

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基陶瓷拉丝模材料的摩擦磨损性能\*

杨学锋 邓建新 姚淑卿

(山东大学机械工程学院 济南 250061)

摘要: 采用热压法制备出三种 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料, 用于陶瓷拉丝模的制作。计算出拉丝模在拉拔加工中的应力分布, 指出拉丝模应力最大和磨损最严重的区域。陶瓷拉丝模的摩擦磨损特性是影响拉丝模工作寿命的主要原因, 因此在 MRH-3 高速环块磨损试验机上对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料摩擦磨损行为及其磨损机理作了试验研究。测试出 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料在不同转速和载荷下, 摩擦因数和磨损率的变化规律。通过扫描电镜观测其磨损区微观形貌, 分析其滑动摩擦的微观机理为机械磨损犁型、粘着和脆性微脱落。结果表明, 这三种 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷拉丝模材料具有较高抗弯强度和断裂韧度。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料的磨损机理主要是脆性脱落和犁型, 具有良好的耐磨性, 是制备拉丝模的优良材料。

关键词: 陶瓷复合材料 拉丝模 摩擦磨损 制备

中图分类号: TQ174.758

## 0 前言

在线材拉拔行业中, 拉丝模是各种金属线材生产厂家如电线电缆厂、钢丝厂、焊条焊丝厂等拉制线材的一种非常重要的易消耗性模具, 拉丝模的适用范围十分广泛, 主要用于拉拔棒材、线材、丝材和管材等直线型难加工物体, 适用于钢铁、铜、钨、钼等金属和合金材料。拉丝模的费用占拉丝费用的1/2以上。如何降低拉丝模成本, 提高其寿命是金属线材生产单位迫切需要解决的问题<sup>[1]</sup>。

从国外研究结果看, 陶瓷材料已广泛应用于模具领域, 在日本、美国、法国等国家已有多项专利。虽然现在陶瓷拉丝模在我国还没有得到广泛的应用, 但是随着制造技术的不断提高, 将会是适合拉丝工业的良好的拉丝模材料<sup>[2-3]</sup>。

进行复合陶瓷拉丝模材料的研制, 并针对拉丝模在拉丝过程的受力状态对复合陶瓷拉丝模材料进行了摩擦磨损试验研究。

## 1 拉丝模力学性能理论分析

拉丝模在拉拔加工中, 主要承受线材引起的工作区和定径区压力  $F_r$ , 摩擦产生的摩擦力  $F_f$ , 外围钢套过盈装配带来的径向压力  $p_1$  以及拉力  $F$  在拉拔线材时, 拉丝模钢套对拉丝模的作用力  $p_2$ <sup>[4-5]</sup>。其受力如图1所示。

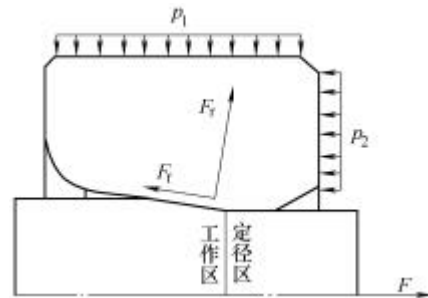


图1 拉丝模受力简图

拉丝模在拉拔线材时的受力情况是通过拉拔力的计算得出的, 拉拔力的计算公式如下

$$F = \frac{1+B}{B} \left( 1 - \frac{1}{R_a^B} \right) s_s S_a \quad (1)$$

式中  $B = \frac{m}{\tan a}$

$m$ ——线材与拉丝模之间的摩擦因数

$a$ ——工作锥半角

$R_a$ ——线材进出口的面积比

$s_s$ ——线材的屈服点

$S_a$ ——出口面积

图1中可以看出, 拉丝模上的正压力与棒材的正压力是相等的, 且方向相反, 为一对反作用力, 而且满足近似塑性变形条件

$$s_1 - s_2 = s_s \quad (2)$$

式中  $s_1$ ——轴向压力

$s_2$ ——径向压力

所以, 在拉丝模工作锥上的正压力为

$$s_n = \left( \frac{2B-1}{B} + \frac{B+1}{B} \frac{1}{R_x^B} \right) s_s \quad (3)$$

\* 国家自然科学基金(50475133)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0622)资助项目。20051027 收到初稿, 20051215 收到修改稿

