PESU: 粒度 30 μm , 密度 1.2 g/cm^3 , 东莞市泽荣塑胶工程有限公司;

PPS: 粒度 30 μm , 密度 1.5 g/cm^3 , 东莞市泽荣塑胶工程有限公司;

MoS_2 : 粒度 30 μm , 密度 4.8 g/cm^3 , 市售;

硅烷偶联剂: 粒度 30 μm , 密度 4.8 g/cm^3 , 南京向前化工有限公司;

苯乙烯马来酸酐共聚物: 马来酸酐含量 10%, 广州喜嘉化工有限公司;

45[#] 钢金属基体: 尺寸 120 mm $\times$ 29.5 mm $\times$ 3 mm, 江苏锡钢集团有限公司。

1.2 仪器与设备

球型研磨机: QM-3SP4 型, 上海书培实验设备有限公司;

超声波清洗机: FRQ-1006HT 型, 杭州法兰特超声波科技有限公司;

真空烘干机: DZX-6050B 型, 上海羽通仪器仪表厂;

热压烧结炉: SF500 型, 郑州金海威科技实业有限公司;

喷砂机: BD-1312-12A 型, 苏州工业园区百通喷砂机械有限公司;

多功能摩擦磨损测试仪: UMT-2 型, 美国 CETR 公司;

静电喷涂装置: WL-2 型, 上海浦东伟隆静电喷涂设备厂;

微机控制电子万能试验机: UTM4140 型, 济南万测电气设备有限公司;

压制烧结成型模具: 自制。

1.3 试样制备

将成型温度 (A)、成型压力 (B)、成型时间 (C) 以及升温速率 (D) 四个工艺参数作为试验因素, 并分析实验的材料性质、工艺以及设备等多个试验因素, 忽略了工艺参数之间的交互作用对成型结果的影响, 确定了试验过程中各个工艺参数的水平值^[5]。采用均衡抽样方法建立了正交试验表, 采用四因素四水平试验^[6]。其中因素与水平设置如表 1 所示。

表 1 工艺参数的因素与水平设置

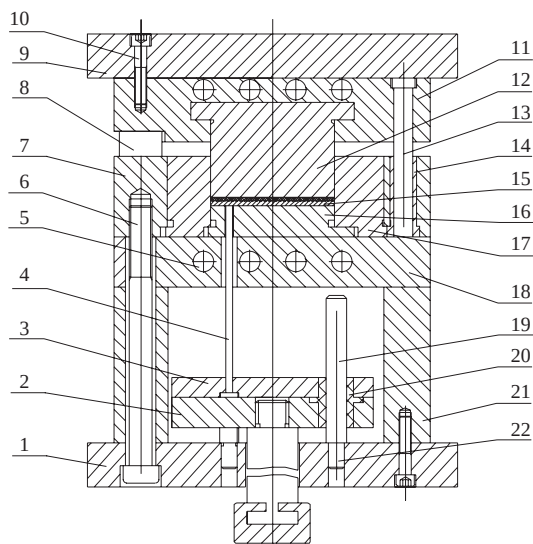
水平	A/℃	B/MPa	C/min	D/(℃·min ⁻¹)
1	310	7	40	6
2	320	8	50	9
3	330	9	60	12
4	340	10	70	15

为了简化模具结构, 采用倒装的方法进行压制烧结成型, 并在模具设计过程中重点考虑了模具热胀冷缩、模具加热方式、凹凸模的分型以及推出机构等方面对制品综合性能的影响。在设计模具加热系统时, 模具内八个加热棒对称布置、均匀且型号一致, 从而保证了模具温度变化速率与模具材料热胀冷缩的对称^[7]。采用该加热方法与传统的将模具放置于炉内加热的方法相比, 具有操作简单、温度控制准确、占用体积小、效率高以及节省费用等优点。模具结构示意图如图 1 所示。

