

SiC/(W, Ti)C 梯度陶瓷喷嘴材料的制备 及其冲蚀磨损机理研究

刘莉莉^{1,2}, 邓建新¹, 周 军¹, 朱丽娜²

(1 山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061;

2 平原大学 机电工程学院, 河南 新乡 453003)

摘要: 针对陶瓷喷嘴磨损特点, 在喷嘴材料的设计和制造中提出运用梯度功能材料理论, 通过控制陶瓷喷嘴材料的成分分布以实现其力学性能的合理梯度变化, 将梯度陶瓷喷嘴材料制备过程中所产生的残余压应力引入喷嘴入口以提高喷嘴入口的力学性能, 从而缓解喷嘴入口的高应力, 提高其抗冲蚀磨损能力. 采用热压烧结工艺制备 SiC/(W, Ti)C 梯度陶瓷喷嘴材料并分析其冲蚀磨损机理. 结果表明, 在相同冲蚀磨损条件下, 梯度陶瓷喷嘴材料的抗冲蚀磨损性能较非梯度陶瓷喷嘴材料显著提高, 这是由于梯度陶瓷喷嘴应力状态的改善及其力学性能提高的缘故. 梯度陶瓷喷嘴材料的磨损机制为入口处呈现疲劳断裂、中间呈现微切削、出口处呈现疲劳断裂和脆性断裂特征.

关键词: 陶瓷喷嘴; 冲蚀磨损性能; 应力分析; 梯度功能材料; SiC/(W, Ti)C

中图分类号: TB312; TH1117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2007)01-0083-05

喷嘴是磨料射流加工的关键部件, 其耐磨性直接影响到喷嘴寿命及磨料射流加工效率. 陶瓷材料具有高硬度、耐磨和耐腐蚀等优点, 是理想的磨料射流喷嘴材料. 但现有陶瓷喷嘴材料的抗冲蚀磨损性能仍不够理想. 陶瓷喷嘴在入口处的冲蚀磨损严重、出口次之、中间区域磨损相对较轻^[1~3], 喷嘴入口处的高应力状态是导致陶瓷喷嘴入口磨损严重的主要原因^[4,5].

磨料射流喷嘴的抗冲蚀磨损性能取决于材料的组成分布及其显微结构的变化规律, 梯度功能材料具备材料的可设计性及力学性能无突变性, 既能实现不同位置材料性能的不同, 同时又能够满足喷嘴材料性能的连续变化^[6~8]. 由此, 本文作者针对陶瓷喷嘴冲蚀磨损特点, 在喷嘴材料的设计和制造中提出运用梯度功能材料理论, 通过合理设计梯度陶瓷喷嘴的不同部位材料组分分布及其制备工艺, 控制陶瓷喷嘴材料的成分分布, 将梯度陶瓷喷嘴制备过程中所产生的残余压应力引入喷嘴入口, 提高喷嘴入口的力学性能, 从而达到提高其抗冲蚀磨损能力的目的.

1 实验部分

1.1 喷嘴材料制备及性能测试

试验采用北京安泰科技股份有限公司提供的 SiC 粉末, 平均粒径为 1 μm , 纯度大于 99%; (W, Ti)C 固溶体粉末由株洲硬质合金厂提供, 平均粒径小于 1 μm , 纯度大于 99.8%. 分别取 SiC 体积分数 45%、40%、35%、30%、25% 和 20%, 将不同配比的 SiC 和 (W, Ti)C 粉末混合, 采用硬质合金球进行强化球磨, 经强化球磨后 SiC 和 (W, Ti)C 平均粒径为 0.8 μm , 球磨后的料浆进行真空干燥.

在烧结压力为 30 MPa, 烧结温度为 1 900 $^{\circ}\text{C}$, 保温 40 min 的条件下, 采用热压烧结工艺制备 SiC/(W, Ti)C 梯度陶瓷喷嘴 (GN) 以及用于对比试验的 SiC 体积分数为 45% 的 SiC/(W, Ti)C 非梯度陶瓷喷嘴 (CN), 喷嘴尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times \phi 20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 梯度陶瓷喷嘴的组成分布指数 $p = 0.5$, 梯度层厚度 $n = 5 \text{ mm}$. 对于梯度陶瓷喷嘴材料, 因各梯度层不同, 材料组分的热膨胀系数和弹性模量等差异, 在材料内部将形成不同的残余应力, 设计 SiC/(W, Ti)C

基金项目: 高等学校博士点基金资助项目 (20030422015); 山东省自然科学基金资助项目 (Y2004F08); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-04-0622).

