

对称型叠层陶瓷喷嘴的结构设计及其冲蚀磨损行为研究

员冬玲, 邓建新, 段振兴

(山东大学 机械工程学院, 济南 250061)

摘要: 为提高陶瓷喷嘴抗冲蚀磨损能力, 缓解喷嘴入口、出口的高应力状态, 采用热压烧结工艺制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3 + (\text{W}, \text{Ti})\text{C}/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ 三层对称型叠层陶瓷材料及叠层陶瓷喷嘴. 研究表明: 叠层陶瓷材料表层较之相应单一材料而言, 具有更高的硬度和断裂韧性; 在相同的冲蚀磨损条件下, 叠层陶瓷喷嘴的抗冲蚀磨损性能较非叠层陶瓷喷嘴有显著的提高; 试验分析叠层陶瓷喷嘴的最佳层厚比为 2. 此外, 采用有限元法对叠层陶瓷喷嘴在制备过程中的残余应力进行了理论计算, 给出了叠层陶瓷喷嘴中残余应力与层厚比的关系. 研究表明, 残余压应力的存在, 细化了晶粒, 提高了叠层材料表层的硬度和断裂韧性, 是叠层陶瓷喷嘴其抗冲蚀磨损能力提高的原因. 理论分析最佳层厚比也为 2, 理论分析与试验结果相互印证.

关键词: 叠层陶瓷喷嘴; 残余应力; 冲蚀磨损性能; 有限元法

中图分类号: TQ174; TH117

文献标识码: A

Structural Design of Symmetric Laminated Ceramic Nozzle and Study on it's Erosion Behavior

YUN Dong-Ling, DENG Jian-Xin, DUAN Zhen-Xing

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: $\text{Al}_2\text{O}_3 + (\text{W}, \text{Ti})\text{C}/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ symmetric laminated ceramic materials and nozzles were produced by hot pressing in order to reduce the tensile stress at the entry and the exit region of nozzles and improve their erosion wear resistance. The test results show that both hardness and toughness of laminated ceramic materials are improved than the simple materials. Under same erosion conditions, the laminated ceramic nozzles have superior erosion wear resistance to that of the common ceramic nozzle; the experimental value of optimal layer thickness ratio is 2. In addition, the residual thermal stress generated in the preparation of laminated ceramic materials is analyzed by finite element method (FEM). Relationship between stress distribution and layer thickness ratio is obtained. It is suggested that the residual thermal stress lead to grain refining mechanical properties strengthening, and improve the erosion wear resistance of laminated ceramic nozzles improving. The theoretical value of optimal layer thickness ratio is 2, the experimental results are consistent with the theoretical prediction.

Key words: laminated ceramic nozzle; residual stress; erosion wear behavior; finite element method

喷砂可以进行表面清洁、表面涂覆前预处理、表面改性和表面强化、表面光饰加工、喷涂剂和喷射加工等工作^[1], 喷砂处理广泛应用于机械、石油、化工、冶金和煤炭等行业. 而喷砂嘴是喷砂机械设备上的关键部件之一, 也是主要的易磨损部件^[2,3]. 制造喷砂嘴的材料主要有: 铸铁、钢、硬质合金和陶瓷. 其中陶瓷喷砂嘴的抗磨性能最好^[4,6]. 喷砂嘴内表面材料同高

速气流所携带的磨料之间相互作用时, 其表面材料所发生的冲蚀磨损是喷砂嘴的主要失效形式. 研究表明^[7-10] 陶瓷喷砂嘴入口处的冲蚀磨损最为严重, 主要是因为喷嘴入口处冲射角较大, 磨料几乎垂直冲蚀喷嘴入口, 导致喷嘴入口处所受的应力最大, 出口处应力次之, 中间部分所受应力略小, 喷嘴的冲蚀磨损率随喷嘴材料硬度的提高而降低^[4,6,7]. 与传统上消除缺

收稿日期: 2008-05-19, 收到修改稿日期: 2008-07-02

基金项目: 国家自然科学基金 (50675120), 山东省科技攻关项目 (2006GG2204017)

作者简介: 员冬玲 (1975 -), 女, 博士研究生. E-mail: yundongling@hotmail.com

通讯联系人: 邓建新, 教授. E-mail: jxdeng@sdu.edu.cn

陷提高机械性能的方法本质不同,叠层陶瓷材料的强韧化机制是一种能量耗散机制,是利用不同层之间热膨胀系数、收缩率的不匹配或者某层中相变使表面层产生合适的压应力.因为压缩区的应力区围绕裂纹尖端,抑制裂纹的产生和扩展,所以表面层如有压应力,它的断裂/疲劳阻抗就会明显的提高,临近裂纹长度减小,导致强度、韧性提高,表面微硬度也有一定的提高^[11, 12].叠层材料成为当前国际上陶瓷增韧技术研究的热点^[11-18].本工作将叠层材料的设计与喷嘴冲蚀磨损的特点及机理进行有效地结合,研究制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3 + (\text{W}, \text{Ti})\text{C}/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ 叠层陶瓷喷嘴,目的是将残余应力引入喷嘴的入口、出口,用以部分抵消入口、出口的高应力状态,从而达到提高其抗冲蚀磨损的能力.

