

成型工艺对树脂基摩擦材料及其摩擦学性能的影响

李辉^{1)✉}, 杜建华²⁾, 王浩旭²⁾, 吕莹莹³⁾

1) 装甲兵工程学院技术保障工程系, 北京 100072 2) 装甲兵工程学院科研部, 北京 100072

3) 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: lihui881111@126.com

摘要 以碳纤维 2.5D 浅交弯联结结构为预制体,分别采用树脂传递成型工艺(RTM)和热压成型工艺(HPM)制备了碳纤维增强酚醛树脂基摩擦材料.通过 MS-T3001 摩擦磨损试验机考核了材料的摩擦磨损性能,采用扫描电子显微镜、激光三维形貌扫描仪观测了材料的磨损形貌,对比分析了两种成型工艺对材料摩擦学性能的影响.结果表明:随着滑动速度和工作载荷的增大,材料的摩擦系数均减小.热压成型工艺成型摩擦材料的主要磨损形式为磨粒磨损,摩擦系数 0.085~0.130,磨损率 $1.5 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.树脂传递成型工艺成型摩擦材料的主要磨损形式为黏着磨损和疲劳磨损,摩擦系数 0.075~0.120,磨损率 $7.5 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

关键词 树脂基摩擦材料; 摩擦磨损; 碳纤维; 树脂传递成型; 热压成型

分类号 TB332.1

Effect of molding process on tribological characteristics of friction materials based on resin

Li Hui^{1)✉}, DU Jian-hua²⁾, WANG Hao-xu²⁾, LÜ Ying-ying³⁾

1) Department of Technique Support Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China

2) Department of Science Research, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China

3) School of Material Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: lihui881111@126.com

ABSTRACT Resin transfer molding (RTM) and hot-pressing molding (HPM) were used to prepare phenolic resin matrix composites reinforced by carbon fiber. The tribological properties of the materials were tested using a MS-T3001-type friction and wear tester. A scanning electron microscopy and three-dimensional laser microscopy were used to analyze the superficial microstructure of the friction materials. Furthermore, a comparative analysis was employed to investigate the influences on the tribological properties by two types of material-forming processes. Results indicate that the friction coefficient decreases with increased relative sliding speed and workload. For the RTM friction material, the main form of wear is adhesive wear and fatigue wear, the coefficient of friction is 0.075-0.120, and the wear rate is $7.5 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. In contrast, for the HPM friction material, abrasive wear is the main form of wear, and the friction coefficient and wear rate are 0.085-0.130 and $1.5 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, respectively.

KEY WORDS resin matrix composite; friction and wear; carbon fiber; resin transfer molding; hot-pressing molding

碳纤维增强树脂基摩擦材料具有高而稳定的摩擦系数、良好的耐磨性、优良的机械性能和低的摩擦噪音,受到了国内外学者的广泛关注^[1-7]. 此类摩擦材料

所采用的增强相主要为短切碳纤维^[8]、长纤维^[9]或 2D 碳布织物^[10]. 关于碳纤维含量、树脂基体含量、孔隙率分布以及织物类型对材料摩擦学性能影响的研究大

量出现。殷艳飞等^[11]采用热压成型工艺制备了不同纤维含量的碳纤维增强树脂基摩擦材料,随碳纤维含量的增加,材料的耐磨性和摩擦稳定性增加,碳纤维质量分数为4%时,材料摩擦系数稳定性最高,磨损机制主要为磨粒磨损和疲劳磨损。Fei等^[12]、Cai等^[13]研究了不同树脂含量的碳纤维增强摩擦材料的摩擦磨损性能,指出质量分数为35%~40%的酚醛树脂摩擦材料具有高摩擦系数、出色的摩擦稳定性和较好的耐热性能。朱文婷等^[14]研究了孔隙率对树脂基摩擦材料的摩擦学性能的影响,结果表明孔隙率较低的摩擦材料有较高的摩擦系数稳定性和较低的磨损率。

