复合材料学报 第18卷 第1期 2月 2001年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 18 No. 1 February 2001

文章编号: 1000-3851(2001)01-0062-05

SiC颗粒增强铝基复合材料制动盘的研究

齐海波, 丁占来, 樊云昌, 姜稚清
(石家庄铁道学院 材料科学与工程研究所, 石家庄 050043)

摘 要: 采用半固态搅拌熔炼-液态模锻工艺制备了与Santana轿车前制动器相匹配的SiC颗粒增强铝基复合材料制动盘, 对该制动盘进行了材料拉伸性能和微观结构分析, 并在SCHENCK制动试验台上进行了制动性能和制动磨损试验。结果表明, 复合材料的拉伸性能优于传统制动盘材料HT250铸铁; 在各种制动工况条件下, 复合材料制动盘对制动衬片的摩擦系数均在大众公司企业标准规定的范围之内, 且较稳定; 此外, 复合材料制动盘质轻、耐磨, 制动噪音小、温升低, 运转平稳; 因此, 可望以其替代传统的铸铁制动盘, 提高制动器的安全可靠性和服役寿命, 减轻轿车悬挂系统的重量, 降低油耗。

关键词: SiC_P/Al复合材料; 制动盘; 台架试验; 摩擦系数
中图分类号: TB331; U467 **文献标识码:** A

RESEARCH ON AUTOMOTIVE BRAKE DISCS OF SiC_P/Al COMPOSITE

QI Hai-bo, DING Zhan-lai, FAN Yun-chang, JIANG Zhi-qing
(Institute of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The SiC_P/Al composite brake disc designed for the front brake of SANTANA cars was prepared by semi-solid stirring melting and liquid forging. The tensile properties and microstructures of the disc materials were examined, and the tribological-wear performances of the disc were tested on the SCHENCK brake testing system made in Germany. The results show that the tensile properties of the composites are superior to those of the conventional disc material, grey cast iron; and that under different braking conditions, the friction coefficients of the composite disc against the conventional brake pad are within the range specified by the standard of VOLKSWAGEN company and with small fluctuations. It is also found that the brake disc made of the composite has such advantages as light weight, high wear resistance, low braking noise and low braking temperature rises, smooth operating, etc. Hence, it is hopeful to substitute the composite disc for the traditional cast iron disc to increase reliability and to prolong the survice life of the car brake, to lighten the weight of the hanging system, and thus, to decrease gas expenditure of cars.

Key words: SiC_P/Al composite; brake discs; dynamometer tests; friction coefficients

目前, 随着能源的日益紧缺和车辆速度的不断提高, 车辆的减重已成为必然的趋势。与传统钢铁材料相比, SiC颗粒增强铝基复合材料具有高的比强度、比刚度, 良好的耐磨性和热稳定性等特点, 较适合于制作汽车和火车盘形制动器的制动盘, 从而使悬挂系统的重量减轻50%以上。国外, 日、德等国相继开发出了适于高速列车的SiC颗粒增强铝基复合材料制动盘[1], 美国Ford公司进行了轿车制动盘的研制和开发[2]; 国内, 虽有上海交通大学王文龙等人研制铝基复合材料摩托车制动轮毂的报道[3], 但在轿车和火车复合材料制动盘的研究方面, 尚未见诸报道。本研究中采用非真空条件下的搅拌熔炼-液态模锻工艺, 制备了SiC颗粒增强铝基复合材料, 将制备的材料用于Santana轿车前制动盘的研制, 并对复合材料制动盘进行了一系列的性能测试和台架试验, 以期开发出高性能的新型轿车制动盘, 达到减轻

收稿日期: 1999-05-30; 收修改稿日期: 1999-10-30
基金项目: 河北省博士基金资助项目(96Z1107)
作者介绍: 齐海波(1972), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 金属基复合材料及纤维增强混凝土复合材料。

