

重载制动摩擦材料

在MM-1000试验机上的模拟试验

李 东 生

摘 要

本文论述了重载制动摩擦材料在 MM-1000 试验机上的模拟试验, 讨论了试验方法的原理、试验条件的选择及试验方法的建立等问题。通过多种摩擦副材料在该机上的试验、实物试车及实际使用的性能对比证明所建立的试验方法是合理的、可靠的, 可用于摩擦材料的研究试验、生产检验和质量控制。

摩擦材料实验室模拟试验方法的研究是很重要的, 它是近代摩擦学的基础研究工作之一。近十几年来, 一些先进工业国家, 如美国的 NASA^[1]、制动器公司, 英国的邓录普公司、费罗多公司, 日本曙制动公司^[2], 苏联的机械研究所等均在摩擦材料模拟试验方法及试验设备等方面进行过大量的研究, 而且苏联的 ИМ-58 试验机及其模拟试验方法, 已成为苏联汽车、拖拉机、国防及航空工业的标准试验方法^[3]。

我国该项研究工作是从1964年开始的。由厦门试验机厂(原厦门机器厂)生产的MM-1000摩擦试验机已在国内推广使用。

现代重载制动装置吸收的动能可高达几千万公斤·米, 其能量转换功率达每秒几十万公斤·米, 摩擦表面温度可达1000℃以上, 温度梯度超过700℃/毫米。由此可见对重载制动工况的实验室模拟是个复杂的技术问题。理论分析和实验证明, 建立模拟试验设备和试验方法时, 重要的问题是合理选择试验参数。

一、实验室模拟参数的选择

1. 模拟试验原理

模拟试验的困难在于必须明确制动过程中

各参量相互作用的变化规律, 即要求给出制动过程的数学模型。由于制动过程各参量间的函数关系十分复杂, 而有些关系至今尚不太清楚, 因此摩擦磨损模拟试验一般可采用相似原理及系统分析方法。通过对模拟参数的数学分析和处理, 选择对制动过程起主要作用的物理参数建立定性或定量模拟试验方法。根据摩擦学的理论观点, 建立定量模拟试验方法时, 对摩擦磨损过程必须考虑下列问题:

- 1) 摩擦副的表面形态及摩擦时表面间的相互作用;
- 2) 相互作用时摩擦副材质所发生的变化;
- 3) 摩擦过程中摩擦副材料的磨损型式及破坏等。

以上问题既相互联系又相互制约, 对于一个较理想的模拟试验方法, 首先应找出摩擦系数和磨损强度的定量模拟关系式。

2. 摩擦系数模拟

通过理论及试验分析, 摩擦系数受诸因素影响的函数关系式表达如下^[3]。

$$\mu = f(A_1 A_2 A_3 A_4 A_5) \quad (1)$$

式中, μ —摩擦系数, A_1 —热物理准数, A_2 —热传导准数, A_3 —机械性能准数, A_4 —接触点(面)的宏观及微观几何准数, A_5 —动力

学准数。上述各物理准数的标准关系式如下:

$$A_1 = \frac{\lambda_{1,2}}{C_{1,2}\rho_{1,2}} \cdot \frac{\text{grad}\theta_{1,2}}{\Delta\theta_{1,2}V^2t_T} \quad (2)$$

$$A_2 = \frac{\sigma_{1,2}}{(g\beta)} \cdot \frac{V^3t_T^3\Delta\theta_{1,2}^{1/2}}{P^2} \quad (3)$$

$$A_3 = \frac{E_{1,2}\tau_{1,2}}{n_{1,2}\omega\eta_{1,2}} \cdot \frac{P^2t_T^2}{V} \quad (4)$$

$$A_4 = \frac{S_{1,2}}{Aa_{1,2}} \cdot \frac{\gamma_{1,2}V^6t_T^6}{n_{1,2}} \quad (5)$$

$$A_5 = \frac{V\Delta\theta_{1,2}}{Pt_T} \cdot m_{1,2}\omega_{1,2} \quad (6)$$

式中, λ —导热系数, C —比热, ρ —密度, σ —散热系数, θ —热量, g —热流分配系数, V —速度, P —压力, t_T —时间, η 、 n 、 E —韧性、塑性、弹性系数, m —质量, ω —角速度, $S = A/V$ —实际接触面积与体积之比。