金属塑料复合材料成型过程可分为四个步骤, 分别为塑料工作层材料处理、金属基体表面预处理、中间结合层的喷涂以及制品压制烧结成型。

(1) 塑料工作层材料处理。首先将塑料工作层材料分别放入真空烘干箱进行烘干处理; 按照 PTFE 55%, PPS 25%, PESU 15%, MoS_2 5% 称重, 并在高速搅拌机内进行混合处理; 然后再次放入烘干机中烘干处理; 最后压制成型胚。在加料过程中需要保证一次完成, 否则可能在界面上出现开裂现象, 在压制过程中需要用刮板刮平, 使塑料工作层材料均匀分布在型腔中, 然后缓慢加压, 在升压过程中需要进行二次卸压, 以便及时排空材料中的空气, 压制成型后将塑料工作层型胚放置 24 h 左右, 以便于消除材料内应力^[8]。

(2) 金属基体表面预处理。对金属基体表面预



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

图1 模具结构示意图

处理主要是为了保证材料成型后的结合强度与稳定的摩擦磨损性能,因此在成型前需要对45#钢基体板材进行表面处理,使金属基体表面具有一定的粗糙度与洁净度。金属基体表面预处理的步骤为:金属基体清洁处理→表面喷砂处理→预热处理→表面调质处理→备用^[9]。

(3) 中间结合层的喷涂。首先将材料进行烘干处理;其次按 PPS 63%, PESU 35%, 苯乙烯马来酸酐共聚物 2% 称重,混合,烘干;最后放入静电喷涂机进行喷涂处理。通过对喷涂过程中的电流、电压、流速压力以及雾化压力等工艺参数进行控制^[10],设置的喷涂工艺参数具体如下:喷枪口至金属基体距离为 100 mm,供粉量为 200 g/min,静电电压为 50 kV,雾化压力为 0.3 MPa,流速压力为 0.4 MPa,静电电流为 15 μ A,供粉桶流化压力为 0.1 MPa。通过喷涂处理,最终在金属基体表面覆盖一层厚度约为 1 mm 的中间结合层材料。

(4) 制品压制烧结成型。将模具安装在热压烧结炉上,将材料放置到模具中,在 20 min 内将模具的温度升高到 80℃进行预热处理;预热处理的同时对材料施加 50 MPa 的压力进行预压处理,在预压过程中需要进行二次卸压,然后重新加热加压;在温度达到 250℃、压力达到 6 MPa 前进行排气处理,

排气后重新加热加压,通过排气处理可以将材料中的一些水分、挥发物变成气体以及化学反应的副产物等蒸发出来;按照正交设计方案所设定的成型工艺参数,将成型温度、成型压力升高至设定值,并保温保压到设定的时间,制品在此过程中发生了交联固化反应;最后进行卸压脱模处理,将成型好的金属塑料复合材料随炉冷却到 50℃脱模,制得的金属塑料复合材料制品如图 2 所示。

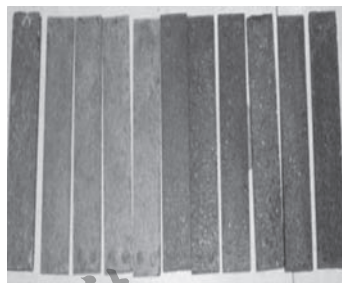
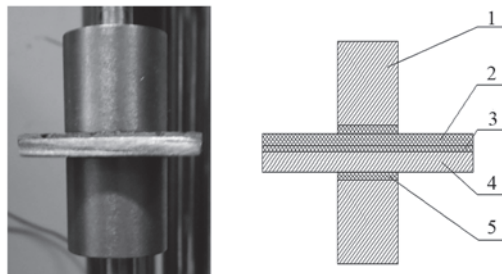


图2 金属塑料复合材料制品

1.4 性能测试

通过垂直拉伸法测量制品的结合强度,在将制品上下两端与金属试柱分别粘接时,必须保持两个金属试柱轴心在同一条直线上,以保证在拉伸时拉力的方向同心,所以实验选择大小形状相同的两个试柱进行实验;另外在拉伸时需要保证拉力的方向垂直于材料的结合界面,以避免拉伸时在材料界面产生剪切应力,所以采用垂直拉伸机进行试验。根据垂直拉伸试验的要求,选用两个大小形状相同的钢试柱,其直径为 25 mm,高度为 100 mm。首先采用砂纸对试柱与材料的两端作打磨处理,其次对试柱与材料接触面进行清洗处理,并放入烘干箱中进行烘干处理,然后对制品与两个钢试柱进行粘结处理,最后将粘接好的试样放置在室温环境下 24 h。通过测试得到拉力的大小,求出制品的结合强度。结合强度性能测试与结构如图 3 所示。



