

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.07.012

复合纤维低树脂基摩擦材料热压成型工艺

钟厉,周富佳,罗明宝

(重庆交通大学机电与车辆工程学院,重庆 400074)

摘要: 针对摩擦材料配料中纤维组分增多、酚醛树脂含量减少,导致基体粘结强度降低的问题,以复合纤维低树脂基摩擦材料为研究对象,利用洛氏硬度计、定速摩擦试验机和扫描电子显微镜等检测设备,研究热压成型工艺对复合纤维低树脂基摩擦材料综合性能的影响,并运用极差分析法确定主要影响因素。结果表明,成型压力对硬度影响最大,热压温度对摩擦系数影响最大,压制时间对剪切强度影响最大,热处理时间对磨损率影响最大。优化工艺参数可以改善复合纤维低树脂基摩擦材料的力学性能和摩擦磨损性能,改变其磨损机制。

关键词: 复合纤维;摩擦材料;热压成型;摩擦磨损

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)07-0062-06

Hot-press Molding Process of Composite Fiber Low Resin-based Friction Materials

Zhong Li, Zhou Fujia, Luo Mingbao

(School of Mechatronic & Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract : Aiming at the problem of friction materials that the increase of fiber components and the decrease of phenolic resin resulted in the decrease of matrix bond strength, the composite fiber low resin-based friction materials were selected as research object. The rockwell hardness tester, the speed friction tester and SEM were used to study the influence of hot-press molding process on the comprehensive properties of the composite fiber low resin-based friction materials, and the main influence factors were determined by the method of range analysis. The results show that the molding pressure has the greatest influence on the hardness, the hot-press temperature has the greatest influence on the friction coefficient, the pressing time has the greatest influence on the shear strength, and the heat treatment time has the greatest influence on the wear rate. The optimization of technological parameters can improve the mechanical properties and friction and wear properties of composite fiber low resin-based friction materials, and the wear mechanism was changed.

Keywords : composite fiber ; friction material ; hot-press molding ; friction and wear

随着汽车制造技术的进步,对摩擦材料的综合性能要求也越来越高,不仅要具有良好的力学性能、适宜的摩擦系数、较好的耐磨性,还要缩短制动距离,保证制动过程平稳舒适,无噪音^[1-3]。摩擦材料作为机械制动应用最为广泛的复合材料,其性能受诸多因素影响。钟厉等^[4-5]研究了复合矿物纤维、酚醛树脂含量对摩擦材料磨损机制的影响;吴耀庆等^[6]发现摩擦材料的金属纤维垂向分布比平行无规分布的摩擦系数更稳定,耐磨性能更好;李辉

等^[7]对比研究树脂传递和热压两种成型工艺对碳纤维树脂基摩擦材料磨损机制的影响,发现前者主要发生黏着磨损和疲劳磨损,后者主要发生磨粒磨损;S. Tiwari等^[8]研究了碳纤维复合摩擦材料在力学性能和摩擦磨损性能最佳组合时的工艺参数;D. Aleksendric等^[9]发现成型压力是影响摩擦材料磨损率的主要因素。

研究表明,摩擦材料性能不仅与材料、结构设计有关,还与成型工艺有关。热压成型是利用粘结

基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究(重点)项目(cstc2015jcyjBX0140)

通讯作者: 钟厉,博士,教授,研究方向为材料表面工程及摩擦材料 E-mail: 2441985314@qq.com

收稿日期: 2018-05-04

引用格式: 钟厉,周富佳,罗明宝. 复合纤维低树脂基摩擦材料热压成型工艺[J]. 工程塑料应用,2018,46(7):62-67,73.

Zhong Li, Zhou Fujia, Luo Mingbao. Hot-press molding process of composite fiber low resin-based friction materials[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(7):62-67, 73.

