

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.02.008

增强树脂基无石棉闸瓦的摩擦性能分析^{*}

罗迎^{1,2}, 杨兆建^{1,2}

(1. 太原理工大学机械工程学院, 太原 030024; 2. 煤矿综采装备山西省重点实验室, 太原 030024)

摘要:以矿用增强树脂基无石棉闸瓦工况条件及运行参数为背景,以酚醛树脂基复合材料闸瓦 WSM-3 为研究对象,选择名义接触压力 P 、滑动速度 v 、接触面温度 T 为可调参数,考察三者与摩擦系数 μ 的关系。并通过 3 个可调参数的多种组合分析复合材料的摩擦学性能,实验结果表明单参数、双参数、三参数实验方法在分析摩擦系数变化的不同性质时各有利弊。建立组合参数与摩擦系数的关系对材料摩擦学设计具有重要意义,亦适用于其它材料的摩擦学性能实验。

关键词:复合材料闸瓦;摩擦学设计;名义接触压力;滑动速度;三参数模型

中图分类号: TH117.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2017)02-0037-05

Analysis of Friction Properties of Reinforced Resin-Based Non-Asbestos Brake Shoe

Luo Ying^{1,2}, Yang ZhaoJian^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Coal Mine Fully Mechanized Equipment Key Laboratory of Shanxi Province, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Take reinforced resin based non-asbestos mine brake shoes working conditions and operating parameters as the experimental background, phenolic composite brake shoe of WSM-3 was taken as the research object, the nominal contact pressure P , sliding speed v , contact surface temperature T as the tunable parameters, and the relationships between friction coefficient μ and the adjustable parameters were investigated. The tribological properties of the composites were analyzed by the combination of three adjustable parameters. The results show that single-parameter, two-parameter, three-parameter data processing methods have advantages and disadvantages in analyzing the different properties of the friction coefficient variation. The experimental results show that relationship between friction coefficient and combination parameters is important to the tribological design of composite brake shoe, also applies to other data processing of other materials.

Keywords: composite shoe; tribological design; nominal contact pressure; sliding velocity; three-parameter model

摩擦学知识转移到工业中去的最有效的途径就是在设计开始阶段就进行摩擦学设计^[1-3],材料摩擦学设计^[4-5]是这一阶段的重要内容,实验选定的材料能否满足设备的性能需要是关键环节^[6-8]。对于闸瓦摩阻设计,需要放在具体的工况条件及设备运行参数之下^[9-11],其工作速度范围相对固定且范围不会太大,制动压力相对固定,接触面平均温度由于制动过程较短,且散热率的影响,其浮动范围一般不大。

笔者选用酚醛树脂基复合材料闸瓦为实验对象^[12-14],以矿井提升机实际工况条件和运行参数为背景,利用摩擦磨损综合实验装置,在不同工况参数下,考察复合材料闸瓦摩擦系数(μ)随工况参数或其组合的变化情况,验证了通过选择不同参数组合的方法分析 μ 变化曲线的不同特性方法的可行性。

1 实验部分

1.1 主要原材料

无石棉酚醛树脂基闸瓦: WSM-3, 中实洛阳重型机械有限公司, 尺寸规格 320 mm × 238 mm × 27 mm, 该材料的基本物理力学性能参数见表 1。

闸瓦的对偶材料: 16 Mn 钢, 铸造成型, 圆盘式结构, 表面粗糙度 $R_a < 1.6 \mu\text{m}$, 硬度为 150 ~ 160, 咸阳新益摩擦密封设备有限公司。

闸瓦及其对偶材料制成试样的宏观几何尺寸误差控制在 0.2 mm 范围内。

1.2 主要设备及仪器

调压变速摩擦试验机: X-DMZ 型, 咸阳新益摩

^{*} 山西省科技重大专项项目 (20111101040), 山西省青年科技研究基金 (201601 D 021084)

