

文章编号: 1004 - 0609(2004) 06 - 0896 - 05

## 铜/ 塑自润滑材料的结构优化及性能<sup>①</sup>

向定汉<sup>1, 2</sup>, 潘青林<sup>1</sup>, 姚正军<sup>2</sup>, 陈健康<sup>2</sup>

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;

2. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 210016)

**摘 要:** 利用 ANSYS 有限元法对铜/ 塑自润滑滑块进行了结构优化。在正压力不变的条件下, 对两种不同截面的滑块进行了承载力和摩擦对比实验。结果表明: 圆柱截面滑块的极限承载力为 82.1 kN/cm, 而菱形截面滑块的极限承载力为 65.9 kN/cm, 两种不同截面自润滑滑块的干摩擦因数均小于 0.1, 与有限元法的优化结果一致。

**关键词:** 摩擦磨损; 滑块; 自润滑材料; 有限元

中图分类号: TB 333

文献标识码: A

## Structural optimization and properties of brass-plastics self-lubricating composites

XIANG Ding-han<sup>1, 2</sup>, PAN Qing-lin<sup>1</sup>, YAO Zheng-jun<sup>2</sup>, CHEN Jian-kang<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering,  
Central South University, Changsha 410083, China;

2. College of Materials Science and Technology,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The structure of brass-plastics self-lubricating composites was optimized with the ANSYS finite element method. When the normal pressure of slideway is unalterable, the load carrying capacity of the self-lubricating slideway for cylinder section is heavier than that of the lozenge section. The experiments of friction and load carrying capacity for the different section self-lubricating slideway were done. The results show that the limit load carrying capacity of cylinder section slideway is 82.1 kN/cm, but the limit load carrying capacity of lozenge section slideway is 65.9 kN/cm, the friction coefficients of two types of different section slideway are less than 0.1. The results of calculation and experiment are accordant.

**Key words:** friction and wear; slideway; self-lubricating composite; finite element

国内外常用的常温块体自润滑材料一般有 3 种<sup>[1-12]</sup>: 单层复合材料以高分子基为主, 如聚四氟乙烯 (PTFE) 基复合材料<sup>[4-7]</sup>、聚甲醛 (POM) 基复合材料、油尼龙基复合材料等; 两层复合材料以镶嵌型自润滑材料为代表; 三层复合材料主要是铜-塑-铜自润滑材料, 如 Du、Dx、SF、TSG 等<sup>[1-3]</sup>。

塑料基自润滑材料具备摩擦因数小的优点, 但其摩擦因数不稳定及承载力较低<sup>[4-7]</sup>; 镶嵌型自润滑材料的承载力大, 块体结构稳定, 但摩擦因数大 (0.2 左右); 三层复合材料承载力大, 摩擦因数小, 但复合层太薄 (小于 1 mm), 抗冲击与刮伤性能差。因此这 3 类材料均难以满足重载支承结构的要求。

① 基金项目: 湖南省博士后基金资助项目 (200107)

收稿日期: 2003 - 10 - 22; 修订日期: 2003 - 12 - 25

作者简介: 向定汉 (1966 -), 男, 副教授, 博士。

通讯作者: 向定汉, 副教授; 电话: 025 - 84647362; E-mail: xiangdh@nuaa.edu.cn

铜/ 塑自润滑材料(TS-70) 是近年来发明的一种新型材料<sup>[1]</sup>, 它是在铜钉板间隙填充塑料, 将塑料的低摩擦因数与铜的高强度完美结合, 其摩擦因数小(小于 0. 1), 承载力大(线压强可达到 70 kN/ cm), 已应用于水电工程钢闸门滑道、滚轮轴承等。但在使用过程中, 如何充分发挥铜/ 塑料自润滑材料的承载力, 以满足更苛刻重载条件下的要求, 如钢闸门支承自润滑滑块、铁道道叉自润滑滑板床等, 是一项值得研究的课题。国内外学者利用有限元法对重载条件下服役的零部件进行了研究, 取得了较好的效果<sup>[13~18]</sup>。本文作者对不同柱体截面的铜/ 塑复合材料进行了有限元分析, 确定其应力分布情况, 然后对不同的方案进行性能对比实验, 通过结构优化开发出承载力大、摩擦因数低的结构复合材料。