收稿日期: 2006-02-15; **修回日期:** 2006-05-22 **联系人** 邓建新, e-mail: jxdeng@sdu.edu.cn

作者简介: 邓建新, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博导, 目前主要从事切削加工、陶瓷材料摩擦学及陶瓷刀具的设计与开发等研究.

梯度喷嘴入口为梯度材料分布,自入口至内各梯度层 SiC 的体积分数由大到小变化,从而保证制备过程中于喷嘴入口形成有利的残余压应力^[9],自喷嘴入口向内,各梯度层 SiC 体积分数分别为 45%、40%、35%、30%、25%和 20%,依次设定为第 1 层、2 层、3 层、4 层、5 层和 6 层。

采用 MH-6 型维氏硬度计测量梯度喷嘴材料不同梯度层的硬度;采用压痕法 (H_V -120 型维氏硬度计)测量梯度陶瓷喷嘴材料的压痕断裂韧性;在 WD-10 型国产电子万能试验机上测量不同梯度层材料的抗弯强度,试样尺寸为 3 mm ×4 mm ×30 mm,跨距为 20 mm,加载速率为 0.5 mm/min 所有测量结果均为 6 个测量结果的平均值。

1.2 冲蚀磨损试验及显微结构分析

采用 GS6 型专用干式喷砂机进行喷砂试验,所用磨料为 SiC,平均粒径 100 μm,空气压力 0.4 MPa,气流喷射时在喷嘴入口处形成负压,从而吸入磨料,

气流携带磨料通过喷嘴而造成喷嘴磨损。采用精度 0.02 mm 的游标卡尺测量喷嘴磨损前后内孔的直径,取 3 次测量结果的平均值。冲蚀试验后用无水乙醇超声清洗喷嘴 0.5 h 后吹干,在电子天平上称量冲蚀前后喷嘴的磨损质量损失,循环试验 30 min 后测量 1 次出砂量,体积冲蚀磨损率 E_v (mm³/g)由下式计算:

$$E_v = \frac{\Delta W_t}{W_p \rho_t}$$

(1)

式中:Δ*W_t*为喷嘴冲蚀前后的质量损失 (mg);*W_p*为出砂量 (g);ρ_{*t*}为喷嘴材料密度 (g/mm³)。采用日立 S-570 型扫描电子显微镜 (SEM)观察梯度陶瓷喷嘴显微组织结构及其磨损表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 梯度陶瓷喷嘴的力学性能

表 1 列出了梯度陶瓷喷嘴 GN 不同梯度层的维

表 1 梯度与非梯度陶瓷喷嘴材料的维氏硬度及压痕断裂韧性

Table 1 Vickers hardness and indentation fracture toughness of SiC/(W, Ti)C gradient and homogeneous ceramic nozzle

Layers	GN hardness H_V /GPa	GN fracture toughness K_{IC} /MPa · m ^{1/2}	GN hardness H_V /GPa	GN fracture toughness K_{IC} /MPa · m ^{1/2}
1 (Surface layer)	26.58	5.63	25.67	4.97
2	25.91	5.32		
3	25.52	5.05		
4	24.98	4.13		
5	23.77	3.76		
6 (Bottom layer)	23.31	3.54		

氏硬度和压痕断裂韧性值,以及非梯度陶瓷喷嘴 CN 的维氏硬度和压痕断裂韧性值。可见,梯度陶瓷喷嘴的表层硬度和断裂韧性最高,由表层至里层的硬度和断裂韧性依次降低,底层的硬度和断裂韧性最低,且梯度陶瓷喷嘴表层的硬度和断裂韧性高于非梯度陶瓷喷嘴的硬度和断裂韧性,这主要与梯度陶瓷喷嘴材料的组成分布、显微组织结构及其表层的残余压应力状态等有关^[10],在采用压头预置诱导裂纹过程中,残余压应力对裂纹的萌生及扩展起到一定的抑制和屏蔽作用^[11,12]。

