

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.01.009

# 铸铁 HT200、45<sup>#</sup> 钢、聚四氟乙烯、尼龙 PA66 滚动行为的对比分析研究<sup>\*</sup>

黄传辉, 蔺超文

(徐州工程学院 机电工程学院, 江苏 徐州 221111)

**摘要:**针对滚动摩擦中的弹性滞后效应问题,利用自行设计的滚动摩擦实验台,考察了 HT200、45<sup>#</sup>钢、PTFE、PA66 与 HT200 配副在不同载荷、速度下的滚动摩擦行为,利用 CETR UMT-2 型试验机及 LKDM-2000 轮廓摩擦磨损仪考察了 PTFE 和 PA66 的蠕变行为。对不同速度、载荷下滚动摩擦阻力及滚动摩擦系数的变化情况进行了研究,重点分析了滚动摩擦阻力与速度、载荷之间的耦合关系,从弹性滞后效应的角度分析了材料的黏弹性质对滚动摩擦行为的影响机理。研究表明:滚动摩擦系数随速度增加而增大,HT200、45<sup>#</sup>钢、PTFE 和 PA66 的滚动摩擦系数之比约为 1:0.99:1.03:1.05;滚动摩擦阻力随 PV 值增加而增大,且二者间存在线性关系,PTFE 和 PA66 拟合直线的斜率显著高于 HT200、45<sup>#</sup>钢。

**关键词:**滚动摩擦系数;滚动摩擦阻力;PV 值

**中图分类号:**TH117.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2017)01-0044-04

## Comparative investigation on rolling behavior of HT200, 45<sup>#</sup> steel, PTFE and PA66

HUANG Chuan-hui, LIN Chao-wen

(Department of mechanical engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou, 221111, China)

**Abstract:** Aiming at the elastic hysteresis effect in rolling friction, the rolling friction behavior under different loads and velocities of HT200, 45<sup>#</sup> steel, PTFE and PA66 were studied through experiments on a self-made rolling friction testing equipment and the creep property of PTFE and PA66 were investigated by experiments on CETR UMT-2 and LKDM-2000 equipment. During experiments, the rule that the rolling friction force varies with velocities and loads was focused and the action mechanism that visco-elastic properties of materials influence the rolling friction was analyzed. In addition, the law that the rolling friction coefficient varies with velocities and loads was discussed at the same time. The results indicate that the rolling friction coefficient rises up with the increment of rolling velocities. The ratio of rolling friction coefficient of HT200, 45<sup>#</sup> steel, PTFE and PA66 was about 1:0.99:1.03:1.05. The rolling friction force was roughly proportional to the value of PV and the fitting-line slopes of PTFE and PA66 was apparently higher than that of HT200 and 45<sup>#</sup> steel.

**Key words:** rolling friction coefficient ; rolling friction force; PV

## 0 引言

由于具有粘着系数高、耐磨损、抗冲击、噪声低等优越的性能,近年来聚合物材料在机械滚动副的设计中应用日益广泛。但聚合物材料具有的高粘弹性,却

是它区别于金属的明显特征,由此也使得聚合物滚动摩擦副产生了接触表层变形大、摩擦热集中、切向弹性滞后等特殊问题<sup>[1-4]</sup>,它们对聚合物的滚动行为具有重要影响,因此对聚合物滚动行为的研究就不能不注意考察材料的粘弹性质对接触过程,特别是加载历史的

收稿日期:2016-04-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275514);江苏省高校自然科学研究重大项目(14KJA440001)

作者简介:黄传辉(1970-),男,江苏徐州人,博士,教授,主要从事工程摩擦学设计方面的研究。E-mail:huangch2008@xzit.edu.cn

影响机理<sup>[5]</sup>。然而目前常用的滚动摩擦模型还大多停留在宏观现象描述方面,没有把对滚物体力学性质及接触性质的影响反映进去,特别是滚动速度这一与加(卸)载历史密切相关的因素无论在机理分析还是在实验数据上都还缺乏研究,影响了分析结果的准确性和合理性<sup>[6-7]</sup>。