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

图3 结合强度性能测试与测试结构示意图

在利用多功能摩擦磨损测试仪测试制品摩擦磨损性能时,通过对同一试样多处测试、在摩擦磨损状态稳定的情况下取平均值的方法获得准确率高的数据。首先用 $13\ \mu\text{m}$ (1000 目) 砂纸对塑料工作层表面作均匀打磨处理,其次用丙酮溶液对打磨后的表面进行清洗处理,并将制品放入烘干箱中进行烘干处理,最后选用球状对摩件在干燥条件下进行摩擦磨损实验,其中施加的载荷为 $10\ \text{N}$,旋转驱动电机的转速为 $200\ \text{r/min}$,摩擦磨损时间为 $60\ \text{min}$ 。在摩擦磨损性能测试结束后,将试样放置在室温环境下 $24\ \text{h}$ 再进行磨痕的测量与磨损量的计算。采用电子天平称量法来计算试样的磨损量。由于试样磨损距离的测量误差较大,笔者以相同时间、载荷以及速度下的磨损量大小作为衡量试样耐磨性能的评价指标。

2 结果与分析

2.1 工艺参数对制品性能评价指标的影响

通过制品成型试验与相关性能测试,得到了所选取的四个工艺参数对制品的三个性能评价指标的影响结果,如表 2 所示。

表 2 正交试验结果与综合评分结果

试验号	A/ ℃	B/ MPa	C/ min	D/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)	结合强度/ MPa	摩擦系数	磨损量/ mg	综合评分
1	310	7	40	6	7.23	0.125	13.5	37.246 69
2	310	8	50	9	7.94	0.129	11.0	42.491 29
3	310	9	60	12	8.06	0.130	9.5	45.027 31
4	310	10	70	15	7.13	0.135	10.0	39.597 41
5	320	7	50	12	7.75	0.132	10.3	42.165 82
6	320	8	40	15	8.33	0.131	10.2	44.689 73
7	320	9	70	6	8.55	0.117	10.4	48.546 18
8	320	10	60	9	8.02	0.113	9.0	49.877 65
9	330	7	60	15	8.45	0.128	9.4	47.056 12
10	330	8	70	12	8.96	0.123	8.3	51.738 51
11	330	9	40	9	9.28	0.115	8.6	54.293 18
12	330	10	50	6	8.87	0.104	8.9	55.436 82
13	340	7	70	9	7.76	0.132	10.1	42.513 80
14	340	8	60	6	8.75	0.113	10.0	50.893 69
15	340	9	50	15	8.67	0.125	8.7	49.645 18
16	340	10	40	12	7.95	0.128	9.0	45.871 58

对表 2 结果中的结合强度质量评价指标作极差分析,得到了四个成型工艺参数对结合强度质量评价指标的影响规律,如图 4 所示。

从图 4 可以清楚地看出,压制烧结成型工艺参数对制品结合强度的影响大小为:成型温度 > 成型压力 > 成型时间 > 升温速率。因此,对于制品的结合强度,通常以调整制品的成型温度与成型压力来达到增强制品结合强度的目的。通过极差分析可

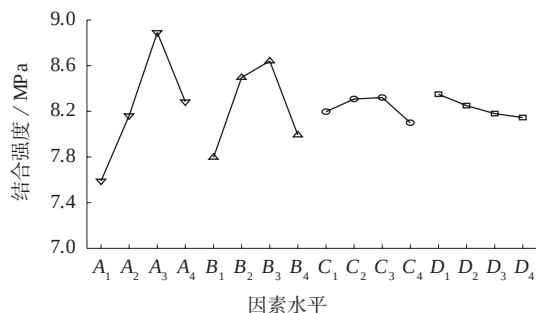


图 4 四个工艺参数对制品结合强度的影响

以得到使金属塑料自润滑复合材料结合强度达到最大时的因素水平组合为 $A_3B_3C_3D_1$,即成型温度为 $330\ ^{\circ}\text{C}$,成型压力为 $9\ \text{MPa}$,成型时间为 $60\ \text{min}$,升温速率为 $6\ ^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

