

文章编号:1672-3961(2008)02-0018-05

# 梯度陶瓷水煤浆喷嘴的残余热应力有限元分析

员冬玲<sup>1</sup>, 邓建新<sup>1</sup>, 丁泽良<sup>2</sup>, 段振兴<sup>1</sup>

(1. 山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061;

2. 湖南工业大学机械工程学院, 湖南 株洲 412008)

**摘要:**根据陶瓷水煤浆喷嘴出口破损和脱落的主要原因,提出了梯度功能陶瓷喷嘴的设计思想,目的是人为的在喷嘴的制备过程中在喷嘴的出口处形成有利的残余压应力,缓和喷嘴在使用中的拉应力.通过合理地设计梯度功能陶瓷喷嘴不同部位材料组分的分布,设计了两种模型:轴向梯度陶瓷喷嘴 FGM-Z, 径向梯度陶瓷喷嘴 FGM-R. 利用有限元法对两种模型进行了分析,得出:两种梯度喷嘴模型在出口处均形成了有利的压应力,特别是 FGM-R 喷嘴在喷嘴的整个内壁都形成了有利的压应力.通过比较,初步确定最佳模型为 FGM-R 陶瓷水煤浆喷嘴.

**关键词:**喷嘴;梯度功能材料;残余热应力

**中图分类号:** TB39; TH117 **文献标识码:** A

## Finite element analysis for the thermal residual stress of gradient CWS ceramic nozzles

YUAN Dong-ling<sup>1</sup>, DENG Jian-xin<sup>1</sup>, DING Ze-liang<sup>2</sup>, DUAN Zhen-xing<sup>1</sup>

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

2. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)

**Abstract:** According to the main reason of the cause of failure at the exit surface of the CWS ceramic nozzle, the gradient function material (FGM) theory was applied into the design and manufacture of CWS ceramic nozzle material, which aimed to induce a compressive residual stress and reduce the tensile stress at the entry area of the FGM ceramic nozzles. The coefficients of thermal expansion of the constituent phases and neighboring layers, the physical models of FGM-Z and FGM-R were set up by the optimum component distribution. Analyzing by FEM, the results show that available compressive stress fields are found to exist in the two FGM nozzles, especially in the inner-hole surface of FGM-R ceramic nozzle. The design model of FGM-R was determined by comparison.

**Key words:** nozzle; functionally gradient material; thermal residual stress

## 0 引言

我国是一个多种能源都比较贫乏的国家,相对而言具有富煤、缺油、少气的特点.水煤浆是一种新型的煤基液体清洁燃料,它有煤粉、水和少量化学添

加剂组成,是我国代油燃料和洁净煤的重要组成部分<sup>[1]</sup>.目前,水煤浆已在我国的电力、石化、建材等行业得到了广泛的应用,并产生了很好的经济效益、环境效益和社会效益<sup>[2,3]</sup>.喷嘴是水煤浆燃烧器中的关键部件之一,水煤浆喷嘴工作时一方面要承受水煤浆中硬质粒子的高速冲蚀,另一方面喷嘴工作

收稿日期:2007-03-16

基金项目:山东省科技攻关项目(2006GG2204017)

作者简介:员冬玲(1975-),女,山东泰安人,博士生,研究方向为新陶瓷材料,有限元分析计算.

E-mail: yundongling@hotmail.com

环境的特殊性,如喷嘴出口端面温度较高(炉内最高温度可达  $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。喷嘴内孔水煤浆对喷嘴的对流换热,使得喷嘴内部存在很大的温差,这种恶劣的工作环境使得水煤浆喷嘴很容易因磨损和破损而损坏。目前,国内外对水煤浆喷嘴的研究主要集中在喷嘴的结构、材料及冲蚀磨损机理的研究方面。陶瓷材料由于硬度高、耐磨性和耐热性能优异等特点,是制备水煤浆喷嘴的理想材料,但是陶瓷喷嘴在内孔磨损量很小且直径几乎不变的情况下,出口出现了热破损和脱落现象,严重影响了陶瓷喷嘴的使用寿命<sup>[4-6]</sup>。文献[7, 8]表明:在水煤浆高温燃烧过程中,喷嘴内部存在较大的温度梯度和热应力,陶瓷水煤浆喷嘴出口处较大的温度梯度和热应力是导致其出口处出现破损和脱落的主要原因。目前,水煤浆喷嘴材料的研究主要集中在传统方法上提高材料的硬度、韧性、强度等。如将陶瓷喷嘴的热损坏特点及机理与喷嘴的设计相结合,将梯度材料设计思想引入陶瓷水煤浆喷嘴的研究中,人为在梯度陶瓷喷嘴的制备过程中于喷嘴的出口处形成残余压应力,缓和喷嘴在使用过程中的拉应力,将对提高陶瓷水煤浆喷嘴的寿命具有十分重要的理论和实际意义。