就织物结构而言,2.5D以及3D织物具有较高的有序性、紧密性和整体性^[6,11],作为树脂基摩擦材料的增强预制体,可进一步提高摩擦材料的机械承载能力,同时防止材料在摩擦过程中出现分层开裂现象。因而2.5D以及3D织物增强摩擦材料及其摩擦学性能的研究是当前摩擦材料的研究重点和热点之一。Kim等^[15]将碳纤维织物增强树脂基复合材料用于轴承内衬,并研究了其摩擦学性能,发现碳纤维织物的自润滑性可显著提高系统的摩擦稳定性。张建民等^[6]采用溶液浸渍和真空辅助工艺制备了2.5D碳纤维机织物增强酚醛树脂基摩擦材料并研究了其力学性能,剪切强度达262 MPa,弯曲应力达729 MPa。杨彩云和胡振英^[16]研究了碳纤维2.5D角连锁结构和三向正交结构预制体增强C/C复合材料的摩擦磨损性能,获得了稳定的摩擦系数和较低的磨损率。Tiwari等^[1]以及Bijwe和Rattan^[7]研究了碳纤维织物增强聚醚基复合材料的性能,获得了适合于该类复合材料的织物类型、含量以及预处理方法等工艺参数。

树脂基摩擦材料及其摩擦学性能受成型工艺影响的研究报道较少。本文采用碳纤维2.5D浅交弯联结构作为预制体,分别采用树脂传递成型工艺(resin transfer molding, RTM)和热压成型工艺(hot pressing molding, HPM),制备碳纤维增强酚醛树脂基摩擦材料。研究对比了两种材料在不同工况条件下的摩擦磨损性能,为碳纤维整体织物增强树脂基摩擦材料研究提供理论依据。

1 试样方法

1.1 试样制备

试样采用T300-3K碳纤维(威海光威复合材料有限公司提供),按照2.5D浅交弯联结构(如图1所示)编织形成碳纤维整体织物结构预制体,编织经密每厘米8根、纬密每厘米4根,编织层数3层。分别采用树脂传递成型工艺(RTM)和热压成型工艺(HPM),将酚醛树脂与碳纤维整体织物结构预制体进行复合,制备碳纤维增强酚醛树脂基摩擦材料。将摩擦材料裁剪为

$\phi 70$ mm的圆盘,供摩擦磨损试验使用。

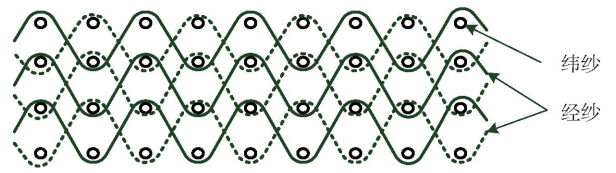


图1 2.5D浅交弯联织物结构示意图

Fig.1 Structure of the 2.5D shallow-crossing linking

树脂传递成型工艺装置示意图如图2所示。工艺过程为,首先使用真空泵(vacuum pump)在真空袋(vacuum bag)中产生负压(-0.1 MPa),将树脂胶液吸入真空袋中,使其浸润预先放置于真空袋中的纤维预制体。浸润结束后加热175℃固化成型。

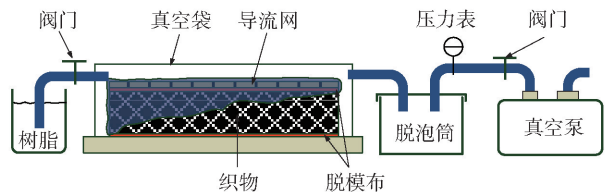


图2 树脂传递成型工艺(RTM)装置示意图

Fig.2 Schematic of resin transfer molding (RTM)

热压成型工艺装置示意图如图3所示。工艺过程为,将纤维预制体与树脂胶液一起放入热压腔体,施加压力使树脂充满模腔,在10 MPa压力和175℃温度下使摩擦材料固化成型。

