

文章编号: 1004-0609(1999)03-0562-05

# 陶瓷高速喷砂咀的研制<sup>①</sup>

袁国洲 黄汉泉

(中南工业大学粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

**摘 要:** 介绍了热压陶瓷高速喷砂咀的研制, 着重研究了在热压温度为1450~1550℃, 热压压力为10~40 MPa情况下材料的致密比, 以及密度由4.30 g/cm<sup>3</sup>增加到4.60 g/cm<sup>3</sup>时材料的硬度和强度的变化情况。结果发现, 随着温度的升高和压力的增大, 材料的密度有规律地增加; 随着密度的增加, 材料的硬度和强度增加。研制的陶瓷喷砂咀产品的性能如下: 密度4.50~4.60 g/cm<sup>3</sup>, 硬度HRA92~94, 抗弯强度700~900 MPa, 使用寿命1000 h以上。

**关键词:** 陶瓷; 热压; 喷砂咀

**中图分类号:** TF124.37

**文献标识码:** A

喷砂咀是喷砂机上的关键部件。高速喷砂是船舶、桥梁、水闸、铁道车辆和石油机械等的钢质件进行除锈涂漆、防腐保护的不可缺少的重要工序。喷砂咀是在高压高速冲刷的恶劣条件下工作, 喷砂气流的速度可达700 m/s, 喷砂咀易磨损, 消耗大, 故对喷砂咀材料提出了苛刻的要求。过去, 我国一直从美国和日本进口, 价格昂贵。因此, 研究高速喷砂咀, 实现国产化, 不但可以满足国内需求, 节省大量外汇, 而且还能制造喷砂机出口(以前由于高速喷砂咀没有过关, 故没有生产喷砂机), 填补我国不能生产高速喷砂咀的空白。

## 1 方案选择

众所周知, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷具有耐磨性好、硬度高及优良的化学稳定性, 1100℃以下基本不变<sup>[1]</sup>, 且价格低廉, 但韧性差, 强度低。含有TiC的陶瓷具有耐磨、耐腐蚀、耐氧化等一系列优点<sup>[2]</sup>。在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>中加入足够的TiC后, 陶瓷的强度 $\sigma_{bb}$ 可达到700~900 MPa, 硬度HRA92~94<sup>[3,4]</sup>。在加入TiC的同时, 再加入

Ni和Cr, Mo, W六副族元素中的一种或几种, 通过热压的方法, 强度 $\sigma_{bb}$ 可提高到1200~1600 MPa, 硬度1800~2000 HV30, 使Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷的性能得到了极大的改善<sup>[5,6]</sup>。在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC复合陶瓷中加入Ni和Mo虽能提高陶瓷材料本身的强度, 但粘结相本身的硬度不高, 仅为462 HV30, 有损整个材料的耐磨性<sup>[7]</sup>。Cr熔点高, 耐磨性和抗氧化性好<sup>[8]</sup>; 在TiC基金属陶瓷中加入一定量的Cr, 强度和硬度都有所提高。W熔点最高, 硬度大, 耐磨性好。考虑到高速喷砂咀的耐磨性、抗冲刷和抗腐蚀性, 本研究的方案是以Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为基, 加入足够的TiC和适量的Cr, W, Ni金属, 采用热压的方法进行研制。

## 2 实验

### 2.1 实验用原材料及喷砂咀材料配制成分

实验材料要求和喷砂咀配制成分见表1。

### 2.2 实验方法

(1) 根据表1的配制成分和配料总重称取各种粉末装入球磨筒或球磨机内湿磨24 h。湿

① 收稿日期: 1998-11-30; 修回日期: 1999-03-02

袁国洲(1945-), 男, 副教授

表 1 陶瓷喷砂咀原材料要求及配制成分

**Table 1** Raw material requirements and preparatory compositions of ceramic spray nozzle( Mass fraction, % )

| Component                      | Purity/ % | Size/ μm | Quantity/ % |
|--------------------------------|-----------|----------|-------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ≥99.5     | ≤3.5     | 40~ 60      |
| TiC                            | ≥99.5     | ≤3.0     | 30~ 40      |
| W                              | ≥99.0     | ≤5.0     | 5~ 8        |
| Cr                             | ≥99.0     | ≤5.0     | 5~ 8        |
| Ni                             | ≥99.0     | ≤5.0     | ≤1          |
| Others                         |           |          | 5           |