联系人: 罗迎, 博士研究生, 主要从事材料摩擦学设计工作

收稿日期: 2016-12-01

表1 WSM-3 材料基本物理力学性能参数

温度 / °C	μ		磨损率 / $\times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$		撕裂强度 / $(\text{N} \cdot \text{cm}^{-1})$		布氏硬度 / MPa		吸水率 / %	吸油率 / %
	标准	实测	标准	实测	标准	实测	标准	实测		
100 ± 5	≥ 0.50	0.6	—	≤ 2.45	0.49					
150 ± 5	≥ 0.48	0.59	—	≤ 4.90	0.59					
200 ± 5	≥ 0.46	0.58	—	≤ 6.78	0.56	>30.38	70	490.5	287.8	0.249
250 ± 5	≥ 0.45	0.57	—	≤ 8.83	1.24					
250 至 100 ± 5	≥ 0.50	0.6	—	0.59	0.85					

擦密封设备有限公司。

1.3 测试原理

采用调压变速摩擦试验机测试 WSM-3 材料的对磨行为。测试原理如图 1 所示,转数由装在主轴附近的感应式接近开关测出;正压力由空气压缩机通过气缸加载于两个闸瓦试样上;摩擦力通过安装在摩擦架上与测力杆相连的拉力传感器测出;闸瓦试样的表面温度由置于摩擦盘表面,靠近闸瓦与摩擦盘接触部位附近的热电偶测出。

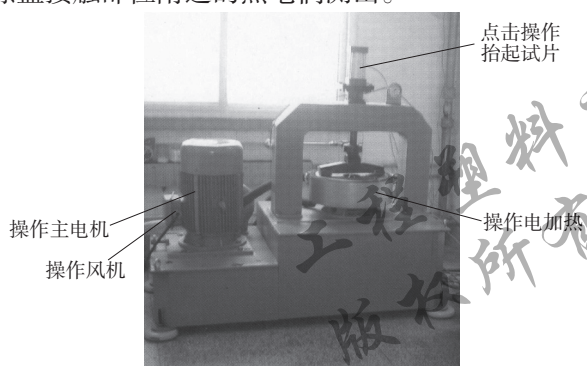


图1 调压变速摩擦试验机照片

1.4 实验工况参数的设定

采用调压变速摩擦试验机,按照 JB/T 3721-1999 测试闸瓦的摩擦性能。试验机的参数,总功率:20 kW;试样中心与正压力加载轴中心的距离:150 mm;测试最大摩擦力:2 000 N;摩擦力测量精度:±1 N;测量误差:±5 N;正压力测试范围:0.5~3.0 MPa;测量精度:±5 N;控制误差:±15 N;摩擦盘转速范围:100~2 000 r/min;速度控制误差:±10 r/min;测试最高温度:400℃;摩擦盘温度测量精度:±1℃,控制误差:±5℃;重复性误差:≤1%。

参考以下五个标准:GB/T 5763-1998 汽车用制动器衬片、GB/T 5764-1998 汽车用离合器面片、GB/T 11834-2000 工业机械用石棉摩擦片、QC/T 227.1-1997 摩托车和轻便摩托车制动片摩擦性能试验方法、SY/T 5023-1994 石油钻机用刹车块、铁路用合成制动闸瓦等的符合性试验,进行实验条件设

定,主要设定参数包括名义接触压力、滑动速度和接触面温度控制参数,受硬件精度限制。名义接触压力(P)范围设定在 0.6~1.6 MPa;滑动速度(v)范围设定在 2.5~20 m/s;接触面温度(T)在 100~350℃范围内可调。

1.5 实验步骤

(1) 实验在标称接触压力为 0.98 MPa、速度为 7.5 m/s 的条件下进行;

(2) 速度保持恒定,名义接触压力以 0.98 MPa 为中心,其余分别为 0.6,0.8,1.0,1.2,1.4,1.6 MPa;