轿车悬挂系统重量并降低油耗的目的。

1 制动盘的制备

本研究制备的复合材料基体组分是与 ZL109 相类似的铸造铝合金(wt%：11.0～13.0Si-0.5～1.5Cu-1.8～2.3Mg-0.8～1.5Ni)；增强体组分选用粒度代号为 W40 的绿色 T-SiC 颗粒，其在复合材料中的体积分数为 20%。

块状铝合金经清洗烘干后放入带有石墨搅拌器的 GWJ-0.05-100-1 型中频感应炉内[4]（坩埚内壁直径为 200 mm）熔化，加热至 720℃后进行精炼、捞渣。然后，按特殊工艺预处理后的 SiC 颗粒，由 Ar 气流携带被均匀地喷吹到熔液表面，借助重力和旋涡力量进入到熔液中去。待全部 SiC 颗粒加入后，将熔液降温至 565℃（基体铝合金的半固态温度），以 690 rpm 的转速对其进行搅拌；同时，在熔液上方通入 Ar 气，保护液面免被氧化；30 min 后停止搅拌，再迅速将熔液升温到 720℃，加入适量的 Al-9%Sr 中间合金变质剂，对熔液进行变质处理；而后，往熔液内通入高纯 Ar 气，对熔液再次进行精炼；扒渣、过滤后，将复合材料熔液浇入安装在 6300 kN 四柱式压力机上的制动盘模具中进行液态模锻成形，挤压比压为 100 MPa，保压时间为 40 s，模具预热温度为 250℃。液态模锻所用模具如图 1 所示。

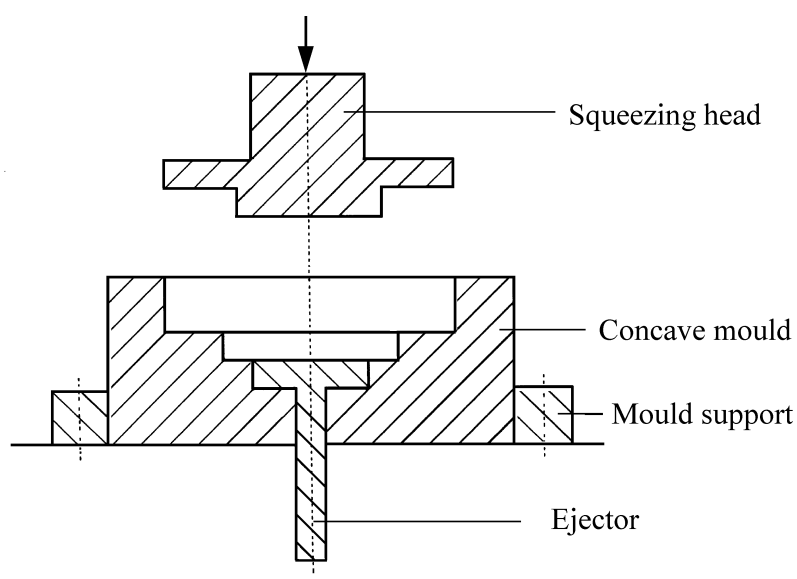

图 1 液态模锻用模具图

Fig. 1 Scheme of squeeze-casting mould

2 试验结果及讨论

2.1 力学性能及组织分析

从热处理后的 SiC 颗粒增强铝基复合材料制动盘本体取样，并将其加工成标准拉伸试样。试样直径为 5 mm，标距段长度为 25 mm。材料的室温拉伸性能测试在 MTS880 电子万能试验机上进行，拉伸应变速率为 $6\times10^{-4}s^{-1}$。同时，在 HB3000 型布氏硬度计上测定了复合材料的硬度。测试结果如表 1 所示。

表 1 SiC_P/Al 复合材料及铸铁 HT250 的力学性能

Table 1 Mechanical properties of the SiC_P/Al composite and HT250

Materials	Tensile strength/MPa	Brinell Hardness
W40SiC_P20 vol%/Al	320	152
HT250*	250	170～241