剂在高温、高压下发生黏流的特性,在一定压制时间和保压温度条件下与增强纤维、填料的界面发生粘结,形成交联结构的工艺方法^[10]。增强纤维是摩擦材料的重要组成成分,能够提高摩擦材料的力学性能。芳纶纤维的比表面积大,易和其它成分形成稳定结构,但开散性差。矿物纤维具有良好的吸声效果,但比热容小,容易引起材料开裂。铜纤维具有良好的塑性和导热性,易在摩擦面形成铜转移膜,减缓摩擦材料热衰退,但铜元素对生物体有毒害作用,摩擦材料中应限制其含量。因此,复合纤维摩擦材料的综合性能更能满足市场需求^[11-12]。此外,酚醛树脂具有高细度、低温粘结性和成型工艺好的特点,但酚醛树脂在高温状态下易热分解,减少酚醛树脂含量成为其主要解决方法^[13]。据报道,低树脂基摩擦材料中酚醛树脂含量已可降低至 8%~14%^[14]。目前,学者对摩擦材料的研究主要集中在配方优化方面,成型工艺对摩擦材料性能影响的研究报道较少。因此,笔者通过对复合纤维低树脂基摩擦材料热压成型工艺的研究,为高性能摩擦材料的研发和工艺参数优化提供理论依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

酚醛树脂: PF6530A, 济南圣泉海沃斯有限公司;

丁腈胶粉: 粒度为 178 μm (80 目), 北京宇达行工贸有限公司;

芳纶纤维: Twaron, 日本帝人株式会社;

矿物纤维: RB250, 荷兰 Lapinus 纤维公司;

铜纤维: 直径 0.1 mm, 长度 3~5 mm, 常州越洋摩擦材料有限公司;

焦炭: 粒度为 149 μm (100 目), 常州宏泰摩擦材料有限公司;

鳞片石墨: 粒度为 149 μm , 青岛晨阳石墨有限公司;

填料: 市售。

1.2 主要试验设备

台式干燥箱: XL702C 型, 武汉市祥龙摩擦材料有限公司;

犁耙式混料机: XL633 型, 武汉市祥龙摩擦材料有限公司;

热压成型模具: XL100-63T 型, 武汉市祥龙摩擦材料有限公司;

洛氏硬度计: HR-45A 型, 东莞市昊泰测量仪器

有限公司;

剪切强度试验机: XL101 型, 武汉市祥龙摩擦材料有限公司;

定速试验机: XL112 型, 武汉市祥龙摩擦材料有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): S-3700N 型, 日本株式会社日立高新技术公司。

1.3 试样制备

按表 1 配比称取混料总质量 1 kg, 矿物纤维和芳纶纤维单独盛放。将矿物纤维和芳纶纤维在混料机中搅拌 15 min, 再加入其余组分共同混料 25 min, 获得成分均匀的模压料。将热压成型模具加热到 160 $^{\circ}\text{C}$, 模腔内壁刷上脱模剂, 再倒入模压料, 盖上钢背进行热压成型, 保压过程中需排气 3 次。热压结束后, 将衬片放入干燥箱进行低温热处理, 最后取出衬片, 在摩擦面加工出尺寸为 25 mm $\times$ 25 mm $\times$ 6 mm 试样, 并对试样编号标记。

表 1 试验原料配比

原料	质量分数 %
酚醛树脂	9
丁腈胶粉	3
芳纶纤维	4
矿物纤维	14
铜纤维	15
焦炭	8
鳞片石墨	12
其它	35

1.4 试验方案

摩擦材料中酚醛树脂含量降低, 会造成粘结剂对增强纤维和填料的表面浸润作用减弱, 引起基体粘结强度下降, 因此需通过设置合理工艺参数提升摩擦材料综合性能。成型压力 (C) 是模压料在模腔内流动的驱动力; 热压温度 (R) 使粘结剂熔化, 保持黏流状态; 压制时间 (Y) 保证模压料在模腔内固化成型, 使各组分形成交联结构; 热处理时间 (T) 对摩擦材料芯部的固化、结构的稳定、残余内应力的消除和力学性能的提升有重要作用。因此, 选取这 4 个参数作为复合纤维低树脂基摩擦材料热压成型工艺主要影响因素, 每个因素设定 3 个水平, 设计正交试验表 $L_9(3^4)$, 见表 2。

1.5 试样测试

根据 GB/T 5766-2007, 选择 5 个距边缘大于 10 mm 且均匀分布的点, 利用洛氏硬度计 M 标尺, 取这 5 个点的平均数值作为试样的洛氏硬度。

根据 GB/T 1700-2001, 利用剪切强度试验机

表2 正交实验表

试样号	C/MPa	R/℃	Y/min	T/h
1 [#]	18	150	5	6
2 [#]	18	160	6	8
3 [#]	18	170	7	10
4 [#]	20	150	6	10
5 [#]	20	160	7	6
6 [#]	20	170	5	8
7 [#]	22	150	7	8
8 [#]	22	160	5	10
9 [#]	22	170	6	6