## 1 水煤浆喷嘴梯度模型的设计思想和模型的设计

出口处较大的热应力是造成陶瓷水煤浆喷嘴出口处破损和脱落的主要原因,如采取措施,防止或减少陶瓷喷嘴发生热破损和脱落现象,那么陶瓷喷嘴的使用寿命必会大大延长。在材料方面,可以采用简单的复合提高陶瓷材料的热导率、降低它的热膨胀系数,提高它的强度等增韧措施,来提高陶瓷喷嘴的抗热损伤能力,但成本较高,效果不很理想。功能梯度材料是缓和热应力,提高陶瓷抗热震性的好方法。通过控制梯度层的几何形状和层内组成梯度,可以合理地控制热应力数值的大小、最大热应力的位置、塑性流动、裂纹的产生与扩展。

图1为陶瓷水煤浆喷嘴的几何模型及尺寸图,其中单位为mm。

考虑到陶瓷材料抗拉强度较低,而抗压强度很高,同时因为陶瓷水煤浆喷嘴出口处拉应力大是造成喷嘴热损坏的主要原因,在喷嘴制备过程中应在出口表面形成残余压应力为宜。这样就能在使用过程中抵消一部分热应力,从而提高喷嘴抵抗热应力破坏的能力,这就要求喷嘴出口表面应具备比内层小的线膨胀系数。

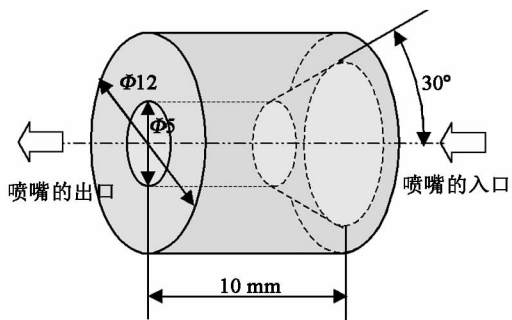
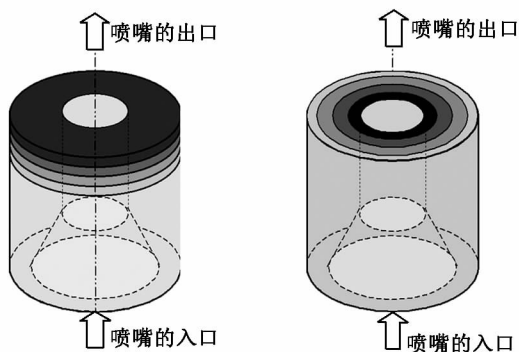


图1 陶瓷水煤浆喷嘴的几何尺寸图  
Fig.1 Geometry and dimensions of CWS ceramic nozzle

同时由于陶瓷水煤浆喷嘴出口处平均温度高,考虑到热的传出,应使从出口到入口方向,热导率逐渐增高,径向由内向外,热导率逐渐增高,这样有利于降低喷嘴出口的温度梯度及热应力的大小。

图2为梯度陶瓷水煤浆喷嘴的设计模型,其中上表面为出口,下表面为入口。图2(a)为材料的组分沿轴向呈梯度分布的梯度陶瓷喷嘴,图2(b)为材料的组分沿径向分布呈梯度层分布的梯度陶瓷喷嘴。

图2(a)的FGM-Z喷嘴为在制备过程中在出口端面形成压应力,沿轴向由出口到内层,线膨胀系数逐渐增大,热导率逐渐增高。而图2(b)的FGM-R喷嘴,材料沿径向,由内孔到外围,线膨胀系数逐渐增大,热导率逐渐增高。