1 实验部分

1.1 陶瓷喷嘴的制备

试验用原料 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为工业用高纯氧化铝,由山东淄博铝厂提供,密度为 $3.98\text{g}/\text{cm}^3$,纯度大于 99.9%,颗粒直径为 $1\sim2\mu\text{m}$; $(\text{W}, \text{Ti})\text{C}$ 固溶体、TiC 粉末均由株洲硬质合金厂提供,平均粒径为 $1\sim2\mu\text{m}$.将原料经过称量配料、强化球磨、真空干燥、过筛后制得试验用材料 $\text{Al}_2\text{O}_3 + 45\text{vol}\% (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$ (以下简称 AWT) 和 $\text{Al}_2\text{O}_3 + 55\text{vol}\% \text{TiC}$ (以下简称 AT).将上述两种材料按预定的质量依次倒入石墨模具中,均匀摊平,为使界面较平整,在每倒入一次料时,施加一定的压力,再倒入另一种原料.如此交替,预压成型后,在 1700°C 、 30MPa 压力、保温时间为 $10\sim20\text{min}$ 、高纯氮气气氛保护下热压烧结.制成表层为 AWT (单层厚度为 t_1),中间层为 AT (厚度为 t_2) 的三层对称型叠层陶瓷材料和非叠层 AWT 陶瓷材料,三层对称型叠层陶瓷喷嘴 (简称 LN) 以及用于对比试验的 AWT 非叠层陶瓷喷嘴 (简称 CN).制得的各陶瓷喷嘴如表 1 所示,喷嘴的尺寸为内径 8mm ,外径 20mm ,长 30mm .

表 1 陶瓷喷嘴编号	
Table 1 Serial number of ceramic nozzles	
Serial number	The layer thickness ratio
CN	Simple
LN0.1	Layer thickness ratio $t_1/t_2 = 0.1$
LN0.2	Layer thickness ratio $t_1/t_2 = 0.2$
LN0.5	Layer thickness ratio $t_1/t_2 = 0.5$
LN1	Layer thickness ratio $t_1/t_2 = 1$
LN2	Layer thickness ratio $t_1/t_2 = 2$
LN5	Layer thickness ratio $t_1/t_2 = 5$

1.2 喷砂试验

喷砂实验采用北京长空喷砂设备有限公司生产的 GS-6 型吸入式喷砂机,空气压力固定为 0.4MPa ,气流喷射时在喷嘴入口处形成负压,从而把磨粒吸入,气流携带磨粒通过喷嘴,造成喷嘴的磨损.实验用磨料为第四砂轮厂生产的白刚玉 (Al_2O_3) 磨料,粒度为 80 目.冲蚀后喷嘴用无水乙醇超声清洗 0.5h 后吹干,用精度为 0.1mg 的分析电子天平对冲蚀前后喷嘴的质量损失的称量来确定磨损率 (W),循环试验 30min 后测量 1 次出砂量,磨损率定义为单位质量冲蚀磨料所对应的喷嘴体积损失量,即: $W = m_1/(d \cdot m_2)$,式中: m_1 为喷嘴的质量损失, d 为喷嘴材料的密度, m_2 为磨料的质量损失.采用扫描电子显微镜 (SEM) 观察、分析陶瓷喷嘴冲蚀表面形貌.