在 (3000 ± 500) N/s 加载速率下测试试样的剪切强度。

根据 GB/T 5763-2008,第四类盘式制动衬片检测标准,采用定速摩擦试验机检测试样的摩擦磨损性能。定速试验机开启以后,通过辅助加热设备使摩擦盘的表面温度升至 100℃,然后试样与摩擦盘进行先期磨合试验,当有效接触面积大于 95%时,按照 100,150,200,250,300,350℃升温顺序,在每个温度点完成 5000 r 的定速试验。试样冷却至室温后用千分尺测量 5 个均匀分布点的厚度,将测试数据输入计算机即可得到试样的摩擦系数和磨损率。

数据采集工作完成后,将磨损后的试样放入真空镀金仪,对磨损表面镀金 2 min,再用 SEM 观察试样磨损表面的微观形貌。

2 结果与分析

2.1 力学性能

硬度是评价摩擦材料力学性能的重要参考指标。硬度过大,摩擦材料压缩形变率低,紧急制动时会产生噪音,并且容易造成对偶盘的磨损;硬度较小,对偶盘的微凸体容易嵌入摩擦材料基体,相对滑动过程中摩擦材料的接触表面易被刮落,增加摩擦材料的磨损量。摩擦材料的洛氏硬度在 50~90 之间较合理,本次试验试样的硬度如图 1 所示,1[#]~9[#] 试样的硬度依次增大。1[#] 试样的硬度值最小,为 62;9[#] 试样的硬度值最大,为 86,所测试样的硬度

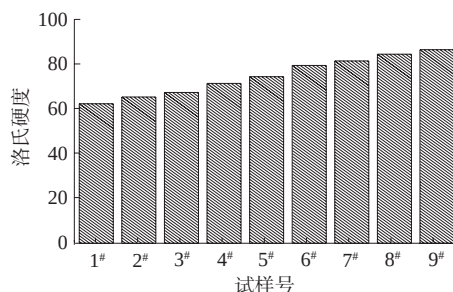


图1 试样洛氏硬度

值皆在合理范围内。

极差是同一因素不同水平参数的考察指标最大平均数值与最小平均数值之差,图 2 是试样洛氏硬度的极差分析图,横坐标代表热压成型工艺 4 个影响因素的 3 个水平,纵坐标代表试样的洛氏硬度。如 $R_C=19$,表示成型压力 $C_3=22$ MPa 的 7[#] 试样、8[#] 试样和 9[#] 试样的平均洛氏硬度值与成型压力 $C_1=18$ MPa 的 1[#] 试样、2[#] 试样和 3[#] 试样的平均洛氏硬度值之差为 19,即成型压力的极差数值为 19。通过极差数值大小可判定作用效果影响因素的主次,极差数值越大,该因素对考察指标的影响程度越大。从图 2 可知,成型压力对复合纤维低树脂基摩擦材料的硬度影响最大,并且成型压力越大,摩擦材料的硬度越大。

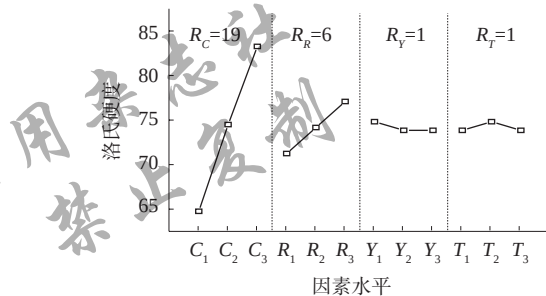


图2 洛氏硬度极差分析

成型压力增大,模压料的流动速度加快,可避免“团聚”现象,使模压料均匀充满整个型腔。增大成型压力还能促进粘结剂与增强纤维、填料形成致密交联界面,提高基体粘结强度,改善摩擦材料力学性能。但成型压力过大会造成摩擦材料的致密度增加、组分间隙减小,摩擦过程中产生的气体无法被及时吸收或排除,容易在摩擦对偶面形成“气垫膜”,影响摩擦系数的稳定性。成型压力过大还会损坏模具和浪费模压料,增加生产成本。

剪切强度是摩擦材料切线方向单位面积所能承受的最大断裂负荷,剪切强度大小主要取决于摩擦材料基体的粘结强度。盘式制动衬片摩擦材料的剪切强度应大于 2.5 MPa,试样的剪切强度如图 3 所示,远大于相应要求。不同工艺参数水平试样的剪切强度呈现较大差异,7[#] 试样与 9[#] 试样的剪切强度相差 27%。