根据相似原理, 为了在模拟试样上获得与实际组合条件相同的摩擦系数值, 必须使模拟试样与实物的上述标准式相等, 即 $A_1 = A_1'$, $A_2 = A_2'$, $A_3 = A_3'$, $A_4 = A_4'$, $A_5 = A_5'$ 。上角“'”为实际组合件标准式。在保持几何相似、外部介质相同及引入温度等式的边界条件下, 方程式可简化, 联立解上述方程可得出表示摩擦功 W 、压力 P 及摩擦速度 V 的单式:

$$C_W^{102/59} = C_K^{-1} \cdot C_S^{-1} \quad (7)$$

$$C_P = K^{19/51} \cdot C_W^{38/59} \quad (8)$$

$$C_V = K^{7/34} \cdot C_W^{21/59} \quad (9)$$

由公式(7)~(9)的物理意义可知, 若能在实验室模拟出实际摩擦副的摩擦功 W 、压力 P 、摩擦速度 V 及几何重叠系数等, 则公式(1)成立。

3. 磨损强度模拟

由于磨损是摩擦过程的必然现象和结果, 所以热物理—机械—动力学模拟条件同样适合于磨损强度的模拟, 一般可用下式表达磨损强度与诸因素的函数关系^[4]。

$$I = f\left(\frac{1}{M} \cdot \frac{1}{F} \cdot R \cdot \rho \cdot \beta\right) \quad (10)$$

* 试验程序和数据处理方法从略。

式中, M —动力学准数, F —热物理准数, R —机械性能准数, ρ 、 β —介质影响准数。

须指出, 公式(10)能否成立及模拟符合程度如何, 只能通过试验和实际应用效果以加验证。

二、模拟试验方法*

通过相似原理的数学分析, 明确了合理的模拟试验参数并据此建立了三种试验方法。

1. 模拟刹车试验方法(简称制动或刹车试验): 该定量模拟试验方法旨在模拟制动过程中的热冲击效应和机械负荷作用, 其模拟条件按下列方法计算。

1) 根据一次刹车所给定的单位功 W_0 和试样的摩擦面积 A 确定试验机惯性飞轮所需要的动能 W_1 。

$$W_1 = CW_0A \quad (11)$$

式中, C —轴承摩擦及空气动力损耗系数(由实验确定)。

2) 根据给定的摩擦速度和动能计算飞轮的惯性矩 I 。

$$I = \frac{2W_1}{\omega^2} \quad \omega \text{—飞轮角速度} \quad (12)$$

3) 制动单位压力 P_0 、初速度 V_0 及摩擦表面重叠系数 K 等模拟实际工况数值。

在 MM 1000 型试验机上进行模拟制动试验, 可直接记录出制动力矩曲线、摩擦表面及体积温度曲线、减速度和制动压力曲线等。通过数据处理可求得下列性能值: 摩擦系数(最大、最小、平均)、制动力矩稳定性系数、制动效率系数和磨损量等, 同时还能显示摩擦副表面质量及形成裂纹、分层、粘结和刮伤等倾向。