2 对称型叠层陶瓷喷嘴的残余应力分析

叠层陶瓷喷嘴的有限元计算模型如图 1 所示 (单位 mm ,以 LN0.2 为例),其中上下表面层厚度相同,根据问题的轴对称性,以喷嘴中心轴与底面的交点为原点,建立坐标系统,分析时取纵断面的 $1/2$ 划分四边形网格,网格划分为 1155 个单元,1248 个节点.叠层材料烧结温度为 $1500\sim1750^\circ\text{C}$,在 $1240\sim1500^\circ\text{C}$ 附近出现较大的应力松弛,因此取 1240°C 为应力松弛温度,室温为 20°C ,故 $\Delta T = -1220^\circ\text{C}$,喷嘴不受其他任何约束,自由收缩.假设几种材料的物性参数均

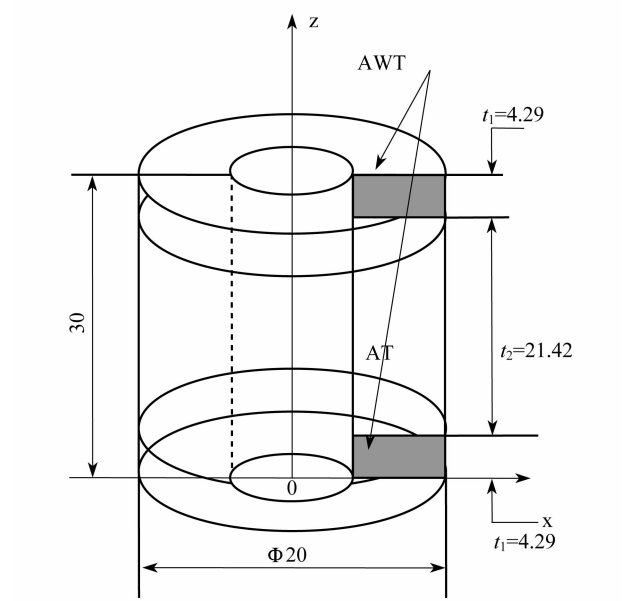


图 1 对称型叠层陶瓷喷嘴残余热应力分析有限元模型 (层厚比 $t_1/t_2 = 0.2$)
Fig. 1 Finite element modeling of symmetric laminated ceramic nozzle (layer thickness ratio $t_1/t_2 = 0.2$)

表 2 叠层陶瓷材料的物理力学性能参数

Table 2 Physical and mechanics properties of the laminated ceramic materials

Material	Density ρ / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Thermal expansion coefficient $\alpha \times 10^{-6} / \text{K}^{-1}$	Elastic modulus E / GPa	Poisson's ratio ν
AWT	6.50	7.251	448.9	0.232
AT	4.73	8.042	413.5	0.226

与温度无关且各向同性;制备过程中和冷却后几种材料最终能达到统一的温度;冷却过程中试样处于弹性状态无塑性变形;各层之间界面结合良好,层分布均匀、平整.所用的材料 AWT 与 AT 的物理热学性能如表 2 所示.

3 结果与讨论

3.1 力学性能测试

将制得的叠层陶瓷材料,经切割、粗磨、细磨、抛光、清洁与干燥处理,注意保持两面平行,将边缘切割掉,制成 $7\text{mm} \times 4\text{mm} \times 22\text{mm}$ 的长条.然后用维氏硬度仪测试样的压痕及裂纹长度,分别计算硬度 HV 、断裂韧性 K_{IC} .表 3 为 AWT 单体材料与不同层厚比的叠层陶瓷材料表面层的硬度、断裂韧性对比.从表 3 可以看出随着层厚比的减小,叠层陶瓷材料表面的硬度值在增大,但是增大的幅度不是很大,层厚比 t_1/t_2 为 0.1 的叠层材料表面的硬度为 22.184GPa.叠层材料表面的断裂韧性值也是随着层厚比的减小而增大,层厚比 t_1/t_2 为 0.1 的叠层材料表面的断裂韧性值为 $10.6\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,较单体 AWT 材料提高了一倍多,叠层陶瓷材料的表面层断裂韧性值有大幅度的提高.

3.2 有限元分析的残余应力分布

图 2 为三层叠层陶瓷喷嘴 LN0.2 的径向 σ_r (A)、

表 3 单体 AWT、AT 材料与不同的厚度比叠层陶瓷材料表面层的机械性能

Table 3 Mmechanical characterization of simple AWT,AT and laminated ceramic materials with different thickness ratio of the layers

Thickness ratio t_1/t_2	Hardness HV/ GPa	Fracture toughness, $K_{IC}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
5.0	20.242	5.86
2.0	20.567	6.39
1.0	20.860	7.35
0.5	21.070	8.35
0.2	21.507	9.80
0.1	22.184	10.60
AWT	19.943	4.82
AT	18.278	4.93

轴向 σ_z (B)、周向 σ_θ (C) 残余应力分布图.从图 2 可以看出,径向、轴向、周向残余应力均是在两种材料的边界处波动较大,各应力的最大拉应力、压应力都是分布在边界处.