试样的剪切强度极差分析如图 4 所示。压制时间的极差值为 3.28,大于其它影响因素,表明压制时间对复合纤维低树脂基摩擦材料的剪切强度影响最大。在一定热压温度和成型压力条件下,压制时间

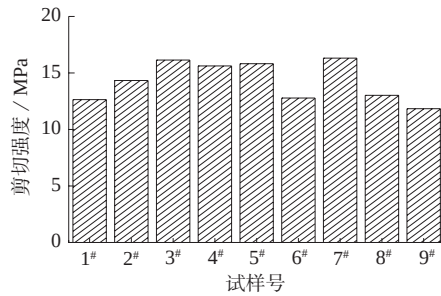


图3 试样剪切强度

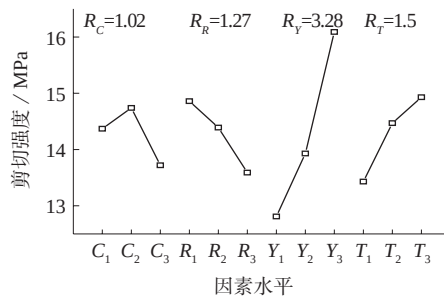


图4 剪切强度极差分析

越长,摩擦材料各组分相互交联越充分,试样的成型效果越好,剪切强度也越大。

2.2 摩擦磨损性能

摩擦材料的摩擦磨损性能主要通过摩擦系数和磨损率来评价。表3是试样的摩擦磨损实验数据,从表3可知,100~250℃范围内,试样的摩擦系数逐渐增大;250~350℃范围内,试样的摩擦系数逐渐降低,并在250℃时试样的摩擦系数达到峰值。研究发现,摩擦材料随着温度的升高,基体逐渐变软,摩擦材料与对偶盘的有效贴合面积增大,摩擦系数也随之增大。当温度超过250℃,酚醛树脂开始发生热分解,摩擦材料基体的粘结强度降低,磨损率增大,摩擦系数下降,出现热衰退现象。

试样的摩擦系数极差分析如图5所示,热压温度的极差值最大,表明热压温度对复合纤维低树脂基摩擦材料摩擦系数影响最大。

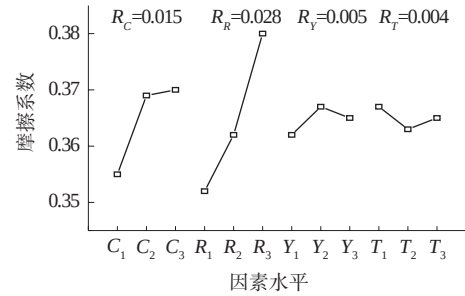


图5 摩擦系数极差分析

热压温度较低时,粘结剂不易完全融化,无法完成对增强纤维和填料的均匀包覆,导致摩擦材料质地不均。摩擦对偶产生的制动摩擦力得不到合理分散,基体粘结强度较弱的部分出现较大磨损,制动效果减弱。热压温度过高,粘结剂的硬化速度加快,基体内的有机挥发物和水蒸气不能有效释放,因而在摩擦材料基体内形成密闭的气孔。当温度和压力降低,聚集在基体内的气体会力图冲破摩擦材料表面,造成小孔、裂纹等表面缺陷,因此需合理设置复合纤维低树脂基摩擦材料的热压成型温度。

同时从表3还可知,试样随着摩擦试验温度的升高,磨损率也逐步增大。250℃以后,试样的磨损速率加快。由前面分析可知,酚醛树脂的热分解不仅会降低摩擦系数,还会加剧摩擦材料磨损。试样磨损率极差分析如图6所示,热处理时间的极差值为0.032,对试样的磨损率影响最大。