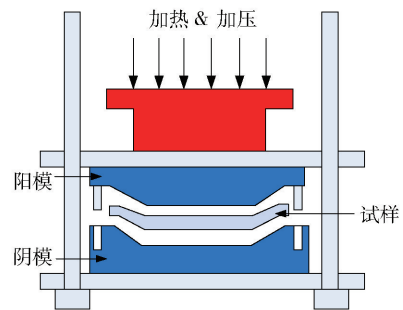


图3 热压成型工艺(HPM)装置示意图

Fig.3 Schematic of hot - pressing molding (HPM)

采用树脂传递成型工艺和热压成型工艺制备的摩擦材料基本物理力学性能在表1中列出。热压成型工艺成型压力达到10 MPa,较高的压力将多余的树脂挤出,造成碳纤维含量较高。碳纤维的密度($1.78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)大于树脂固化后的密度,且较大的成型压力造

表1 不同成型工艺成型的材料物理性能

Table 1 Physical properties of different materials

工艺	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	纤维质量 分数/%	抗压 强度/MPa	硬度, HS
树脂传递成型	1.48	65	413	98.8
热压成型	1.53	80	448	79.8

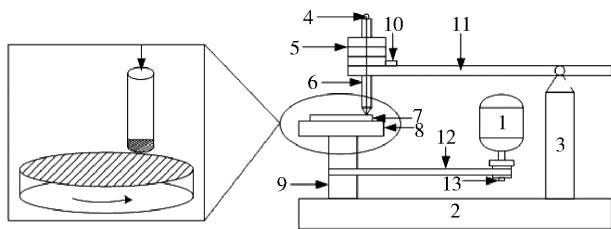
成树脂交联固化程度增加, 复合材料密度增加。

1.2 试验方法

使用兰州华汇科技有限公司 MS-T3001 销盘式 (pin-on-disk) 摩擦磨损试验仪进行摩擦磨损性能测试。试验仪的工作原理如图 4 所示。试验时, 相对转速由电机控制, 对偶销与摩擦材料试样之间的正压力通过配重砝码调节。对偶材料为 GCr₁₅ 钢球, 直径 φ5 mm。试验转速分别为 500、750、1000 和 1500 r·min⁻¹, 旋转半径 30 mm, 对应相对滑动线速度 1.57、2.36、3.14、4.71 m·s⁻¹。试验载荷 5、7.5、10、15、20 N。摩擦系数由实验仪测出, 质量磨损率通过测量磨损前后的质量差求得, 如下式。

$$\theta = \frac{1}{2\pi r} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{m_1 - m_2}{f} \quad (1)$$

式中: θ 为质量磨损率, g·N⁻¹·m⁻¹; f 为摩擦力, N; m_1 为磨损前质量, g; m_2 为磨损后质量, g; r 为摩擦半径, m; n 为转速, r·min⁻¹。



1—电机; 2—底座; 3—支架; 4—温度传感器; 5—配重砝码; 6—销; 7—试样盘; 8—承载盘; 9—转动支架; 10—摩擦力传感器; 11—支撑臂; 12—传动带; 13—转速传感器

图 4 MS-T3001 摩擦磨损试验仪示意图

Fig. 4 Schematic of the MS-T3001 pin-on-disk tribometer

采用 Quanta200 型扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观测材料磨损后的表面微观形貌, 分析材料的摩擦磨损机理。采用 OLS4000 型 3D 激光扫描形貌仪观察摩擦材料磨损前后的表面形貌和磨痕形态。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌

图 5 为材料磨损前的表面形貌。由图可知, 树脂传递成型工艺成型材料 (图 5(a)、(b)) 表面被树脂基体覆盖且较为平整, 表面高度差小于 20 μm。热压成型工艺成型材料 (图 5(c)、(d)) 表面呈现明显的织物轮廓。对比图 5(c) 与图 5(d), 图 5(c) 中“纤维束 A”对应的部位高度值较小, 而纤维交织节点 B 对应的部位高度值较大。说明此织物轮廓并非碳纤维织物轮廓, 而是成型时脱模布在材料表面留下的印记。这是因为热压成型工艺成型压力较高 (10 MPa), 将脱模布压入到树脂基体中, 造成材料表面较粗糙, 表面粗糙度为 Ra = 0.714 μm。而树脂传递成型工艺成型压力较低 (0.1 MPa), 且多余的树脂被吸出, 所以材料表面较平整, 表面粗糙度为 Ra = 0.158 μm。

