

改性树脂基滑板的制备及其热磨损性能

陈振华, 涂川俊, 陈刚, 严红革, 夏金童

(湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要: 采用共混改性的聚双马来酰亚胺树脂(PBMI)/腰果壳油改性酚醛树脂(YM)为粘结剂, 添加导电相、润滑相和增强纤维相, 利用热轧混料, 二次热模压及通氢固化等工艺制得改性树脂基受电弓滑板试样。利用 TG、DTG 和 DSC 分析方法对树脂基体进行热分析, 通过环块磨损试验机对滑板/铜环的高温、干态磨损性能进行测试, 利用 SEM 方法对滑板的磨损形貌进行观察和分析, 进而探讨滑板/铜环的热态磨损机制。结果表明: PBMI/YM 改性树脂的耐热性优于 YM 树脂, PBMI/YM 改性树脂基滑板的耐磨性明显优于 YM 树脂基滑板。在环境温度为 350 °C、磨损时间为 30 min 时, YM 树脂基滑板的磨损率和摩擦因数分别为 $23.57 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 和 0.232; 而 PBMI/YM 改性树脂基滑板的则分别为 $9.88 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 和 0.144。在磨损过程中, 随着环境温度的增加, 树脂基滑板/铜环的磨损机制发生由粘着磨损向伴随有轻微剥层磨损的热磨损转变。

关键词: PBMI/YM; 树脂基滑板; 共混; 热态磨损; 磨损机制

中图分类号: TB 332; U 264.3

文献标识码: A

Preparation and thermal wear properties of modified resin-matrix pantograph contact strip

CHEN Zhen-hua, TU Chuan-jun, CHEN Gang, YAN Hong-ge, XIA Jin-tong

(College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: With polybismaleimide resin(PBMI)/cashew nut oil modified phenol formaldehyde resin(YM) as bonding agent, and other electric conductive phase, lubricating phase and intensifier fiber, modified resin-matrix pantograph contact strip was produced by the processes of hot rolling, dually heated die-pressing and hydro-solidification technology. The thermal properties of resin matrix were characterized by TG, DTG and DSC. The wear properties of the contact strip against copper were evaluated by the ring block wear tester at elevated temperature under dry sliding conditions. The morphologies of the worn surfaces of YM and PBMI/YM contact strip samples were examined by scanning electron microscope(SEM), and the wear mechanism of the contact strip against copper was also studied. The experimental results indicate that the heat resistance of the PBMI/YM modified resin is better than that of the YM resin. The PBMI/YM modified resin-matrix contact strip against copper has superior wear resistance at elevated temperature than that of unmodified one under the same conditions. At initial environmental temperature of 350 °C and wear time of 30 min, the wear rate and the kinetic friction coefficient of the YM resin-matrix contact strip are $23.57 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ and 0.232; while those of the PBMI/YM modified resin-matrix contact strip are $9.88 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ and 0.144. At elevated temperature, the wear mechanism of the resin-matrix contact strip against copper evolves from adhesion wear to thermal wear with slight delamination wear.

Key words: PBMI/YM; resin-matrix contact strip; blending modification; thermal wear; wear mechanism

在电力机车受电弓滑板材料的研究和应用中,主要经历了纯金属滑板、粉末冶金滑板、纯炭质滑板、浸金属炭滑板和聚合物基复合材料滑板的历程^[1-5]。受电弓滑板与导线构成一对机械与电气耦合的特殊摩擦副,接触网导线大多为纯铜或铜合金^[4,6]。纯金属和粉末冶金滑板的电阻率偏小,运行中易打弧,对导线的磨损非常严重^[7-8];纯炭系滑板具有优良的自润滑性和耐电弧性,改善了滑板对接触网导线的磨损,但其机械强度低,易掉块断裂,且固有电阻大,接触温度高,可引起导线过热氧化,烧成连续麻坑,加速磨损;浸金属炭滑板的机械强度较差,且对导线的磨损仍较严重,而且维护成本偏高^[9-10]。而聚合物基功能材料可以在较大范围内调整电阻率,灭弧性好,且具有耐磨、抗冲击和对导线减摩性好等特点^[11],因此可望成为电力机车受电弓滑板的理想材料。受电弓滑板在高速滑动和强电流的综合作用下其摩擦面上接触点的短时温度可达200~550℃^[12],电弧放电瞬间温度甚至可高达800℃以上。目前国内外对采用耐热、高导电率的树脂基复合材料作为受电弓滑板的研究鲜有报道。

