

# 基于梯度功能的陶瓷水煤浆喷嘴的设计

丁泽良<sup>1</sup>, 邹永生<sup>1</sup>, 员冬玲<sup>2</sup>, 邓建新<sup>2</sup>

(1. 湖南工业大学 无机非金属材料工程技术湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412008;

2. 山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 在分析水煤浆喷嘴工作特性和磨损机理的基础上, 提出了梯度功能陶瓷水煤浆喷嘴的设计模型, 并对单向梯度功能陶瓷喷嘴的残余应力进行了有限元分析。结果显示, 梯度功能陶瓷喷嘴内部的残余压应力能缓解喷嘴工作时的热应力, 提高陶瓷喷嘴的抗热冲蚀磨损能力。

**关键词:** 梯度功能材料; 热应力; 陶瓷喷嘴; 水煤浆

**中图分类号:** TQ174; TK263.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2008)01-0068-05

## Design of Ceramic Coal Water Slurry Nozzle Based on Functionally Gradient

Ding Zeliang<sup>1</sup>, Zou Yongsheng<sup>1</sup>, Yuan Dongling<sup>2</sup>, Deng Jianxin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Inorganic & Nonmetal Materials Engineering Technology in Hunan Province, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Analyzing on working conditions and wear mechanisms of coal water slurry (CWS) nozzles, a model for designing ceramics CWS nozzle with functionally gradient is proposed. The finite element method (FEM) is used to evaluating the residual thermal stress of the ceramic nozzle with unilateral functionally gradient during the fabricating process. Result showed that the residual thermal stress in gradient ceramic CWS nozzle could partially counteract the thermal stress of ceramic nozzle in CWS burning process, and improve the thermal erosive wear resistance of ceramic nozzles.

**Key words:** unctionally gradient materials (FGM); thermal stress; ceramic nozzles; coal water slurry (CWS)

## 0 引言

梯度功能材料 (Functionally Gradient Materials, 简称 FGM) 是一种新型复合材料, 是指沿着某一方向其物理、化学、生物、力学等单一或复合性能发生连续变化, 以适应不同环境, 实现某种特殊功能的先进材料<sup>[1]</sup>。与均质复合材料相比, FGM 内部的成分和显微结构可被控制地实现连续梯度变化, 使材料性能平稳连续变化, 从而消除材料服役时内部产生的热应力界面, 达到缓和热应力的目的<sup>[2,3]</sup>。FGM 先进的设计思想引起了国内外学者的高度重视并成为当今材料科学研

究的前沿课题之一<sup>[4-8]</sup>。

喷嘴是水煤浆 (coal water slurry, 简称 CWS) 燃烧器中的关键部件, 喷嘴的耐磨性决定喷嘴的使用寿命, 并直接影响水煤浆应用的经济性。为此, 开发高性能、长寿命的水煤浆喷嘴一直是水煤浆应用技术的攻关课题之一。目前, 对于水煤浆喷嘴的研究主要集中在喷嘴的结构、磨损机理和雾化性能等方面<sup>[9-13]</sup>, 而有关喷嘴材料方面的研究报道较少。本文在分析水煤浆喷嘴工作特性和喷嘴磨损机理的基础上, 利用 FGM 技术思想, 提出了梯度功能陶瓷水煤浆喷嘴的设计模型, 并对单向梯度陶瓷喷嘴的残余应力进行了有限元

收稿日期: 2007-12-25

基金项目: 教育部科学技术研究基金资助重点项目 (2007B074), 湖南省教育厅基金资助重点项目 (06A014)

作者简介: 丁泽良 (1966-), 男, 湖南攸县人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事磨损理论和耐磨材料的研究。