图 3 是不同的层厚比的三层叠层陶瓷喷嘴的径向 σ_r (A)、轴向 σ_z (B)、周向 σ_θ (C) 残余应力在喷嘴内孔表面沿喷嘴轴向(Z 方向)的分布曲线.因为是对成型的叠层陶瓷喷嘴,因此残余应力的分布也是对称的,图为喷嘴一半的残余应力分布曲线.从图(A)可以看出,叠层喷嘴在整个内孔表面分布比较均匀,而且数值很小,波动很小.从图(B)可以看出、轴向残余应力在叠层陶瓷喷嘴两种材料分界处波动比较大,层厚比(t_1/t_2)越小,表层越薄,波动的位置越靠近出口(或入口)(波峰过一点即为表层的厚度),压应力的范围也小,比较来看层厚比为 1、2、5 的叠层陶

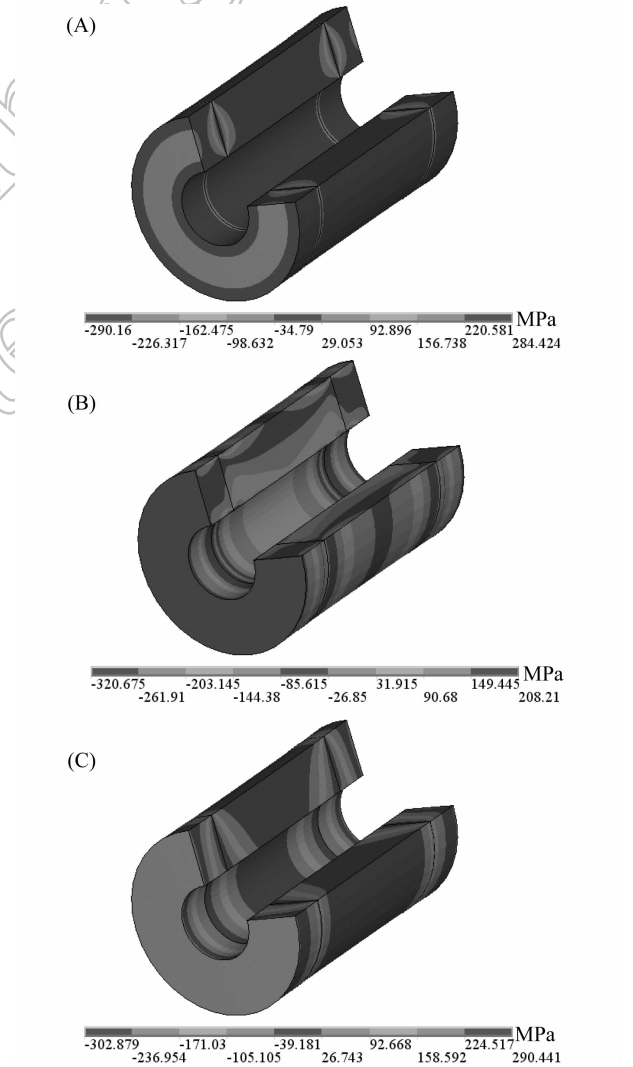


图 2 叠层陶瓷喷嘴 LN0.2 的径向 σ_r (A)、轴向 σ_z (B)、周向 σ_θ (C) 残余应力分布图

Fig.2 Distribution of radial (σ_r), axial (σ_z), and circumferential (σ_θ) residual stresses in laminated nozzle LN0.2