树脂基滑板材料研制的重点是提高聚合物基体的耐热性。本文作者在前期研究工作的基础上^[13-14],采用共混改性获得的PBMI/YM为粘结剂,添加导电相、润滑相和增强纤维相,利用热轧混料,二次热模压及

通氢固化等工艺制得改性树脂基受电弓滑板试样。研究了在高温条件下树脂基滑板/铜环的干态热磨损性能。此外,讨论了在热态条件下树脂基滑板/铜环摩擦副的磨损机制,以期新型受电弓滑板材料的选材提供试验依据。

1 实验

1.1 树脂基受电弓滑板实验配方及制备

树脂基受电弓滑板的主要原材料及其实验配方见表1。

树脂基受电弓滑板的制备流程如图1所示。

1.2 树脂基受电弓滑板的性能测试

采用德国NEJZSCH制STA449C综合热分析仪测试滑板的耐热性能,在程控温度操作条件下以10℃/min的升温速率对滑板在室温至1000℃的温度下进行动态升温试验,试验气氛为空气,试样质量均控制在7.0mg以内;用JSM-6700F型场发射扫描电子显微镜观察滑板的摩擦磨损表面形貌。

用GM-2000型高速高温摩擦磨损试验机对滑板进行热态磨损性能研究。摩擦副为滑板块/紫铜环,实

表1 树脂基受电弓滑板主要原材料及实验配方

Table 1 Specification of main raw materials and composition of resin-matrix contact strip specimens

Function	Raw material	Quality requirement and index	Mass fraction/%
Continuous phase	PBMI	Thermosetting, particle size 40~60 μm	4~8
	YM	Free phenol ≤4%, particle size ≤74 μm	8~12
Electric conductive main phase	Electrolytic copper powder	Copper content ≥99.5%, particle size ≤74 μm	68~78
Lubricating main phase	Flake graphite	Carbon content >99%, particle size <35 μm	9~14
	Carbon fiber	Average length 1~3 mm, average diameter 20 μm	4~10
Intensifier fiber phase	Copper gauze	Average diameter 70~80 μm	

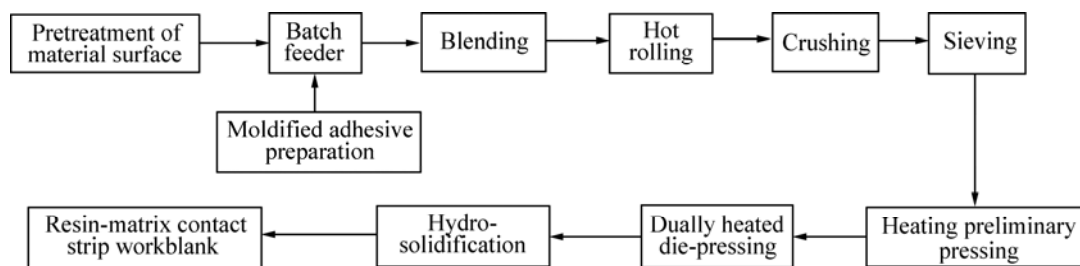


图1 树脂基受电弓滑板的制备流程示意图

Fig.1 Preparation process of resin-matrix contact strip

验温度为 200、250、300、350 和 400 °C; 法向载荷为 150 N; 转速为 400 r/min, 持续时间为 30 min; 滑板试样直径为 75 mm, 厚度为 22 mm, 紫铜环硬度为 HB80, 表面粗糙度 R_a 约为 0.8–1.2 μm , 外环直径为 66 mm, 内环直径为 57 mm; 试验前用 300# 水磨砂对试样表面进行研磨, 并用丙酮处理凉干备用。

摩擦因数(μ)由摩擦力矩通过下式换算:

$$\mu = \frac{M}{F \cdot r} \quad (1)$$

式中 M 为摩擦力矩, N·m; F 为加载载荷, N; r 为摩擦回转半径, m。

滑板试样的磨损质量由感量为 0.1 mg 的 FA1104 型分析天平测量, 磨损率计算式为^[13]

$$W = \frac{\Delta m \cdot r}{L \cdot M \cdot \rho} \quad (2)$$

式中 W 为磨损率, $\text{cm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$; Δm 为质量磨损量, g; L 为滑动距离, m; ρ 为试样的密度, g/cm^3 。

2 分析与讨论

2.1 热性能分析

树脂固化物 YM 和 PBMI/YM 的 TG-DTG 曲线见图 2。以树脂固化物的热分解温度和树脂固化物质量损失 10.0% 时的温度作为基体耐热性的判定指标^[15]。

