

湿式多片制动器纸基摩擦材料 摩擦特性试验研究

孙冬野 秦大同 王玉兴 诸文农
(重庆大学) (山东工程学院) (吉林工业大学)

摘要 湿式多片制动器纸基摩擦材料摩擦特性受其工作条件的影响非常显著。该文通过对制动器盘片温度、速度和衬片压力等因素的正交试验分析,阐明了各项因素及其交互作用因素对其摩擦特性的影响程度,推导出制动器平均摩擦系数与盘温、速度和衬片压力等因素之间的回归方程,从而为新型湿式多片制动器的设计提供理论依据。

关键词 湿式制动器 摩擦特性 正交试验

湿式多片制动器工作于封闭浸油环境中,特殊的工作环境使其具有了制动平顺、磨损量小、散热效果好、制动转矩容量大的特点,从而广泛地用于大型农用工程车辆上。但同时也导致了一些问题的出现,其中之一便是车辆在制动过程中,制动效果受其工作条件的影响比较大,由此给湿式多片制动器的设计带来一定的困难。

正因为这一点,国内外的许多专家学者从不同的角度对湿式多片制动器进行了一系列的试验研究^[1-3],并得出许多值得借鉴的结果。但上述试验又存在一定的不足,试验均是在试验机上,针对摩擦衬片本身所做的模型试验,而试验模型与制动器实物本身在对偶片材料、力矩输入形式、摩擦副间滑动速度、衬片压力分布规律和温度分布规律等因素方面的差异性,使试验结果与制动器在实际使用过程中的效果有一定的差距。为了消除这一误差,本试验将以厦门工程机械厂生产的CXG-ZL 80S轮式装载机为对象,借助德国SCHENCK公司制造的LBA 0049惯性式双制动试验台,采用惯性制动法对其所使用的纸基湿式多片制动器进行了实物试验。试验系统结构简图参见图1。

2 试验数据回归分析

2.1 确定试验因素的变化范围并进行编码

由有关文献^[2,4]的分析发现,影响摩擦系数的因素非常多,除摩擦材料本身(包括石墨含量、孔隙度以及冷却油槽的结构形式等)外,衬片压力(p)、摩擦速度(v)、表面温度(t)等制动器工作环境因素的影响也非常大。同时,各因素间的交互作用也是不容忽视的。因此,本次试验以摩擦系数为试验指标,采用正交设计方案(选取标准正交表 $L_8(2^7)$),对压力(p)、速度(v)、温度(t)三项因素进行多元正交线性回归分析。

收稿日期: 1997-12-26

孙冬野, 博士后, 重庆市沙坪坝区正街 重庆大学机械传动国家重点实验室, 400044

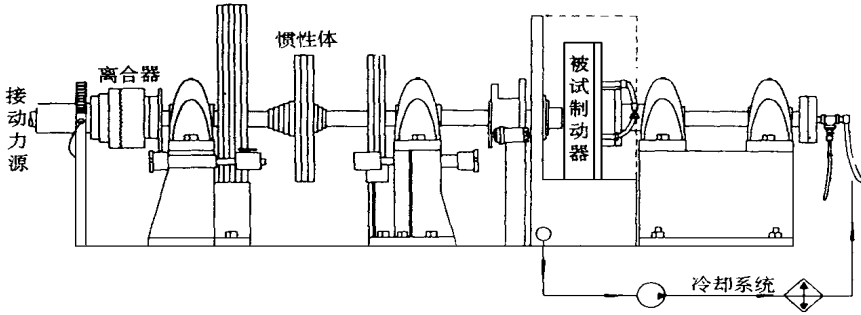


图 1 试验系统结构简图

Fig 1 Sketch diagram of experimental equipment

试验中各试验因素的水平数均为 2 个, 若令 z_{2i} , z_{1i} , z_{0i} , Δ_i 和 x_i 分别为第 i 个自然因素 z_i 的上水平、下水平、零水平、变化区间和编码因素, 则有相应的公式^[5]

$$\begin{cases} z_{0i} = (z_{2i} + z_{1i})/2 \\ \Delta_i = (z_{2i} - z_{1i})/2 \\ x_i = (z_i - z_{0i})/\Delta_i \end{cases} \quad (1)$$