式中  $R_x$ ——由入口到出口任意位置面积比

由式(3)可以看出, 拉丝模工作锥上的正应力由两部分组成, 第一部分为固定值, 第二部分与棒材的减面率有关。可以看出, 拉丝模工作锥在与棒材接触的开始位置, 应力值最大。这就是环状沟槽为什么总是发生在拉丝模与棒材接触开始点的原因<sup>[6-8]</sup>。

拉丝模定径区受力分析需要把塑性变形条件式(2)代入式(3), 可得拉丝模在定径区受到的正压力

$$s_n = s_s - s_x = \left[ \frac{1 - \frac{s_a}{s_s}}{\exp\left(\frac{4mx}{D_a}\right)} \right] s_s \quad (4)$$

式中  $s_a$ ——工作区出口位置线材的应力值  
 $x$ ——由入口到出口任意位置轴向坐标  
 $s_x$ ——位置  $x$  时的应力值  
 $D_a$ ——定径区直径

由式(3)可以看出, 定径区的正压力是随着定径区的增长而减小的。在定径区与工作区的交界处, 产生的正压力最大。

## 2 $Al_2O_3$ 基陶瓷复合材料的制备

采用氧化铝粉末为  $\alpha-Al_2O_3$ , 纯度大于 99.9%, 密度为  $3.99 \text{ g/cm}^3$ , 粉末平均粒径小于  $0.5 \mu\text{m}$ 。采用的(W, Ti)C, Ti(C, N), TiC 粉末纯度大于 99.8%, 粉末平均粒径小于  $0.8 \mu\text{m}$ 。采用热压烧结工艺制备三种不同配比的陶瓷复合材料试样, 烧结温度为  $1500 \sim 1800$  °C, 压力为 30 MPa, 保温  $10 \sim 30 \text{ min}$ , 采用氮气烧结气氛。

使用切片机将烧结后的陶瓷材料切割成  $3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 36 \text{ mm}$  的试样, 采用排水法测量试样的密度; 用维氏硬度计测量试样的硬度; 以三点弯曲法测量试样的抗弯强度, 跨距为 20 mm, 加载速率为  $0.2 \text{ mm/min}$ ; 用压痕法测量断裂韧性。从而得到三种陶瓷复合材料的烧结性能(表)。

表 三种  $Al_2O_3$  基复合陶瓷材料试样的力学性能

材料	断裂韧性 $K_{1C}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	抗弯强度 $S/\text{MPa}$	硬度 $HV/\text{GPa}$	密度 $r/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
$Al_2O_3/(W, Ti)C$	5.1	850	21.5	6.64
$Al_2O_3/Ti(C, N)$	4.9	880	21.0	6.60
$Al_2O_3/TiC$	4.4	900	20.0	4.96

## 3 $Al_2O_3$ 基复合陶瓷材料摩擦磨损试验

试验是在济南试验机厂制造的 MRH-3 高速环块磨损试验机上进行的。本试验机是环块式滑动摩

擦副, 以测定在选定的载荷、转速和环境条件下, 各种工程陶瓷材料的摩擦因数。本试验模拟拉丝模的工作环境, 主要测试材料的耐磨性和摩擦因数。

试块是三种复合陶瓷材料制成, 其规格为  $15 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ , 经过严格的磨削加工及研磨抛光处理。试环为硬度为  $45 \text{ HRC} \pm 3 \text{ HRC}$  的淬火 45 钢, 外圆直径为 50 mm, 内圆直径为 35 mm, 宽度为 13 mm。工况为干摩擦, 试验时试块通过夹紧机构固定不动, 试环以  $100 \sim 550 \text{ r/min}$  的速度运转, 载荷加在摩擦面的法线方向上。试验结构简图如图 2 所示。