由图 2 中两种材料的热重(TG)曲线可知, YM 树脂固化物的热分解温度及树脂固化物热质量损失 10.0% 时的温度均低于 PBMI/YM 改性树脂固化物的。热质量损失为 10.0% 时, YM 树脂固化物的温度为 360 °C, PBMI/YM 改性树脂固化物的温度为 390 °C。由图 2 中两种材料的微分热重(DTG)曲线可知, 在给定的升温速率下, YM 树脂固化物的热裂解随温度的升高经历了 4 个不同质量损失阶段, 第 1 阶段发生在 355 °C 左右, 质量损失率为 9.8%; 第 2、第 3 和第 4 阶段的热质量损失温度分别发生在 405、550 和 710 °C 左右。而 PBMI/YM 改性树脂固化物的热裂解随温度的升高主要经历了 2 个阶段, 分别在 425 °C 和 665 °C 左右。在给定的升温速率下, PBMI/YM 改性树脂固化物的耐热性比 YM 树脂固化物有较大的提高。

树脂固化物热裂解的 DSC 结果见图 3。由图 3 可知, YM 树脂固化物的初始放热峰出现在 550 °C 左右, 而 PBMI/YM 改性树脂固化物的初始放热峰在 675 °C。这说明在 YM 树脂的主链上引进刚性 PBMI 基团后, 氧化放热峰后移, 制得的 PBMI/YM 改性树脂固化物

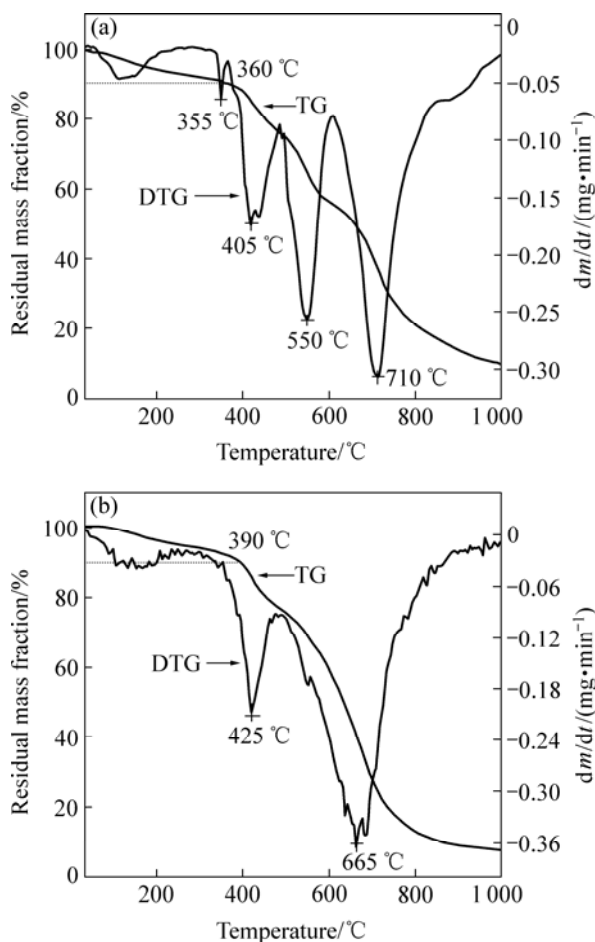


图 2 不同树脂固化物的 TG-DTG 曲线

Fig.2 TG-DTG curves of different kinds of consolidation resins: (a) YM; (b) PBMI/YM

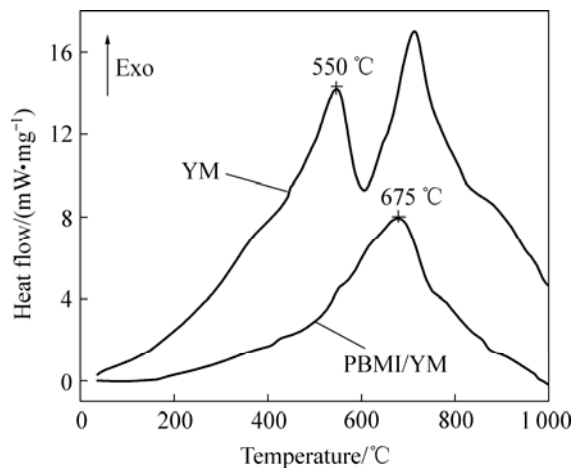


图 3 不同树脂固化物热裂解的 DSC 曲线

Fig.3 DSC curves of different kinds of consolidation resins

在耐热性上得到了明显提高。

树脂基体的耐热性主要由树脂分子的化学键和耐

热链结构等因素决定^[16]。改性试样耐热性得以提高的主要原因：一方面是在共混过程中，YM树脂主链上引进了热固性PBMI刚性基团，提高了主链的耐热性；另一方面，在热和催化剂的共同作用下，YM和PBMI树脂分子间可能发生残端反应。YM树脂和PBMI树脂的分子式如图4所示。