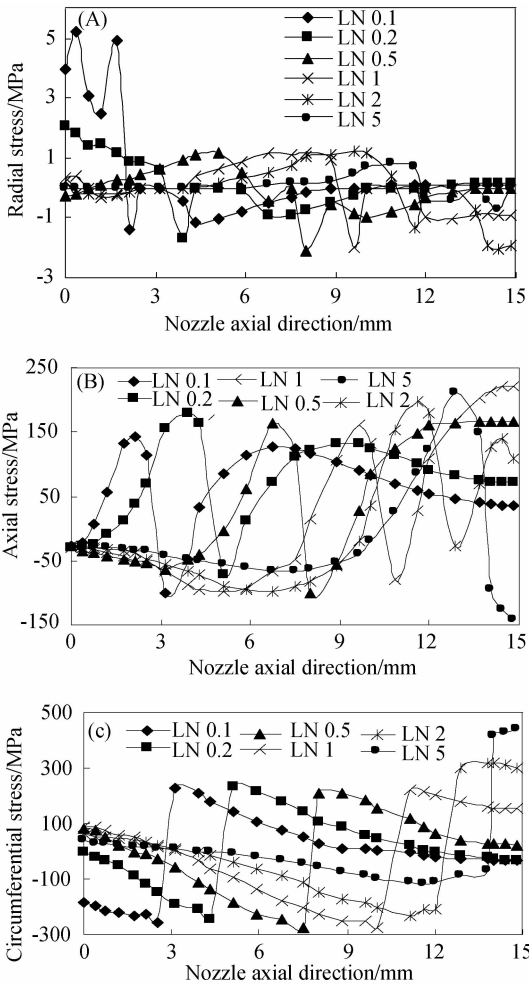


图3 叠层陶瓷喷嘴内孔轴向上的径向 σ_r (a)、轴向 σ_z (b)、周向 σ_θ (c)残余应力与层厚比的关系
Fig. 3 Variation of radial (σ_r), axial (σ_z), and circumferential (σ_θ) residual stresses of laminated nozzles with different layer thickness ratio at inner-hole surface along the axial direction

瓷喷嘴 LN1、LN2、LN5 的残余压应力范围大些,压应力数值相对也大些.从图(C)可以看出周向残余应力在叠层陶瓷喷嘴两种材料分界处波动非常大,由表层的压应力变为内层的拉应力,层厚比(t_1/t_2)越小,表层越薄,波动的位置越靠近出口(或入口)(应力值由压应力变为拉应力的位置即为分界处),相对来说层厚比越小,出口(或入口)处压应力越大,特别是 LN0.1 叠层陶瓷喷嘴出口(或入口)处最大压应力达到 -184.25MPa,但是表层的厚度只有 2.5mm.相对来说,层厚比为 0.5、1、2 的叠层喷嘴 LN0.5、LN1、LN2 的残余应力分布范围大些,压应力数值相对也大些.

3.3 叠层陶瓷喷嘴的冲蚀磨损特性

在相同实验条件下测得叠层及非叠层陶瓷喷嘴的重量损失如图 4 所示,各种喷嘴的重量损失均随冲蚀时间的延长而增加,但是,不同层厚比的叠层喷嘴随时间变化的总量损失又有很大的差别.比较来看,随着冲蚀时间的增加,叠层陶瓷喷嘴 LN0.5、LN1、

LN2、LN5 的重量损失明显低于非叠层陶瓷喷嘴.进一步比较,叠层陶瓷喷嘴 LN0.5、LN1、LN2、LN5 的重量损失在冲蚀的最初 90min,重量损失由小到大为 LN0.5 < LN1 < LN5 < LN2.因为陶瓷等脆性材料抗高角冲蚀能力弱,在最初的 90min,磨料对喷嘴产生近似垂直的冲蚀作用,因此入口的冲蚀比较严重,此时的重量损失主要是由入口的损失引起,而入口的周向 σ_θ 残余压应力值越大,喷嘴的抗冲蚀能力越好,因此此时从图 4 可看出叠层陶瓷喷嘴 LN0.5 的抗冲蚀能力最好.但是随着冲蚀时间的延长,最终重量损失由小到大为 LN2 < LN5 < LN1 < LN0.5,层厚比为 2 的叠层喷嘴的重量损失最小,因为 AT 喷嘴材料的抗冲蚀能力远不如 AWT 材料,所以随冲蚀时间的延长叠层陶瓷喷嘴 LN0.5、LN1 的重量损失比叠层陶瓷喷嘴 LN2、LN5 的重量损失大,叠层陶瓷喷嘴 LN2 与 LN5 相比,虽然,叠层陶瓷喷嘴 LN5 的 AWT 层(表层)更厚一些,但是从图 4 可以看出,叠层陶瓷喷嘴 LN5 的表层的残余压应力值远不如叠层陶瓷喷嘴 LN2,因此影响了其表层物理力学性能的提高,喷嘴入口、出口的高应力难以有效缓解,所以,叠层陶瓷喷嘴 LN2 的重量损失更小.叠层陶瓷喷嘴 LN0.1、LN0.2 由于层厚比太小,表层太薄,冲蚀效果并不好,特别是叠层喷嘴 LN0.1 最终的重量损失比非叠层陶瓷喷嘴的重量损失都大.

由于各种喷嘴的密度不同,对不同喷嘴的抗冲蚀性能进行比较,根据图 4 计算各喷嘴的体积冲蚀磨损率,结果见表 4.可见,各陶瓷喷嘴的体积冲蚀磨损率由小到大依次为:LN2 < LN5 < LN1 < LN0.5 < CN < LN0.2 < LN0.1.叠层陶瓷喷嘴 LN2 的体积冲蚀磨损率最低,为 $0.98 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{g}$;叠层喷嘴 LN0.1 的体积冲蚀磨损率最高,为 $1.79 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{g}$;非叠层陶瓷喷嘴 CN 的体积冲蚀磨损率为 $1.345 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{g}$,叠层陶瓷喷嘴 LN2 比非叠层陶瓷喷嘴的抗冲蚀能力有明显地提高.