磨介质为无水酒精, 球料比 6: 1。

(2) 湿磨完毕, 取出硬质合金球后干燥, 并粉碎成粉末。

(3) 粉碎后的粉末装入石墨模中, 送入热压机中进行热压。保温温度 1 450~ 1 550 ℃, 热压压力 10~ 40 MPa, 保温时间 8~ 20 min。

(4) 热压完毕, 冷却到 1 000 ℃取出石墨模放入石墨粉中缓冷至室温, 然后脱模出样品。

(5) 对样品进行密度、硬度和抗弯强度的测定以及金相分析。

3 实验结果及分析

3.1 热压的致密化机理

热压是压制和烧结同时进行的过程, 热压法可以制取密度高、晶粒细的产品。这种方法对一些不易压制和烧结的氧化物和难熔金属及其碳化物、硼化物等材料来说, 应用非常广泛。由于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC 基复合陶瓷硬度极高(HRA92~ 94), 耐磨性极好, 但烧结性能差, 无压烧结不能致密, 必须采用热压的方法才能实现。

热压的致密化过程通过 3 个阶段来实现<sup>[9]</sup>。早期阶段, 粉末颗粒的位移和重新排列, 致密化速率较大。中期阶段, 当热压压力超过该热压温度下的材料屈服极限时, 则产生塑性流动, 此时, 致密化速率减慢。晚期阶段, 材料接近终极密度时, 塑性流动基本消失, 依靠扩散、蠕变的作用达到最终密度或理论密

度。

按照文献[ 10] 的热压规律, 热压时孔隙的变化如下式所示:

$$l_n \frac{\theta_0}{\theta} = \frac{3pt}{4\eta} \tag{1}$$

式中  $\theta_0$ —试样热压前的孔隙度,  $\theta$ —试样热压后的孔隙度,  $p$ —热压压力,  $t$ —热压保温时间,  $\eta$ —材料的粘度系数。

由式(1) 很易看出, 材料中的孔隙度随热压的压力、温度和保温时间的增加而降低, 即密度提高, 因为提高温度即意味着降低  $\eta$ 。

3.2 热压压力对材料密度的影响

热压压力对密度的影响如图 1 所示。由图 1 可知, 当温度一定时, 随着压力的增加, 材料的密度有规律地增加。图中开始的近似直线部分, 可认为是致密化的早期阶段, 材料的密度增加很快; 斜率逐渐变小的曲线部分, 可视为以塑性流动为主的致密化中期阶段, 材料的密度增加缓慢; 斜率逐渐趋向零的曲线部分可视为致密化的晚期阶段。要使材料的密度接近或达到理论密度, 塑性流动和扩散蠕变起着主要的作用。如前所述, 当热压压力超过该温度下粉末颗粒的屈服极限时, 粉末颗粒就会产生塑性变形, 使孔隙缩小。变形速率与外加切应力的关系如下式<sup>⑨</sup>所示:

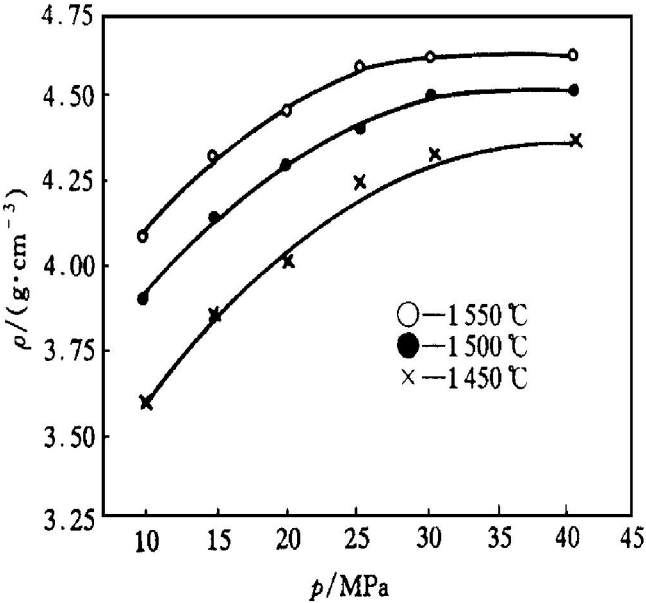


图 1 热压压力、温度与密度的关系

**Fig. 1** Hot pressing pressure, temperature vs. density

$$\tau = \eta \dot{\epsilon} + \tau_c \quad (2)$$

式中  $\tau$ —外加的切应力,  $\tau_c$ —材料的屈服极限,  $\dot{\epsilon}$ —变形速率,  $\eta$ —材料的粘度系数。

由式(2)可以看出, 当外加的切应力超过屈服极限时就会产生塑性变形, 而且, 与变形速率成正比。当外加应力增加时, 切应力增加, 变形速率增加, 意味着含有孔隙的材料密度将会进一步增加。

### 3.3 热压温度对材料密度的影响

由图1还可以看出, 当热压压力一定时, 材料的密度随热压温度的提高而增加。大家知道, 随着温度的提高, 材料的屈服极限变小,  $\eta$ 下降。根据式(2), 变形速率增加, 材料的密度就会进一步提高。另一方面, 从物质分子的热运动看, 温度提高时, 原子或分子的振幅也会相应提高, 有部分的原子或分子的振幅会大到不能维持原来的状态, 导致固体性质降低而流体性质增加。在压力的作用下, 不但会产生塑性变形, 而且也会产生粘性流动, 结果使含有孔隙的材料密度进一步增加。

### 3.4 密度对材料硬度和强度的影响

硬度和强度是衡量陶瓷喷砂咀的重要指标, 直接影响到喷砂咀的耐磨性和抗冲刷能力。图2为喷砂咀材料的硬度和抗弯强度与密度的关系曲线。由图可见, 材料的硬度和强度随着密度的增加而增加。强度  $\sigma_{bb}$  与孔隙度的关系如下式<sup>[11]</sup>所示:

$$\sigma_{bb} = \sigma_{bbo} \exp(-b\theta) \quad (3)$$

式中  $\sigma_{bb}$ —含有孔隙材料的抗弯强度,  $\sigma_{bbo}$ —相应致密材料的抗弯强度,  $b$ —与材料性能有关的常数,  $\theta$ —材料的孔隙度。

由实验可知, 当材料密度达到  $4.6 \text{ g/cm}^3$  时, 强度  $\sigma_{bb}$  可达  $900 \text{ MPa}$ , 这时, 材料的孔隙度为零; 而  $\rho = 4.5 \text{ g/cm}^3$ ,  $\sigma_{bb} = 700 \text{ MPa}$  (见图2), 可计算出  $\theta = 0.0217$ , 根据上述数据, 则可计算出  $b = 12$ 。于是式(3)可改写如下:

$$\sigma_{bb} = 900 \exp(-12\theta) \quad (4)$$

### 3.5 热压过程中各组元的交互作用

热压过程中,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiC}$  通过粘结剂  $\text{W}$  和  $\text{Cr}$  的作用, 形成高硬度的复合陶瓷,  $\text{W}$  和