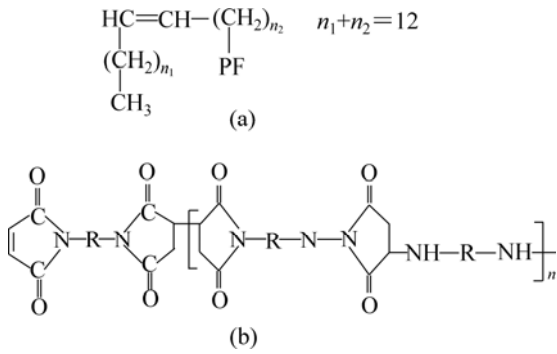


图4 YM树脂和PBMI树脂的分子式示意图
 Fig.4 Schemes of YM and PBMI molecular formula: (a) YM resin; (b) PBMI resin

2.2 热态磨损性能分析

2.2.1 环境温度对树脂基滑板热态磨损性能的影响

环境温度对树脂基滑板磨损率的影响见图5，树脂基滑板的摩擦因数随环境温度的变化曲线见图6。

由图5可见，两种树脂基滑板的磨损率均随环境温度升高而逐渐增大。环境温度达250℃时，YM树脂基滑板的磨损率比其在200℃时的高2倍左右。而在相同温度下，YM树脂基滑板比PBMI/YM改性树脂基滑板的高5倍。从图5还可知，在环境温度为400℃时，PBMI/YM改性树脂基滑板的磨损率与环境温度为250℃时YM树脂基滑板的基本相当。

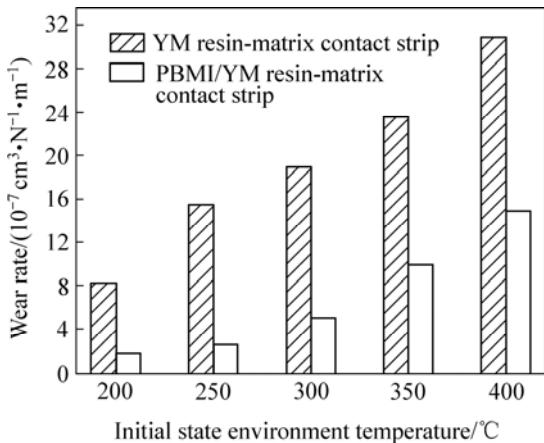


图5 环境温度对树脂基滑板试样磨损率的影响
 Fig.5 Influences of environmental temperature on wear rate of resin-matrix contact strip

由图6可知，当环境温度从200℃升高到300℃时，PBMI/YM改性树脂基滑板的摩擦因数呈现减小趋势，从200℃时的0.215降到300℃时的0.142，此后又缓慢升高。当环境温度从200℃升高到400℃时，YM树脂基滑板的摩擦因数呈现先增大，然后降低，最后又增大的变化趋势。由图6还可知，在相同条件下，PBMI/YM改性树脂基滑板的摩擦因数均小于YM树脂基滑板的。这表明PBMI/YM改性树脂基滑板的减摩性和耐磨性优于YM树脂基滑板。

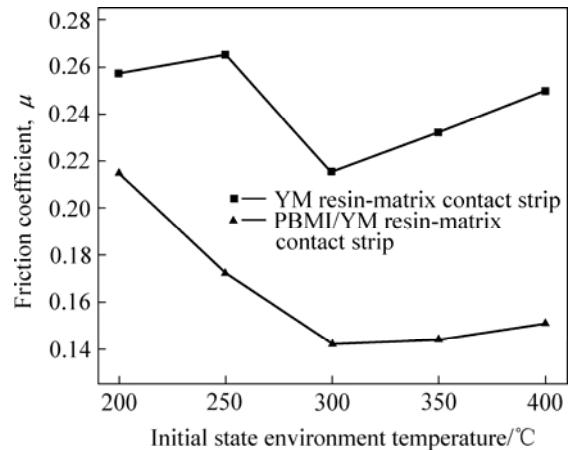


图6 环境温度对树脂基滑板试样摩擦因数的影响
 Fig.6 Influences of environmental temperature on friction coefficient of resin-matrix contact strip