1 铜塑自润滑材料的结构优化

1.1 结构优化模型

采用不同截面的铜钉板与聚甲醛基复合材料热压成型(见图 1 和图 2), 组成新型铜/ 塑料自润滑材料, 建立了有限元分析模型。

1.2 有限元模型

水电工程是重载自润滑材料应用最早也比较成功的领域之一, 通常钢闸门支承滑块与不锈钢轨之间的接触副为平面对弧面, 因此自润滑滑块承载力一般用单位长度上承受的载荷即线压强来表示(单位: kN/ cm)。不锈钢轨的材料为 1Cr18Ni9Ti, 弧面半径为 300 mm, 铜合金的材质为 C86300(64Cu-26Zr-3Fe-3Al-4Mn)。

滑块的有限元分析采用实体建模, 应用四面体 10 节点的实体单元 SOLID92, 有 3 个方向的自由度, 即  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 。此单元适合于不规则的几何外形模拟, 而且计算精度较高, 因此在进行自由网格划

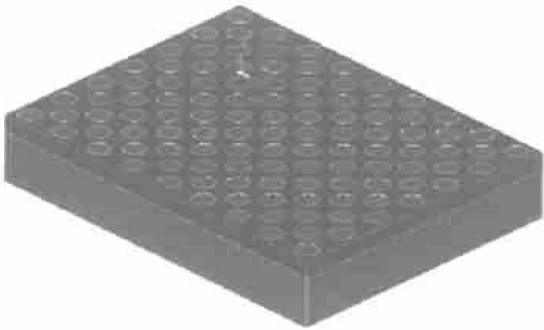


图 1 圆柱截面自润滑材料示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of self-lubricating composite for cylinder section

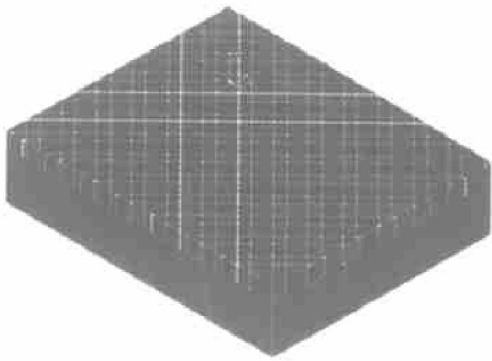


图 2 菱形截面自润滑材料示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of self-lubricating composite for lozenge section

分时产生的节点和网格单元的数量会有所不同。有限元网格划分较密是为了更清晰地显示滑块的应力集中区域。有限元分析采用的材料常数分别为: 不锈钢弹性模量 209 GPa, 泊松比 0. 29; C86300 铜合金弹性模量 120 GPa, 泊松比 0. 35; 聚甲醛复合材料弹性模量 3. 7 GPa, 泊松比 0. 30。为了减少计算量, 采用半实体模型, 实体模型和网格划分如图 3 所示。

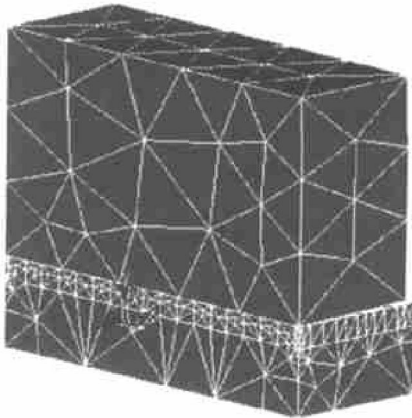


图 3 实体模型的有限元网格  
Fig. 3 Finite element mesh of TS-70D

1.3 计算结果及分析

有限元数值分析得到的应力等值线图如图 4 所示。

改性聚甲醛的抗拉强度为 127 MPa, 条件屈服极限为 70 MPa, C86300 铜合金的抗拉强度为 820 MPa, 条件屈服极限为 670 MPa。铜合金与塑料均为塑性材料, 可选用第三强度理论或第四强度理论校核。本研究选用第三强度理论进行校核, 即