图 6 为转速 1000 r·min⁻¹, 载荷 11 N, 对磨 5 h 条件下, 不同成型工艺摩擦材料的表面磨损形貌。由图可知, 树脂传递成型工艺成型试样磨痕较深, 磨痕中心深度约 180 μm, 有明显的磨痕边缘, 而未发现碳纤维有明显的磨损现象。热压成型工艺成型试样磨痕较浅, 磨痕中心深度约 70 μm, 没有明显的磨痕边缘, 并且在磨痕中部发现碳纤维磨损现象。

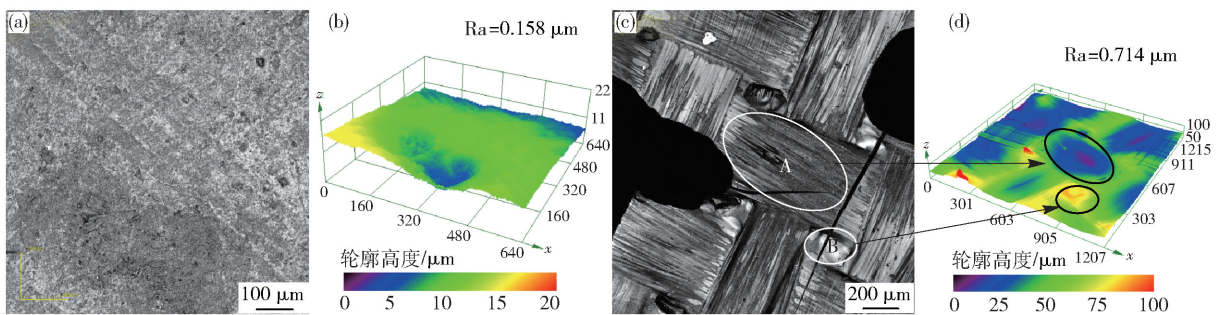


图 5 不同成型工艺复合材料表面形貌。(a) 树脂传递成型工艺材料表面照片; (b) 树脂传递成型工艺材料表面三维形貌; (c) 热压成型工艺材料表面照片; (d) 热压成型工艺材料表面三维形貌

Fig. 5 Surface topography of different materials; (a) topography of material made by RTM; (b) three-dimensional (3D) topography of material made by RTM; (c) topography of material made by HPM; (d) 3D topography of material made by HPM

树脂传递成型工艺成型摩擦材料表面树脂含量较多 (质量分数 35%), 摩擦过程中对偶钢球与树脂基体对磨, 强度较低的树脂基体发生磨损, 在材料表面形成较深的磨痕。在树脂基体的保护下, 碳纤维没有发生明显的磨损现象。

热压成型工艺成型材料与对偶钢球的实际接触位

置为材料表面的微凸体 (图 5(c) 中的 B 处)。摩擦过程中, 在压力与剪切力的作用下, 微凸体逐渐被磨平、脱落, 形成磨屑。对偶钢球进一步与碳纤维发生摩擦, 对表层纤维造成破坏, 产生纤维磨屑。因材料表面树脂厚度小, 所以无明显磨痕产生。

