

研
究
开
发

高摩合成闸瓦的龟裂和金属镶嵌物 产生机理的研究

张定权¹, 李丹丹², 李晓波²

(1 华东理工大学, 上海 200237; 2 上海壬丰复合材料有限公司, 上海 201205)



作者简介: 张定权 (1962-), 男, 高级工程师, 从事摩擦材料和密封材料的研究与生产。

摘 要:通过对摩擦材料的填料组份、材料机械损失正切损耗角 $\tan \delta$ 及基体材料高温残留物进行分析, 研究高摩合成闸瓦的龟裂和金属镶嵌物的产生机理, 得出提高闸瓦材料的机械损失正切损耗角 $\tan \delta$ 可以有效防止闸瓦龟裂的产生, 提高树脂的分解残留物比例可减少金属镶嵌物的产生。

关键词: 高摩合成闸瓦; 龟裂; 金属镶嵌物; 列车制动装置

中图分类号: U260.351 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)02-0034-03

Mechanism Research of Cracking and Metal Mosaic for High Friction Composite Brake Shoe

ZHANG Ding-quan¹, LI Dan-dan², LI Xiao-bo²

(1. East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Shanghai Reinphen Composite Material Co. Ltd., Shanghai 201205, China)

Abstract: To analyze the packing composite, mechanical loss tangent of loss angle($\tan \delta$) and the high temperature residue of the friction material, this paper set up the mechanism of cracking and metal mosaic of high friction composite brake shoe, reached the results that the mechanical loss tangent of loss angle($\tan \delta$) might prevent cracking, the increase of the resin high temperature residue ratio might avoid to produce the metal mosaic.

Key words: high friction composite brake shoe; cracking; metal mosaic; train braking device

0 引言

轨道交通的特点是运行站距短、制动频次高, 因此高摩合成闸瓦在列车制动装置中获得了广泛的应用。但是高摩合成闸瓦在制动过程中往往会产生龟裂和金属镶嵌物, 从而造成对对偶材料——车轮的损伤, 车辆轮对踏面产生热龟裂、沟槽及踏面剥离。当踏面发生剥离或沟槽磨损后, 将影响车辆的运行平稳性, 甚至造成制动失效, 给车辆安全运营造成很大危险。

高摩合成闸瓦在制动过程中的摩擦磨损机理极为复杂, 从宏观来看, 闸瓦是个塑性材料, 它的摩擦机理存在粘附摩擦及迟滞摩擦, 闸瓦的工作温度常常为闸瓦基体材料的分解温度。同时用于摩擦性能调节的填料往往对对偶材料产生犁削磨损^[1]。基于上述因素, 本

文将对闸瓦的龟裂和金属镶嵌物产生的机理进行分析研究。

1 试验

为考察高摩合成闸瓦各组份对热龟裂和金属镶嵌物的影响, 将采用不同组份配方制成的闸瓦分别对其热性能、摩擦性能及摩擦后的表面状况进行分析测试, 得到影响闸瓦金属镶嵌物产生的主要因素。

1.1 原材料

原材料规格见表 1。

表1 原材料规格

材料名称	型号
2123 酚醛树脂	100 目
CM-15 改性酚醛树脂	100 目
长石粉	200 目
陶土粉	200 目
钢纤维	D-05
Kevlar 浆粕	979 型

收稿日期: 2010-08-03

1.2 试验配方

试验配方见表2。

表2 试验配方

配方编号	2123/ CM-15/%	长石粉 /%	陶土粉 /%	钢纤维 /%	Kevlar979 /%
1	20/6	10	40	25	5
2	15/5	10	40	25	5
3	10/10	10	40	25	5
4	5/15	10	40	25	5
5	0/20	10	40	25	5
6	0/20	50	0	25	5
7	0/20	40	10	25	5
8	0/20	30	20	25	5
9	0/20	20	30	25	5
10	0/20	0	50	25	5