2. 摩擦热稳定性试验方法: 该方法是以温度为主要参数测定摩擦副的摩擦系数与磨损量随温度的变化规律。

3. 摩擦副极限使用温度测定方法: 所谓极限使用温度, 即在该摩擦温度下摩擦副材料

瞬间破坏并失去工作效能。采用该方法可测定出磨擦副随温度、压力、速度和时间等变化的磨损曲线、曲线拐点及相应的极限使用温度值。

三、模拟试验结果

十几年来，采用上述试验方法对 114 种配方材料（其中 46 种已实际应用）进行了试验和鉴定工作并取得了较好的试验效果。下面简单介绍几种摩擦副的试验结果。

1. 摩擦热稳定性试验结果

1) 国产 A 型石棉-树脂基制动材料。试验条件及结果见表 1 和图 1。

表 1

摩擦副材料	试验条件			试验结果		备注
	重叠系数	单位压力 公斤/厘米 ²	主轴转速 转/分	磨擦量 毫米 A ₁ /A ₂	摩擦系数	
A ₁ -合金铸铁	K=1	15	100,200 500,700 1000,2000 3000	1.8	见图 1	A ₁ A ₂ 材料成分同苏产 ΦK-16Π, 试样尺寸 φ28×20 毫米
A ₂ -合金铸铁	K=1	15	同上	0.8		

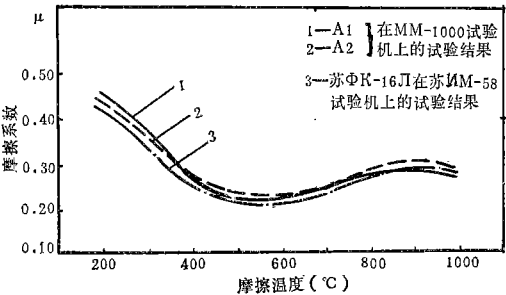


图 1 国产与苏产石棉-树脂型摩擦材料摩擦系数与温度的关系

图 1 曲线的变化规律一般认为与材料在摩擦时的弹-塑性变化及有机添加剂的物理-化学反应有关。室温到 400℃ 时 μ 值下降主要由于材料表面层的塑性变形所致,此时磨损也较严重; 400~700℃ 时, 出现 μ 值较低但趋稳定阶段,是

由于材料表面形成较稳定的膜层(由氧化物、碳化物、硫化物及磨损附着物等组成), 该膜层起稳定 μ 值减少磨损的作用; 当温度达 700~800℃ 时由于表面急剧“焦化”产生硬化效应引起 μ 值上升; 当温度超过 800℃, 由于材料剧烈分解和烧熔导致 μ 值下降及严重磨损。

2) 粉末冶金摩擦材料摩擦热稳定性试验与惯性试车结果。

(1) 摩擦热稳定性试验

试验条件和结果见表 2 和图 2。

表 2

摩擦副材料	试验条件			磨损量, 毫米			备注
	重叠系数	单位压力 公斤/厘米 ²	主轴转速 转/分	F26	ΦMK-11	合金铸铁	
F26-合金铸铁	K=1	15	100,200 500,700 1000,2000 3000,4000 5000	0.79	—	0.44	F26 为仿苏 ΦMK-11 材料试样尺寸 φ28×20 毫米
(苏 ΦMK-11)-合金铸铁	K=1	15	同上	—	0.69	0.15	

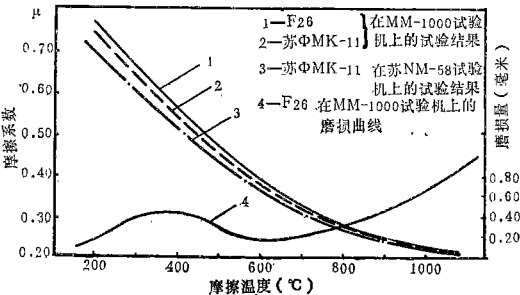


图 2 国产和苏产粉末冶金摩擦材料摩擦系数、磨损量与温度的关系

图 2 中, 随温度升高引起摩擦副材料机械性能的降低导致 μ 值呈单调函数下降。此时磨损规律较复杂, 200℃ 以下主要为机械磨损阶段, 当温度达 300~400℃ 时材料表层生成 Fe₃O₄, 引起较大的磨损, 温度达 500~600℃ 时表层