随着环境温度的升高，树脂材料将发生热分解反应，导致其粘结力降低，使滑板磨损率明显增大。PBMI/YM改性树脂基滑板的热分解起始温度比YM树脂基滑板推后，延缓了解及氧化速率；共混改性后，PBMI/YM改性树脂中活性高、键能低的不饱和C=C^[17]的数量减少，也使得基体的耐热性得以提高。此外，在磨损面上的连续复合润滑膜不易从基体剥离，有效提高了滑板的减摩耐磨能力。

2.2.2 树脂基滑板磨损面SEM分析

图7和8所示分别为不同树脂基滑板在环境温度分别为200℃和350℃时，摩擦磨损30min的干态磨损表面形貌。

如图7和8所示，在环境温度为200℃时，YM树脂基滑板试样磨损表面有一些轻微的擦伤痕迹，犁沟和少许磨屑坑以及大量的复合润滑膜(见图7(a))，这表明在摩擦过程中，摩擦副表现出粘着磨损特征。而相同温度下，PBMI/YM改性树脂基滑板试样存在大量的复合润滑膜，其表面较光滑、界面结合良好，未见明显擦伤和转移痕迹(见图7(b))，这表明在摩擦过程中，摩擦副的局部磨损区域存在轻微的粘着磨损。

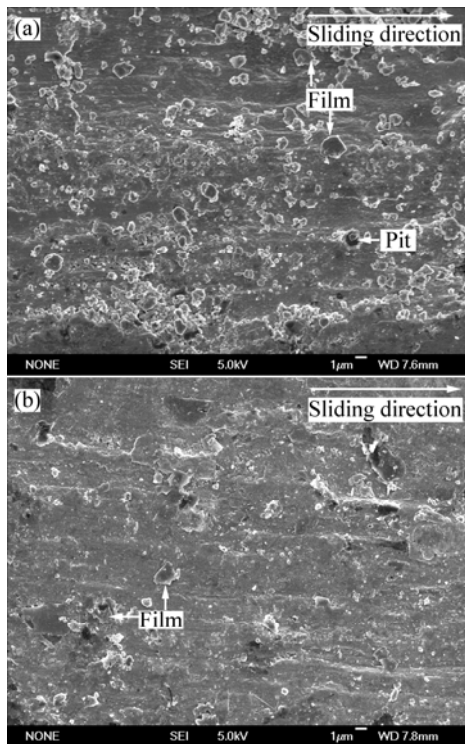


图 7 环境温度为 200 °C 时树脂基滑板的表面磨损形貌
Fig.7 SEM micrographs of worn surface of resin-matrix contact strip under initial temperature of 200 °C: (a) YM; (b) PBMI/YM

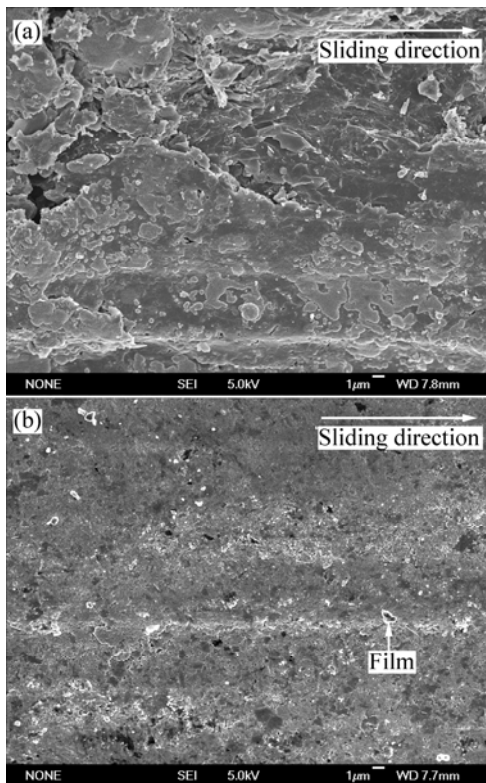


图 8 环境温度为 350 °C 时树脂基滑板的表面磨损形貌
Fig.8 SEM micrographs of worn surface of resin-matrix contact strip under initial temperature of 350 °C: (a) YM; (b) PBMI/YM