*：数据摘自 GB/T 9439-88，铸件壁厚在 10～20 mm 之间。

从表 1 可以看出，复合材料的抗拉强度比铸铁 HT250 的抗拉强度提高了约 28%，完全可以满足制动盘的强度要求。由于本研究中采用的非真空熔炼条件下的复合材料制备工艺解决了搅拌铸造法的几个关键问题。例如，采用特殊颗粒预处理工艺解决了 SiC 颗粒与铝合金熔液浸润性差的问题；在基体铝合金处于半固态温度时，通过合理的强制搅拌工艺使 SiC 颗粒在基体合金中达到了基本均匀的分布状态；选择高硅铝合金作为基体组分并采用低热胀系数陶瓷套管热电偶全过程监控铝液温度，使 SiC 颗粒与基体铝合金的界面处无脆性反应物生成；采用高纯 Ar 气保护液面、对合金熔液进行两次精炼，并采用液态模锻工艺成形，有效地避免了气孔、夹杂等铸造缺陷的发生。因此，复合材料的内在质量得到了保障。

图 2、图 3 分别为 W40SiC_P20 vol%/Al 复合材料的微观结构和 SiC 颗粒分布状况的光学显微照片。从图中可以看出，复合材料中的 T-相枝晶破碎、间距较小，共晶硅为球状颗粒且其尺寸细小、分布均匀；SiC 颗粒也基本处于均匀分布状态。