本研究考察铸铁 HT200、45#钢、聚四氟乙烯 (PTFE) 和尼龙 PA66 四种材料与铸铁 HT200 配副在不同速度、载荷下滚动摩擦阻力及滚动摩擦系数的变化情况,并从弹性滞后的角度探讨影响机理。

1 实验部分

试验在滚动摩擦试验台上进行,试验台示意图如图 1 所示。

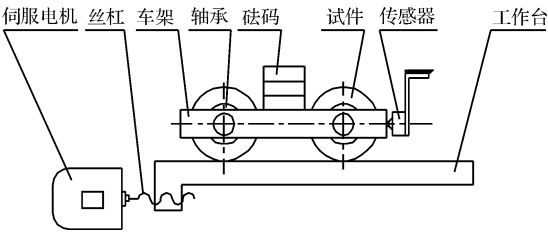


图 1 滚动摩擦试验台示意图

HT200、45#钢、PTFE 和 PA66 试件均加工成外径 90 mm、内径 62 mm、宽 17 mm 的圆环状,外圆表面经精车后用 1 200# 砂纸打磨抛光至表面粗糙度  $Ra = 0.8\ \mu\text{m}$ 。铸铁 HT200 导轨经表面淬火处理,硬度为 HRC57,实验表面磨削至表面粗糙度  $Ra = 0.4\ \mu\text{m}$ 。综合调节车身及砝码重量,使得实验载荷分别为 19.6 N (2 kg)、29.4 N (3 kg)、39.2 N (4 kg)。伺服电机由 FANUC-OI-MC 驱动系统控制,驱动工作台以 0.2 m/min、0.6 m/min、1 m/min、1.4 m/min、4 种速度直线运动。利用 KQ-WH639hd 型精密传感器测量滚动摩擦阻力。相同试验重复 3 次,实验结果取 3 次试验的平均值。

滚动摩擦系数按下式计算:

$$k = \frac{F \cdot R}{P} \tag{1}$$

式中: $F$ —滚动摩擦阻力,N; $R$ —试件半径,m; $P$ —接触压力,N。

PA66 及 PTFE 的静态蠕变及松弛实验在 CETR UMT-2 型多功能试验机及 LKDM-2000 轮廓摩擦磨损仪上进行。试件加工成 10 mm×10 mm×10 mm 的立方体,表面用 1 200# 砂纸打磨至表面粗糙度  $Ra = 0.4\ \mu\text{m}$ 。实验载荷分别取为 19.6 N 和 29.4 N,加载后定时测量试件的压缩变形量,持续加压 180 min 后去除载荷。