$$\sigma_3 = \sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma]$$

式中  $\sigma_1$  为第一向主应力,  $\sigma_3$  为第三向主应力。

正压力按线压强为 70 kN/ cm 加载。圆柱截面

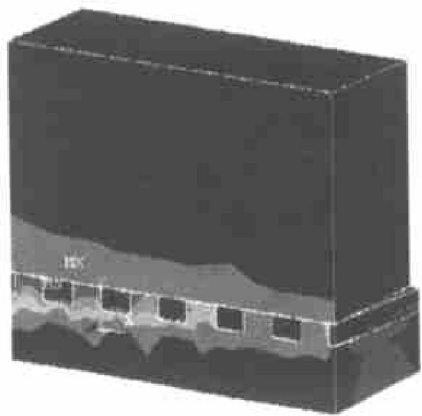


图4 滑块与钢轨的应力等值线图

Fig. 4 Profile of stress isoline for tribopairs

滑块的第三强度理论应力值  $\sigma_{t3}$  为 658.75 MPa; 菱形截面滑块的第三强度应力  $\sigma_{t3}$  为 2 908 MPa。由此可见在承受相同载荷的条件下, 圆柱截面滑块所受应力均匀, 不会发生塑性变形, 而菱形截面滑块所受应力则严重集中。

## 2 实验

### 2.1 自润滑滑块材料的研制

本研究自润滑滑块是由高强黄铜铸造成钉板, 材料为 C86300(GB1176-87), 固体润滑材料基体为聚甲醛, 填充材料为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末、石墨粉与 PTFE。其配方如表 1 所示。

表1 固体润滑材料的配方

Table 1 Components of solid self-lubricating composites

| $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$ | $w(\text{graphite})/\%$ | $w(\text{PTFE})/\%$ | $w(\text{POM})/\%$ |
|-------------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| 5~10                          | 3~6                     | 5~10                | Bal.               |

本研究的圆柱截面滑块编号为 TS-70D1, 菱形截面滑块编号为 TS-70D2, 这两种新型滑块材料的性能通过对比实验研究确定。

### 2.2 滑块承载力实验

滑块的承载力是衡量滑块承受载荷的重要指标。两种滑块的承载力实验在液压式万能实验机上进行, 滑块试件的尺寸为 80 mm × 40 mm × 15mm, 实验机弧面压头  $R = 300$  mm, 材料与实际钢轨相同, 为 0Cr21Ni5Ti 不锈钢, 加载时的变形曲线由实验机自动记录。

### 2.3 两种滑块材料的摩擦实验

两种滑块材料的摩擦实验在滑动摩擦实验机上完成。滑动摩擦实验机最大正压力  $N$  为 600 kN, 加载负荷连续可调, 最大牵引力  $F$  为 200 kN, 由测力计测量, 精度  $\pm 50$  N, 摩擦因数  $\mu = F/N$ 。实验条件: 钢轨为 0Cr21Ni5Ti 不锈钢, 轨道半径为 300 mm, 表面光洁度为 1.6  $\mu\text{m}$ , 相对速度为 2.5 m/min。TS-70D2 试样尺寸为 100 mm × 50 mm × 15 mm, 共 2 对。先将正压力加到 100 kN(滑块材料的承载力为 20 kN/cm), 测定出摩擦因数, 停机, 共重复 3 次; 再依次按正压力为 175、250、300、350 kN 加载, 测定摩擦因数。为消除摩擦热的影响, 每次测一组, 摩擦因数取一组(测 3 次)的平均值。