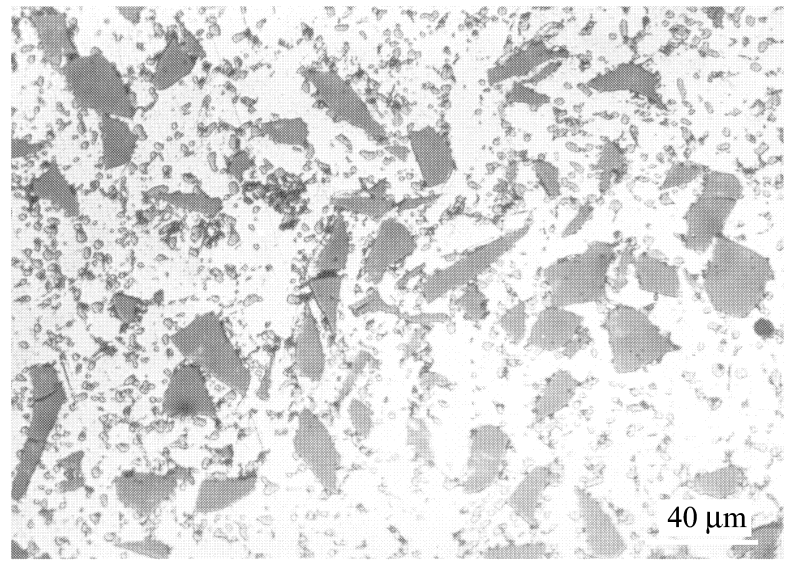

图 2 W40SiC_P20 vol%/Al 复合材料的微观结构

Fig. 2 Microstructure of W40SiC_P20 vol%/Al composite

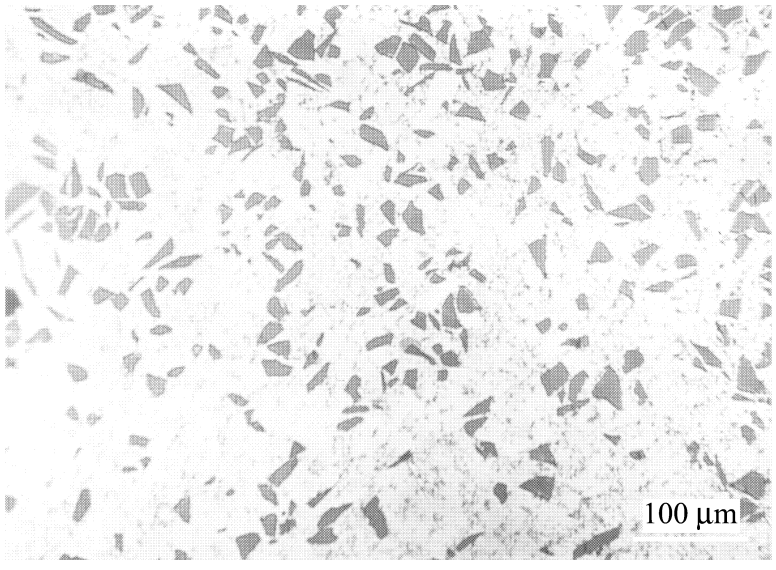

图 3　SiC 颗粒在基体铝合金中的分布

Fig. 3　Distribution of SiC_P in Al-alloy matrix

2.2　制动盘的摩擦磨损台架性能试验

制动盘的摩擦磨损台架性能试验在德国 SCHENCK LBA 0049 型惯性试验式双制动试验台上进行。测试结果参照大众公司企业标准进行评定。在试验过程中，测定了制动速度、制动压力与摩擦系数的关系，连续制动情况下制动盘表面温升与摩擦系数的关系，以及制动盘的制动磨损性能。

2.2.1　制动压力和制动速度对摩擦系数的影响

研究中，采用 W40SiC_P20 vol%/Al 复合材料制备的制动盘和无石棉半金属制动衬片组成摩擦副(以下简称复合材料摩擦副)进行制动性能试验，并与 HT250 铸铁制动盘和同种制动衬片组成的摩擦副(以下简称铸铁摩擦副)的制动性能试验结果进行比较。图 4(a)为制动初速度一定时(v= 80 km/h)，不同摩擦副的摩擦系数与制动压力的关系曲线，图 4(b)为制动压力一定时(P= 6 MPa)，不同摩擦副的摩擦系数与制动速度的关系曲线。

从图 4(a)中可以看出，在制动初速度一定的条件下，当制动压力较小(< 6 MPa)时，复合材料摩擦副的摩擦系数高于铸铁摩擦副，且随着制动压力的增大而有所降低，铸铁摩擦副的摩擦系数却随制动压力的增大而升高；当制动压力达到 6～8 MPa 时，两者趋于一致；当制动压力进一步增大(> 8 MPa)时，复合材料摩擦副的摩擦系数反而低于铸铁摩擦副的摩擦系数。复合材料摩擦副的摩擦系数随制动压力变化的这种趋势似应与复合材料中 SiC 颗粒的“镶嵌”作用有关。当制动压力较小时，两种摩擦副均以粘着摩擦为其主要摩擦机制。在此阶段，复合材料与制动衬片的接触面主要由面心立方的 T-Al 微凸体组成，其粘着系数远远高于铸铁摩擦副中体心立方的 Fe 微凸体[5]；但随着制动压力的增大，复合材料接触面上的 T-Al 微凸体发生塑性变形，使得粘着系数更低的密排六方的 SiC 颗粒开始与制动衬片相