生成 Fe_2O_3 及 FeO (质地较 Fe_3O_4 强韧), 材料磨损较小, 当温度升至 800°C 以上由于材料表面软化及“塑流”引起剧烈的热磨损。

从图1和图2试验结果可看出, 国产与苏产相同材料副在相同的试验条件下得出基本一致的试验结果, 说明国产MM-1000试验机与苏NM-58试验机的性能相当。

(2) 国产与苏产摩擦副惯性试车

试验条件: 刹车动能 $A=490000$ 公斤·米, 刹车压力 $P=19$ 公斤/厘米², 刹车速度 $V=27.5$ 米/秒。

试车结果见表3。

表 3

摩擦副材料	平均刹车力矩 公斤·厘米	刹车力矩 稳定性系数	磨损量 毫米/面·次	
			摩擦材料	合金铸铁
F26-合金铸	33700	0.76	0.0063	0.0017
铁 (苏ΦMK-11)				
合金铸铁	33200	0.73	0.0040	0.0035

通过对试车结果和实验室摩擦热稳定性试验结果的比较可看出, 两种试验具有较好的定性和半定量关系。

2. 实验室模拟试验、实物惯性试车和实际使用的性能比较

国产粉末冶金摩擦材料7501与苏产ΦMK-11材料性能比较。

1) 试验及使用条件和结果见表4和表5。

表 4

项目	单位功 公斤·米 厘米 ²	刹车动能 公斤·米	刹车压力 公斤 厘米 ²	刹车速度 公里 小时	重叠 系数
实验室模拟试验	261	按350000 模拟	6	160	0.9
实物试车	261	350000	6	160	0.9
实际使用	261	350000	6	160	0.9

表 5

项 目 类别	材 料	平均摩	μ 比值	磨损量	刹车	S比值	备 注
		擦系数	$\frac{\mu_{\Phi MK-11}}{\mu_{7501}}$	毫米	距离	$\frac{S_{7501}}{S_{\Phi MK-11}}$	
实验室	$\Phi MK-11$	0.35	$\frac{80}{100}$	0.005	—	—	试车时水 冷 刹 车 装 置 故 磨 损 量 偏 大
模拟试验	7501	0.44	$\frac{100}{100}$	0.006	—	—	
实物试车	$\Phi MK-11$	0.33	$\frac{82}{100}$	0.011	—	—	
	7501	0.42	$\frac{100}{100}$	0.016	—	—	
实际使用	$\Phi MK-11$	—	—	0.004	600	$\frac{83}{100}$	
	7501	—	—	0.005	500	$\frac{100}{100}$	

由表5数据可知, 模拟试验结果与试车及实际使用效果符合程度较好, 如摩擦系数值7501材料的比ΦMK-11材料的高约20%, 而实际使用中, 用7501材料的刹车距离比用ΦMK-11材料的缩短了约20%。

2) 模拟刹车试验与惯性试车摩擦系数(力矩)曲线比较见图3。

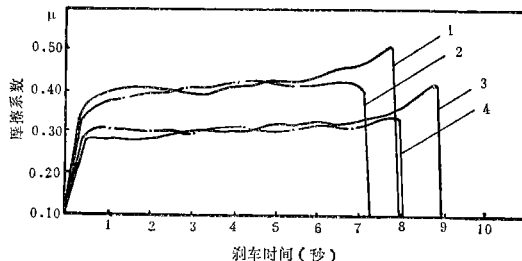


图3 国产7501材料与苏ΦMK-11材料模拟试验、惯性试车摩擦系数(力矩)曲线(实测曲线按比例绘制)

- 1—7501材料模拟试验曲线;
- 2—7501材料惯性试车曲线;
- 3—ΦMK-11材料模拟试验曲线;
- 4—ΦMK-11材料惯性试车曲线。

从图3可知, 两种材料副的模拟试验和惯性试车曲线的特征及数值对应符合关系较好。

四、讨 论

1. 十几年来在MM-1000 (或J02) 试验机上采用本文论述的模拟试验方法对多种摩擦

材料所进行的试验研究证明, 所得试验数据的可靠性较高、重复性较好, 模拟试验结果与实际使用效果的对应关系较好。

2. 本文所述试验方法中, 摩擦系数的模拟较为理想而磨损强度的模拟和计算的偏差有时较大。目前国外也存在这个问题, 其主要原因可能是: 第一, 现用的数学模型不能很完整、准确地反映磨损规律; 第二, 在数学处理中, 某些对磨损影响较大的因素如高温下材质的相变、氧化、磨损物的转移及组合件的结构模拟等考虑不全或未予考虑。