1.3 性能测试

热性能：采用 Dupont 1090 热分析仪，升温速率 10℃/min；材料动态粘弹谱仪频率 3.5 Hz，升温速率 20℃/min。

摩擦性能：采用 HP-S 定速式摩擦试验机，压力 10 kg/cm²，温度 100~350℃。

表面状况：采用扫描电镜观察。

2 分析

2.1 树脂热性能分析

图1及图2为2123树脂及CM-15树脂的TGA曲线，各配方基体材料的高温残留物见表3。

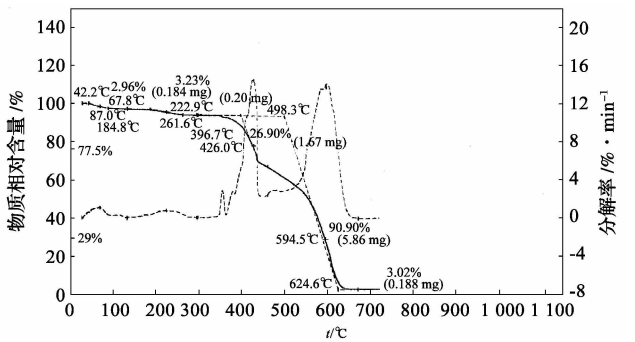


图1 2123 未改性酚醛树脂的 TGA

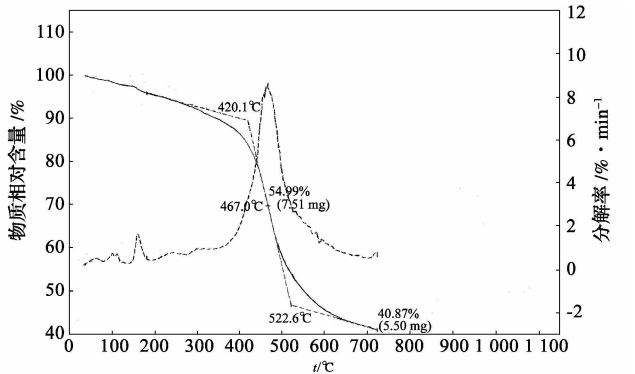


图2 CM-15 改性酚醛树脂的 TGA

表3 各配方基体材料的750℃高温残留物

配方编号	高温残留物 / %	机械损失切向损耗角(tanδ)
1	3.02	0.039
2	12.49	0.049
3	21.95	0.060
4	31.41	0.070
5	40.87	0.080

由图1及图2中可见未改性的2123酚醛树脂其高温残留物仅为3.02% (见表3)，改性后的树脂高温残留物为40.87%，改性后的树脂其热性能有了很大改善，具有较好的热稳定性。未改性的酚醛树脂在测定范围内有2次放热反应，分别在300~400℃及400~500℃，改性后的CM-15树脂只在400~500℃有一次放热反应。有报道表明改性后的树脂可以有效保护树脂的网状结构不被破坏^[2]。

2.2 机械损失切向损耗角 (tanδ) 对摩擦磨损的影响

闸瓦在常温下的摩擦机理可以应用金属与弹性体之间的摩擦机理，即闸瓦的摩擦系数。

$$\mu = \mu_{粘附} + \mu_{迟滞} \tag{1}$$

$$\mu_{粘附} = K_1 \frac{E}{P \cdot r} \tan \delta \tag{2}$$

$$\mu_{迟滞} = K_2 \left(\frac{P}{E}\right)^n \tan \delta \tag{3}$$

故：

$$\mu = \left[K_1 \frac{E}{P \cdot r} + K_2 \left(\frac{P}{E}\right)^n \right] \tan \delta \tag{4}$$

式中： K_1 ——由摩擦力确定的常数； E ——有效综合杨氏模量； P ——外力； r ——小于1的指数； $\tan \delta$ ——机械损失切向损耗角； n, K_2 ——常数。

由式(4)可见，材料的切向损耗角 $\tan \delta$ 与摩擦系数成正比，这与试验数据相吻合 (见表3)。

机械损失正切损耗角 $\tan \delta = E'/E$ 中 E' 或 E 为损耗模量，是与正应力成 90° 方向的总应力和总变形之比，由此可见，材料的 $\tan \delta$ 越大，表明要使材料发生形变所消耗的能量也越大。根据粘附理论，当闸瓦以速度 v 在金属表面上滑动 (如图3所示)，假定粘附持续一段时间，阶段a“粘附”发生在A点上；阶段b闸瓦以速度 v 移动一距离 λ ，并产生摩擦阻力；阶段c在A点上的粘附破坏，在A'点上建立新的粘附点。每一次粘附、破