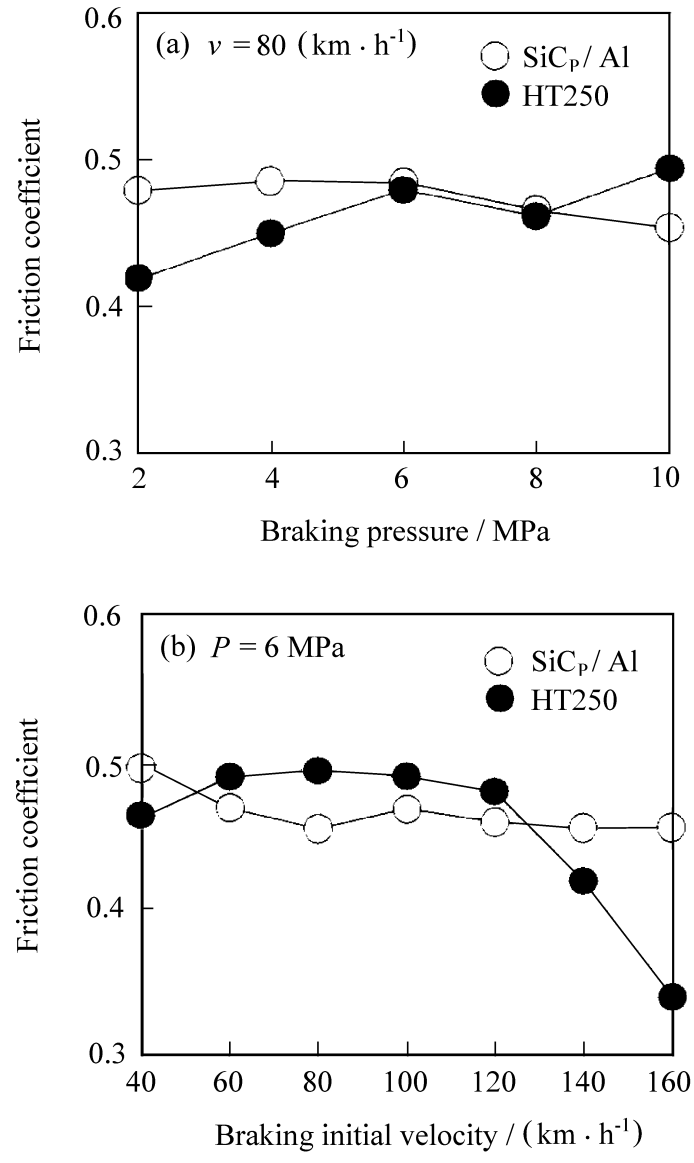

图 4　摩擦系数与制动压力和制动速度的关系曲线

Fig. 4　(a) Effect of braking pressure on the friction coefficients at constant braking initial velocity, (b) effect of braking initial velocity on the friction coefficients under constant braking pressure

接触，因而摩擦系数下降并逐渐达到与铸铁摩擦副相当的摩擦系数；当制动压力进一步增大时，复合材料中 T-Al 微凸体被粘着脱落，其接触面将主要由高硬度的 SiC 颗粒组成，但其数量毕竟有限，使得实际接触面积降低，因而复合材料的摩擦系数低于铸铁摩擦副的摩擦系数。

从以上试验结果和分析中可以看出，在制动初速度一定时，对复合材料摩擦副施加相对较低的制动压力便可以得到较为理想的制动效果，从而可减轻制动系统的工作压力，延长制动系统的使用寿命。同时，经计算可知，复合材料摩擦副的摩擦系数比较稳定，在试验范围内的稳定系数(摩擦系数均值与最大值之比)为 0.975，而在相同压力范围内铸铁摩擦副摩擦系数的稳定系数为 0.912。

图 4(b)为制动压力一定时，摩擦系数与制动初速度的关系。虽然复合材料摩擦副与铸铁摩擦副的摩擦系数均随制动初速度的提高有所下降，但复合材料摩擦副的下降趋势明显小于铸铁摩擦副，特别

在高速制动情况下, 复合材料摩擦副的摩擦系数远高于铸铁摩擦副。例如, 制动初速度为 160 km/ h 时, 复合材料摩擦副摩擦系数为 0. 456, 而铸铁摩擦副的摩擦系数仅为 0. 342。在试验制动初速度范围内复合材料摩擦副摩擦系数的稳定系数为 0. 936, 铸铁摩擦副的相应稳定系数则为 0. 828。说明采用复合材料制动盘可以提高轿车制动系统的可靠性。