对摩擦系数质量评价指标作极差分析,得到了四个成型工艺参数对摩擦系数质量评价指标的影响规律,如图 5 所示。从图 5 可清楚看出,压制烧结成型工艺参数对制品摩擦系数的影响大小为:升温速率 > 成型温度 > 成型压力 > 成型时间。因此,对于制品的摩擦系数,通常以调整升温速率与成型温度的方法来达到降低制品摩擦系数的目的。通过极差分析可得到使金属塑料复合材料摩擦系数最小的因素水平组合为 $A_3B_4C_3D_1$,即成型温度为 $330\ ^{\circ}\text{C}$,成型压力为 $10\ \text{MPa}$,成型时间为 $60\ \text{min}$,升温速率为 $6\ ^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

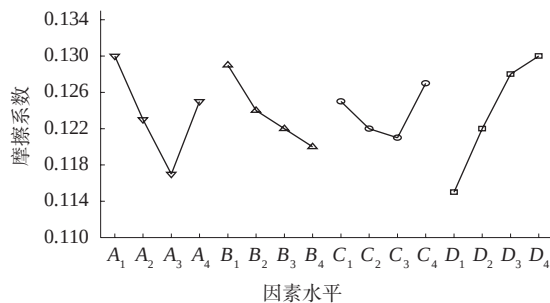


图 5 四个工艺参数对制品摩擦系数的影响

对磨损量评价指标作极差分析,得到了四个成型工艺参数对磨损量评价指标的影响规律,如图 6 所示。从图 6 可以清楚地看出,压制烧结成型工艺参数对制品磨损量的影响大小排序为:成型温度 > 成型压力 > 升温速率 > 成型时间。因此,对于制品的耐磨性,通常以调整成型温度与成型压力来提高。通过极差分析可以得到使金属塑料复合材料磨损量最小时的因素水平组合为 $A_3B_4C_3D_3$,即成型温度为 $330\ ^{\circ}\text{C}$,成型压力为 $10\ \text{MPa}$,成型时间为 $60\ \text{min}$,升温速率为 $12\ ^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

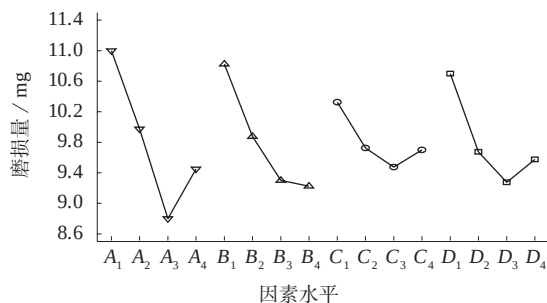


图6 四个工艺参数对制品磨损量的影响

2.2 制品质量多目标模糊数学综合评价

通过以上分析可知,所研究的四个压制烧结成型工艺参数对制品的三个质量评价指标的影响程度各有侧重,这是由于正交试验与极差分析方法对于单一目标的优化效果比较明显,但是对于多目标的优化就比较困难,并具有一定的模糊性,因此可以将多个目标经过模糊数学综合评价处理转化为单一目标,再进行工艺参数的优化分析^[11]。对于多个目标转化为单一目标,通过采用权值分配的方法来分析各个工艺参数对制品质量的影响程度,并从制品的质量、性能以及运用等方面综合考虑^[12],设置结合强度、摩擦系数以及耐磨性3个性能评价指标的权值都为100/3,则综合评分值的计算公式表示为:

$$Y_j = b_1 Y_{j1} + b_2 Y_{j2} + b_3 Y_{j3} = \sum_{i=1}^3 b_i Y_{ji} \quad (1)$$

式中: j ——试验号;

b_1, b_2, b_3 ——结合强度、摩擦系数、耐磨性的权值;

Y_j ——第 j 个试验号的综合评分值。

在运用模糊综合评价方法进行多目标优化时,需要运用到模糊数学理论,在运用该理论进行优化时,有S形、三角形以及梯形等多个类型的隶属度函数可供选用,而其中S形函数的单调性较好,所得到的隶属度值较高,从而可以使制品综合评价的结果趋于合理^[13]。由于结合强度、摩擦系数以及耐磨性三个性能评价指标的量纲不同,通过采用S形隶属度函数可以将三个性能评价指标值映射到[0, 1]区间内^[14],其中该函数的计算公式表示为:

$$Y_{ji} = \frac{1}{1 + e^{-a(X_{ji}-c)}} \quad (2)$$

式中: i ——制品性能评价指标,其中结合强度、摩擦系数以及耐磨性指标的分别为1,2,3;