分析, 以期对高性能陶瓷水煤浆喷嘴的开发提供参考。

## 1 水煤浆喷嘴的工作特性

图1为水煤浆喷嘴工作情况的示意图。室温水煤浆由喷枪进入喷嘴, 在喷嘴内被高压气体加速并雾化, 然后进入锅炉燃烧, 锅炉燃烧室内火炬的最高温度可达1400℃。

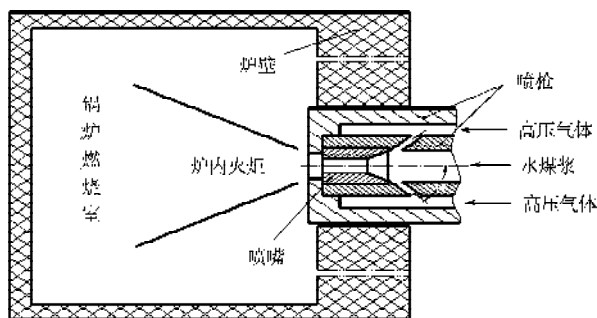


图1 喷嘴工作情况示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the working conditions of nozzle

喷嘴工作时不仅充当雾化嘴对水煤浆进行雾化, 而且起到烧嘴的作用, 它所承受的冲蚀既不同于喷嘴、火电厂换热管路等受到的气固冲蚀和水轮机叶片、选矿行业的脱水、筛选等设备受到的气、固两相流浆体冲蚀, 也不同于磨料水射流喷嘴受到的气、固、液三相流浆体冲蚀, 它具有如下特点:

**内部温差大** 喷嘴工作时, 不同部位所接触的介质温度不同。其中入口部位和内孔接触的是室温水煤浆, 出口部位面向高温炉膛(最高温度可达1400℃), 受热辐射作用, 其表面温度较喷嘴其它任何部位都要高, 喷嘴内部存在较大温差并产生温度梯度。

**冲蚀介质多相** 由于水煤浆为煤粉和水的混合物, 其中煤粉中含有黄铁矿、石英等许多高硬质粒子(其硬度可达Hv 2500以上), 雾化介质为高速压缩空气, 因此, 水煤浆喷嘴工作时将同时承受气、固、液多相流的冲蚀。

**冲蚀角度多变** 冲蚀粒子在喷嘴入口处的冲蚀角度比较大, 其中有的粒子甚至以90°角度正面冲击喷嘴, 并且大部分冲蚀粒子的冲蚀角与喷嘴的入口角大小有关;但在喷嘴的中间段, 因为入口锥角的收缩作用, 水煤浆流动的紊乱性和粒子运动的无序性大为减轻, 浆流和粒子的运动方向基本上与喷嘴轴心平行, 这样粒子对喷嘴内壁的冲蚀角度就会很小, 一般在10°以下;到了喷嘴的出口位置, 由于压力的释放, 浆粒对喷嘴的冲蚀角度也发生了改变, 其大小介于入口段和中间段之间。

根据冲蚀粒子对水煤浆喷嘴不同位置冲蚀角度大小的不同, 可将喷嘴分为高角冲蚀区和低角冲蚀区,

其中冲蚀角度大于20°的称为高角冲蚀区, 冲蚀角度小于20°的则称为低角冲蚀区。这样, 喷嘴入口部位可划分为高角冲蚀区, 而喷嘴其它部位则为低角冲蚀区, 喷嘴冲蚀区域的划分见图2所示。

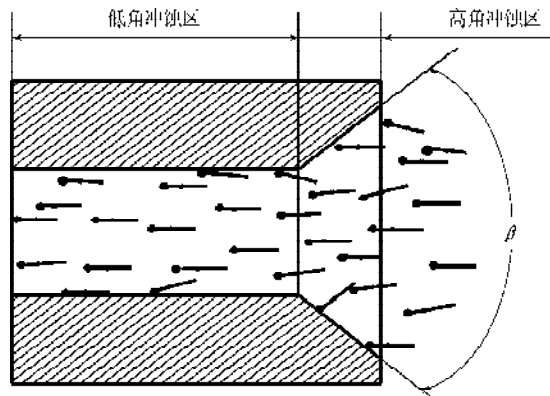


图2 水煤浆冲蚀喷嘴示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CWS impacting nozzle