复合材料摩擦副与铸铁摩擦副的摩擦系数随制动初速度的提高而下降, 主要是制动高温引起摩擦面生成润滑膜所致。润滑膜主要是由于制动过程中产生的局部高温使制动衬片中的低熔点金属熔化或有机物热分解, 从而在摩擦面上形成一层由液态物质组成的膜。它对减少制动副材料的磨损有益, 但却使其摩擦系数下降。复合材料摩擦副由于基体铝合金良好的导热性, 使其在制动过程中的温升远低于铸铁摩擦副, 从而产生的润滑膜相对较少, 因而摩擦系数下降幅度不大, 且较稳定。

2. 2. 2　制动盘温升对摩擦系数的影响

在轿车高速运行或较长坡路的制动情况下, 铸铁制动盘因制动摩擦发热而使其表面温度高达 700℃, 这一温度远远高于一般铝合金的熔点。然而, 大量试验数据表明[3, 6], SiC 颗粒增强铝基复合材料的导热系数约为 HT250 铸铁的四倍, 比热约为 HT250 铸铁的 2 倍, 因而在制动过程中复合材料制动盘的表面温升低于铸铁制动盘。在台架试验过程中, 进行了制动初速度 v= 80 km/ h、制动压力 P= 6 MPa, 制动周期 t= 60 s、连续制动次数 n= 20 的制动盘表面温升和摩擦系数测定试验。结果发现, 复合材料制动盘在第 7 或 8 次制动后, 表面温度不再升高, 基本稳定在 430 ℃左右。而且, 由于制动温升低, 制动衬片材料中有机物的性能变化较小, 从而使摩擦系数稳定在 0. 37～0. 43 之间。当然, 为了具有必要的热容量, 制动盘的实际结构尺寸可以适当加大。

2. 2. 3　制动盘制动磨损性能

表 2 为复合材料摩擦副与铸铁摩擦副的制动磨损性能试验结果。

从表 2 中可以看出, 复合材料制动盘的质量磨损(1. 00 g)仅为铸铁制动盘(3. 80 g)的 1/ 4, 且复合材料制动盘在磨损过程中厚度有增加的趋势。复合材料制动盘较高的磨损抗力是由材料中与基体界面结合良好的高硬度 SiC 颗粒造成的。同时, 由于这些高硬度 SiC 颗粒形状为不规则的多面体, 对制动衬片材料具有很强的刮削作用, 因而引起制动衬片材料向制动盘摩擦面转移, 致使复合材料制动盘的厚度有所增加。磨损后的制动盘表面经扫描电子显微镜观察(见图 5)发现, 复合材料表面有一层均匀、连续的转移膜, 该转移膜与复合材料结合紧密, 对制动盘的磨损起到了减缓作用。而 HT250 铸铁的表面虽然也出现了制动衬片材料的转移, 但未形成连续的转移膜。这层转移膜的出现也许是复合材料摩擦副中制动衬片的磨损高于铸铁摩擦副的原因。

此外, 在制动试验过程中, 与铸铁制动盘相比, 复合材料制动盘制动噪音小、运转平稳, 因而可望以其替代传统的铸铁制动盘, 提高制动器的安全可靠

表 2　复合材料摩擦副及铸铁摩擦副的制动磨损性能测试结果

Table 2　Wear resistance for brakes consisting of the composite disc]Z brakes consisting of cast iron disc

	Braking temperature/ ℃	Composite brake		Cast iron brake	
		Brake disc	Brake pad*	Brake disc	Brake pad
Thickness changes/ (1/ 1000 mm)	50	0. 00	- 29	0. 00	- 18
	100	0. 00	- 57. 5	0. 00	- 90
	200	+ 0. 01	- 95	- 0. 01	- 52
	300	+ 0. 02	- 146	0. 00	- 98
	400	+ 0. 04	- 224	0. 00	- 168
Mass losses/ g	50		- 0. 30		0. 00
	100	Total mass	- 0. 40	Total mass	- 0. 50
	200	losses	- 0. 80	losses	- 0. 60
	300	1. 00 g	- 2. 00	3. 80 g	- 0. 80
	400		- 3. 30		- 2. 40