由此可进行因素编码。各因素变化范围及因素编码列于表 1。

表 1 因素编码表

Tab 1 Factor code scheme

因素 $z_i(x_i)$	$z_1(t/s)$	$z_2(v/m \cdot s^{-1})$	$z_3(p/MPa)$
$z_{1i}(-1)$	80	0.3	0.7
$z_{2i}(+1)$	90	0.4	0.9
z_{0i}	85	0.35	0.8
Δ_i	5	0.05	0.1
编码公式	$x_1 = (z_1 - 85)/5$	$x_2 = (z_2 - 0.35)/0.05$	$x_3 = (z_3 - 0.8)/0.1$

因素经过编码后, 不论试验因素在自然空间如何变动, 编码因素的变动范围总是从 -1 到 +1, 并且所有的编码因素的变动范围都一样。

2.2 回归系数的计算

在本次试验的编码空间中, 有关摩擦系数的回归方程式为

$$\mu = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{j < i} b_{ji} x_j x_i \quad (2)$$

式中 b_0 , b_i , b_{ji} 分别为常数项、一次项和交互项的回归系数。利用最小二乘法可计算回归系数为

$$\begin{cases} b_0 = B_0/(N \cdot M) = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{p=1}^N \mu_p \\ b_i = B_i/(N \cdot M) = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{p=1}^N x_{pi} \mu_p \quad (i = 1, 2, 3) \\ b_{ji} = B_{ji}/(N \cdot M) = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{p=1}^N (x_{pj} x_{pi}) \mu_p \quad (j < i) \end{cases} \quad (3)$$

式中 N 为试验次数, $N = 8$; M 为每项试验重复次数, $M = 3$ 。计算结果列于表 2。

表 2 摩擦系数多元线性回归分析表

Tab 2 Multiple linear regression analysis of friction coefficient

因素试验号	<i>t</i>	<i>v</i>	<i>t</i> × <i>v</i>	<i>p</i>	<i>t</i> × <i>p</i>	<i>v</i> × <i>p</i>	<i>t</i> × <i>v</i> × <i>p</i>	$y_{ij} = (\mu_{ij} - 0.115) \times 10^4$			<i>M</i>	
	(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	<i>y</i> ₁₁	<i>y</i> ₁₂	<i>y</i> ₁₃	$j = 1$ ^{<i>y</i>_{ij}}
1	1	1	1	1	1	1	1	1	- 47	- 52	- 43	- 142
2	1	1	1	1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 9	2	- 2	- 9
3	1	1	- 1	- 1	1	1	- 1	- 1	- 14	- 2	- 16	- 32
4	1	1	- 1	- 1	- 1	- 1	1	1	- 14	- 10	- 15	- 39
5	1	- 1	1	- 1	1	- 1	1	- 1	- 22	- 31	- 29	- 82
6	1	- 1	1	- 1	- 1	1	- 1	1	22	22	9	53
7	1	- 1	- 1	1	1	- 1	- 1	1	42	32	35	109
8	1	- 1	- 1	1	- 1	1	1	- 1	52	43	49	144
<i>y</i> _{k1}		- 222	- 180	102	- 147	23	- 119	- 19	10	4	- 12	2
<i>y</i> _{k2}		224	182	- 100	149	- 21	121	21	$W = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M y_{ij}^2 = 22130$			
<i>y</i> _{k1} ²		49284	32400	10404	21609	529	14161	361	$p = \frac{1}{NM} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M y_{ij} \right)^2 = 0.1667$			
<i>y</i> _{k2} ²		50176	33124	10000	22201	441	14641	441	$Q_k = \frac{b_k}{NM} \sum_{k=1}^b y_{jk}^2 = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^2 y_{jk}^2$			
<i>B</i> _N <i>B</i> _{ji}	2	- 446	- 362	202	- 296	44	- 240	- 40	$S_k = Q_k - p$			
<i>b</i> _N <i>b</i> _{ji}	0.083	- 18.58	- 15.08	8.42	- 12.33	1.83	- 10.0	- 1.67	$f = 23 \quad f_k = 1 \quad f_e = 18$			
<i>S</i> _k		8288	5460	1700	3651	81	2400	67	$F_{0.01}(1, 18) = 8.28$			
<i>F</i> _k		19.32	12.73	3.96	8.51	—	5.60	—	$F_{0.05}(1, 18) = 4.41$			
α_k		0.01	0.01	0.10	0.01	—	0.05	—	$F_{0.10}(1, 18) = 3.01$			