3. 模拟试验与实际使用的摩擦副材质表面层组织结构的变化特性基本相同^[5]。

4. 对 \bar{R} 的看法:

目前国内外对环形试样摩擦试验的摩擦系数计算多采用下列基本公式或导出式。

$$\mu = \frac{M_T}{P\bar{R}} \quad (13)$$

式中, M_T —摩擦力矩, P —压力, \bar{R} —环形试样的平均半径, 其物理意义为试样摩擦力合力作用点的半径。

实际上合力作用点并不在 \bar{R} 处, 如图4所示, 设摩擦副产生的摩擦力矩为 M_T , 则

$$dM_T = F\rho dS. \quad (14)$$

式中, dM_T —在 F 力作用下 dS 上产生对转轴的微分力矩, 积分(14)式得摩擦副的总力矩 M_T 。

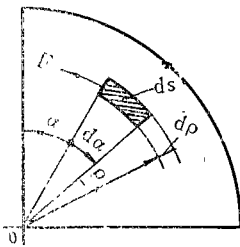


图4

$$M_T = \int F\rho dS = \int_0^{2\pi} \int_r^R \mu P \rho^2 dS d\alpha = \frac{2}{3} \pi \mu p_0 (R^3 - r^3) = \mu p_0 \pi (R^2 - r^2) \cdot \frac{2(R^3 - r^3)}{3(R^2 - r^2)} = \mu p_0 A R_g = \mu p R_g \quad (15)$$

式中, r 、 R —圆环内、外半径, P_0 —单位压力, A —摩擦面积。

公式(15)中 R_g 的物理意义为摩擦力合力实际作用点的半径。

又设 $K_r = \frac{r}{R}$, 则由式(15)得:

$$R_g = \frac{2(R^3 - r^3)}{3(R^2 - r^2)} = \frac{1}{2} (R + r) \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{1 - K_r}{1 + K_r} \right)^2 \right] = \bar{R} \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{1 - K_r}{1 + K_r} \right)^2 \right] \quad (16)$$

比较公式(12)、(13)、(14)、(15)可知, \bar{R} 与 R_g 不重合, 在极限情况即 $r=0$ 时,

$$\text{则 } R_g = \frac{4}{3} \bar{R} = \frac{2}{3} R \quad (17)$$

将式(17)代入式(15)得

$$\mu = \frac{M_T}{p_0 A R_g} = \frac{3M_T}{4pR} \quad (18)$$

从公式(18)明显看出, 当摩擦盘(或试样)内外径相差较大时, 采用公式(13)计算摩擦系数会出现较大的偏差。笔者认为: 第一, 当 $K_r = \frac{r}{R} < 0.4$ 时计算 μ 值采用(13)式以 R_g 代替 \bar{R} 是必要的; 第二, 当 K_r 值较小时, 模拟试样应考虑对实际制动盘副 K_r 值的模拟。

五、结 论

1. 在MM-1000(或J02)型摩擦试验机上, 采用本文论述的模拟试验方法能够模拟出重载制动装置的主要工作条件和工况, 所测得的摩擦性能与实物试车及实际使用效果符合得较好。