### 2.4 两种滑块摩擦的时间效应实验

两种滑块的时效摩擦实验在滑动摩擦实验机上进行。实验条件: 静承载力  $q$  为 50 kN/cm, 不锈钢轨道半径为 300 mm, 表面光洁度为 1.6  $\mu\text{m}$ , 相对速度为 2.5 m/min, 静承载时间分别为 0、2、4、8、16、24、48 h<sup>[1, 2]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 两种滑块的承载力

两种不同截面的滑块加载时的变形曲线如图 5 所示。由图 5 可知, A 为 TS-70D1 对不锈钢轨屈服点、B 为 TS-70D2 的屈服点, 载荷分别为  $P_{S1} = 328.4$  kN、 $P_{S2} = 263.6$  kN, 因此滑块承载力为  $q_1 = 82.1$  kN/cm,  $q_2 = 65.9$  kN/cm。可见, 圆柱截面滑块的极限承载力大于菱形截面滑块, 与有限元优

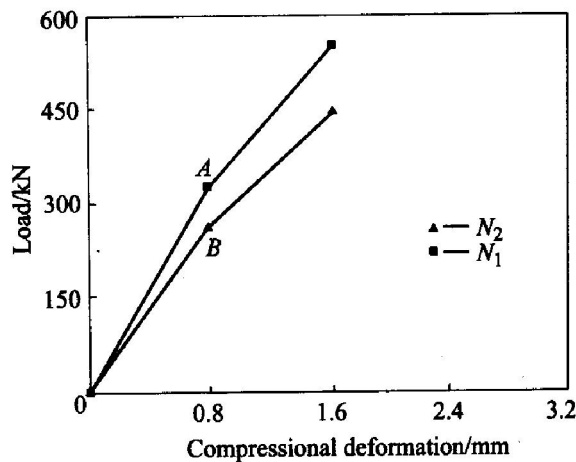


图5 两种滑块荷载与变形关系曲线

Fig. 5 Relationships between compressional deformation and load for TS-70D1 and TS-70D2

化结果是一致的。

### 3.2 两种滑块的静摩擦因数

两种不同截面滑块在干摩擦条件下的静摩擦因数与承载力的关系如图 6 所示。从图 6 可以看出: 在干摩擦条件下, 当滑块承载力为  $20 \text{ kN/cm}$  时, 两种不同截面的静摩擦因数都小于 0.090。当承载力为  $60 \text{ kN/cm}$  时, 静摩擦因数均小于 0.070, 其中 TS-70D1 的静摩擦因数为 0.065, TS-70D2 的静摩擦因数为 0.067。TS-70D1 滑块试件在承载力为  $70 \text{ kN/cm}$  下反复进行摩擦实验, 待实验完成后分析试件, 没有发现变形现象, 还能正常服役, 有足够的支承强度。

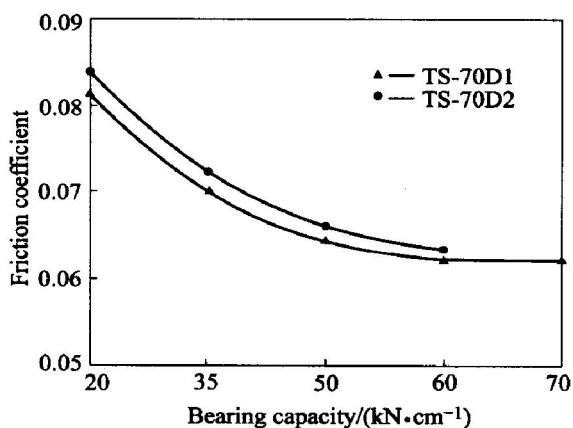


图 6 两种不同截面滑块承载力与摩擦因数关系

**Fig. 6** Relationships between friction coefficient and load carrying capacity for TS-70D1 and TS-70D2

总之, 两种不同截面的 TS-70D 滑块的摩擦系数都小于 0.1。但 TS-70D1 的承载力大, 在  $q = 70 \text{ kN/cm}$  仍能够正常使用, 是一种高强低摩性能的新型滑块。