(a) 轴向梯度陶瓷喷嘴 FGM-Z (b) 径向梯度陶瓷喷嘴 FGM-R

图2 梯度陶瓷水煤浆喷嘴示意图  
Fig.2 Illustration of FGM CWS ceramic nozzle

## 2 梯度陶瓷喷嘴残余热应力分析

### 2.1 梯度陶瓷水煤浆喷嘴的材料物理性能参数

梯度陶瓷水煤浆喷嘴的材料取  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{W}, \text{Ti})\text{C}$ , 材料的物理和热学材料性能参数如表1所示<sup>[9]</sup>, 梯度陶瓷喷嘴各梯度层的性能是不同的,呈梯度渐变。

表 1 梯度陶瓷水煤浆喷嘴各层的物理性能参数  
Table 1 Physical parameters of FGM CWS ceramic nozzles

(W,Ti)C 的体积 百分含量 Vol/%	线膨胀系数 $\alpha_l/10^{-6} K^{-1}$	弹性模量 $E/GPa$	泊松比 $\mu$
30	7.660	424.7	0.242
35	7.522	432.6	0.239
40	7.386	440.7	0.235
45	7.251	448.9	0.232
50	7.117	457.2	0.229

### 2.2 残余热应力分析模型的建立

根据问题的轴对称性,可以选择陶瓷水煤浆喷嘴的纵剖面的一半建立平面有限元模型.有限元分析首先选择四节点四边形单元 Plane42,设置为轴对称,网格划分采用四边形单元,参考温度为喷嘴烧结温度 1700 °C,最终统一温度为室温 20 °C,温差为 1680 °C,分析梯度陶瓷水煤浆喷嘴的残余热应力分布.

### 2.3 结果与讨论

计算时,假设材料各向同性,物性参数不随温度变化而改变,无塑性变形.计算在相同的制备条件下,FGM-Z 陶瓷水煤浆喷嘴和 FGM-R 陶瓷水煤浆喷嘴的应力分布情况,成分分布指数  $n = 1$ ,梯度层数目同为 4 层,FGM-Z 喷嘴梯度层的总层厚为 3 mm,分别比较 FGM-Z 喷嘴及 FGM-R 喷嘴的应力分布效果.

图 3(a),(b),(c)为 FGM-Z 喷嘴的径向残余应

力  $\sigma_r$ 、轴向残余应力  $\sigma_z$  和周向残余应力  $\sigma_\theta$  的分布图(其中,锥口为入口,直口为出口).图 4(a)为 FGM-Z 喷嘴的径向残余应力  $\sigma_r$ 、轴向残余应力  $\sigma_z$  和周向残余应力  $\sigma_\theta$  在喷嘴的出口端面径向  $l$  上的分布曲线图(坐标以出口中心为原点,方向由中心点沿半径方向向外).图 4(b)为 FGM-Z 喷嘴的径向残余应力  $\sigma_r$ 、轴向残余应力  $\sigma_z$  和周向残余应力  $\sigma_\theta$  在喷嘴内孔轴向  $h$  上的分布曲线图(坐标以出口中心为原点,方向为由出口指向入口的锥角口).从图 3,4 中我们可以看出,FGM-Z 喷嘴的径向残余应力  $\sigma_r$  变化不大,在喷嘴的出口端面形成了有利的残余压应力,但数值不大,在喷嘴的轴向上,沿内孔从出口到入口变化有波动,但数值也不大.轴向残余应力  $\sigma_z$  在出口端面的靠近内孔的地方形成了有利的压应力,而在喷嘴的外围形成了拉应力,这与陶瓷水煤浆喷嘴在工作时的出口端面应力分布:内孔处为拉应力,而在外围为压应力正好对应.在喷嘴的轴向上,沿内孔从出口到入口逐渐由压应力变为拉应力.轴向残余应力  $\sigma_z$  最大压应力为 119 MPa,在出口端面的内孔处.最大拉应力为 301 MPa,在出口的最外围.周向残余应力  $\sigma_\theta$  在出口端面均为压应力,沿轴向方向,沿内孔从出口到入口方向周向应力由压应力逐渐变为拉应力,压应力最大为 284 MPa,拉应力最大为 158.33 MPa.