另外,经过测量得到梯度陶瓷喷嘴表层的抗弯强度为 526.3 MPa,非梯度陶瓷喷嘴的抗弯强度为 517.3 MPa

2.2 梯度陶瓷喷嘴的冲蚀磨损特性

在相同试验条件下测得梯度及非梯度陶瓷喷嘴试样的冲蚀磨损率分别为 13.013 ×10⁻³ mm³/g 和 53.196 ×10⁻³ mm³/g,可见,梯度陶瓷喷嘴的抗冲蚀

磨损性能较非梯度陶瓷喷嘴高。

图 1 所示为冲蚀磨损前后梯度陶瓷喷嘴 GN 入口和出口的表面形貌照片。可见,与非梯度陶瓷喷嘴冲蚀磨损特点明显不同:冲蚀磨损后梯度喷嘴 GN 入口和出口处的形状规则,入口和出口处的磨损程度均较轻,且入口处的磨损程度相对出口处轻。

图 2 所示为冲蚀 540 min 后梯度和非梯度陶瓷喷嘴内径沿轴向位置的变化情况,图中虚线表示冲蚀前喷嘴内径,实线表示梯度及非梯度陶瓷喷嘴冲蚀后的内径。可见:非梯度陶瓷喷嘴入口处内径增幅最大,出口次之,中间区域内径变化相对较小;而梯度陶瓷喷嘴内径的变化幅度较小,特别是其入口处内径增幅明显减小,由入口至出口,内径增幅逐渐增加。

综上所述,在同样冲蚀磨损条件下,梯度陶瓷喷嘴较非梯度陶瓷喷嘴入口和出口处的冲蚀磨损程度均明显减轻。

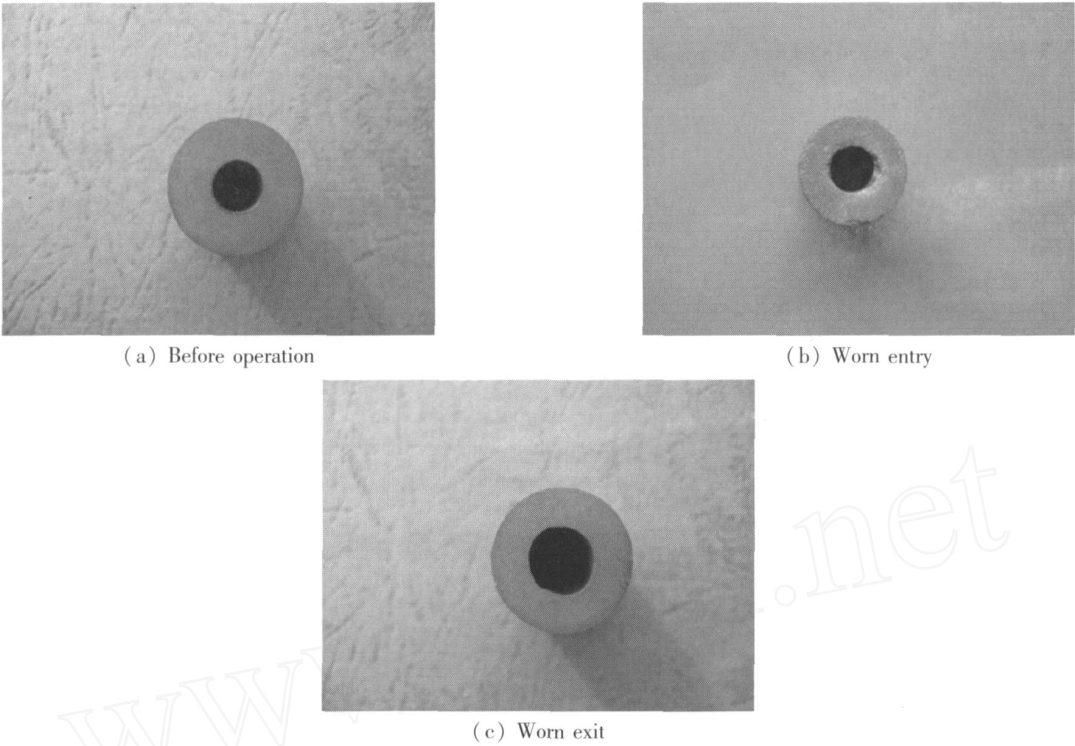


Fig 1 Photographs of GN nozzle entry and exit bore profiles before and after erosion (2 ×)