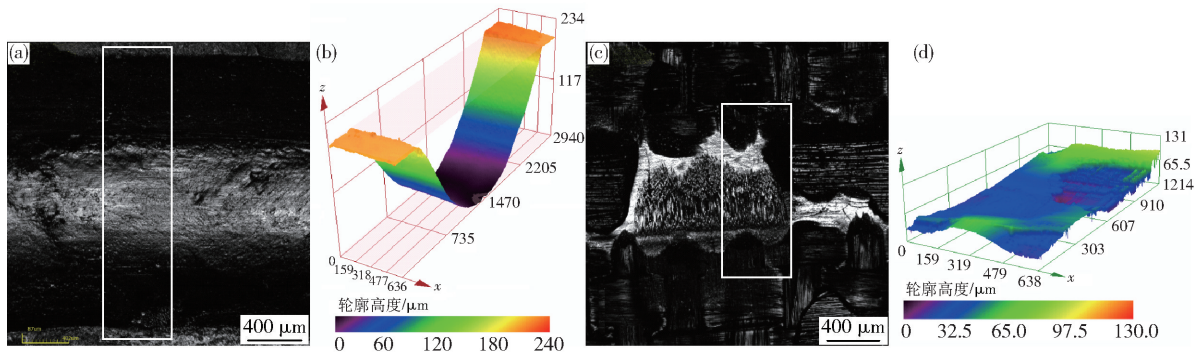


图6 不同成型工艺制备的复合材料磨痕形貌。(a) 树脂传递成型工艺材料磨痕照片;(b) 树脂传递成型工艺材料磨痕三维形貌;(c) 热压成型工艺材料磨痕照片;(d) 热压成型工艺材料磨痕三维形貌

Fig. 6 Wear scratches of different materials: (a) wear scratches of material made by RTM; (b) 3D wear scratches of material made by RTM; (c) wear scratches of material made by HPM; (d) 3D wear scratches of material made by HPM

2.2 摩擦磨损性能

图7为不同载荷条件下,材料的动摩擦系数随滑动速度的变化曲线。热压成型工艺成型摩擦材料的摩擦系数波动范围0.085~0.130。树脂传递成型工艺成型摩擦材料的摩擦系数波动范围0.075~0.120。随载荷和相对滑动速度的增加,两种材料的动摩擦系数都逐渐减小。这是由于,相对滑动速度增加时,接触表面粗糙峰啮合程度降低,摩擦副贴合状态较弱。而且在高速相对滑动状态下,摩擦面上会产

生高温,使基体材料软化,抗剪切极限力降低,容易被“切掉”而减小摩擦阻力。同时,摩擦材料表面温度升高使润滑油黏度减小。综合因素都使摩擦系数降低。树脂传递成型工艺成型材料摩擦系数随相对滑动速度的增加几乎呈直线下降,而热压成型工艺成型材料的摩擦系数下降趋势在高速时逐渐减缓。这是因为热压成型工艺成型材料表面树脂含量少,高速时碳纤维承受较大的摩擦载荷,摩擦状态受相对速度和温度的影响较小。

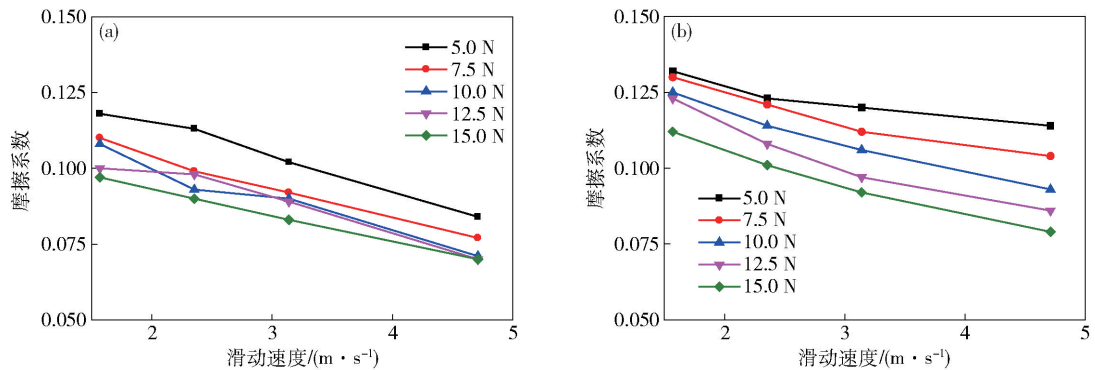


图7 摩擦系数随滑动速度的变化曲线。(a) 树脂传递成型工艺成型材料;(b) 热压成型工艺成型材料

Fig. 7 Relation between friction coefficient and sliding speed: (a) material made by RTM; (b) material made by HPM