在环境温度为 350 °C 时, YM 树脂基滑板试样磨损表面有因剥落而留下的剥落坑和撕裂块(见图 8(a)),这是因为在磨损过程中,随着环境温度的升高, YM 基体较 PBMI/YM 改性基体易发生氧化断链和热分解反应,从而在滑板摩擦面上产生轻微的界面脱粘(见图 8(a)),使滑板的表层材料被粘附到对磨铜面,形成大量的磨屑,导致磨损加剧。这表明在摩擦过程中,摩擦副主要表现出热磨损的特征,辅以轻微的剥层磨损。而相同温度下, PBMI/YM 改性树脂基滑板试样磨损表面未见明显犁沟和剥离层,整体性较好(见图 8(b)),但连续复合润滑膜的数量逐渐减少。

在磨损过程中,以鳞片石墨为主的复合润滑膜在层间易于滑移,这层润滑膜有效隔离摩擦副的直接接触。在相同热态条件下, PBMI/YM 改性树脂基滑板比 YM 树脂基滑板能提供较完整的固体润滑膜,从而起到有效的减摩作用。

2.2.3 树脂基滑板/铜环摩擦副高温磨损机制

树脂基滑板在高温条件下的磨损主要是由复合材料中有机组分的热分解决定,同时还与摩擦副的表面形貌和润滑膜的形成等有关,温度是影响树脂基滑板高温磨损特性的最主要因素。Rhee^[18]建立的树脂基摩擦材料的热磨损率公式可表示为

$$\Delta W = \beta p^a v^b t \exp[-E_a / (RT)] \quad (3)$$

式中 ΔW 为热磨损率; p 为法向压力; v 为滑动速度; t 为摩擦时间; β 、 a 、 b 为与摩擦温度、复合材料材质相关的试验常数; E_a 为试样氧化反应的表现活化能; T 为对磨时界面的绝对温度。

由图 5 可知,在低温摩擦阶段,树脂基滑板的磨损率受环境温度的影响较小,其磨损率计算基本符合式(3)。但在高温摩擦阶段,摩擦副界面间吸热速率大于放热速率,引起摩擦副温升较快,导致树脂基体受热分解,磨损严重。在相同条件下,当把式(3)中的温度 T 视为惟一变量时,即得此时的热磨损率:

$$\Delta W = A \exp[-E_a / (RT)] \quad (4)$$

式中 A 为指前因子, R 为摩尔气体常数, 8.314 J/(mol·K)。

随着温度的升高,磨损率变化显著。对式(4)两边取自然对数,然后移项得

$$\ln(\Delta W) = -E_a / (RT) + \ln A \quad (5)$$

根据 Arrhenius 方程式^[19],树脂基滑板的热磨损率与温度符合式(5)。在式(5)中,设 E_a 和 A 为常数,由图 5 的数据代入式(5)可得各温度下滑板的热态磨损率,见表 2。以 $\ln(\Delta W)$ 为纵坐标,以 T^{-1}/K^{-1} 为横坐标

进行做图,可以得到图9。通过图9中的直线斜率可以计算出氧化反应的活化能见表3。

表2 不同树脂基滑板的热态磨损率

Table 2 Thermal wear rate of different kinds of resin-matrix strips at different temperatures

T/K	$T^{-1}/10^{-3} K^{-1}$	$-\ln[\Delta W_1/(\text{cm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})]$	$-\ln[\Delta W_2/(\text{cm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})]$
473.2	2.11	4.89	6.45
523.2	1.91	4.26	6.06
573.2	1.75	4.06	5.39
623.2	1.61	3.84	4.71
673.2	1.49	3.57	4.30

表3 不同树脂基滑板氧化反应的活化能数据

Table 3 Active energy data of oxidation reaction for different resin-matrix contact strips

Material	$E_a/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	r
YM resin-matrix contact strip	16.7	0.985
PBMI/YM resin-matrix contact strip	30.1	0.988

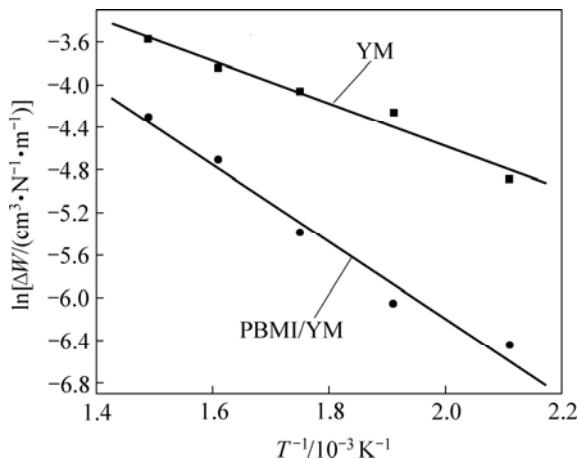


图9 不同树脂基滑板材料的阿仑尼乌斯曲线

Fig. 9 Arrhenius curves of different kinds of resin-matrix contact strips

对某一反应过程而言,反应的活化能与反应机理有关,机理不同,活化能不同,活化能越大表明反应进行得越慢。PBMI/YM 改性树脂基滑板氧化反应过程的活化能大于YM树脂基滑板的,这表明PBMI/YM改性树脂基滑板的耐热性优于YM树脂基滑板。