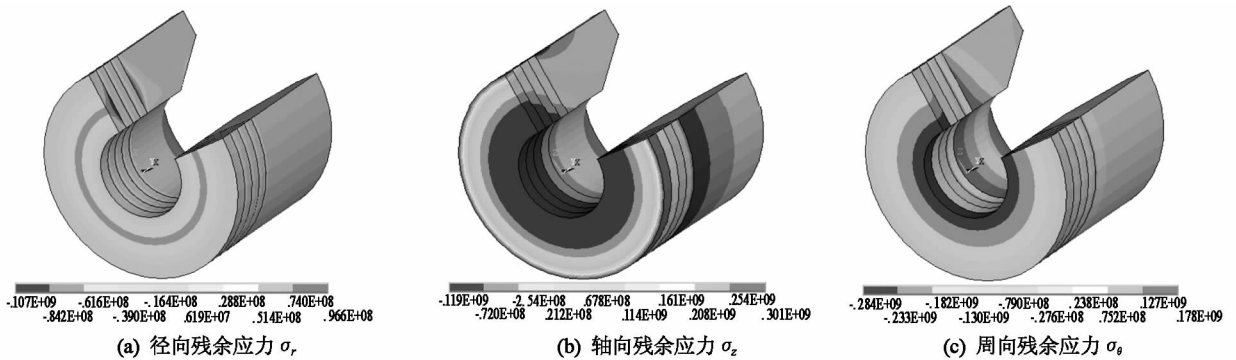


图 3 FGM-Z 陶瓷水煤浆喷嘴的热应力分布图

Fig.3 Thermal stress distribution of FGM-Z CWS ceramic nozzle

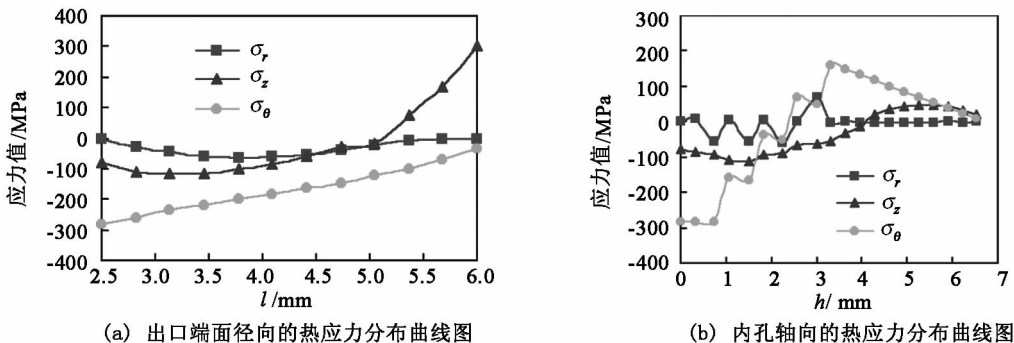


图 4 FGM-Z 陶瓷水煤浆喷嘴沿出口端面径向及内孔轴向的热应力分布曲线图

Fig.4 Thermal stress distribution of FGM-Z CWS ceramic nozzle at exit surface along radial direction and interior along axis direction

图5(a),(b),(c)为 FGM-R 喷嘴的径向残余应力  $\sigma_r$ 、轴向残余应力  $\sigma_z$  和周向残余应力分布图  $\sigma_\theta$ . 图6(a),(b)为 FGM-R 喷嘴的径向残余应力  $\sigma_r$ 、轴向残余应力  $\sigma_z$  和周向残余应力  $\sigma_\theta$  在喷嘴的出口端面径向及内孔轴向上的分布曲线图(坐标表示同图4). 从图5、6中我们可以看出,FGM-R 喷嘴的径向残余应力  $\sigma_r$  变化不大,应力值也很小. 轴向残余应力  $\sigma_z$  在出口端面的靠近内孔的地方形成了有利的压应力,而在喷嘴的外围形成了拉应力,这与陶瓷水煤浆喷嘴在工作时的出口端面应力分布:内孔处为

拉应力,而在外围为压应力正好对应. 在喷嘴的轴向上,沿内孔从出口到入口均为压应力,数值逐渐减小. 整个喷嘴形成的轴向残余应力  $\sigma_z$  最大压应力为 244 MPa,在出口端面的内孔处. 最大拉应力为 171 MPa,在出口的最外围. 周向残余应力  $\sigma_\theta$  的变化趋势与轴向残余应力  $\sigma_z$  的变化基本一致. 喷嘴的周向残余应力  $\sigma_\theta$  的最大压应力为 266 MPa,在出口端面的内孔处. 最大拉应力为 234 MPa,在入口的外围.