对比两种材料在相同载荷下摩擦系数随相对滑动速度的变化情况,如图8所示,热压成型工艺(HPM)成型材料的摩擦系数高于树脂传递成型工艺(RTM)成型材料,这是因为热压成型工艺成型材料成型压力高,表面粗糙度大,所以摩擦系数较大。树脂传递成型工艺成型压力较小,表面树脂基体较厚,粗糙度小,摩擦时对偶钢球压入材料表面树脂层,摩擦系数低。因树脂基体耐磨性差,所以在摩擦过程中对偶钢球对材料造成较严重的磨损,磨损率达到 $7.5 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,约为热压成型工艺材料磨损率 $1.5 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 的5倍(如图9)。

2.3 磨损机理

图10为两种材料磨损后的扫描电镜微观形貌,可以发现树脂传递成型工艺成型材料磨痕表面覆盖了一层光滑的树脂,而且有裂纹分布,裂纹方向与碳纤维轴向平行。说明碳纤维与树脂基体界面结合强度不够,经过长时间的摩擦,会造成树脂基体的成块脱落。

热压成型工艺成型材料磨痕表面分布有大量的颗粒,碳纤维清晰可见,且有少量被磨断。

通过对试样进行三维形貌的观测和扫描电镜观测,可以推断试样不同的摩擦磨损方式。如图11(a)所示,树脂传递成型工艺成型试样表面树脂层较厚,对

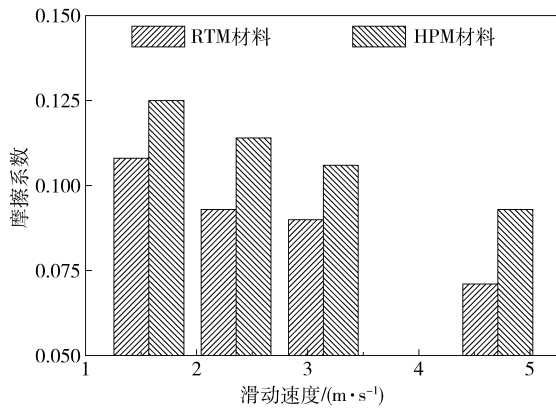


图 8 10 N 载荷时摩擦系数随相对滑动速度的变化

Fig. 8 Coefficient of friction for different materials followed with sliding speed at a load of 10 N