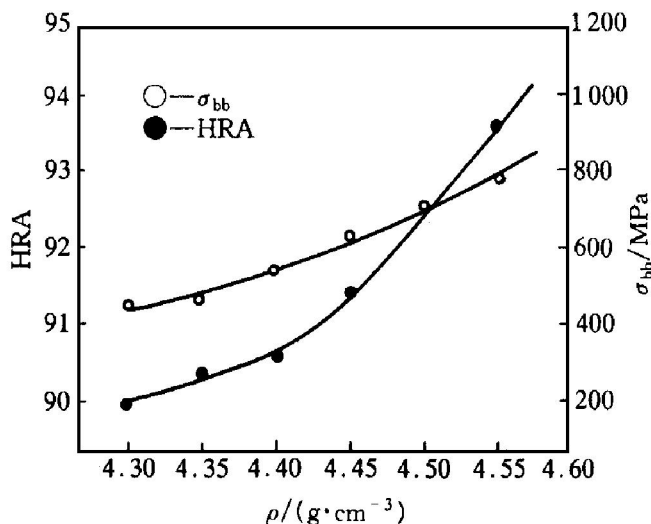


图2 硬度、抗弯强度与密度的关系

Fig. 2 Hardness, bending strength vs. density

$\text{Cr}$  形成固溶体,  $\text{Ni}$  活化粘结相的烧结, 降低热压温度。另一方面,  $\text{W}$  和  $\text{TiC}$  能形成固溶体,  $\text{Cr}$  对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  有很好的润湿性。此外,  $\text{Cr}$  在湿磨及干燥过程中表面会生成氧化物薄膜,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  薄膜与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  能形成固溶体。在热压过程中, 由于原子或分子处于热活性状态, 促使各组元进行交互作用, 这样, 有利于热压的进行和材料的致密化。基于  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  复合陶瓷的特性, 因而可制取高硬度(HRA92~94)、高耐磨性、抗冲刷、抗腐蚀并具有足够强度的喷砂咀理想材料。

## 4 陶瓷喷砂咀的性能和使用效果

热压陶瓷喷砂咀的性能指标如下:

密度  $4.5 \sim 4.6 \text{ g/cm}^3$ , 硬度 HRA92~94, 抗弯强度  $700 \sim 900 \text{ MPa}$ , 晶粒平均尺寸  $\leq 3 \mu\text{m}$ 。

陶瓷喷砂咀的结构如图3所示。喷砂咀由套管和芯管两部分组成。套管为钢质件, 以保护芯管。芯管为本研究的  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  基复合陶瓷, 其尺寸主要由石墨模具控制。芯管压入套管后, 研磨工作面。芯管分为收缩管、扩张管和引射管三部分。在扩张管和引射管之间开有增气孔。工作过程为压缩空气和磨料经喷砂胶管输入喷砂咀入口处, 流经收缩管并在其最小

断面处达到音速; 然后进入扩张管, 在流经增气孔时, 又有另外的气流从增气孔补充进来, 促使气流在引射管继续加速, 从而, 在喷砂咀的出口处获得 700m/s 的超音速气流冲击钢板表面, 达到迅速去除锈斑和污物的目的。

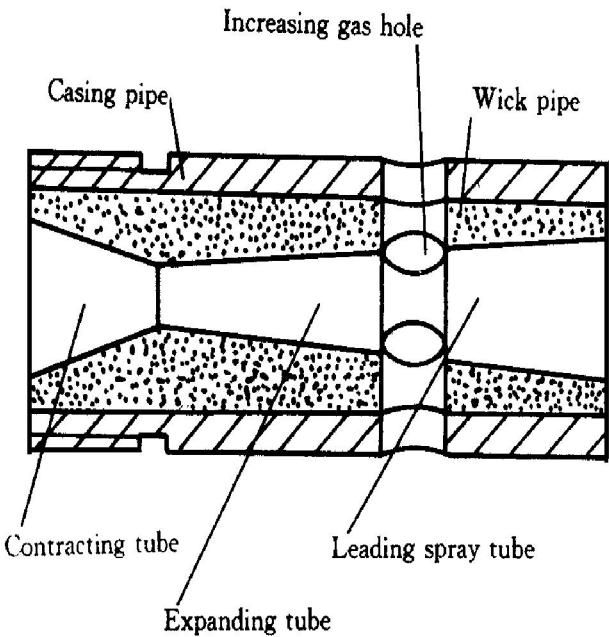


图 3 陶瓷高速喷砂咀结构示意图

Fig. 3 Structure scheme of high-speed ceramic spray nozzle

热压陶瓷高速喷砂咀经过试验和使用, 其使用寿命、除锈效率列入表 2。为了比较, 将日本进口高速喷砂咀的性能和使用效果也列入其中。通过表 2, 可以看出, 国产陶瓷喷砂咀使用寿命达 1000h 以上, 比日本进口的硬质合金喷砂咀明显高得多。