图 1 梯度陶瓷喷嘴 GN 冲蚀磨损前后入口和出口表面形貌照片 (×2)

2 3 梯度陶瓷喷嘴的冲蚀磨损机理

2 3 1 喷嘴应力分析

图 3(a)所示为 SiC/(W, Ti)C 梯度陶瓷喷嘴沿轴向位置内壁的 Von Mises 等效应力曲线. 可见, 梯

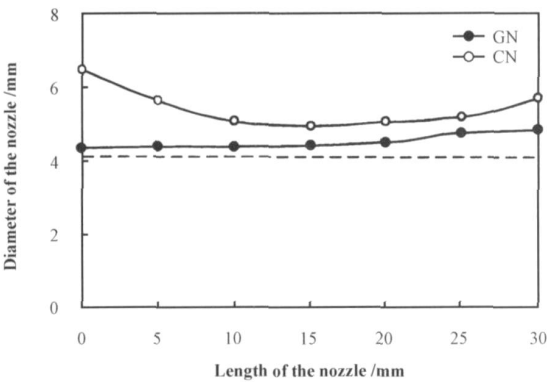


Fig 2 Variation of bore diameter with GN and CN nozzle length after 540 min in operation

图 2 梯度与非梯度陶瓷喷嘴冲蚀 540 min 后内径沿轴向位置的变化情况

度陶瓷喷嘴内径入口的应力为 115.11 MPa, 比非梯度陶瓷喷嘴入口应力小, 沿轴向至中间部位应力增至 332.87 MPa, 至出口处为 327.42 MPa. 图 3(b)所示为 SiC/(W, Ti)C 非梯度陶瓷喷嘴沿轴向位置内

壁的 Von Mises 等效应力曲线. 可以看出, 非梯度陶瓷喷嘴内径入口的应力较大 (521.58 MPa), 沿轴向至内应力逐渐减小, 距入口 5 mm 处应力降低到 151.37 MPa, 至出口处应力为 393.66 MPa. 分析表明, 梯度陶瓷喷嘴的应力与非梯度陶瓷喷嘴相比变化很大, 由于梯度陶瓷喷嘴的入口处采用了梯度设计, 梯度陶瓷喷嘴在入口引入残余压应力, 从而使得梯度陶瓷喷嘴入口的拉应力得到明显缓解, 这正是造成梯度陶瓷喷嘴的抗冲蚀磨损能力提高的主要原因之一.

2 3 2 喷嘴微观结构

图 (4 和 5) 所示为梯度及非梯度 SiC/(W, Ti)C 陶瓷喷嘴内磨损表面形貌的 SEM 照片. 可见, 梯度与非梯度陶瓷喷嘴呈现不同的冲蚀磨损特征, 非梯度陶瓷喷嘴入口处磨损表面颗粒严重破坏; 而梯度陶瓷喷嘴较非梯度陶瓷喷嘴入口部位的冲蚀磨损程度较轻, 表面颗粒较规整, 各相材料界面清晰. 梯度陶瓷喷嘴较非梯度陶瓷喷嘴中间部位的冲蚀磨损程度略轻, 梯度陶瓷喷嘴的中间部位出现犁沟, 且犁沟方向一致, 磨料粒子在喷嘴中间部位反复犁耕和碾压而导致喷嘴剥除. 梯度陶瓷喷嘴的冲蚀磨损机理在入口处主要表现为疲劳断裂, 中间部位为微切削,