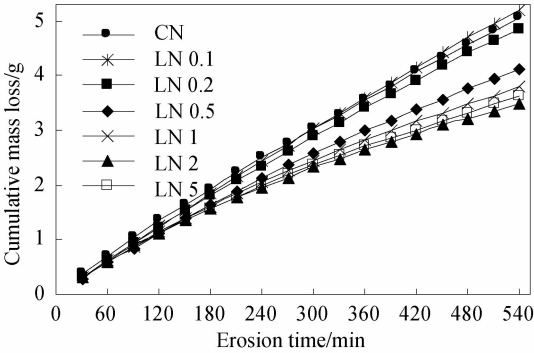


图4 喷砂过程中各陶瓷喷嘴的累积重量损失
Fig. 4 Cumulative mass loss of ceramic nozzles in sand blasting processes

表 4 喷砂过程中各种陶瓷喷嘴的冲蚀磨损率对比
Table 4 Comparison of the erosion ratio of ceramic nozzles in sand blasting processes

Ceramic nozzles	The erosion ratio of ceramic nozzles $W \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{g}$
CN	1.345
LN0.1	1.790
LN0.2	1.603
LN0.5	1.265
LN1	1.109
LN2	0.980
LN5	0.985

图 5 为冲蚀 540min 后叠层陶瓷喷嘴 LN2 与非叠层陶瓷喷嘴 CN 的内孔轮廓,从图 5 可以看出,在相同的冲蚀条件下,冲蚀后的叠层陶瓷喷嘴 LN2 的内孔磨损程度均轻于非叠层陶瓷喷嘴 CN 的内孔磨损.特别是入口和出口磨损程度明显轻于非叠层陶瓷喷嘴 CN 的磨损.

图 6 为冲蚀 540min 后叠层和非叠层陶瓷喷嘴内孔直径沿轴向位置的变化情况,图中虚线表示冲蚀前喷嘴内径,实线表示叠层 LN2 及非叠层陶瓷喷嘴 CN 冲蚀后的内径.可见非叠层陶瓷喷嘴入口处内径增幅最大,出口次之,中间区域从约 6.8mm 处有拐点,从此点到出口内径逐渐增大.而叠层陶瓷喷嘴内径的变化幅度相对较小,特别是其入口、出口处内径增幅明显减小,中间位置由于 AT 材料相对 AWT 材料抗冲蚀性能较差,所以此处内径变化最大.

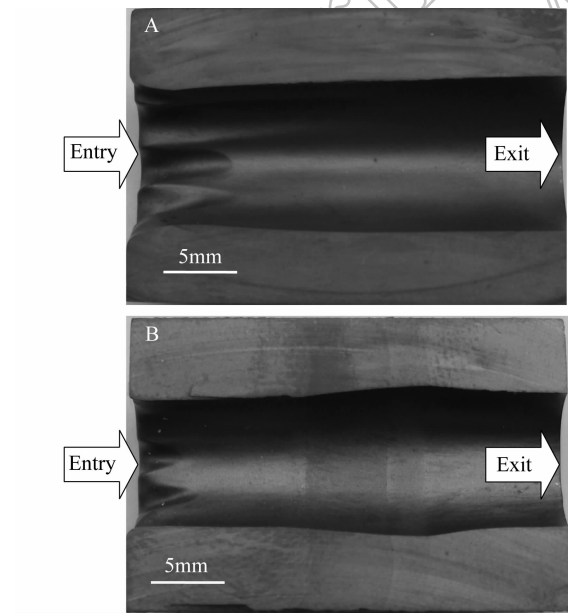


图 5 叠层陶瓷喷嘴 LN2(A) 与非叠层陶瓷喷嘴 CN(B) 冲蚀 540min 后的内孔轮廓
Fig. 5 Photos of the worn inner-hole profile of (A) CN stress-free nozzle and (B) LN2 laminated nozzle after 540min erosion

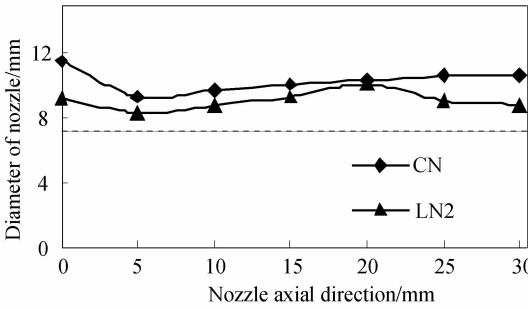


图 6 叠层陶瓷喷嘴 LN2 与非叠层陶瓷喷嘴 CN 冲蚀 540min 后内径沿轴向位置的变化情况
Fig. 6 Variation of bore diameter with CN and LN2 nozzle length after 540min erosion