* 制动衬片的磨损为内片与外片的总和。

性和服役寿命, 减轻轿车悬挂系统的重量, 降低油耗。

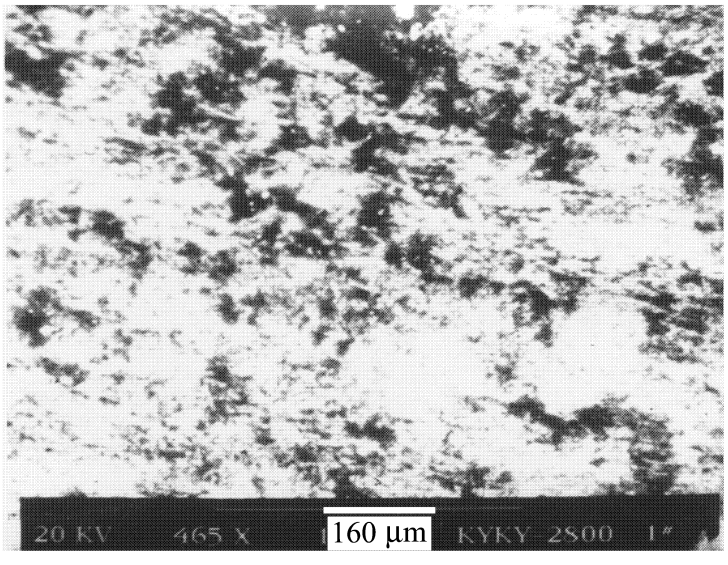

图 5　复合材料制动盘的磨面形貌

Fig. 5　Worn morphology of composite brake disc

3　结　论

(1) 适于民用工业规模性批量生产的搅拌熔炼-液态模锻工艺可被用于 SiC 颗粒增强铝基复合材料轿车制动盘的制备。研制出的复合材料轿车制动盘强度高, 增强颗粒分布均匀, 微观结构细密, 基本消除了气孔、疏松等铸造缺陷, 满足了高性能新型制动盘的基本要求。

(2) 在制动速度一定的条件下, 复合材料制动盘的摩擦系数随制动压力的增大而降低, 与铸铁制动盘摩擦系数的变化趋势相反, 因而可对复合材料制动系统采用较低的制动压力进行制动; 在制动压力一定的条件下, 复合材料制动盘的摩擦系数随制动速度的增加虽稍有降低, 但却明显小于同样条件下铸铁制动盘摩擦系数的降低幅度, 这对保证制动装置的安全可靠性和延长制动装置的工作寿命起到了积极的影响作用。

(3) 在反复连续制动的工况条件下, 复合材料制动盘的表面温升低, 摩擦系数稳定。

(4) 在制动磨损试验中, 复合材料制动盘的质量磨损量约为铸铁制动盘的 1/4, 但其对制动衬片的磨损却大于铸铁制动盘对制动衬片的磨损。

参考文献:

[1] 迁村太朗. 铝合金盘形制动器[J]. 国外机车车辆工艺, 1995(4): 19- 23.

[2] Clyne T W, Withers P J. An introduction to metal matrix composites[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

[3] 王文龙, 吴军华, 张国定, 等. 铝基复合材料的摩擦磨损性能[J]. 金属学报, 1998, 34(11): 1178- 1182.

[4] 任德亮, 齐海波, 丁占来, 等. SiCp/Al 复合材料搅拌铸造工艺的研究[J]. 铸造技术, 1999(2): 41- 43.

[5] 高彩桥. 摩擦金属学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988. 31.

[6] Davis J R. ASM Specialty Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys[M]. New york: ASM International Handbook Committee, 1994.