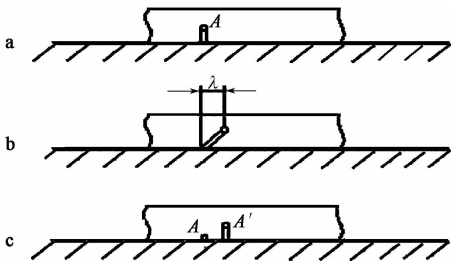


图3 闸瓦粘附的简单原理

坏都在闸瓦上有一个相应的变形发生，它促使能量弹性地存贮于闸瓦材料中，经多次反复后，当热能和弹性性能达到并超过闸瓦中基体材料的化学键能时，化学键发生断裂，表面出现开裂，并在此产生应力集中，使裂纹向深度和长度方向发展，这就是裂纹的长度方向总是与闸瓦摩擦滑动方向垂直，并随着闸瓦的不断磨损，不但不会消失，而且只会加剧的原因。因此提高材料的正切损耗角，对防止龟裂极为有利。

2.3 基体材料（高聚物）的分解残留物对摩擦磨损的影响

由于闸瓦与车轮轮毂的摩擦过程极为复杂^[3]，表面温度高于300℃，而实际摩擦界面的局部温度高于600℃，这对有机材料来讲是难以承受的，已高于它们的分解温度，因此基体分解残留物的含量就显得尤为重要。此时的界面现象有：

①摩擦界面的高聚物分解，不同于一般状态下的高聚物分解，主要表现在：a.在长期变化而方向固定的应力作用下，这种应力使高聚物聚集态改变，使定向磨削时产生的游离基发生进一步反应；b.工作时的摩擦界面的温度和停止工作时表面的温度相差较大，特别有时是处在瞬时高温作用下；c.摩擦副工作时是在无氧或缺氧状态下，而停止工作时，暴露于空气中又是有氧状态；d.反复使用时的疲劳作用，加剧了对高聚物与填料之间的界面的破坏。

因此，基体的摩擦表面容易产生空穴。

②产生的小分子物质造成各种混合摩擦，其中有气体介质产生，而气体又被金属表面吸附形成气体膜，此膜又在压力下不断地被破坏。分解产生的苯焦油等液体生成液体膜，由于这些液体具有很高的粘度，致使摩擦界面中的磨粒不易排出。而磨粒中被高莫氏硬度的填料犁削下来的金属粒发生聚集，在力和温度的作用下，发生熔融。当液体膜被不断破坏时，熔融的金属磨粒就镶嵌在因树脂分解而产生的空穴中。而这些镶嵌在闸瓦上的金属物，其金相结构已发生了变化。由于摩擦后冷却速度的不同，会在表层中得到淬火和回火的结构组织，且发生原子间的相互扩散，引起对偶材料中的碳和合金元素重新分配，形成一种特殊的结构，称为摩擦奥氏体（奥氏体—马氏体—碳化物）。该奥氏体硬度较高，其磨损行为为典型的粘着磨损，因此破坏性很大，严重损伤轮毂。