图 7、8 为叠层陶瓷喷嘴 LN2 与非叠层陶瓷喷嘴内孔入口、中间表面磨损形貌的 SEM 照片,两喷砂嘴各自的入口和出口具有相同的新形貌.叠层与非叠层陶瓷喷嘴呈现不同的冲蚀磨损特征,非叠层陶瓷喷嘴 CN 入口处磨损表面光滑平整,粒子形貌规则有

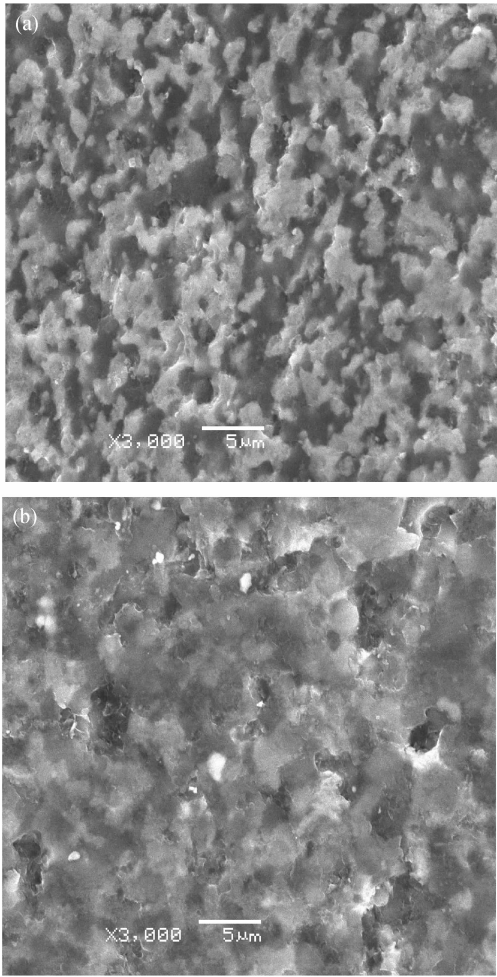


图 7 叠层陶瓷喷嘴 LN2 入口及中间冲蚀磨损表面 SEM 照片 (冲蚀 540min)
Fig. 7 SEM micrographs of the entry bore surface (a) and middle bore surface (b) of the LN2 laminated nozzle (after 540min erosion)

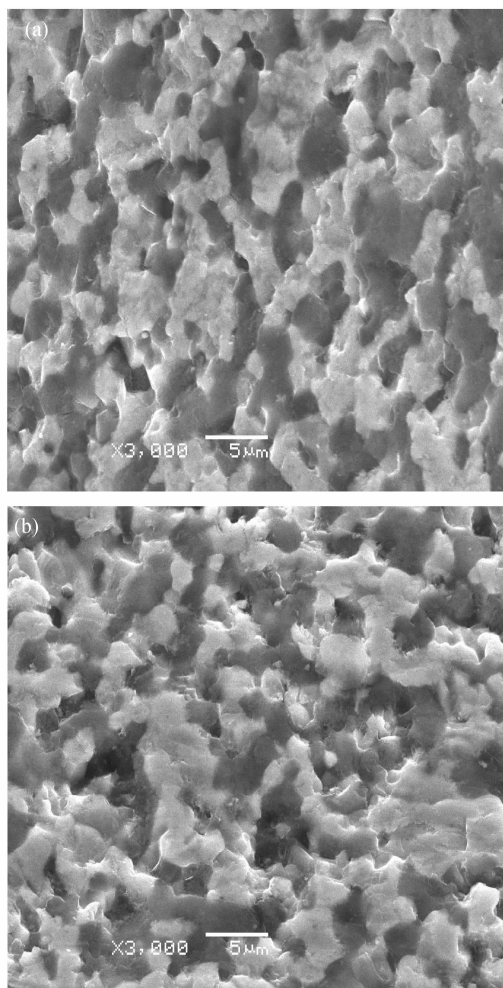


图8 非叠层陶瓷喷嘴 CN 入口及中间冲蚀磨损表面 SEM 照片(冲蚀 540min)

Fig. 8 SEM micrographs of the entry bore surface (a) and middle bore surface (b) of the CN homogeneous nozzle (after 540min erosion)

序,主要为疲劳断裂和晶粒脱落,而叠层陶瓷喷嘴 LN2 入口处主要为疲劳断裂.非叠层陶瓷喷嘴 CN 中间处磨损表面高低不平,主要为微切削和晶粒脱落,而叠层陶瓷喷嘴 LN2 中间主要为疲劳断裂和脆性断裂引起的晶粒脱落.叠层陶瓷喷嘴 LN2 的晶粒较非叠层陶瓷喷嘴 CN 细小,由于表层压应力的存在,在较高的烧结温度下,抑制了晶粒的生长,细化了晶粒.