(3) 名义接触压力保持恒定。速度中心值取为 7.5 m/s,其余分别为 2.5,5.0,7.5,10.0,12.5,15.0,17.5,20 m/s;

(4) 输出摩擦力,计算不同工况下的摩擦系数数据,将数据汇总成表,绘制曲线并分析;工况参数的设定由计算机控制系统完成。

2 结果与分析

2.1 单参数的实验方法

实验中探索的单参数曲线包括 $\mu-P$ 、 $\mu-v$ 、 $\mu-T$ 曲线。过程是将实验数据以精度 0.002 圆整,列表并绘图,在此只列举了 $\mu-P$ 、 $\mu-v$ 曲线。图 2 是当滑动速度(v)设定 7.5 m/s 时,不同接触面温度(T)下的 $\mu-P$ 曲线。由图 2 可知, $v=7.5$ m/s 时,不同接触压力下的 μ 随 T 的上升的总体变化趋势一致,都是随着 T 的升高而下降,其中 100,150,200℃的曲线特性相近,250,300,350℃的曲线特性相近;从区间性上分析,当 $T \leq 200$ ℃时, μ 的增幅和增量大于 $T \geq 200$ ℃时的增幅和增量。

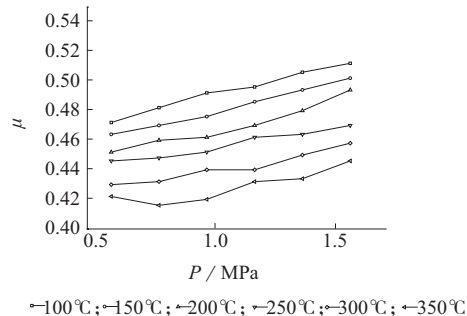
图2 不同接触面温度下 $\mu-P$ 曲线

图3是当接触压力 $P=0.98$ MPa时,不同接触面温度 T 下 μ 随 v 的变化情况。由图3可知, $P=0.98$ MPa时,不同 v 下的 μ 随 T 上升的总体变化趋势较为一致,都是随着 v 的增大而减小。从区间上观察,在 $v \leq 12.5$ m/s时,6种温度下 μ 的降幅和负增量相近,在 $v \geq 12.5$ m/s时, μ 的降幅和负增量都减小,曲线趋于平缓并伴有小幅的振荡。

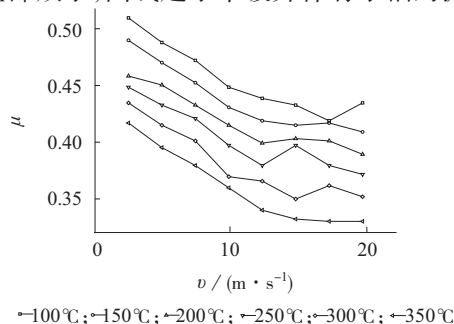


图3 不同接触面温度下 $\mu-v$ 曲线

由以上分析可知,单参数曲线最大的优点是采样点在每条曲线上分布均匀,不会出现在 X 轴某个区域采样点稀疏的情况,保证了摩擦曲线的可信性。

2.2 双参数的实验方法

实验过程中探索的双参数曲线包括 $\mu-(P \cdot v)$, $\mu-[1/(P \cdot v)]$, $\mu-(v/P)$, $\mu-(P/v)$, $\mu-(P \cdot T)$, $\mu-(v \cdot T)$, $\mu-(P/T)$, $\mu-(T/P)$, $\mu-(v/T)$, $\mu-(T/v)$,在本文中只举例了 $\mu-(P \cdot v)$, $\mu-(v/P)$, $\mu-(P/v)$, $\mu-[1/(P \cdot v)]$, $\mu-(100P/T)$, $\mu-(100v/T)$ 曲线,分别见图4~图9。