3 回归的统计检验

在回归设计中, 试验指标 *y* 的总波动, 一般情况下是由三方面的原因所引起的: 试验因素 *x* 取不同水平; 试验误差; 试验因素 *x* 的非线性以及其它条件因素及其交互作用的影响等。上述三个方面造成的波动, 可以分别由回归偏差平方和 *S*_回, 误差偏差平方和 *S*_e 及失拟偏差平方和 *S*_f 表述, 而试验指标的总波动由总偏差平方和 *S* 表述。

总偏差平方和 *S* 及其自由度 *f* 为

$$\begin{cases} S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M y_{ij}^2 - \frac{1}{N \cdot M} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M y_{ij} \right)^2 \\ f = N \cdot M - 1 \end{cases} \quad (4)$$

3.1 回归系数的显著性检验

$$F_k = \frac{S_k/f_k}{S_e/f_e} \sim F_\alpha(f_k, f_e) \quad (5)$$

式中 *S*_k/*f*_k——第 *k* 项因素或交互因素的偏差平方和及其自由度; *S*_e/*f*_e——误差偏差平方和及其自由度。

当因素的水平数 *b* 均为 2 时,

$$S_k = b_k \cdot B_k; \quad f_k = 1$$

而在重复试验的情况下, 试验误差偏差平方和 *S*_e 是由正交表中空列项偏差平方和 *S*_{e1} 和纯试验误差偏差平方和 *S*_{e2} 两部分组成, 即

$$S_e = S_{e1} + S_{e2} \quad \text{式中} \quad S_{e1} = S_{k空}; \quad S_{e2} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M y_{ij}^2 - \frac{1}{M} \left(\sum_{i=1}^N y_{ij} \right)^2$$

$$f_e = f_{e1} + f_{e2} \quad \text{式中} \quad f_{e1} = f_{k空}; \quad f_{e2} = N(M - 1)$$

当某因素或交互作用列所在列的偏差平方和很小时, 表明其对试验指标的影响也很小, 因而可将该列偏差平方和作为空列项偏差平方和的一部分归入试验误差偏差平方和, 其自由度也一并归入。

根据上述原则, 将 $S_{t \times p}$ 和 $S_{t \times v \times p}$ 项并入试验误差偏差平方和, 因素 x 的显著性水平计算结果见表 2。

3.2 回归方程的显著性检验

$$F_{回} = \frac{S_{回}/f_{回}}{S_R/f_R} \sim F_{\alpha}(f_{回}, f_R) \quad (6)$$

式中 $S_{回}$ 、 $f_{回}$ ——回归偏差平方和及其自由度; S_R 、 f_R ——剩余偏差平方和及其自由度。其中回归偏差平方和及其自由度等于对试验指标具有显著性影响的各列偏差平方和之和及其各列自由度之和。而

$$\begin{cases} S_R = S - S_{回} \\ f_R = f - f_{回} \end{cases} \quad (7)$$

由于 $F_{回} = (17399/3)/(4731/20) = 24.5 > F_{0.01}(3, 20) = 4.94$ 显然, 回归方程的置信度为 99%。