4 结论

1) 叠层材料表层的硬度、断裂韧性均随层厚比 t_1/t_2 的减小而增大,表层越薄,表层内的残余压应力越大,表层的硬度、断裂韧性也越大.

2) 叠层陶瓷喷嘴最佳层厚比为 $t_1/t_2 = 2$,叠层陶瓷喷嘴 LN2 的表层压应力值相对较大,分布的范围

(压应力层的长度)相对比较大,喷砂冲蚀磨损试验表明叠层陶瓷喷嘴 LN2 的冲蚀效果最好.

3) 叠层陶瓷喷嘴 LN2 的抗冲蚀性能比非叠层陶瓷喷嘴 CN 有显著提高,叠层陶瓷喷嘴 LN2 的体积冲蚀磨损率为 $0.98 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{g}$,非叠层陶瓷喷嘴 CN 的体积冲蚀磨损率为 $1.345 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{g}$.

4) 由于表面压应力的存在,叠层陶瓷喷嘴 LN2 的晶粒得到了细化,力学性能得到了提高,是造成叠层陶瓷喷嘴 LN2 的抗冲蚀性能比非叠层陶瓷喷嘴 CN 有显著提高的主要原因.由于中间层 AT 的抗冲蚀性能较差,叠层陶瓷喷嘴 LN2 中间层的磨损最严重.叠层陶瓷喷嘴 LN2 的入口处磨损机制为疲劳断裂,中间磨损机制为疲劳断裂和晶粒脱落.

参考文献:

- [1] Deng Jianxin, Liu Lili, Ding Mingwei. *Materials and Design*, 2007, **28**(7): 2099-2105.
- [2] 李国英 主编. 表面工程手册. 北京:机械工业出版社,1998. 21-27.
- [3] Deng Jianxin, Liu Lili, Ding Mingwei. *Materials characterization*, 2008, **59**(1): 1-8.
- [4] Ding Zeliang, Deng Jianxin, Li Jianfeng. *Materials & Design*, 2007, **28**(5): 1531-1538.
- [5] Ding Zeliang, Deng Jianxin, Zen Xiaohong, et al. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2008, **26**(4): 334-339.
- [6] 冯益华. 新型陶瓷喷砂嘴的研究开发及其冲蚀磨损机理研究. 山东大学博士论文,2003.
- [7] Deng Jianxin, Feng Yihua, Ding Zeliang. *Journal of the European Ceramic Society*, 2003, **23**(2): 323-329.
- [8] 刘莉莉,邓建新,皇黎凌,等. 中国科学(E 辑),2007, **37**(7): 8571-865.
- [9] Deng Jianxin, Wu Fengfang, Zhao Jinlong. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, **47**(12-13): 2031-2039.
- [10] Deng Jianxin, Zhang Xihua, Niu Pingzhang, et al. *Tribology International*, 2006, **39**(3): 274-280.
- [11] Toschi F, Melandri C, Pinasco P, et al. *Journal of American Ceramic Society*, 2003, **86**(9): 1547-1553.
- [12] 苏盛彪,包亦望,杨建军. 硅酸盐学报, 2003, **31**(8): 743-747.
- [13] Tekmen C, Ozdemir I, Celik E. *Surface and Coatings Technology*, 2003, **174-175**: 1101-1105.
- [14] Portu de G, Micele L, Pezzotti G. *Composites Part B: Engineering*, 2006, **37**(6): 556-567.
- [15] Lambrinou K, Lauwagie T, Chalvet E, et al. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, **27**(2-3): 1307-1311.
- [16] Deng Jianxin, Liu Lili, Li Jianfeng, et al. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2007, **25**(2): 130-137.
- [17] de Portu G, Micele L, Prandstraller D, et al. *Wear*, 2006, **260**(9-10): 1104-1111.
- [18] Li Dongyun, Qiao Guanjun, Jin Zhihao. *Ceramics International*, 2004, **30**(2): 213-217.