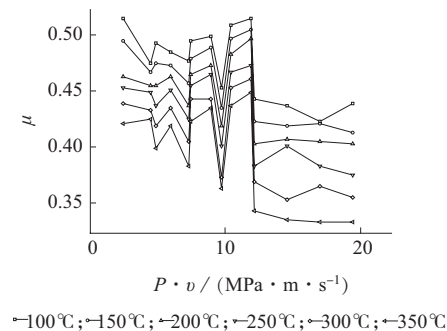


图4 不同接触面温度下 $\mu-(P \cdot v)$ 曲线

由图4可知, $\mu-(P \cdot v)$ 数据点分布较为均匀,未出现明显的采样点稀疏区域,可信度较好,各个控制温度的 $\mu-(P \cdot v)$ 虽然总体趋势上呈现出下降的趋势,但这条性质表现的并不突出,连续性减弱;区间性和突变性表现特别强烈,呈现出明显的分段性,例如 $(P \cdot v) \in [12, 12.5]$ 区间时, $(P \cdot v)$ 微小的增量将引起 μ 值的急剧下降; $(P \cdot v)=12.5$ 的左侧, μ 变化剧烈,其右侧曲线平滑, μ 值波动不大。图5为

不同接触温度下 $\mu-(v/P)$ 曲线。图5与图4性质相近,仅在初始阶段 $v/P \in [2.55, 4.69]$ 时 μ 值随 v/P 的增大而增大,在这一点上与图6变化趋势相反。

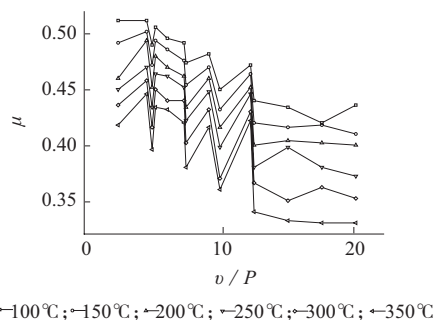


图5 不同接触面温度下 $\mu-(v/P)$ 曲线

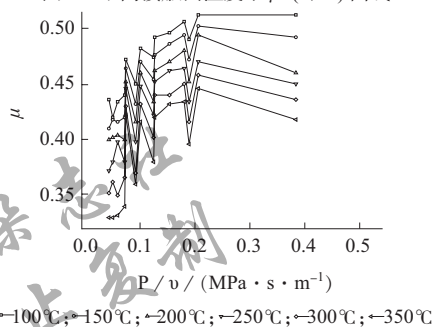


图6 不同接触面温度下 $\mu-(P/v)$ 变化曲线

由图6可知,各条接触面温度下的 $\mu-(P/v)$ 变化曲线随 (P/v) 值的增大表现的区间性非常明显, $(P/v) \leq 0.213$ 时,数据点分布密集,集中了84个采样点中的78个,且在区间 $[0.049, 0.213]$ 分布较均匀,表现出的摩擦系数特性可信度较高;同 $\mu-(P \cdot v)$ 一样, μ 从数据上呈现在狭小区间上的多极值性。

图7为不同 T 下 $\mu-[1/(P \cdot v)]$ 变化曲线。由图7可知,在 $[1/(P \cdot v)] \in [0.050, 0.222]$ 狭小区域集中了93%的数据点,这个区间表现出的 μ 的变化特征较单参数 μ 变化曲线更可信,例如,在 $[1/(P \cdot v)] \in [0.05, 0.08]$ 时, μ 随 $[1/(P \cdot v)]$ 增大呈现小幅增长趋势,且以较高频率小幅震荡; $[1/(P \cdot v)] \in [0.082, 0.083]$ 时 μ 增幅极大,从图形看变化率接近垂线; $[1/(P \cdot v)] \in [0.095, 0.102]$ 时 μ 降幅极大。