2 结果与分析

4 种实验材料的滚动摩擦系数随滚动速度增加的变化情况如图 2 所示。

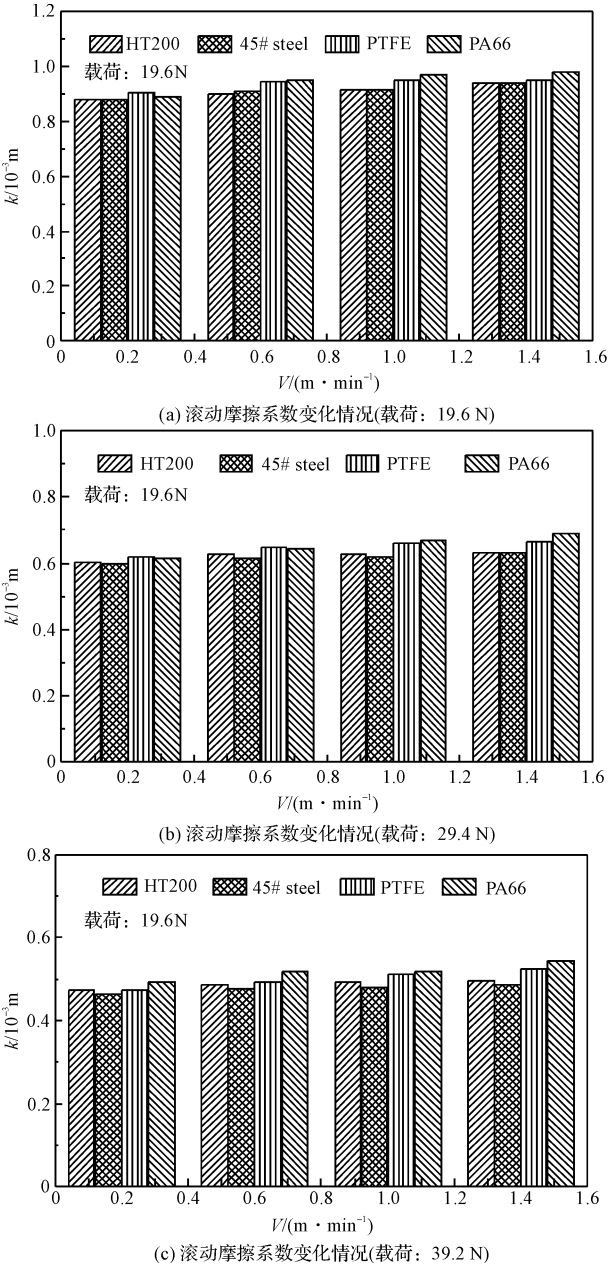


图 2 滚动摩擦系数随滚动速度的变化趋势

可以看出,随速度增加,HT200、45#钢、PTFE 和 PA66 的滚动摩擦系数均呈增大的趋势。当速度从 0.2 m/min 上升到 1.4 m/min 时,4 种材料的滚动摩擦系数平均增长了 5.6% (HT200)、5.4% (45#钢)、7.8% (PTFE) 和 10.8% (PA66)。同样实验条件下,PTFE 和 PA66 的滚动摩擦系数高于 HT200 和 45#钢,HT200、45#钢、PTFE 和 PA66 的滚动摩擦系数之比约为 1:0.99:1.03:1.05。

4 种实验材料的滚动摩擦阻力与 PV 值(接触压力

与滚动速度的乘积)的相互关系如图 3 所示。

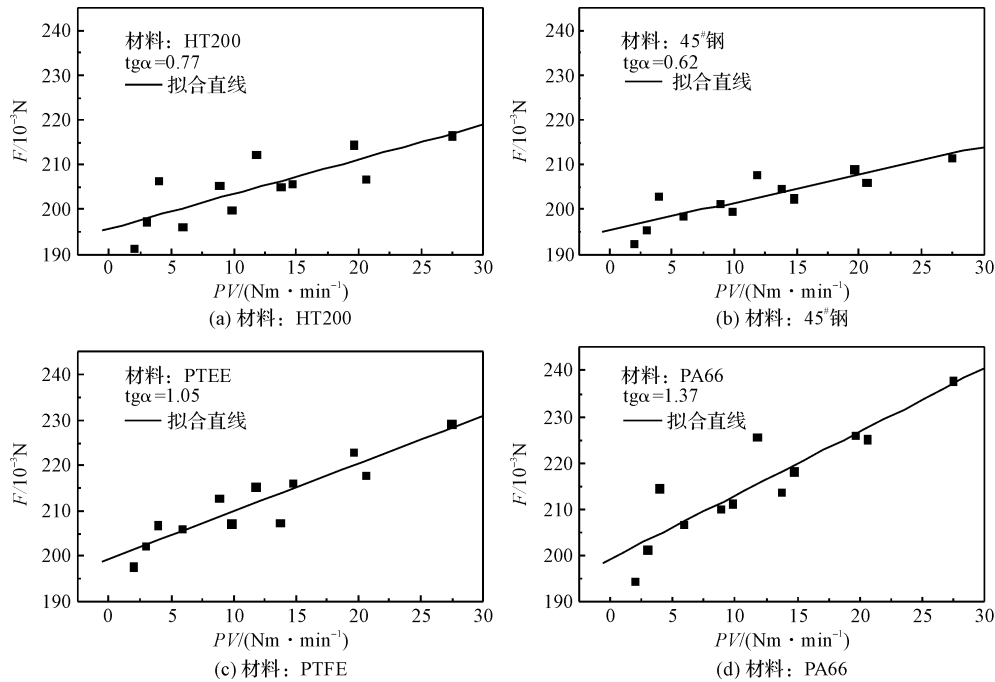


图 3 滚动摩擦阻力随 PV 值的变化趋势

可以看出,随 PV 值的增加,HT200、45# 钢、PTFE 和 PA66 的滚动摩擦阻力均增大,二者之间存在较好的线性关系。经相关性分析,可得图中各拟合直线的斜率如表 1 所示。