此外, 随着工作时间的增加, 喷嘴高、低角冲蚀区域的大小会发生变化。冲蚀初期, 仅喷嘴入口部位为高角冲蚀区, 但随着工作的继续, 高角冲蚀区会向低角冲蚀区扩散, 到最后喷嘴直孔段的内孔磨损很严重, 其直径几乎与喷嘴入口直径相同, 这时整个喷嘴全长都成为了低角冲蚀区。

**内部存在多种应力** 喷嘴工作时不仅要承受浆粒对它的冲蚀作用, 使其内部存在冲击应力, 而且内部较大的温差会导致热应力的产生;此外, 喷嘴在喷枪中的固定需要一定的机械约束力。因此, 水煤浆喷嘴工作时, 其内部存在冲击应力、热应力和机械应力。

## 2 陶瓷水煤浆喷嘴的磨损特点

### 2.1 多种磨损机制并存

图3为Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(W,Ti)C陶瓷水煤浆喷嘴工作120h后磨损表面形貌的SEM照片。可见, 磨损表面因其部位不同而呈现不同的表面特征。

喷嘴入口区域属于高角冲蚀区, 硬质粒子冲击喷嘴表面时, 使接触区域产生局部的弹塑性变形, 并在变形区周围引发横向和径向裂纹, 裂纹的扩展与贯穿导致材料表面晶粒剥落, 从而在喷嘴表面产生蚀坑;喷嘴中间部位属于低角冲蚀区, 水煤浆的冲蚀作用近似于冲蚀粒子对陶瓷喷嘴内壁表面进行的研磨和抛光作用, 从而形成出光滑的磨损表面;喷嘴出口部位受到高温炉膛强烈的热辐射后, 内部存在较大的温度梯度和热应力, 导致发生热裂纹和热崩等热冲击损伤, 喷嘴表面凸凹不平。因此, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(W,Ti)C陶瓷水煤浆喷嘴的磨损机制表现为脆性断裂、研磨损伤、热裂纹和热崩等形式。

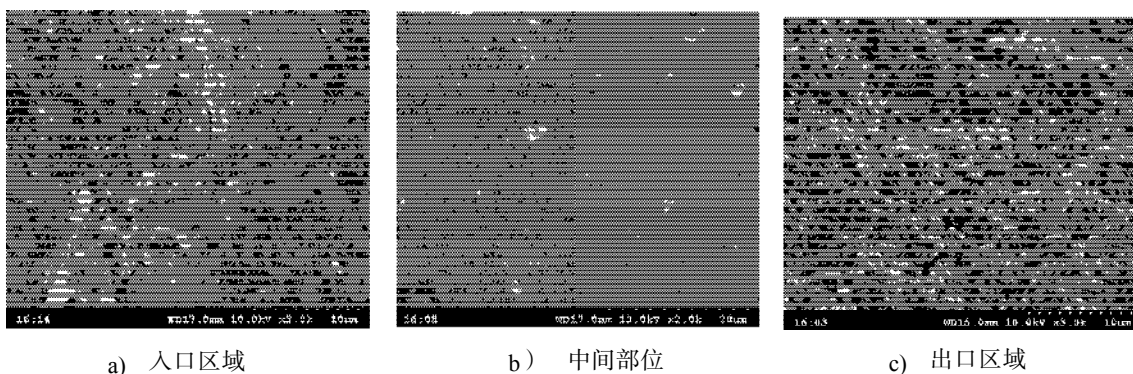


图3 陶瓷喷嘴磨损表面形貌SEM照片

Fig. 3 SEM micrographs of worn surfaces of ceramic nozzles

## 2.2 热应力是磨损失效的主要原因

虽然陶瓷水煤浆喷嘴磨损表面的特征多样,但研究发现,喷嘴在孔径磨损很小的情况下,却往往因出口热崩严重而无法继续使用。为定量分析陶瓷喷嘴产生热裂纹和热崩等热冲击损伤的原因,作者采用有限元方法对稳态时的陶瓷喷嘴进行了分析,边界条件参照文献[10]。