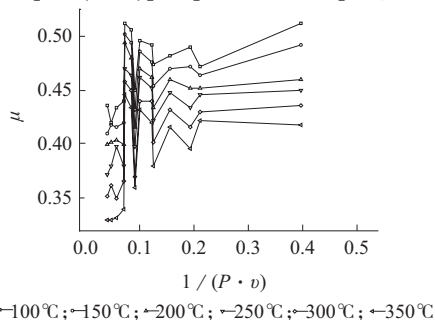


图7 不同接触面温度下 $\mu-[1/(P \cdot v)]$ 变化曲线

图8为 $v=7.5\text{ m/s}$ 时 $\mu-(100P/T)$ 变化曲线。由图8可知,随 $100P/T$ 的增大, μ 值虽有小幅震荡,但总体呈现增大趋势,曲线特别之处是在 $100P/T=0.4$ 时, μ 分别等于0.452,0.47,0.496, μ 值变化在该点呈现明显多值性,这对于参数组合研究方法来说并不奇异,原因是材料在该点组织结构或复合材料闸瓦试样组分发生明显的变化。

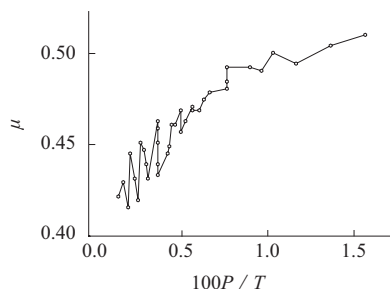


图8 $\mu-(100P/T)$ 变化曲线

图9为 $P=0.98\text{ MPa}$ 时 $\mu-(100v/T)$ 变化曲线。由图9可知, $100v/T=5$ 时, μ 分别等于0.49,0.454,0.416,0.38,0.35,多值特性更加明显; $100v/T \leq 5$ 时,随 $100v/T$ 增大,振幅逐渐增大, $100v/T \geq 5$ 时,随 $100v/T$ 增大,振幅逐渐减小,并趋于中值。

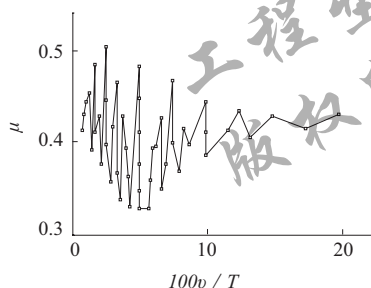


图9 $\mu-(100v/T)$ 变化曲线

2.3 三参数的实验方法

实验过程中研究的三参数曲线包括 $\mu-[T/(P \cdot v)]$, $\mu-[(v \cdot T)/P]$, $\mu-(P \cdot v \cdot T)$, $\mu-[P/(v \cdot T)]$, $\mu-[(P \cdot v)/T]$, $\mu-[v/(P \cdot T)]$, $\mu-[(P \cdot T)/v]$, $\mu-[1/(P \cdot v \cdot T)]$ 。6种曲线虽然曲线形态差异非常明显,但从分析方法上没有区别,在本文仅举两例,分别见图10和图11。在数据点分布的区间性上,三参数模型的数据点均匀性小于单参数模型而高于双参数模型,数据较为可信。从曲线特性上来说,三参数曲线既不像单参数曲线那样对摩擦系数变化的总体趋势和连续性上具有较强的表现力,也不像双参数曲线那有对区间性和连续性具有极强的表现力,介于两者之间。三参数曲线的独特优势是在实验中表现出频率很大的振荡,振幅也较大。由图10可知,当 $[T/(100P \cdot v)]=0.408$ 时, $\mu=0.512$ 达到峰值;当 $T/$