| 材料  | HT200 | 45# 钢 | PTFE | PA66 |
|-----|-------|-------|------|------|
| tgα | 0.77  | 0.62  | 1.05 | 1.37 |

对比分析可见,PTFE 和 PA66 拟合直线的斜率显著高于 HT200、45# 钢,这表明随 PV 值的增加,聚合物实验材料滚动摩擦阻力的增长幅度远高于金属材料。

3 讨论

滚动摩擦阻力主要来源于弹性滞后、黏附、微观滑移及塑性变形<sup>[8]</sup>。自由滚动时弹性滞后效应是滚动摩擦力的重要来源。对滚物体在法向载荷 P 及力矩 M 作用下向前滚动时的受力情况如图 4 所示<sup>[9]</sup>。

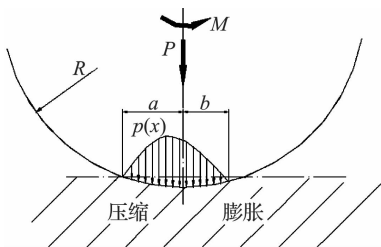


图 4 滚动摩擦时力偶平衡示意图

此时由弹性滞后效应引起的阻力矩可表示为:

$$M = \int_{-a}^b xp(x) dx \tag{2}$$

其中,p(x)—接触区内的压力分布,一般可表达为:

$$p(x,t) = -\sigma = -\int_0^t \Psi(t-t') \frac{\partial \varepsilon(t')}{\partial t'} dt' \tag{3}$$

式中:Ψ(t)—滚动体材料的松弛函数。

可以看出,p(x) 的分布特性取决于对滚材料的黏弹性和滚动速度。滚动速度低,滚动体单元材料通过半接触区宽度的时间长,黏弹性恢复明显,阻力矩小。滚动速度增大,单元材料通过半接触区宽度的时间缩短,接触应力不对称现象加剧,阻力矩变大,因此随转速的增加滚动摩擦系数呈上升趋势。

HT200、45# 钢在弹性范围内应力与应变之间具有简单正比关系,而 PTFE、PA66 则表现出显著的黏弹性质,其静态蠕变特性如图 5 所示。

可以看出,在加载的瞬间,PA66 和 PTFE 均发生较大的应变。其后虽载荷不变,但应变继续增加。在加载后的 5 min 之内,试件蠕变较大,之后增长幅度趋于平缓。PA1010 的蠕变量高于 PTFE,在 0 ~ 120 min 内达到 12.6 μm(19.6 N)及 13.1 μm(29.4 N),PTFE 为 10.7 μm(19.6 N)及 9.5 μm(29.4 N)。PA66、PTFE 的黏弹性质影响了滚动接触区内的应力分布 p(x) 及其随时间变化的函数关系,增加了 p(x) 分布的不对称性,并随着 PV 值的增加,影响更加显著,因此 PTFE 和 PA66 的滚动摩擦系数高于 HT200 和 45# 钢,且随 PV 值增加,其滚动摩擦阻力的增长率也较大。