X_{ji}, Y_{ji} ——第 i 个性能评价指标对应的第 j 个试验号的结果、映射^[15]。

通过对三个性能评价指标的S形隶属度函数中的参数进行分析与计算,确定结合强度、摩擦系数以及耐磨性函数中的参数(a, c)分别取值为(0.465, 7.13), (-32.26, 0.104), (-0.1923, 8.3),并根据公式(1)与(2)计算出制品性能的综合评分结果,具体结果如表2所示。对表2结果中的制品质量综合评价指标作极差分析,得到了四个成型工艺参数对综合评价指标的影响规律,如图7所示。

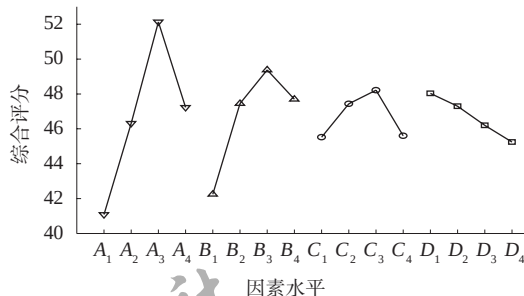


图7 四个工艺参数对制品综合评分的影响

从图7可以得到各工艺参数对制品质量综合评分的影响大小为:成型温度>成型压力>升温速率>成型时间,因此,对于质量综合评价指标,往往通过调整成型温度与成型压力来提高制品综合性能。通过极差分析可得到使金属塑料复合材料质量综合评分最大时的因素水平组合为 $A_3B_3C_3D_1$,即成型温度为330℃,成型压力为9 MPa,成型时间为60 min,升温速率为6℃/min。表1中没有该试验方案,通过实验对该组合方案进行验证,得出结合强度为9.35 MPa,摩擦系数为0.106,磨损量为8.4 mg,将结果代入公式(1)与(2)计算出综合评分为57.21433。通过与表2中的制品综合评分进行比较,发现该组合方案的综合评分数值都高于表2中的综合评分数值,所以可以得出该工艺参数组合方案为所设定的参数值中的最优方案。

3 结论

(1) 设计了成型模具与正交试验方案,并进行压制烧结成型试验,制得了16组不同的结合强度、摩擦系数以及耐磨性的金属塑料复合材料,通过极差分析,得到了四个工艺参数对制品三个性能评价指标的影响规律,并确定了使三个性能评价指标分别达到最佳时的三组工艺参数组合。

(2) 通过模糊数学综合评价方法将制品的三个性能评价目标转化为单一目标,并进行了优化研究。结果表明,当成型温度为330℃,成型压力为9 MPa,成型时间为60 min,升温速率为6℃/min,制品的综合性能最高。