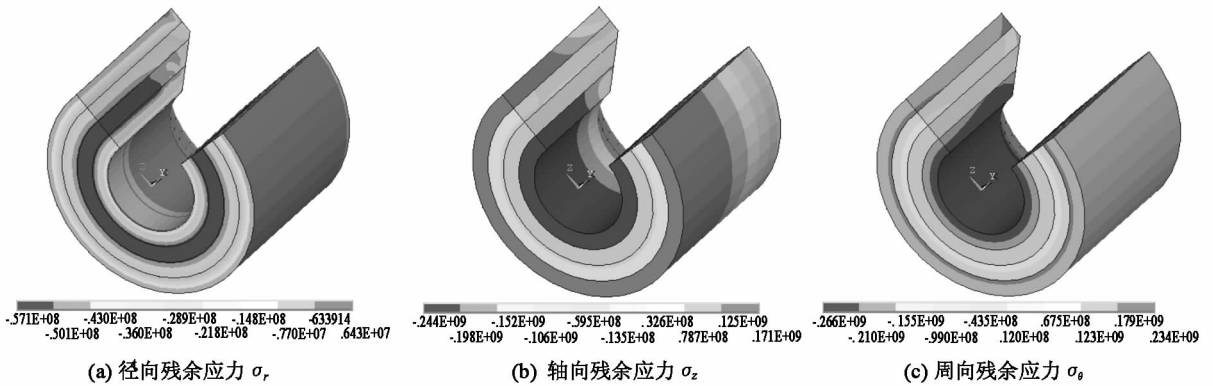


图5 FGM-R 陶瓷水煤浆喷嘴的热应力分布图  
Fig.5 Thermal stress distribution of FGM-R CWS ceramic nozzle

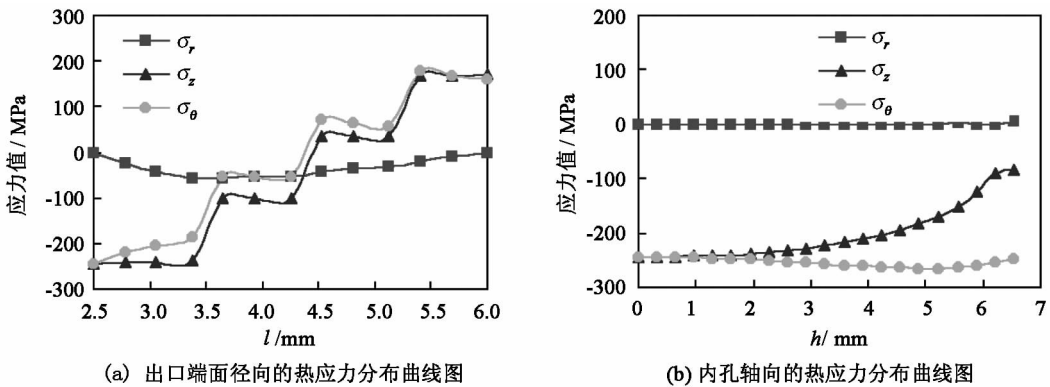


图6 FGM-R 陶瓷水煤浆喷嘴沿出口端面径向及内孔轴向的热应力分布曲线图  
Fig.6 Thermal stress distribution curve of FGM-R CWS ceramic nozzle at exit surface along radial direction and interior along axis direction

从上边分析可以看出:两个梯度陶瓷水煤浆喷嘴在出口处均形成了有利的残余压应力. 虽然, FGM-Z 陶瓷水煤浆喷嘴比 FGM-R 陶瓷水煤浆喷嘴在出口端面形成的最大压应力数值大一些. 但 FGM-Z 陶瓷水煤浆喷嘴的形成的残余拉应力最大值也更大一些,对陶瓷喷嘴的性能不利. 考虑到 FGM-R 陶瓷水煤浆喷嘴的轴向残余应力  $\sigma_z$  和周向残余应力  $\sigma_\theta$  在出口处特别是在喷嘴的内壁都形成了很好的压应力,对喷嘴在工作状态下的热应力具有很好的抵消作用. 因此,FGM-R 陶瓷水煤浆喷嘴的效

果比 FGM-Z 陶瓷水煤浆喷嘴的效果更加好.