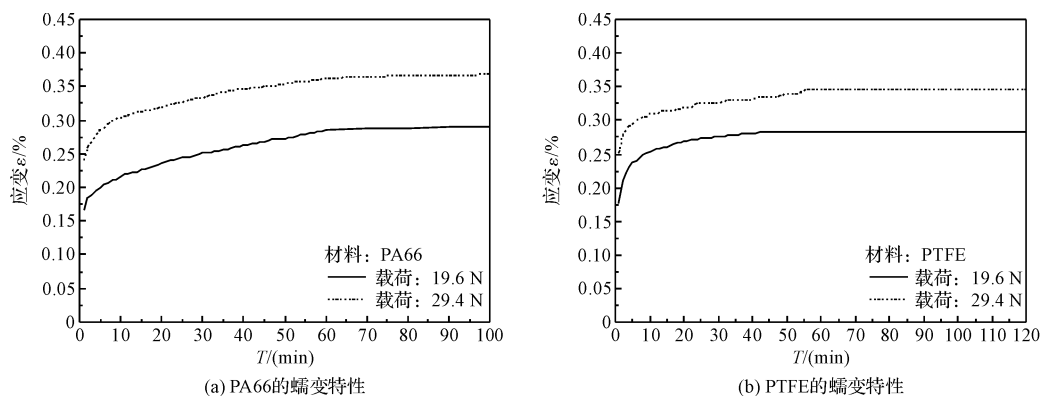


图5 PA66 和 PTFE 的蠕变特性

## 4 结束语

本研究考察分析了 HT200、45<sup>#</sup>钢、PTFE、PA66 这 4 种材料与 HT200 配副时的滚动摩擦行为,从弹性滞后效应的角度讨论了滚动摩擦阻力、滚动摩擦系数和材料黏弹特性之间的耦合关系。

结果表明,随滚动速度增加,HT200、45<sup>#</sup>钢、PTFE 和 PA66 的滚动摩擦系数均呈增大趋势,4 种材料的滚动摩擦系数之比约为 1:0.99:1.03:1.05。4 种材料的滚动摩擦阻力均随 PV 值增加而增大,二者之间存在比较显著的线性关系,且 PTFE 和 PA66 拟合直线的斜率明显高于 HT200、45<sup>#</sup>钢。PA66 和 PTFE 作为聚合物材料,其黏弹性质影响了滚动接触区内的应力分布及其随时间变化的函数关系,增加了应力分布的不对称性,这是造成它们滚动摩擦系数高、随 PV 值增加滚动摩擦阻力增长快的主要原因。该研究对于揭示聚合物滚动摩擦滞后机理及其与滚动效率之间的规律有一定的参考意义。

## 参考文献 (References):

[1] BIJAKZUCHOWSKI M, MAREK P. Residual stress in some

elasto-plastic problems of rolling contact with friction[J].

**International Journal of Mechanical Sciences**, 1997, 39 (1):15-32.

- [2] 龚科家,危银涛,叶进雄. 基于热力学有限元分析的轮胎滚动阻力仿真[J]. 中国机械工程,2009,20(5):626-629.
- [3] 何永明,穆塔里夫·阿赫迈德,刘毅龙. 油泵机械密封摩擦副界面热-结构耦合分析[J]. 液体机械,2014,42(6):21-25.
- [4] 张霞,陈志华,张立华,等. 玻璃/碳纤维增强聚合物基纳米复合材料冲击力学特性分析研究[J]. 机电工程,2016,33(5):546-550.
- [5] BALTOV A I, NEDEV A G. Approach to the modelling of contact friction during rolling[J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 1995, 53(3-4):695-711.
- [6] 曾盛琦,余劲松. 新型摩擦式无级变速器的开发及其应力应变的改善性分析[J]. 机电工程,2012,29(12):1386-1390.
- [7] 温泽峰,金学松,刘兴奇. 两种型面轮轨滚动接触蠕滑率和摩擦功[J]. 摩擦学学报,2001,21(4):288-292.
- [8] 全永昕. 工程摩擦学[M]. 杭州:浙江大学出版社,1994.
- [9] JOHNSON. K. L. 接触力学[M]. 徐秉业,等译. 北京:高等教育出版社,1992.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

黄传辉,蔺超文. 铸铁 HT200、45<sup>#</sup>钢、聚四氟乙烯、尼龙 PA66 滚动行为的对比分析研究[J]. 机电工程,2017,34(1):44-47.

HUANG Chuan-hui, LIN Chao-wen. Comparative investigation on rolling behavior of HT200, 45<sup>#</sup>steel, PTFE and PA66[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017,34(1):44-47.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>