5 结论

(1) 热压 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC 基复合陶瓷高速喷砂咀材料的性能如下: 密度 4.5~ 4.6 g/cm<sup>3</sup>, 硬度 HRA92~ 94, 抗弯强度 700~ 900 MPa, 晶粒平均尺寸 ≤3 μm, 使用寿命 1000h 以上, 远高于日本进口的硬质合金喷砂咀。

(2) 陶瓷喷砂咀材料的抗弯强度与孔隙度的关系式为  $\sigma_{bb}=900\exp(-12\theta)$ , MPa。

表 2 国产、日本进口喷砂咀(芯管)的性能和使用效果

Table 2 Properties and service life of spray nozzle(wick pipe) made in China and Japan

| Place of production | Material        | Service life/h | Efficiency of rust/m <sup>2</sup> h <sup>-1</sup> | Hardness (HRA) | m/kg |
|---------------------|-----------------|----------------|---------------------------------------------------|----------------|------|
| Japan               | Hard alloy      | ≥400           | 30                                                | 89~ 91         | 2.0  |
| China               | Compound cermet | ≥1 000         | 30                                                | 92~ 94         | 1.5  |

Note: Working conditor,scouring speed 700 m/s of mixture gas flow.

REFERENCES

1 Editor Group of Foreign Hard Alloy( 国外硬质合金编写组) ed. Foreign Hard Alloy( 国外硬质合金). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1976: 467.

2 Liu Ning( 刘宁), Xu Genying( 徐根应), Xu Yudong( 许育东) *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals( 中国有色金属学报), 1997, 7(4): 136.

3 Yokohama K *et al.* Special Steel, 1974, (12): 22.

4 Rin L( 林二郎) *et al.* Material Processing( in Japanese), 1974, (1): 49.

5 Kieffev R. PMI, 1975, (2): 62.

6 Sakal T. J Amer Ceram Soc, 1981, 64(3): 135.

7 Niskigaki K *et al.* Powder and Powder Metallurgy( in Japanese), 1986, 27(4): 133.

8 Tang Zhaolin( 唐兆麟) and Wang Fuhui( 王福会). The Chinese Journal of Nonferrous Metals( 中国有色金属学报), 1998, 8(2): 245.

9 Huang Peiyun( 黄培云) ed. Principle of Powder Metallurgy( 粉末冶金原理). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982: 334~ 340.

10 MurrGay P, Rodgers E and Williams A. Trans Brit Cer Soc, 1954, 53(8): 474.

11 ПОМАНОВА Н И. Nonferrous Metals, ( in Russian), 1975, (8): 75~ 77.

# Investigation and manufacture of high-speed ceramic spray nozzle

Yuan Guozhou, Huang Hanquan

*State Key Laboratory for Powder Metallurgy,  
Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China*

**Abstract:** To deal with the high-speed ceramic spray nozzle made by thermo pressing process, the densification of the nozzle material under the condition of 1 450~ 1 550 °C and 10~ 40 MPa pressure, and the hardness and strength of the material with 4.30~ 4.60 g/cm<sup>3</sup> density were investigated. The results show that the density of the material increases with the increase in thermo pressing temperature and pressure, and the hardness and strength of the material increase with the increase in the density. The characteristics of the nozzle are as follows: density 4.50~ 4.60 g/m<sup>3</sup>, hardness HRA92 – 94, bending strength 700~ 900 MPa, and lifetime  $\geq 1\,000$  h.

**Key words:** ceramics; thermo pressing; spraying; nozzles

(编辑 朱忠国)