$(100P \cdot v) \in [0.051, 0.612]$ 区间时, μ 以极大的振幅振荡,且频率极小,表现出明显的区间振荡性。

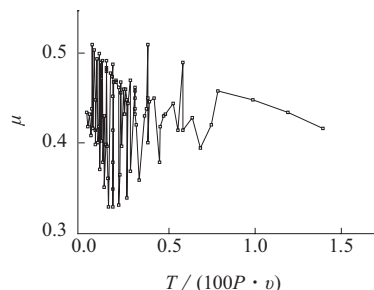


图10 $\mu-[T/(100P \cdot v)]$ 变化曲线

图11为 $\mu-[(P \cdot v \cdot T)/100]$ 变化曲线。由图11可知,当 $[(P \cdot v \cdot T)/100]=2.45$ 时, μ 处于峰值0.512后随 $(P \cdot v \cdot T)/100$ 增大有一个明显的下滑,随后进入振荡期,这种状态持续到 $(P \cdot v \cdot T)/100=12.5$; $(P \cdot v \cdot T)/100 \in [12.5, 44.1]$ 时, μ 值有较大的振幅和较小的频率变化; $(P \cdot v \cdot T)/100 \in [44.1, 60.025]$ 时,随 $[(P \cdot v \cdot T)/100]$ 增大, μ 以平滑的形态下降。在所有考察的曲线中, $\mu-[(P \cdot v \cdot T)/100]$ 曲线的区间性最为明显,呈现出显著的分段曲线特征。

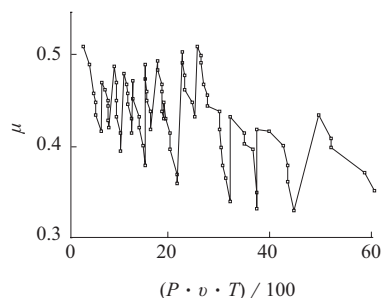


图11 $\mu-[(P \cdot v \cdot T)/100]$ 变化曲线

3 结论

(1) 单参数实验方法适用于研究总体变化趋势和变化的连续性,其不能表现出区间性和突变性,并对曲线变化的振荡性的表现非常弱。

(2) 双参数实验方法由于对 X 轴的单位长度的放缩变化,常常呈现出数据点分布的极不均匀性,这就造成在采样数据点密集的地方其对摩擦系数变化的刻画精度远远超出单参数实验办法,但数据点稀疏的地方由于数据点的不足只能在分析中舍弃,例如图11,共84个采样点,每个数据点10组,共840组,但当 $1/(P \cdot v) \in [0.222, 0.408]$ 时,如此大的区域仅分布6个数据点,所有摩擦系数变化刻画是研究范围选定为 $1/(P \cdot v) \in [0.051, 0.222]$,其余部分舍弃。三参数实验方法处理的某些曲线上也有类似情形。

(3) 双参数实验办法适用于研究摩擦系数变化的区间性和突变性,其曲线形态往往呈现出明显的分段曲线特征;双参数实验方法对于曲线的总体变化趋势和连续性刻画上表现极差,但呈现出部分振荡性。

(4) 三参数实验方法适用于研究摩擦系数变化的振荡性,但在总体趋势、连续性、区间性、突变性四个方面在不同的曲线上有不同的表现,变化情况复杂于单参数、双参数处理方法。