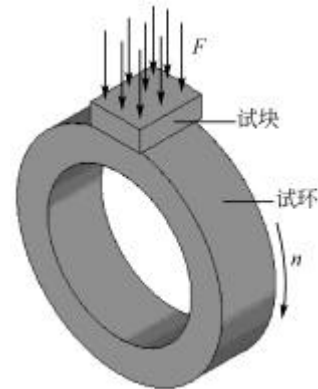


图 2 摩擦磨损试验结构简图

$Al_2O_3$  基陶瓷拉丝模材料的磨损情况是通过高精度电子天平进行称重, 用质量减少量来表征磨损量的大小, 并计算出磨损率。高精度电子天平的精确度为:  $0.00001 \text{ g}$ 。每次对磨时间为 30 min。其中磨损率按下式进行计算

$$\Delta W = \frac{\Delta w}{2\pi R t n m F r}$$

式中  $\Delta w$ ——试验过程磨损量(g)  
 $r$ ——试样的密度( $\text{g/cm}^3$ )  
 $R$ ——平均摩擦半径, 即试块中心与盘试样旋转轴中心的距离(m)  
 $t$ ——试验时间(min)  
 $n$ ——试样转速(r/min)  
 $m$ ——摩擦副平均摩擦因数  
 $F$ ——施加在试块上的法向力(N)

## 4 结果与讨论

### 4.1 $Al_2O_3$ 基陶瓷拉丝模材料的摩擦因数分析

图 3 为三种  $Al_2O_3$  基复合陶瓷材料的摩擦因数随着试环转速的增加而变化的关系曲线。可见, 在试验力为 150 N 时, 随着转速的提高,  $Al_2O_3$  基复合陶瓷材料的摩擦因数总体呈下降趋势。在低速下,  $Al_2O_3$  基复合陶瓷材料的摩擦因数比较大, 达到

0.6~0.7,在高速下 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料的摩擦因数降低,在0.4~0.5之间。分析可知,在低速下,试块与试环摩擦主要是以局部的微颗粒断续机械撞击为主,对于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料来说,并不适宜断续加工,脱落的细小晶粒在摩擦区阻碍了两者之间的相对运动,所以摩擦因数较大。而高速下,其转变为连续的机械摩擦力,摩擦区内 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料相对的强度增加,细小晶粒很少脱落,其摩擦因数相对较小。在高速下,三种 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料的摩擦因数的区别并不是很大,维持在0.4左右。

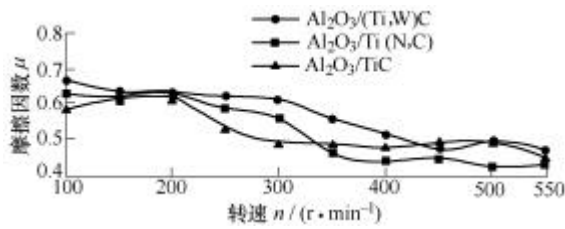


图3 三种 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料在不同转速下的摩擦因数

#### 4.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基陶瓷拉丝模材料的磨损量分析

陶瓷材料的耐磨性能与  $HV^{1/2} \cdot K_{IC}^{3/4}$  (其中 HV 为材料的维氏硬度,  $K_{IC}$  为第一类断裂韧度)成正比。经过测量及计算后,得到三种 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料在相同载荷不同转速下的磨损率曲线图如图4所示。可见,载荷为150 N时,随着转速的提高,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料的磨损率呈逐渐下降的趋势。这说明材料在高速下的滑动摩擦性较好,高速下的耐磨性要优于低速。其中,以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC 复合陶瓷材料磨损量最小, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti(C,N) 复合陶瓷材料最大, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(W,Ti)C 居中。在磨损量的测量中发现, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC 复合陶瓷材料的耐磨性最好。

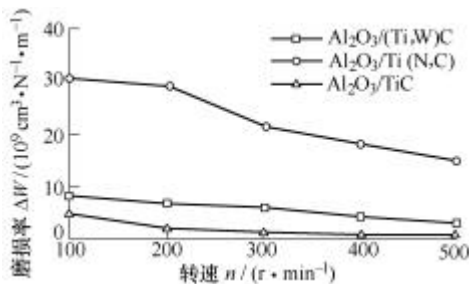


图4 三种 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料在相同载荷下随转速变化的磨损量

#### 4.3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基陶瓷拉丝模材料的摩擦磨损机理分析

图5为对三种 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料磨损形貌的 SEM 照片。对比分析可见,在磨损过表面某些部位发生了少量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>晶粒脱落现象。而残留在表面的硬质复合颗粒因为具有较高的硬度,对材料的耐磨性起到重要的作用。由图5a可见,在磨损表