### 3 结论

(1) 根据出口较大的热应力是造成陶瓷水煤浆喷嘴热损坏的主要原因,将梯度材料设计思想引入陶瓷水煤浆喷嘴的研究中,目的是人为在梯度陶瓷喷嘴的制备过程中于喷嘴的出口处形成残余压应力,缓和喷嘴在使用过程中的拉应力,提高陶瓷水煤浆喷嘴的寿命.

(2) 根据梯度陶瓷喷嘴的设计思想,提出两种梯度陶瓷喷嘴的结构物理模型:轴向梯度 FGM-Z 陶瓷水煤浆喷嘴,径向梯度 FGM-R 陶瓷水煤浆喷嘴.通过对梯度陶瓷喷嘴在制备中形成的残余热应力的有限元计算,得出两种梯度陶瓷喷嘴出口周围均产生了有利的压应力.

(3) 通过对两种梯度陶瓷水煤浆喷嘴的残余热应力分析结果的比较,FGM-R 陶瓷水煤浆喷嘴比 FGM-Z 陶瓷喷嘴在出口处形成的压应力的相比,喷嘴的轴向残余应力  $\sigma_z$  和周向残余应力  $\sigma_\theta$  在出口处特别是在喷嘴的内壁都形成了很好的压应力,对喷嘴在工作状态下的热应力具有很好的缓和作用.因此,FGM-R 陶瓷水煤浆喷嘴的效果比 FGM-Z 陶瓷水煤浆喷嘴的效果更加好.

#### 参考文献:

- [1] 岑可法,姚强,曹欣玉,等.煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术[M].杭州:浙江大学出版社,1997.  
CEN Ke-fa, YAO Qiang, CAO Xin-yu. Theory and application of coal water slurry burning, flow, convey and aerification [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997.
- [2] 詹隆,王柱勇,刘珊.水煤浆技术在中国的应用和发展[J].洁净煤技术,1999, 5:10-12.  
ZHAN Long, WANG Zhu-yong, LIU Shan. Development of applications of coal water slurry in China[J]. Clean Coal Technology, 2004, 34(4):10-12.
- [3] 崔秀玉,雷晓平.浅谈中国水煤浆技术的开发与应用[J].洁净煤技术,2002, 8(4):13-16.  
CUI Xiu-yu, LEI Xiao-ping. Development and applications of Chinese coal water mixture technology[J]. Clean Coal Technol-
- ogy, 2002, 8(4):13-16.
- [4] 王宝中,贾晓鸣,赵伟.水煤浆用喷嘴磨损机理研究[J].工业炉,2002, 24(3):8-10.  
WANG Bao-zhong, JIA Xiao-ming, ZHAO Wei. Study the mechanism of abrasion of the nozzle used by coal-liquid mixture [J]. Industry Boiler, 2002, 24(3):8-10.
- [5] 丁泽良,李剑锋,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 Ze-liang, LI Jian-feng, DENG Jian-xin. Thermal erosion wear behavior of nozzles in coal water slurry burning[J]. Tribology, 2003, 23(5):441-444.
- [6] DING Ze-liang, DENG Jian-xin, LI Jian-feng, et al. Wear behavior of ceramic nozzles in coal water slurry burning[J]. Ceramics International, 2004, 30(4):591-596.
- [7] 员冬玲,邓建新,丁泽良.陶瓷水煤浆喷嘴温度场及热应力的有限元分析[J].山东大学学报:工学版,2005, 35(1):32-36.  
YUAN Dong-ling. Temperature and thermal stress analysis of coal water slurry ceramic nozzles with finite element method [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2005, 35(1):32-36.
- [8] DENG Jian-xin, DING Ze-liang, YUAN Dong-ling. Erosion wear mechanisms of coal water slurry (CWS) ceramic nozzles in industry boilers[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 417(1-2):1-7.
- [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 Jun. Design and fabrication of functionally gradient ceramic tool material and their cutting performance[D]. Jinan: Shandong University, 1998.

(编辑:陈燕)