3.3 失拟检验

考察事先假定的回归模型是否符合实际, 这种检验称为失拟检验。

$$F_{ff} = \frac{S_{ff}/f_{ff}}{S_e/f_e} \sim F_{\alpha}(f_{ff}, f_e) \quad (8)$$

式中 S_{ff} 、 f_{ff} ——失拟偏差平方和及其自由度。

其中

$$\begin{cases} S_{ff} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M y_{ij} - \bar{y}_i \right)^2 \\ f_{ff} = N - 1 \end{cases} \quad (9)$$

由于

$$F_{ff} = \frac{49.12/7}{7721/18} = 0.01635 < F_{0.01}(7, 18) = 3.85 \quad (10)$$

因此, 检验结果说明失拟偏差平方和基本上是由试验误差引起的, 本回归方程是不失拟的。

通过上述三项显著性检验, 可得出: 本回归方程的显著性水平为 0.01, 并且不失拟。在编码空间中, 回归方程是

$$y = 0.0833 - 0.18583x_1 - 0.15083x_2 + 0.8417x_1x_2 - 0.12333x_3 - 0.100x_2x_3 \quad (11)$$

将编码公式代入式(11), 得自然空间中的回归方程

$$y = 0.2112 - 0.00155t - 0.1564v + 0.0577p + 0.00337tv - 0.2vp \quad (12)$$

式(12)即为本次纸基摩擦材料摩擦特性试验欲求的回归方程。

4 结 论

在本次试验条件下,湿式多片制动器纸基摩擦材料摩擦系数受 t, v, p 的影响最为显著(显著性水平为 $\alpha=0.01$);受 $v \times p$ 的影响为显著(显著性水平为 $\alpha=0.05$);受 $t \times v$ 的影响比较显著(显著性水平为 $\alpha=0.1$);而 $t \times p, t \times v \times p$ 的影响不显著。

由式(12)可知,摩擦系数与 $t, v, v \times p$ 成反比;与 $p, t \times v$ 成正比。这主要是由于温度 t 的升高,使冷却油的粘度降低,最终导致湿式制动器纸基摩擦材料动摩擦系数下降而带来平均摩擦系数的减小;对于速度 v ,由于湿式纸基摩擦材料摩擦系数静/动比的存在,随着制动初始速度的升高,必然导致制动器混合摩擦时间的增长,并且温度也将升高,从而导致平均摩擦系数的减小;对于压力 p ,随着制动压力的上升,摩擦副间油膜更易遭到破坏,这就使制动器混合摩擦时间的缩短,从而使平均摩擦系数增大。

参 考 文 献

- 1 H E Staph, H W Marbach Further experimental studies in wet-brake friction SA E Paper 861199, 1986
- 2 Takayuki M alsumo b. A study of the influence of porosity and resiliency of a paper-based friction material on the friction characteristics and heat resistance of the material SA E Paper 932924, 1993
- 3 翁振福 湿式烧结金属摩擦片缩比模拟试验 工程机械, 1993(4): 15~ 17
- 4 F A L byd, J N Anderson and L S Bom les Effects of operating conditions on performance of wet friction materials: a guide to material selection SA E Paper 881280, 1988
- 5 任露泉 试验优化设计. 北京: 机械工业出版社, 1987. 130~ 147

Experiment and Study on Friction Characteristics of a Paper-Based Friction Material in Wet Multiple Disc Brakes

Sun Dongye Qin Datong

Wang Yuxing

Zhu Wennong

(Chongqing University, Chongqing)

(Shandong College of Engineering)

(Jilin University of Technology)

Abstract The performance of paper-based friction material in a wet multiple disc brake is greatly influenced by working conditions. In this paper, the effects of several major factors, such as the plate temperature, speed, lining pressure and the interactions among the factors were investigated in orthogonal experiment using an inertia dynamometer. The regression equation on average friction coefficient was derived. It provides a theoretical basis for designing a new wet multiple disc brake.

Key words wet brake, friction characteristics, orthogonal experiment