面有明显的机械磨损犁型痕迹,表明在给定的试验条件下, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(W,Ti)C 复合陶瓷材料的磨损机理主要是脆性脱落和犁型。由图5b可见, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti(C,N) 复合陶瓷材料表面出现刮擦产生的脱漏现象。表面严重粗糙不平,磨损严重。其磨损机理主要是颗粒脱落。图5c是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC 复合陶瓷材料磨损区不同放大倍数下的微观结构。可以清晰地看到磨损区内形貌,可见磨损面凹凸不平,是脆性断裂的典型特征,清楚地看到机械磨损犁型痕迹。

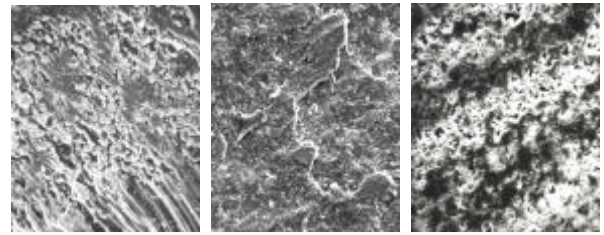


图5 三种 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料磨损面 SEM 照片对比 ×1000

图5 三种 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料磨损面

SEM 照片对比 ×1000

## 5 结论

在给定的试验条件下, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料与淬火45钢滑动摩擦时,其抗磨能力随转速的提高而明显提高,其摩擦因数有所降低,同时磨损量减少。

在压力载荷一定,改变转速的情形下, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料磨损量总体趋势逐渐减小。三种陶瓷材料中,以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC 复合陶瓷材料磨损量最小, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti(C,N) 复合陶瓷材料最大, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(W,Ti)C 居中。在磨损量的测量中发现, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC 复合陶瓷材料的耐磨性最好。 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC 复合陶瓷材料的主要磨损机理是机械磨损犁型、粘着和脆性微脱落。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基复合陶瓷材料具有良好的耐磨性,其强度也远远优于硬质合金,是制备拉丝模的良好材料。

## 参 考 文 献

- [1] 陈三平, 朱志云. 提高钨钼拉丝模使用寿命的探讨[J]. 中国钨业, 2003, 18(3): 24-27.
- [2] ZHANG Z, M, SHEN H S, SUN F H. Fabrication and application of chemical vapor deposition diamond-coated drawing dies[J]. Diamond and Related Materials, 2001, 10: 33-38.
- [3] 邓建新, 艾兴. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基陶瓷材料的摩擦磨损特性[J]. 材料研究学报, 1997, 11(3): 252-258.

- [4] 胡黄卿. 硬质合金拉丝模的几何形状与使用寿命的关系[J]. 硬质合金, 2000, 17(1): 39-42.
- [5] LO Sywei, LU Yuunghwa. Wire drawing dies with prescribed variations of strain rate[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123: 212-218.
- [6] 赵治业. 金属塑性加工力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
- [7] 贾成厂. 陶瓷材料导论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
- [8] WU C W, HSU R Q. Theoretical analysis of extrusion of rectangular, hexagonal and octagonal composite clad rods[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42: 473-486.

## FRICITION AND WEAR BEHAVIORS OF Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-BASED CERAMIC COMPOSITE USING AS WIRE DRAWING DIES

YANG Xuefeng DENG Jianxin YAO Shuqing  
(College of Mechanical Engineering, Shandong  
University, Jinan 250061)

**Abstract:** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based ceramic composite is produced using hot pressing sintering, it can be used to manufacture wire

drawing dies. Work out the stress distributing of wire drawing dies at drawing process and point out the maximum region and the most wear and tear region. The friction and wear behaviors of the composite are the mostly influenced with the wire drawing dies working life. Therefore friction and wear behaviors of the composite are studied at high speed wear and tear test machine. Test and work out the coefficient of friction and the wear rate of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based ceramic composite at the different rotate speed and the different load, point out the change trend of it. Observation the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based ceramic composite microcosmic shape used by scanning electronic microscopy micrographics, the wear mechanism of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based ceramic composite is furrow, adhere and brittleness break off. Results show that the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based ceramic composite has strong fracture toughness and wear resistance. The wear mechanism of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based ceramic composite are mostly brittleness break off and furrow, it has great capabilities in wear resistance, and it is a preferable materials for wire drawing dies.

**Key word:** Ceramic composite Wire drawing dies

Friction and wear Preparation

作者简介: 杨学锋, 男, 1977 年出生, 博士研究生。主要研究方向为高性能陶瓷材料在模具行业的应用及其摩擦磨损机理等。

E-mail: wshytzh@163.com