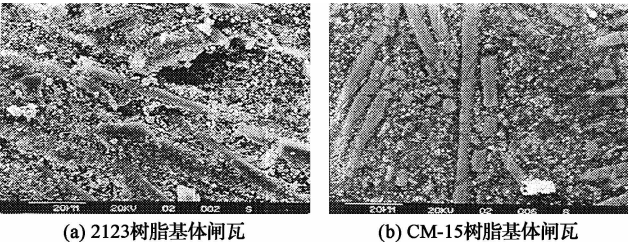


图4 不同基体闸瓦的扫描电镜

从扫描电镜的照片(图4)可见，基体分解残留物

越多，空穴越少。同时基体分解残留物越多，分解产生的粘性液体也越少，因此更不易产生金属镶嵌物，有利于摩擦界面的清洁。

2.4 高莫氏硬度填料的影响

由于基体材料树脂、增强材料钢纤维和Kevlar浆粕的摩擦系数较低，为了获得具有一定摩擦系数的闸瓦，必须添加高莫氏硬度的填料，如铬铁矿粉，重质氧化镁，长石粉，刚玉等。由于这些填料的加入，增强了对对偶材料的犁削作用，这不仅加大了高温下对偶材料的磨损(见表4)，更由于产生大量的金属磨粒而使金属镶嵌物产生，造成对偶材料轮毂的非正常磨损。从图5中的几个图片比较可以看出，随着长石粉含量的增加，金属镶嵌物的数量也增加。

表4 100℃及350℃时摩擦系数及磨耗率

配方编号	100℃		350℃	
	μ	$\Delta w(10^{-7}cm^3/Nm)$	μ	$\Delta w(10^{-7}cm^3/Nm)$
1	0.41	0.25	0.32	0.69
2	0.42	0.25	0.35	0.60
3	0.42	0.18	0.36	0.40
4	0.43	0.20	0.38	0.25
5	0.44	0.15	0.41	0.22
6	0.51	0.35	0.48	0.75
7	0.48	0.29	0.45	0.65
8	0.45	0.25	0.40	0.65
9	0.40	0.21	0.36	0.40
10	0.35	0.16	0.30	0.25

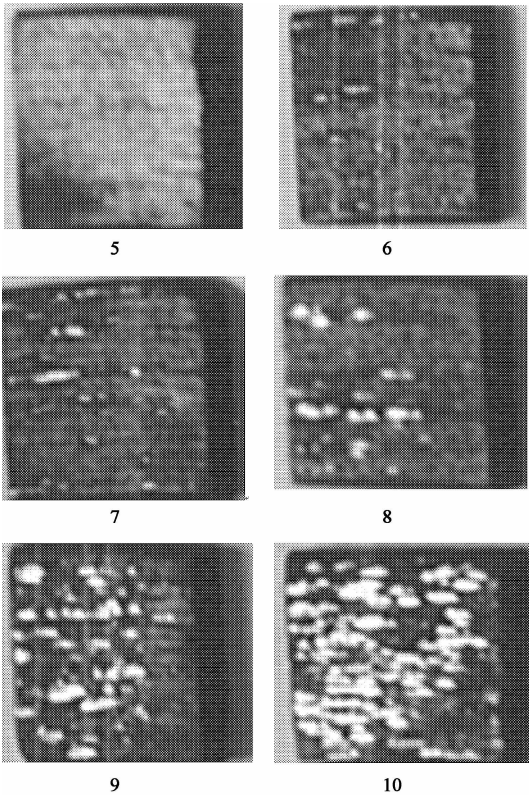


图5 长石粉含量变化(配方编号5-10)对闸瓦金属镶嵌物产生的影响

(下转第39页)

其中： C_1 、 C_2 、 P 、 Q 分别满足

$$C_1 = \frac{\mu_0 N^2 S_\delta}{\varepsilon_e} = 0.000\,926\,7,$$

$$C_2 = -\frac{\mu_0 N S_\delta H_c \delta_p}{\varepsilon_e} = -0.169\,7,$$

$$P = \delta_p S_\delta / (\varepsilon_e \mu_r S_p) = 0.033\,04,$$

$$Q = \delta_p S_\delta / (\varepsilon_p \mu_r S_p) = 0.036\,83,$$

$R=1\Omega$ 为线圈电阻，上标“ $\cdot$ ”表示变量对时间 t 的

导数。选取 $x=[x_1 \ x_2 \ x_3]^T=[\delta \ \dot{\delta} \ i_1+i_2]^T$ ，

$u=[u_1 \ u_2]^T$ ，在零功率悬浮工况下，系统的平衡点为

$$x_0 = \begin{bmatrix} -\frac{C_2}{2\sqrt{\frac{C_1 Mg}{\varepsilon_e}}} - \frac{Q}{2} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \text{而在平衡点处的线性数}$$