### 3.3 两种滑块的时效摩擦因数

两种不同滑块摩擦的时间效应实验测试所得的静摩擦因数如图 7 所示。由图 7 可知, 在承载力为  $50 \text{ kN/cm}$ , 两种不同截面的滑块 TS-70D1 与 TS-70D2 的起始摩擦因数分别为 0.065 和 0.067; 它们的时效摩擦因数为分别为 0.078 和 0.080。由此可知, 两种滑块的摩擦时间效应比较接近。

两种不同截面的滑块的摩擦因数都小而且稳定, 摩擦过程与截面形状关系不大, 原因是摩擦过程与自润滑滑块中工作表面(见图 1、2)铜合金与 POM 材料之比例相关。这两种不同截面的滑块在

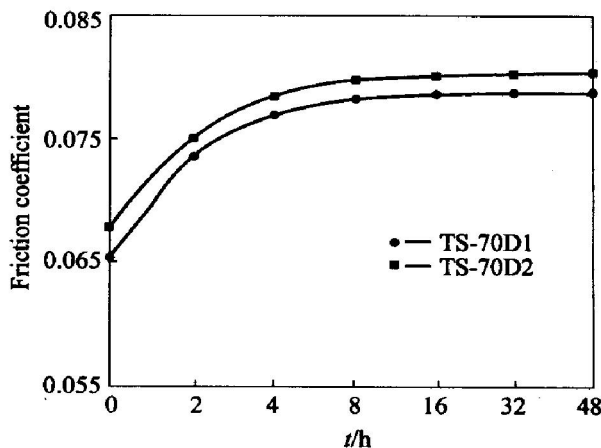


图 7 两种不同截面的滑块摩擦的时间效应

**Fig. 7** Friction time effects of TS-70D1 and TS-70D2

设计时, 其铜合金与 POM 材料之比是相同的。实验结果证实, 圆形截面与菱形截面的变化, 并没有影响到固体润滑剂的转移, 因此截面变化只对滑块极限承载力有影响, 而对摩擦过程无影响。

滑块材料安装在闸门上作为减摩构件, 而闸门是大坝的泄洪设备, 一般只在洪水季节开启, 大多数情况下一年不超过 5 次, 因此对滑块材料磨损量极少, 一般不进行磨损实验。

### 3.4 滑块的磨损分析

通过对摩擦实验后的自润滑滑块试件进行观察, 发现有少量犁沟, 其磨屑呈细粒状, 铜柱的磨损表面有一薄层自润滑转移膜, 磨损机制以磨粒磨损为主。可能是由于自润滑膜的存在, 抑制了铜/塑自润滑滑块中铜合金与不锈钢接触相对运动中的粘着磨损, 减小了摩擦过程的摩擦因数。

为深入研究 POM 自润滑材料的磨损机理, 用扫描电镜对磨损表面进行了分析。图 8 所示是自润

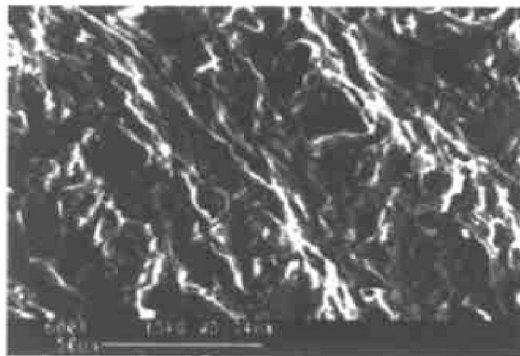


图 8 POM 自润滑材料磨损表面形貌

**Fig. 8** Morphology of wear surface of POM-based composites

滑材料磨损表面形貌。由图 8 可见, 填充  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的

聚甲醛复合材料有磨粒坑与犁沟, 磨损表面的犁沟与塑性变形都比较轻微, 填充料没有破坏聚甲醛的结构, 起到了增强的作用。因此充填  $\text{Al}_2\text{O}_3$  能在保持低摩擦因数的同时增加承载力、抑制聚甲醛塑料的蠕变、减少实际接触面积, 这就是滑块摩擦因数小而稳定的原因。