在相同环境温度下,随着磨损的进行,由于环境热和摩擦热的共同作用,使得树脂基滑板磨面的表层、

次表层基体材料发生软化。在高温下,树脂基滑板表面受到紫铜磨面的法向和切向作用而产生软化变形,使滑板表层材料被粘附至对磨表面,从而在滑动摩擦时形成鳞片状的剥落碎片。在树脂基体未发生热分解时,片层状剥落碎片在磨面上形成有益的转移膜,起到了减缓磨损的作用。随着磨损的进行,在磨面间形成复合润滑膜,润滑膜主要来源于磨损中脱落的鳞片石墨、金属氧化物和部分基体热解形成的树脂炭^[20],润滑膜在对偶面形成均匀牢固转移润滑膜,如图7(a)、7(b)和图8(b)所示。这种膜的硬度低,可对划伤后的复合润滑膜进行“自补给、自修复”,使得复合润滑膜在摩擦表面上生成和剥落过程达到动态平衡。随着磨损的进行,当摩擦副界面间吸热速率大于放热速率时,摩擦表面温度不断升高,尤其当滑板表面接触点温度超过树脂基体的熔点时,树脂基体热分解反应速率加剧,从而导致滑板表层材料的性能下降,组元间的结合强度减弱,表现出剥层磨损特征(见图8(a))。随着摩擦表面温度的升高,树脂热解成树脂炭,复合润滑膜在反复摩擦下产生裂纹,使复合润滑膜被破坏,从而导致滑板的摩擦因数呈现轻微的增大趋势(见图6)。因此,树脂基滑板/铜环的磨损机制呈现出类似的规律,即在磨损过程中,随着环境温度的升高,发生由粘着磨损向伴随有轻微剥层磨损的热磨损转变。

3 结论

1) 在相同条件下, PBMI/YM 改性树脂基滑板热态磨损率和摩擦因数均低于YM树脂基滑板。在环境温度为350℃,磨损时间为30min时, YM树脂基滑板的热态磨损率和摩擦因数分别为 $23.57 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 和0.232;而PBMI/YM改性树脂基滑板的分别为 $9.88 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 和0.144。

2) 随着温度的升高,树脂基滑板的磨损率不断增加, PBMI/YM改性树脂基滑板的耐热性明显优于YM树脂基滑板。YM树脂主链上引进了热固性的刚性PBMI基团后,提高改性树脂的热分解温度,延缓了其分解速率。