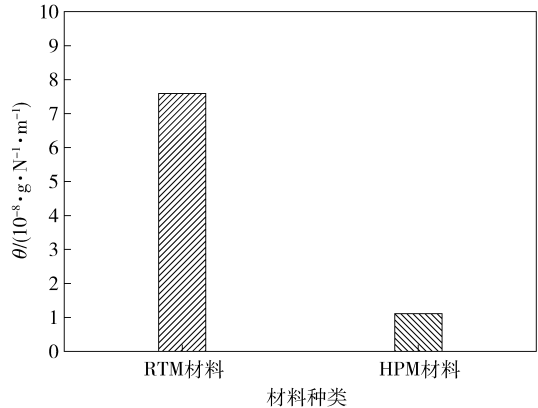


图 9 10 N 载荷时不同材料质量磨损率对比

Fig. 9 Wear rate of different materials at a load of 10 N

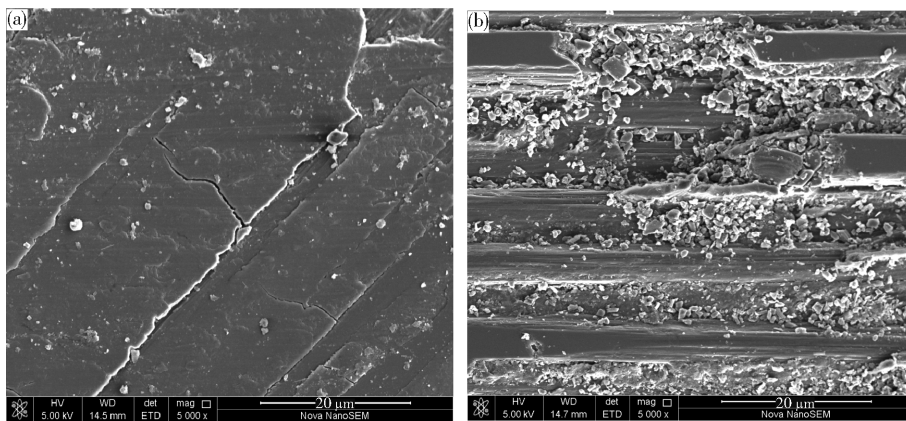


图 10 不同工艺成型材料磨痕微观形貌对比. (a) 树脂传递成型工艺材料; (b) 热压成型工艺材料

Fig. 10 Microstructure of wear scratches: (a) material made by RTM; (b) material made by HPM

偶钢球与树脂基体的持续摩擦产生大量的热量,使接触区域温度升高,导致材料剪切强度下降,产生黏着现象,在接触区域产生摩擦膜,摩擦膜的撕裂与涂抹形成了图 10(a) 中的光滑摩擦面. 摩擦过程主要是树脂与对偶钢球发生摩擦作用,对纤维的损伤较小,但是树脂本身的硬度与耐磨性能远低于碳纤维,所以磨痕较深,磨损较严重. 磨损形式以黏着磨损和疲劳磨损为主.

如图 11(b) 所示,热压成型工艺成型试样表面树脂层较薄且凹凸不平,对摩时钢球表面微凸体发生相互剪切作用,被剪切掉落的微凸体形成磨屑对纤维织物产生磨粒磨损. 因为碳纤维的硬度与耐磨性较树脂基体要好得多,所以磨痕较浅,磨损量较小. 磨损形式以磨粒磨损为主.

3 结论

(1) 热压成型工艺成型材料的碳纤维质量分数高达 80%,较树脂传递成型工艺成型材料(65%)高,密度(1.48 g·cm⁻³)较树脂传递成型工艺成型材料(1.53 g·cm⁻³)大. 热压成型工艺成型材料的表面粗糙度为

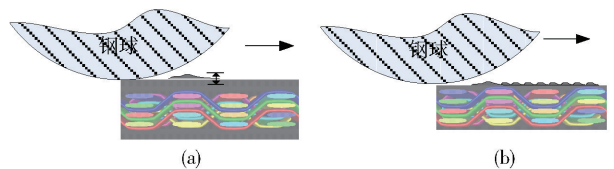


图 11 不同工艺成型材料磨损形式示意图. (a) 树脂传递成型工艺材料; (b) 热压成型工艺材料

Fig. 11 Schematic of wear mode: (a) material made by RTM; (b) material made by HPM

$Ra = 0.714 \mu\text{m}$,树脂传递成型工艺成型材料的表面粗糙度为 $Ra = 0.158 \mu\text{m}$.

(2) 树脂传递成型工艺和热压成型工艺制备的摩擦材料摩擦系数均随相对滑动速度的增大而减小,随工作载荷的增大而减小. 热压成型工艺制备的摩擦材料较树脂传递成型工艺制备的摩擦材料摩擦系数高,磨损率低. 树脂传递成型工艺制备的摩擦材料的主要磨损形式为黏着磨损和疲劳磨损,而热压成型工艺制备的摩擦材料的主要磨损形式为磨粒磨损.