图4为采用ANSYS分析软件得到的 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{W},\text{Ti})\text{C}$ 陶瓷水煤浆喷嘴的热应力分布曲线( $Z$ 向起点为喷嘴出口中心, $X$ 、 $Y$ (径向)起点为喷嘴出口内孔)。

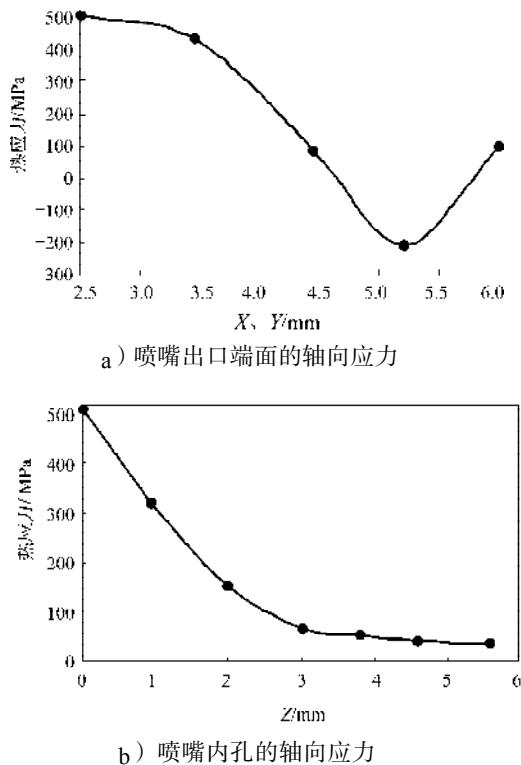


图4 陶瓷水煤浆喷嘴热应力分布曲线

Fig. 4 Thermal stress distribution of CWS ceramic nozzle

可见,沿喷嘴轴向由入口到出口,热应力逐渐升高;出口端面上,沿喷嘴径向由内孔到外圈,喷嘴的热应力逐渐减小。喷嘴出口内径处的热应力最大,数

值为506 MPa。由此可见, $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{W},\text{Ti})\text{C}$ 陶瓷喷嘴出口部位较大的热应力是导致其发生热冲击损伤的主要原因。

## 3 梯度功能陶瓷水煤浆喷嘴的设计

### 3.1 设计思路

影响陶瓷水煤浆喷嘴磨损的因素较多,但其中以喷嘴材料性能影响最大,而材料性能在本质上取决于材料的组成分布规律和显微结构的变化规律。因此,高性能陶瓷水煤浆喷嘴材料的设计应根据喷嘴的工作条件和磨损特点,建立起喷嘴材料的组成分布、显微结构与其抗热冲蚀性能之间的关系。梯度功能陶瓷水煤浆喷嘴的设计思路是:通过合理控制梯度陶瓷喷嘴材料成分的空间分布,实现其显微结构及力学性能的梯度变化,使喷嘴的出口、入口部位具有较高的韧性,其它部位具有较高的硬度;并使陶瓷喷嘴在制备过程中形成有利的残余热应力,即喷嘴出口、入口区域处形成残余压应力,以缓解出口部位的热应力,抵消入口部位的机械冲击应力,从而全面提高陶瓷水煤浆喷嘴的抗热冲蚀磨损能力。

### 3.2 设计模型

设计FGM时,梯度层数越多,其组成分布、显微结构及力学性能的分布就越接近理想的连续梯度,但这会导致制备工艺复杂,成本提高。图5为3种 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{W},\text{Ti})\text{C}$ 梯度功能陶瓷水煤浆喷嘴的设计模型。图中颜色深浅表示材料成份的变化,颜色越深表示 $(\text{W},\text{Ti})\text{C}$ 含量越多;反之, $(\text{W},\text{Ti})\text{C}$ 含量越少。图5a)表示 $(\text{W},\text{Ti})\text{C}$ 含量呈单向梯度变化,其中 $(\text{W},\text{Ti})\text{C}$ 变化局限于喷嘴出口区域,喷嘴其它区域为均质材料;图5b)、c)则为 $(\text{W},\text{Ti})\text{C}$ 成份呈双向梯度变化,其变化规律是: $(\text{W},\text{Ti})\text{C}$ 含量由出口到中间或由入口到中间逐渐降低,其中图5b)为对称梯度变化,图5c)为非对称梯度变化。