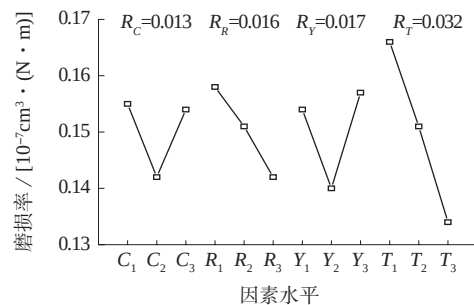


图6 磨损率极差分析

表3 摩擦磨损实验数据

试样号	摩擦系数(μ)						磨损率(V)/[$10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$]					
	100℃	150℃	200℃	250℃	300℃	350℃	100℃	150℃	200℃	250℃	300℃	350℃
1#	0.287	0.331	0.362	0.395	0.372	0.301	0.032	0.061	0.124	0.187	0.276	0.411
2#	0.295	0.342	0.371	0.408	0.387	0.312	0.029	0.041	0.067	0.146	0.218	0.352
3#	0.313	0.356	0.391	0.421	0.402	0.334	0.028	0.039	0.078	0.134	0.205	0.337
4#	0.302	0.349	0.384	0.413	0.391	0.317	0.025	0.032	0.068	0.113	0.192	0.307
5#	0.311	0.357	0.391	0.423	0.409	0.322	0.027	0.054	0.113	0.174	0.236	0.385
6#	0.318	0.365	0.401	0.438	0.412	0.346	0.026	0.037	0.079	0.134	0.207	0.339
7#	0.297	0.349	0.378	0.402	0.391	0.319	0.031	0.058	0.113	0.171	0.254	0.391
8#	0.305	0.357	0.389	0.413	0.397	0.331	0.023	0.044	0.087	0.143	0.209	0.347
9#	0.317	0.372	0.423	0.457	0.431	0.342	0.024	0.047	0.095	0.152	0.223	0.364

在生产实践过程中,为提高生产效率,降低工艺成本,摩擦材料在模腔内的压制时间较短,因此摩擦材料芯部并未完全固化,需放入干燥箱中进一步保温固化成型。热处理时间过短,基体内部还未形成稳定的交联结构,摩擦材料表面磨损以后,亚表层抗磨损能力较低,基体易被摩擦对偶盘凸起刮落,加快摩擦材料的磨损,降低摩擦材料的使用寿命。延长热处理时间,基体内部固化更加充分,粘结剂与增强纤维、填料形成的交联链更密,摩擦材料的结构也更加稳定。热处理过程中,基体内部聚集的气体通过孔隙逐渐逸出,减小摩擦材料热压成型过程中形成的残余内应力,同时减少摩擦材料的表面缺陷,提高产品合格率。

2.3 模糊综合评价

摩擦材料力学性能的优劣会通过其摩擦磨损性能体现。参照 GB 5763-2008,摩擦材料在不同试验温度下的摩擦系数(μ)和磨损率(V)范围见表4,本次试验试样的摩擦系数和磨损率皆在此范围内。为选取本次试验最佳工艺参数,采用模糊综合评价法定量表征试样的摩擦磨损性能。定义 μ^* 为摩擦材料摩擦系数的模糊评价值, μ^* 值越大,表征摩擦系数越理想; V^* 为摩擦材料磨损率的模糊评价值, V^* 值越大,表征摩擦材料磨损率越低; N^* 为摩擦材料摩擦磨损性能的模糊综合评价值, N^* 值越大,表征摩擦材料的摩擦磨损性能越优异。根据前期研究成果,摩擦系数的影响因子定为0.6,磨损率的影响因子定为0.4,其相互关系见式(1)。

$$N^* = 0.6\mu^* + 0.4V^* \quad (1)$$

摩擦系数 μ^* 的模糊评价值计算见式(2)。

$$\mu^* = \sum_{i=1}^6 \mu_i M_i \quad (2)$$

式中: μ_i 是试样在第*i*个温度点对应的摩擦系数。摩擦系数在0.40~0.50之间摩擦材料的制动效果最好,故其得分值最大, μ_i 具体取值见式(3)。 M_i 是第*i*个温度点的摩擦系数比值权重,取值见表5。

$$\mu_i = \begin{cases} 1.00, \mu \in [0.45 \pm 0.5] \\ 0.75, \mu \in [(0.35, 0.40) \cup (0.50, 0.55)] \\ 0.50, \mu \in [(0.30, 0.35) \cup (0.55, 0.60)] \\ 0.25, \mu \in [(0.25, 0.30) \cup (0.60, 0.70)] \\ 0.00, \mu \in [(0.00, 0.25) \cup (0.70, X)] \end{cases} \quad (3)$$