参考文献

[1] Tiwari S, Bijwe J, Panier S. Adhesive wear performance of poly-

- etherimide composites with plasma treated carbon fabric. *Tribology Int*, 2011, 44 (7-8): 782
- [2] Fei J, Huang J F, Cao L Y, et al. Wet tribology performance of carbon fabric/resin composites. *Acta Mater Compos Sin*, 2013, 30 (3): 70
(费杰, 黄剑锋, 曹丽云, 等. 炭布/树脂复合摩擦材料的湿式摩擦学性能. *复合材料学报*, 2013, 30(3): 70)
- [3] Li B, Yang S D, Qu B, et al. Research and development of automobile friction material. *Mater Rev*, 2012, 26(S1): 348
(李兵, 杨圣崇, 曲波, 等. 汽车摩擦材料现状与发展趋势. *材料导报*, 2012, 26(专辑1): 348)
- [4] Abadi S B K, Khavandi A, Kharazi Y. Effects of mixing the steel and carbon fibers on the friction and wear properties of a PMC friction material. *Appl Compo Mater*, 2010, 17(2): 151
- [5] Li S F, Fu Y W, Li H J, et al. Effect of mating materials on friction and wear properties of resin-based friction materials. *Lubr Eng*, 2014, 39(7): 35
(李慎飞, 付业伟, 李贺军, 等. 对偶材料对树脂基摩擦材料摩擦磨损性能的影响. *润滑与密封*, 2014, 39(7): 35)
- [6] Zhang J M, Lu X F, Qian K, et al. Mechanical property of 2.5D woven carbon fabric phenolic resin matrix friction material. *New Chem Mater*, 2015, 43(11): 52
(张建民, 卢雪峰, 钱坤, 等. 新型深交联结构碳纤维机织物酚醛树脂基摩擦材料及其制备方法. *化工新型材料*, 2015, 43(11): 52)
- [7] Bijwe J, Rattan R. Carbon fabric reinforced polyetherimide composites: optimization of fabric content for best combination of strength and adhesive wear performance. *Wear*, 2007, 262(5-6): 749
- [8] Song X D, Yang F, Qi L H, et al. Effects of carbon fibers length and orientation on thermal load and tribological properties of paper-based friction material. *Tribology*, 2014, 34(1): 65
(宋晓东, 杨方, 齐乐华, 等. 碳纤维长度与取向对纸基摩擦材料热负荷及摩擦学性能影响. *摩擦学学报*, 2014, 34(1): 65)
- [9] Guan Q F, Wan M Z, Zou Y, et al. Friction surface layer of carbon fiber reinforced friction material. *J Jilin Univ Eng Technol Ed*, 2012, 42(3): 672
(关庆丰, 万明珍, 邹阳, 等. 碳纤维增强摩擦材料的摩擦表面层. *吉林大学学报(工学版)*, 2012, 42(3): 672)
- [10] Zhang Z M, Fu Y W, Zhang X, et al. Influence of braiding count on tribological properties of carbon fabric/phenolic composite under oil-lubricated condition. *Lubr Eng*, 2013, 38(5): 64
(张兆民, 付业伟, 张翔, 等. 编织密度对碳布增强树脂基摩擦材料湿式摩擦学性能影响. *润滑与密封*, 2013, 38(5): 64)
- [11] Yin Y F, Liu Y, Ding G, et al. Friction and wear properties of carbon fiber reinforced resin-based friction material. *Aerospace Mater Technol*, 2016, 46(2): 31
(殷艳飞, 刘莹, 丁郭, 等. 碳纤维增强树脂基摩擦材料摩擦磨损性能. *宇航材料工艺*, 2016, 46(2): 31)
- [12] Fei J, Wang H K, Huang J F, et al. Effects of carbon fiber length on the tribological properties of paper-based friction materials. *Tribology Int*, 2014, 72: 179
- [13] Cai P, Wang Y M, Wang T M, et al. Effect of resins on thermal, mechanical and tribological properties of friction materials. *Tribology Int*, 2015, 87: 1
- [14] Zhu W T, Wang X F, Jiang J, et al. Effect of porosity percentage on friction and wear performance of resin-based friction materials. *Lubr Eng*, 2016, 41(6): 59
(朱文婷, 王晓芳, 姜娟, 等. 孔隙率对树脂基摩擦材料性能的影响. *润滑与密封*, 2016, 41(6): 59)
- [15] Kim S S, Yu H N, Hwang I U, et al. The sliding friction of hybrid composite journal bearing under various test conditions. *Tribology Lett*, 2009, 35(3): 211
- [16] Yang C Y, Hu Z Y. Friction and wear properties of 3D woven reinforced C/C composites. *Chin J Nonferrous Met*, 2009, 19(1): 70
(杨彩云, 胡振英. 三维机织 C/C 复合材料的摩擦磨损性能. *中国有色金属学报*, 2009, 19(1): 70)