2. 长期试验证明, 摩擦热稳定性试验方法和模拟刹车试验方法用于摩擦副材料的研制、批产检验和产品质量控制是可行的。

参 考 文 献

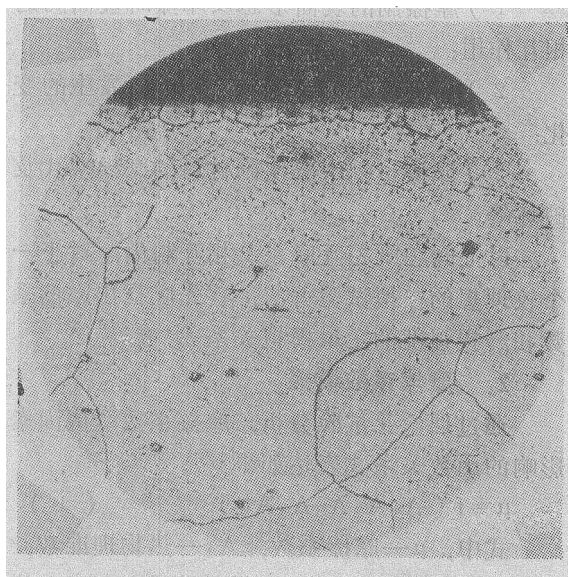
- [1] Development of Aircraft Brake Materials, NASA, CR134663, 1974.
- [2] 谷内刚、石田制一, 烧结合金ブレーキライニング (下转第33页)

规定温度的下限锻造，这对降低粗晶废品率稍有作用（见表5）。

此外，对于已超过规定标准的粗晶叶片，可以通过表面喷丸或直接对机械加工后的叶片进行一次 $1060 \pm 10^\circ\text{C}$ 、30 分钟氩气保护退火处理，可以细化表面晶粒（见图7）。这是由于

表 5

材料产地	终锻温度 ($^\circ\text{C}$)	试验数量 (片)	废品数 (片)	废品率 (%)
长城钢厂	1090~1115	119	46	38.6
	1090 ± 10	98	0	0
抚顺钢厂	1100~1120	56	6	10.8
	1080~1090	48	0	0
大冶钢厂	1100~1140	155	5	3.2
	1085~1090	136	0	0
	1103~1113	94	25	26.7
	1094~1100	98	8	8.2
	1080~1087	48	0	0
上钢五厂	1090~1115	8531	2351	27.6
	1080~1090	6830	1200	17.6



× 115

图 7 经氩气保护退火处理的显微组织

机械加工时，加工应力造成了表面层的晶粒破碎和晶粒之间的位移，在退火温度下，得到恢复和再结晶，形成大约0.04毫米厚的细晶层，对于提高叶片的疲劳强度有一定的作用。



耐270℃的XZ-1高温灌注料

六二一所与一八三厂协作，利用国产材料研制成XZ-1室温硫化的耐高温灌注料。使用时将灌注料调成白色粘稠状液体，可用压注枪（压力4~5大气压，咀部口径 $\phi 3.5$ 毫米）顺利地压注灌封，室温硫化24小时后即成为弹性体。

灌注料的耐温范围为 $-60 \sim +270^\circ\text{C}$ ，绝缘性能良好，对镀镍的电工钢不腐蚀。

用XZ-1灌注料的模拟电磁铁零件及燃油电磁开关正式产品，通过了振动强度、耐振稳定性、密封性、绝缘电阻和绝缘强度检查，也通过了高空试验、寿命试验、高低温试验及通液检查工作能力等全项试验，没有发生异常情况。试验结束后分解产品，灌注料无裂解现象，不发粘、不发脆亦不“掉渣”，并保持一定弹性，工厂决定采用。有关单位如需要这种材料可与六二一所联系。

（胡少枝）

× × ×

（上接第88页）

（第I报），（日）粉末冶金，Vol.14，№5，1967。

〔3〕Э.Д.Браун，Н.Д.，Моделирование процесса торможения на машине трения ИМ-58，Машиноведение，№2，1965Г。

〔4〕A.Chichinadze，A.Ginzburg，Z.Ignatieva，Theoretical and Experimental Investigation of Friction under Braking，First European Tribology Congress，1973。

〔5〕重载制动摩擦材料的组织变化，三机部六二一所，1979年。