参考文献

- [1] 谢友柏. 摩擦学系统的系统理论研究和建模[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(1):1-8.
Xie Youbai. On the system theory and modeling of tribo-systems [J]. Tribology, 2010, 30(1):1-8.
- [2] Zhu Zhencai, Xu Lei, Chen Guoan. Effect of different whiskers on the physical and tribological properties of nonmetallic friction materials[J]. Materials & Design, 2011, 32(1):54-61.
- [3] Isik E, Özses Ç. Determination of the mechanical properties of friction welded tube yoke and tube joint[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 1-8.
- [4] 符蓉, 宋宝韞, 高飞, 等. 摩擦制动条件对列车制动闸片材料摩擦性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(7):1 223-1 230.
Fu Rong, Song Baoyun, Gao Fei, et al. Effect of friction conditions on friction properties of braking materials used for trains[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(7):1 223-1 230.
- [5] 牛永平, 王勇峰, 汪小伟, 等. 环氧树脂复合材料的摩擦学性能研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(6):117-121.
Niu Yongping, Wang Yongfeng, Wang Xiaowei, et al. Study on tribological properties of epoxy resin composites [J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(6):117-121.
- [6] 朱真才, 史志远, 陈国安. 提升机盘形制动器无石棉闸瓦的摩擦性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(3):462-465.
Zhu Zhencai, Shi Zhiyuan, Chen Guoan. Friction performance of disc brake without asbestos in hoisting machine[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(3):462-465.
- [7] 魏儒东, 杜永平, 裴顶峰. 粘合剂体系对高摩擦成闸瓦摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2008, 33(11):63-65.
Wei Rudong, Du Yongping, Pei Dingfeng. Effect of binder system on friction and wear properties of high friction composite brake shoe [J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(11):63-65.
- [8] Öztürk B, Arslan F, Öztürk S. Effects of different kinds of fibers on mechanical and tribological properties of brake friction materials[J]. Tribology Transactions, 2013, 56(4):536-545.
- [9] 史志远, 朱真才, 陈国安. 提升机盘形制动器闸瓦材料摩擦性能实验研究[J]. 润滑与密封, 2006(12):99-101.
Shi Zhiyuan, Zhu Zhencai, Chen Guoan. Experimental study on friction properties of disc brake brake shoe material of hoist[J]. Lubrication Engineering, 2006(12):99-101.
- [10] Kobashi M, Ninomiya T, Kanetake N, et al. Effect of alloy in elements in the brazing sheet on the bonding strength between Al_2O_3 and aluminum[J]. Scripta Metallurgica Et Materialia, 1996, 34(3):415-420.
- [11] 苏堤, 罗成, 潘运娟. 树脂基汽车复合摩擦材料的磨损机理[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2007, 12(4):221-224.
Su Di, Luo Cheng, Pan Yunjuan. Wear mechanisms of a resin-based semi-metallic friction material for automotive[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2007, 12(4):221-224.
- [12] Edrissy A, Perry T, Cheng Y T, et al. Wear of thermal spray deposited low carbon steel coatings on aluminum alloys[J]. Wear, 2001, 251:1 023.
- [13] Straffelin I G, Pellizzar I M, Olinar I A. Influence of load and temperature on the dry sliding behavior of Al-based metal-matrix-composites against friction material[J]. Wear, 2004, 256:754-767.
- [14] Uyyuru R K, Surappa M K, Brusethaug S. Effect of reinforcement volume fraction and size distribution on the tribological behavior of Al-composite / brake pad tribo-couple[J]. Wear, 2006, 260:1 248-1 260.

兰州石化大乙烯项目通过国家环保部验收

兰州石化公司大乙烯项目正式通过国家环保部竣工环境保护验收。

大乙烯项目属于兰州石化和大庆石化乙烯联合改造工程的一部分,主要包括新建 46 万 t 乙烯装置、20 万 t 汽油加氢装置、9 万 t 丁二烯抽提装置、20 万 t 高压聚乙烯装置、30 万 t 全密度聚乙烯装置和 30 万 t 聚丙烯装置及相关配套工程。为认真落实乙烯工程环评批复要求,兰州石化先后开展氧化塘项目和新建油污干管论证,实施了一批水资源优化、节水减排和污水回用措施,配合兰州市人民政府完成了油污干管安全评估和上游排放环境影响评价,为通过环境保护验收提供了有力支撑。

收提供了有力支撑。

去年 7 月 28 日,集团公司正式向国家环保部申请该项目竣工环保验收。国家环保部于 2016 年 8 月 12 日受理该项目环保验收。2016 年 10 月 21 日,甘肃省环保厅受国家环保部委托,组织对乙烯工程进行竣工环保验收现场检查,经国家环保部司长专题会、司委会审查以及验收决定前公示,2016 年 12 月 20 日,国家环境保护部正式下发《关于中国石油天然气股份有限公司兰州石化和大庆石化乙烯联合改造工程(兰州石化部分)竣工环境保护验收合格的函》,标志着大乙烯项目正式通过国家环保部竣工环境保护验收。

(工程塑料网)