磨损率 V^* 的模糊评价值计算见式(4)。

$$V^* = \sum_{i=1}^6 V_i N_i \quad (4)$$

式中: V_i 是试样在第*i*个温度点对应的磨损率得分值,取值参照文献[15]; N_i 是第*i*个温度点磨损率比值权重,取值见表5。

根据式(1)~式(4),试样的模糊综合评价值见表6。从表6可知,6[#]试样的模糊综合评价值最大,摩擦磨损性能最好;1[#]试样的模糊综合评价值最小,摩擦磨损性能最差;8[#]试样的摩擦磨损性能居中。综上所述,6[#]试样的工艺参数为本次试验最佳工艺参数:成型压力 20 MPa、热压温度 170℃、压制时间 5 min 和热处理时间 8 h。

表4 GB 5763-2008 摩擦材料不同温度下摩擦性能标准

项目	100℃	150℃	200℃	250℃	300℃	350℃
μ	0.25 ~ 0.65	0.25 ~ 0.70	0.25 ~ 0.70	0.25 ~ 0.70	0.25 ~ 0.70	0.25 ~ 0.70
$V/[10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}]$	≤0.50	≤0.70	≤1.00	≤1.50	≤2.50	≤3.50

表5 不同温度下的比值权重

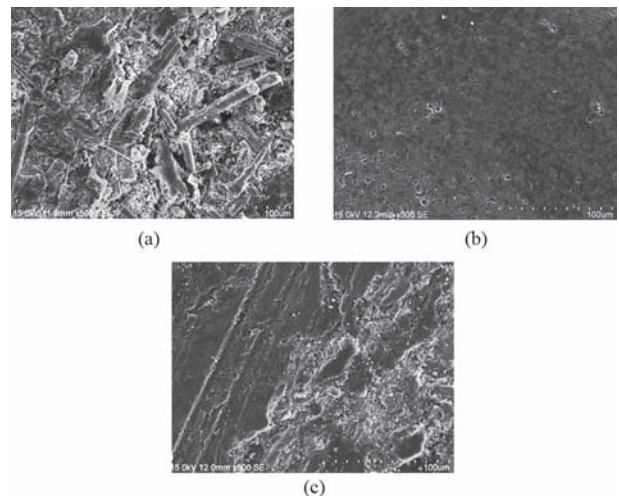
项目	100℃	150℃	200℃	250℃	300℃	350℃
M_i	0.1	0.1	0.15	0.15	0.2	0.3
N_i	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4

表6 试样模糊综合评价值

项目	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]
N^*	0.728	0.767	0.843	0.800	0.819	0.865	0.751	0.813	0.845

2.4 磨损机制分析

摩擦材料磨损表面的微观形貌是分析其磨损机制的重要依据,从表6选择典型1[#]试样、6[#]试样和8[#]试样进行磨损表面 SEM 观察,结果见图7。图7a是1[#]试样的磨损表面 SEM 形貌,磨损表层几乎无平整面,散布着从基体剥落的填料和块状磨屑,存在较大脱落坑,增强纤维从基体被拔出。1[#]试样的成型工艺参数为成型压力 18 MPa、热压温度



a—1[#]试样;b—6[#]试样;c—8[#]试样

图7 试样磨损表面 SEM 形貌(放大500倍)

150℃、压制时间 5 min 和热处理时间 6 h,工艺参数处于最低水平,导致 1[#] 试样的结构疏松、力学性能和摩擦磨损性能严重下降。摩擦对偶过程中,摩擦表面发生严重塑性变形,甚至从基体被剥离。磨损程度较大的表面主要由裸露的增强纤维和凸起提供摩擦力,因此摩擦系数波动大,制动过程容易发生抖动。1[#] 试样和对偶盘的接触面积较少,产生的摩擦热不能及时传导出去,造成局部温度升高,摩擦材料中耐热性较差的有机物受热分解。因此,1[#] 试样的磨损机制主要为热分解磨损。

图 7b 是 6[#] 试样的磨损表面 SEM 形貌,摩擦表面平整,没有较大脱落坑,密集的气孔既能释放基体内有机物受热分解产生的气体,又能减缓摩擦材料表面焦状炭化层连续相的形成。6[#] 试样的工艺参数理想,基体粘结强度高,摩擦对偶过程中增强纤维能提供较大摩擦力。增强纤维中的铜纤维在摩擦表面形成铜转移膜,将摩擦热迅速传导出去,降低摩擦材料表面温度,减少基体中有机物的分解,降低 6[#] 试样的磨损率,延长使用寿命。6[#] 试样的磨损表面磨痕较浅,旧的摩擦表层易被新的摩擦表层替代,有利于提高摩擦材料表层的自洁性和摩擦系数的稳定性。因此,6[#] 试样的磨损机制主要为磨粒磨损。