学模型为式(2)：

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{4gL}{C_2} & 0 & \frac{2C_1g}{T} \\ 0 & \frac{2TL}{C_1C_2} & \frac{RT}{2C_1L} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{T}{2LC_1} & -\frac{T}{2LC_1} \end{bmatrix},$$
$$C = [1 \ 0 \ 0]$$

变量 T 、 L 满足 $T=C_2+(Q-P)\sqrt{C_1Mg/\varepsilon_e}<0$ ， $L=\sqrt{\frac{C_1Mg}{\varepsilon_e}}$

$$P_c = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B \end{bmatrix} \quad (3)$$

很容易判断式(3)满秩，说明系统是可控的。采用

状态反馈控制，仿真结果如图6~图8。另外，仿真结果图表示系统起浮过程中，5 s时刻突然其中一个控制器输出故障时，系统仍正常工作，不会发生吸死故障。

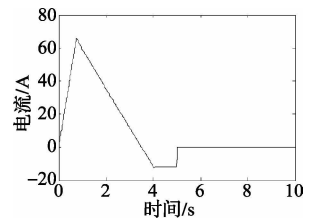


图 6 控制器 1 电流输出

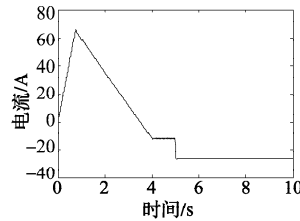


图 7 控制器 2 电流输出

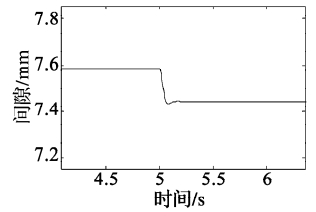


图 8 间隙值

3 结语

经过对磁铁、电源、控制器简单更新改造后，系统具有冗余性，在硬件条件上最大限度降低了吸死的可能性。经分析，新系统是可控、可实现的，虽然增加了一定的控制复杂度和成本，但这些相对于能扫除吸死障碍还是微不足道的。

参考文献：

- [1] 陈慧星. 永磁型EMS磁浮列车悬浮磁铁设计与控制问题研究[D]. 长沙：国防科技大学，2009.
- [2] 李云钢. EMS型磁浮列车悬浮控制技术研究[D]. 长沙：国防科技大学，1997：10-20.
- [3] 王莉，连级三. 永磁和电磁构成的混合式悬浮系统研究[J]. 铁道学报，2005，27(3).
- [4] 王莉，张昆仑. 基于零功率控制策略的混合磁悬浮系统[J]. 西南交通大学学报，2005，40(5).
- [5] 张颖，陈慧星，李云钢. 电磁永磁混合EMS型磁浮列车的吸死防护问题研究[J]. 兵工自动化，2009，28(1).

(上接第36页)

3 结论

理论和试验表明：

① 提高闸瓦材料的机械损失正切损耗角 $\tan\delta$ 可以有效防止闸瓦龟裂的产生。

② 基体材料(树脂)的分解残留物，对金属镶嵌物的产生至关重要，提高树脂的分解残留物比例可以防止或减少金属镶嵌物的产生。

③ 高莫氏硬度(莫氏硬度大于5)的填料的加入，虽然可以增加闸瓦的摩擦系数，但同时也增加了金属镶嵌物产生的可能。

④ 由于材料的机械损失正切损耗角 $\tan\delta$ 与材料的摩擦系数 μ 成正比，高机械损失正切损耗角 $\tan\delta$ 的材料可以减少高莫氏硬度填料的应用，因此也可以减少或避免金属镶嵌物的产生。

参考文献：

- [1] 李岳恒，张启安. 对机车闸瓦开发的探讨[J]. 内燃机车，2001(4):24-27.
- [2] Gurunath P V, Bijwe J. Friction and wear studies on brake-pad materials based on newly developed resin[J]. Wear, 2007, 263: 1212-1219.
- [3] 马东辉，张永振，陈跃，宫宝. 制动摩擦材料高速摩擦学性能的主要影响因素[J]. 润滑与密封. 2003(6):44-47.