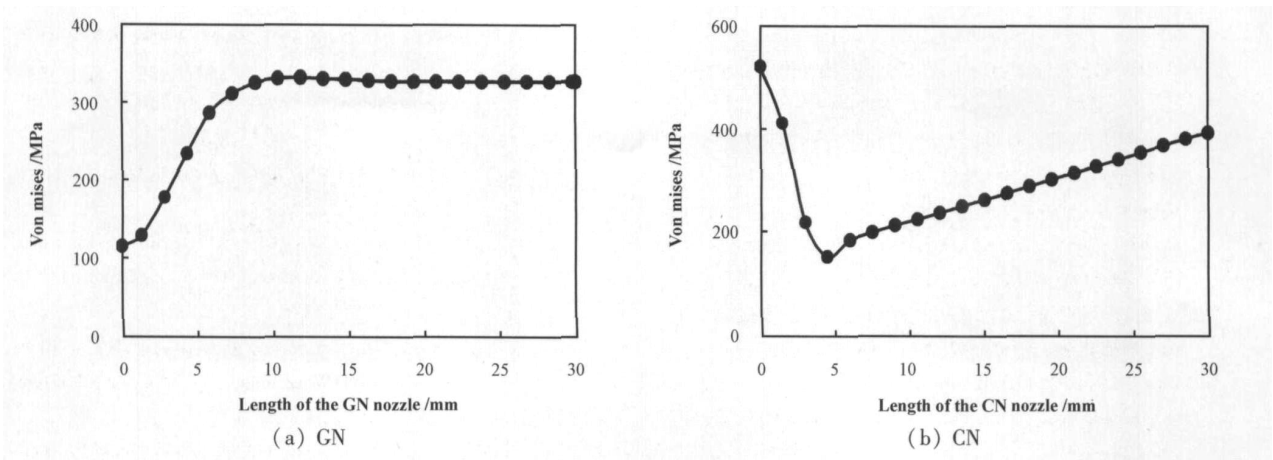


Fig 3 Von Mises curve of inter wall of GN and CN nozzle
图 3 梯度与非梯度陶瓷喷嘴内壁的 Von Mises 等效应力曲线



Fig 4 SEM micrographs of the worn bore surfaces of the GN gradient nozzle (after 540 min operation)
图 4 梯度陶瓷喷嘴冲蚀磨损内表面形貌 SEM 照片 (冲蚀 540 min)

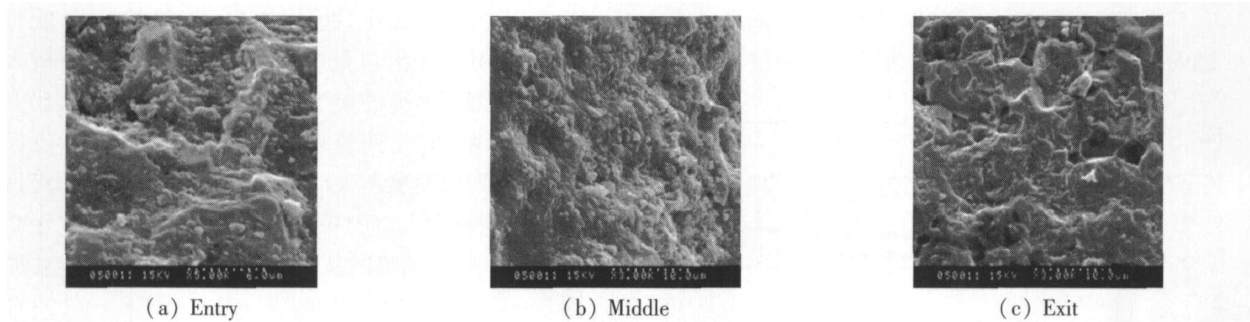


Fig 5 SEM micrographs of the worn bore surfaces of the CN homogeneous nozzle (after 540 min operation)
图 5 非梯度陶瓷喷嘴冲蚀磨损内表面形貌 SEM 照片 (冲蚀 540 min)

出口处主要表现为疲劳断裂和脆性断裂。

3 结论

a 梯度陶瓷喷嘴材料的力学性能随梯度层数不同而异,其表层硬度和断裂韧性最高,由表层至里硬度和断裂韧性依次降低,底层硬度和断裂韧性最低.与非梯度陶瓷喷嘴材料相比,梯度陶瓷喷嘴材料的力学性能显著提高。

b 梯度陶瓷喷嘴入口处的应力比非梯度陶瓷喷嘴显著降低。

c 梯度陶瓷喷嘴力学性能的提高和应力状态的改善是造成其抗冲蚀磨损能力显著高于非梯度陶瓷喷嘴的主要原因。

d 梯度陶瓷喷嘴入口处磨损最轻,由喷嘴入口至出口磨损逐渐增加,入口处磨损机制为疲劳断裂、中间磨损机制为微切削、出口处呈现疲劳断裂和脆性断裂特征。

参考文献:

[1] Deng J X, Zhang X H, Niu P G, et al Wear of ceramic nozzles

- by dry sand blasting[J]. Tribology International, 2006, 39: 274-280.
- [2] 冯益华, 邓建新. B₄C(W, Ti)C 陶瓷喷砂嘴冲蚀磨损机理研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24 (4): 346-350.
- Feng Y H, Deng J X. Erosion wear mechanisms of B₄C(W, Ti)C ceramic nozzles[J]. Tribology, 2004, 24 (4): 346-350.
- [3] Wakuda M, Yamauchi Y, Kanzaki S. Effect of workpiece properties on machinability in abrasive jet machining of ceramic materials[J]. Precision Eng, 2002, 26: 193-198.
- [4] 丁泽良, 李剑峰, 邓建新, 等. 水煤浆喷嘴热冲蚀磨损机理研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23 (5): 441-444.
- Ding Z L, Li J F, Deng J X, et al. Thermal erosion wear behavior of nozzles in coal water slurry burning[J]. Tribology, 2003, 23 (5): 441-444.
- [5] Schwetz K A, Sigl L S, Grein J. Wear of boron carbide ceramics by abrasive water jets[J]. Wear, 1995, 181-183: 348-355.
- [6] Zhao J, Ai X, Deng J X, et al. Thermal shock behaviors of functionally graded ceramic tool materials[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24: 847-854.
- [7] Kemer E H. The elastic and thermal-elastic properties of composite media[J]. Proc Phys Soc, 1956, B69: 808-813.
- [8] Jin Z H, Noda N. Transient thermal stress intensity factors for a crack in a semi-infinite plane of a functionally gradient material[J]. International Journal of Solids and Structures, 1994, 31 (2): 203-218.
- [9] 赵军. 新型梯度功能陶瓷刀具材料的设计制造及其切削性能研究[D]. 济南: 山东大学, 1998.
- Zhao J. Design and fabrication of functionally gradient ceramic tool material and their cutting performance[D]. Jinan: Shandong University, 1998.
- [10] Chi S H, Chung Y L. Cracking in coating-substrate composites with multi-layered and FGM coatings[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70 (10): 1 227-1 243.
- [11] Vigneau J, Bordel P. Influence of the microstructure of the composite ceramic tools on their performance when machining nickel alloys[J]. Annals of the CIRP, 1987, 36: 13-16.
- [12] Jorge Abanto-Bueno, John Lambros. Investigation of crack growth in functionally graded materials using digital image correlation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69 (14-16): 1 695-1 711.

Development of SiC/(W, Ti)C Gradient Ceramic Nozzle and Study on Its Erosion Mechanism

LU Li-li^{1,2}, DENG Jian-xin¹, ZHOU Jun¹, ZHU Li-na²

(1. Department of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Department of Mechanical and Electrical, Pingyuan University, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Idea of functionally gradient material (FGM) theory was used to the design of ceramic nozzle. The purpose was to reduce the stress at the entrance of the nozzle during abrasive jet machining process. The stress states of the nozzle were analyzed by finite element method. Results show that the minimum stress appeared in entrance area of the gradient ceramic nozzle, and so SiC/(W, Ti)C gradient ceramic nozzle were produced. The erosion behavior of the SiC/(W, Ti)C gradient ceramic nozzle was investigated in comparison with common ceramic nozzles. The SiC/(W, Ti)C gradient ceramic nozzles exhibited an apparent increase in erosion wear resistance over the common ceramic nozzles under the same test conditions. This is because that the stress state at gradient ceramic nozzle was changed and its mechanical properties were improved. The wear mechanism of gradient ceramic nozzle was fatigue and fracture at nozzle entrance, micro-cutting between entrance and exit, and fracture due to fatigue and brittle fracture.

Key words: ceramic nozzle, erosion wear mechanics, function gradient material, stress analysis, SiC/(W, Ti)C

Author: DENG Jian-xin, male, born in 1966, Ph. D., Professor, e-mail: jxdeng@sdu.edu.cn