图 7c 是 8[#] 试样的磨损表面 SEM 形貌,摩擦表面平整性遭到破坏,存在沿摩擦方向的裂纹和深浅不一的脱落坑。8[#] 试样的成型压力为 22 MPa,造成其硬度偏高、交联链密度偏大和各组分间隙偏小。由于摩擦材料基体内各组分的受热膨胀系数不同,在不稳定应力场和温度场作用下,8[#] 试样基体内存在较大内应力,因此摩擦对偶过程中基体容易开裂、变形。8[#] 试样摩擦表层散布的硬质颗粒和磨屑在对偶盘施加的摩擦力矩作用下嵌入基体,充当磨粒,对摩擦材料表面产生犁削作用,并划擦出“犁沟”。摩擦制动过程中,新脱落的硬质颗粒和磨屑继续对摩擦材料表面产生犁削作用,导致试样的磨损速率逐步增加。因此,8[#] 试样的磨损机制主要为疲劳磨损和磨粒磨损。

3 结论

(1) 当摩擦表面温度超过 250℃时,复合纤维低树脂基摩擦材料的摩擦系数降低和磨损速率加快,出现热衰退现象。

(2) 复合纤维低树脂基摩擦材料的热压成型工艺中成型压力对硬度影响最大,热压温度对摩擦系

数影响最大,压制时间对剪切强度影响最大,热处理时间对磨损率影响最大。试验最佳工艺参数组合为成型压力 20 MPa、热压温度 170℃、压制时间 5 min 和热处理时间 8 h。工艺参数的优化可以改善复合纤维低树脂基摩擦材料的力学性能和摩擦磨损性能。

(3) 通过 SEM 观察可知,试样的工艺参数不同,磨损机制存在较大差异。1[#] 试样主要发生热分解磨损和粘着磨损;6[#] 试样主要发生磨粒磨损;8[#] 试样主要发生疲劳磨损和磨粒磨损。

参考文献

- [1] 马云海,佟金,王宝刚,等. 矿物纤维增强酚醛树脂基摩擦材料热压工艺[J]. 农业工程学报,2012,28(5):54-59.
Ma Yunhai, Tong Jing, Wang Baogang, et al. Research on hot-press processing of friction material based on phenolic resin reinforced by mineral fiber[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5):54-59.
- [2] 陈辉,吴其胜. 硫酸钙晶须增强树脂基复合摩擦材料摩擦磨损性能的研究[J]. 化工新型材料,2012,40(8):111-112.
Chen Hui, Wu Qisheng. Research on friction attrition performance of resin based friction composite enhanced by calcium sulfate whisker[J]. New Chemical Materials, 2012, 40(8):111-112.
- [3] Kumar M, Bijwe J. Optimized selection of metallic fillers for best combination of performance properties of friction materials: A comprehensive study[J]. Wear, 2013, 303(1-2):569-583.
- [4] 钟厉,刘力,王昭银,等. 复合矿物纤维增强低树脂基摩擦材料性能研究[J]. 润滑与密封,2016,41(3):15-20.
Zhong Li, Liu Li, Wang Zhaoyin, et al. Research on low resin-based friction materials reinforced by compound mineral fiber[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(3):15-20.
- [5] 钟厉,王昭银,刘力,等. 新型低树脂基摩擦材料的优化设计及性能研究[J]. 润滑与密封,2016,41(1):96-103.
Zhong Li, Wang Zhaoyin, Liu Li, et al. Research on properties and optimization design of low content resin friction materials[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(1):96-103.
- [6] 吴耀庆,曾鸣,范力仁. 垂直取向金属纤维增强材料的摩擦性能研究[J]. 润滑与密封,2010,35(6):9-14.
Wu Yaoqing, Zeng Ming, Fan Liren. Research on friction properties of vertically oriented metal fiber reinforced composites[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(6):9-14.
- [7] 李辉,杜建华,王浩旭,等. 成型工艺对树脂基摩擦材料及其摩擦性能的影响[J]. 工程科学学报,2017,39(8):1 182-1 187.
Li Hui, Du Jianhua, Wang Haoxu, et al. Effect of molding process on tribological characteristics of friction materials based on resin[J]. Journal of Functional Materials, 2017, 39(8):1 182-1 187.

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)