3) 在磨损过程中,随着环境温度的升高,树脂基滑板/铜环的磨损机制发生由粘着磨损向伴随有轻微剥层磨损的热磨损转变。

4) 磨损过程产生的固体润滑膜能减少磨损,在树脂基体未发生热分解前,滑板表面存在有益的复合润滑膜,随着温度的升高,复合润滑膜呈现出逐渐减少的趋势。

REFERENCES

- [1] He D H, Manory R. A novel electrical contact material with improved self-lubrication for railway current collectors[J]. *Wear*, 2001, 249(7): 626–636.
- [2] 王贵青, 陈敬超, 孙家林. 电力机车受电弓滑板材料的研究状况及发展趋势[J]. *材料导报*, 2003, 17(1): 18–20.
WANG Gui-qing, CHEN Jin-chao, SUN Jia-lin. Current status and future trends of research on pantograph slide[J]. *Materials Review*, 2003, 17(1): 18–20.
- [3] Tomiyama Y. Development of brake lining and contact strip materials for high speed trains[J]. *Metal Powder Report*, 1994, 49(3): 42–44.
- [4] Azevedo C R F, Sinatora A. Failure analysis of a railway copper contact strip[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2004, 11(6): 829–841.
- [5] 高强, 吴渝英, 张国定, 洪 钺, 肖学明. 碳纤维对铜-石墨复合材料性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2000, 10(S1): 97–101.
GAO Qiang, WU Yu-ying, ZHANG Guo-ding, HONG Qin, XIAO Xue-ming. Effect of carbon fiber on property of copper-graphite composite materials[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10(S1): 97–101.
- [6] Jia S G, Liu P, Ren F Z, Tian B H, Zheng M S, Zhou G S. Sliding wear behavior of copper alloy contact wire against copper-based strip for high-speed electrified railways[J]. *Wear*, 2007, 262(7/8): 772–777.
- [7] Suckchoon K. A study of friction and wear characteristics of copper- and iron-bases sintered material[J]. *Wear*, 1993, 162/164, Part 2: 1123–1128.
- [8] Nagasawa H, Kato K. Wear mechanism of copper alloy wire sliding against iron-base contact strip under electric current[J]. *Wear*, 1998, 216(2): 179–183.
- [9] Kubo S, Kato K. Effect of arc discharge on the wear rate and wear mode transition of a copper-impregnated metallized carbon contact strip sliding against a copper disk[J]. *Tribology International*, 1999, 32(7): 367–378.
- [10] Kubo S, Kato K. Effect of arc discharge on wear rate of Cu-impregnated carbon contact strip in unlubricated sliding against Cu trolley under electric current[J]. *Wear*, 1998, 216(2): 172–178.
- [11] 王泽华. 复合材料在高速列车上的应用[J]. *机械工程材料*, 2001, 25(10): 1–4.
WANG Ze-hua. Application of composite materials in high-speed train[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2001, 25(10): 1–4.
- [12] He D H, Manory R, Sinkis H. A sliding wear tester for overhead wires and current collectors in light rail systems[J]. *Wear*, 2000, 239(1): 10–20.
- [13] 陈振华, 刘耀宗, 陈 刚, 滕 杰, 严红革. SiC_p/Al复合材料制动盘用树脂基摩擦材料研究[J]. *湖南大学学报*, 2005, 32(6): 73–77.
CHEN Zhen-hua, LIU Yao-zong, CHEN Gang, TENG Jie, YAN Hong-ge. Study on resin matrix friction materials used for SiC_p/Al composite brake disc[J]. *Journal of Hunan University*, 2005, 32(6): 73–77.
- [14] Chen Z H, Teng J, Chen G, Fu D F, Yan H G. Effect of the silicon content and thermomechanical treatment on the dry sliding wear behavior of spray-deposited Al-Si/SiC_p composites[J]. *Wear*, 2007, 262: 362–368.
- [15] 潘贻珊, 张佐光, 孙志杰, 李 敏. ODP/PMDA共聚PMR聚酰亚胺树脂[J]. *复合材料学报*, 2003, 20(5): 7–10.
PAN Yi-shan, ZHANG Zuo-guang, SUN Zhi-jie, LI Min. ODP/PMDA PMR copolyimide resins[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2003, 20(5): 7–10.
- [16] 陈建林, 万 隆, 刘小磐, 汪 洋. 二元胺改性双马来酰亚胺树脂的固化工艺[J]. *热固性树脂*, 2005, 20(5): 1–4.
CHEN Jian-lin, WAN Long, LIU Xiao-pan, WANG Yang. The thermosetting process of diamine-modified bismaleimide resin[J]. *Thermosetting Resin*, 2005, 20(5): 1–4.
- [17] 李宗猛, 潘振华, 毛协民, 王文清, 戴绪绮, 黄乃瑜. 呋喃树脂硬化过程中呋喃环反应行为的研究[J]. *铸造*, 1997, 46(7): 12–15.
LI Zong-meng, PAN Zhen-hua, MAO Xie-min, WANG Wen-qing, DAI Xu-qi, HUANG Nai-yu. Study on curing behaviour of furan rings during the hardening process of furan resin[J]. *Foundry*, 1997, 46(7): 12–15.
- [18] Rhee S K. Wear equation for polymers sliding against metal surfaces[J]. *Wear*, 1970, 16(6): 413–445.
- [19] 高朋召, 王红洁, 金志浩. SiC涂层/三维碳纤维编织体的氧化动力学和机理研究[J]. *无机材料学报*, 2005, 20(2): 323–331.
GAO Peng-Zhao, WANG Hong-Jie, JIN Zhi-Hao. Oxidation kinetics and mechanism of SiC coating/3-dimensional carbon fiber braid[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2005, 20(2): 323–331.
- [20] 李江鸿, 熊 翔, 巩前明, 黄伯云. 不同基体炭/C/C复合材料的摩擦磨损性能[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(3): 446–451.
LI Jiang-hong, XIONG Xiang, GONG Qian-ming, HUANG Bai-yun. Friction and wear properties of carbon/carbon composites with different matrix carbon[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(3): 446–451.

(编辑 杨 兵)