参考文献

- [1] 肖伯律,刘振宇,张星星,等.面向未来应用的金属基复合材料[J]. 中国材料进展,2016,35(9):666-673,701.
Xiao Bolyu, Liu Zhenyu, Zhang Xingxing, et al. Metal matrix composites for future applications[J]. Progress in China Materials, 2016,35(9):666-673,701.
- [2] Fan G, Xu R, Tan Z, et al. Development of flake powder metallurgy in fabricating metal matrix composites: A review[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 27(5):806-815.
- [3] 戴亚春,崔沛,骆志高,等.金属基复合材料制备工艺及结合力的研究[J]. 工程塑料应用,2016,44(10):67-71.
Dai Yachun, Cui Pei, Luo Zhigao, et al. Study on preparation process and bonding force of metal matrix composites[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(10):67-71.
- [4] Dosta S, Bolelli G, Candeli A, et al. Plastic deformation phenomena during cold spray impact of WC-Co particles onto metal substrates[J]. Acta Materialia, 2017, 124:173-181.
- [5] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等.正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理,2010,27(9):52-55.
Liu Ruijiang, Zhang Yewang, Wen Chongwei, et al. Research on orthogonal experimental design and analysis methods[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9):52-55.
- [6] Vild A, Teixeira S, Kühn 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] 张社奇.大孔环形精冲件圆度研究与控制[J]. 模具工业,2010,36(6):25-29.
Zhang Sheqi. Study and control of roundness of large hole circular fine blanking parts[J]. Die & Mould Industry, 2010, 36(6):25-29.
- [8] 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. High-temperature manganese phosphating treatment technology of 25Cr2Ni4W and 30CrNi3 alloy steel[D]. Chongqing:Chongqing University, 2010.
- [9] Vaidya U K, Ochoa-Putman C. Mechanisms of interfacial adhesion in metal polymer composites: Effect of chemical treatment[J]. Composites: Part A, 2011, 42:906-915.
- [10] 夏露,张友寿,黄晋.金属表面超高分子量聚乙烯涂层的制备[J]. 机械工程材料,2006,30(4):41-43.
Xia Lu, Zhang Youshou, Huang Jin. Preparation of ultra high molecular weight polyethylene coatings on metal surfaces[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(4):41-43.
- [11] Zhang W, Lu J, Zhang Y. Comprehensive evaluation index system of low carbon road transport based on fuzzy evaluation method[J]. Procedia Engineering, 2016, 137:659-668.
- [12] 段宝彬.综合评价的模糊数学方法研究[D]. 南京:河海大学,2005.
Duan Baobin. Research on fuzzy mathematics method for comprehensive evaluation[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [13] Li X, Chen D S. Comprehensive evaluation of network information security based on dynamic fuzzy mathematics[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 701-702:167-171.
- [14] 丁清国,刘泓滨.基于 CAE 和 DOE 的注塑成型工艺多目标优化研究[J]. 塑料工业,2012,40(7):54-58.
Ding Qingguo, Liu Hongbin. Multi-objective optimization of injection molding process based on CAE and DOE[J]. Plastics Industry, 2012, 40(7):54-58.
- [15] Yang X H, Zhang T. Port coastline value assessment on the basis of fuzzy mathematics comprehensive evaluation method[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 204-208:2293-2297.
- [8] Tiwari S, Bijwe J, Panier S. Adhesive wear performance of polyetherimide composites with plasma treated carbon fabric[J]. Tribology International, 2011, 44(7-8):782-788.
- [9] Aleksendric D, Senatore A. Optimization of manufacturing process effects on brake friction material wear[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(22):9-15.
- [10] 文国富,蓝奇,王秀飞,等.混杂短纤维增强无石棉摩擦材料的制备及摩擦磨损性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2012,17(5):675-680.
Wen Guofu, Lan Qi, Wang Xiufei, et al. Fabrication and wear properties of hybrid short fibers reinforced asbestos-free friction material[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2012, 17(5):675-680.
- [11] Österle W, Prietzel C, Kloss H, et al. On the role of copper in brake friction materials[J]. Tribology International, 2010, 43(12):2317-2326.
- [12] Hu C, Bai M, Lv J, et al. Molecular dynamics investigation of the effect of copper nanoparticle on the solid contact between friction surfaces[J]. Applied Surface Science, 2014, 321:302-309.
- [13] 姚为,吴其胜,侯贵华,等.超细 γ - Al_2O_3 / 铜纤维对树脂基摩擦材料摩擦性能的影响[J]. 材料导报,2010,24(18):57-60.
Yao Wei, Wu Qisheng, Hou Guihua, et al. Influence of ultrafine γ - Al_2O_3 / copper fiber content on tribological properties of resin based friction materials[J]. Materials Review, 2010, 24(18):57-60.
- [14] Kumar M, Boidin X, Desplanques Y, et al. Influence of various metallic fillers in friction materials on hot-spot appearance during stop braking[J]. Wear, 2011, 270(5):371-381.
- [15] 王玥,周元康,聂华伟.增强组分对半金属摩擦材料摩擦性能的影响[J]. 非金属矿,2015(5):81-84.
Wang Yue, Zhou Yuankang, Nie Huawei. Tribological performance of semimetal friction material with different functional constituents[J]. Non-Metallic Mines, 2015(5):81-84.

(上接第 67 页)