## REFERENCES

- [1] 向定汉, 陈胜宏. 高强低摩 TS-70D 型固体自润滑滑道的摩擦试验研究[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(3): 391 - 393.  
XIANG Ding-han, CHEN Sheng-hong. Experimental study on the solid self-lubricating slideway TS-70D with heavy Load and Low Friction[J]. Tribology, 2000, 20(3): 391 - 393.
- [2] 向定汉, 潘青林, 姚正军. 聚四氟乙烯自润滑编织复合材料关节轴承的摆动摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(1): 72 - 75.  
XIANG Ding-han, PAN Qing-lin, YAO Zheng-jun. Friction and wear behavior of PTFE fabric composite spherical bearing in swaying[J]. Tribology, 2003, 23(1): 72 - 75.
- [3] 李溪滨, 刘如铁, 杨慧敏. 铝铅石墨固体自润滑材料的性能[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 465 - 468.  
LI Xi-bin, LIU Rutie, YANG Huimin. Properties of solid self-lubricating Al-Pb-graphite composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 465 - 468.
- [4] Khedkar J, Negulescu I, Meletis E I. Sliding wear behavior of PTFE composites[J]. Wear, 2002, 252(5 - 6): 361 - 369.
- [5] LI Fei, HU Ke-ao, LI Jian-lin, et al. The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene [J]. Wear, 2001, 249(10 - 11): 877 - 882.
- [6] Tevrlitz T. Tribological behaviours of bronze-filled polytetrafluoroethylene dry journal bearings[J]. Wear, 1999, 230(1): 61 - 69.
- [7] LI Fei, YAN Feng-yuan. The tribological behaviors of copper-coated graphite filled PTFE composites[J]. Wear, 2000, 237: 33 - 38.
- [8] Schon J. Coefficient of friction composite delamination surfaces[J]. Wear, 2000, 237: 77 - 89.
- [9] Kang S C. The synthesis and friction properties of lubricant-impregnated cast nylon[J]. Wear, 2000, 239: 244 - 250.
- [10] El-Sayed A A, El-Sherbiny M G. Friction and wear properties of polymeric composite materials for bearing applications [J]. Wear, 1995, 184: 54 - 64.
- [11] JIA J H, ZHOU H D, GAO S Q, et al. A comparative investigation of the friction and wear behavior of polyimide composites under dry sliding and water-lubricated condition [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 356(1 - 2): 48 - 53.
- [12] de Baets P. Comparison of the wear behaviour of six bearing materials for a heavily loaded sliding system in seawater[J]. Wear, 1995, 180: 128 - 133.
- [13] Diao D F. Finite element analysis on local yield map and critical maximum contact pressure for yielding in hard coating with an interlayer under sliding contact[J]. Tribology International, 1999, 32: 25 - 32.
- [14] Zhao Jia-xin, Farshid S. A finite element analysis of surface pocket effects in Hertzian line contact [J]. J Tribology, 2000, 122: 47 - 54.
- [15] Stephens L S. Finite element analysis of the initial yielding behavior of a hard coating/substrate system with functionally graded interface under indentation and friction[J]. J Tribology, 2000, 122: 381 - 387.
- [16] Zhang S, Hodgson P D, Cardew-Hall M J, et al. A finite element simulation of micro-mechanical frictional behaviour in metal forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 134(1): 81 - 91.
- [17] Molinari J F. Finite element simulation of shaped charges [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2002, 38(10): 921 - 936.
- [18] Lee B H, Keum Y T, Wagoner R H. Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130 - 131(20): 60 - 63.

(编辑 何学锋)