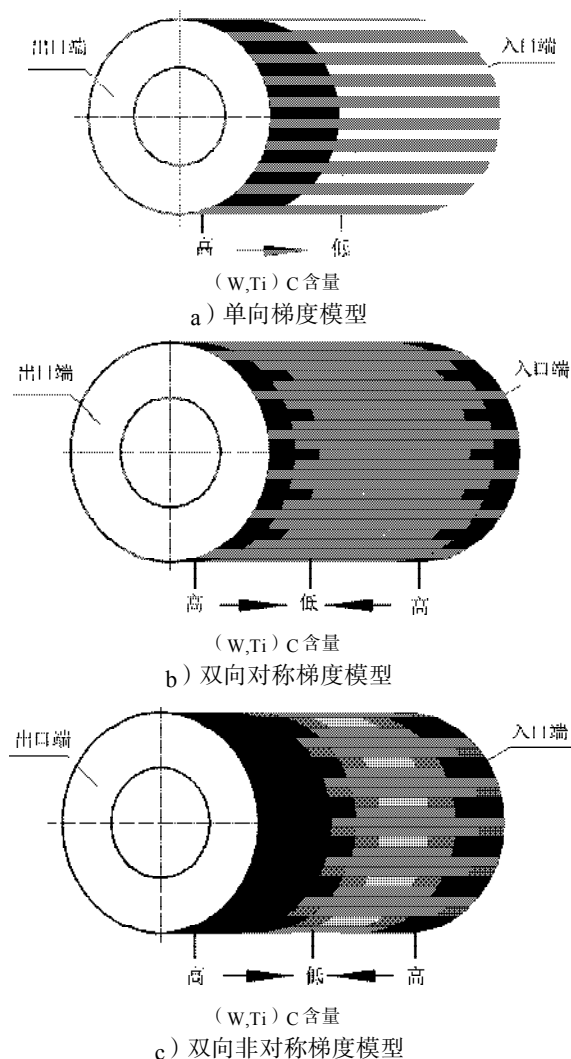


图5 梯度功能陶瓷水煤浆喷嘴设计模型

Fig. 5 Design models of FGM ceramic CWS nozzle

### 3.3 残余热应力分析

为了解  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{W,Ti})\text{C}$  梯度功能陶瓷水煤浆喷嘴制备后内部形成残余热应力的情况, 以图 5 a) 所示单向梯度模型为例, 采用有限元方法进行分析, 建立如图 6 所示的坐标系。

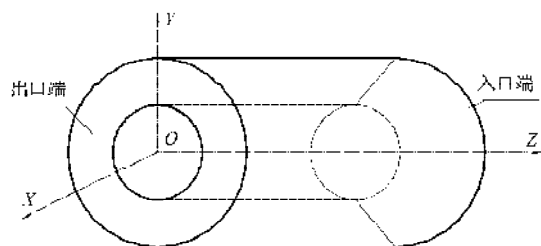


图6 喷嘴三维坐标系

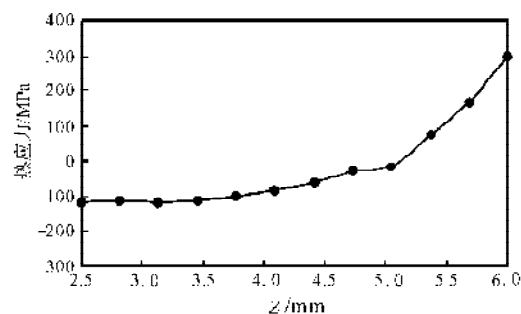
Fig. 6 Tri-dimensional coordinates of nozzle

喷嘴材料为  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{W,Ti})\text{C}$ , 不同梯度层对应材料的物理和热学性能参数如表 1 所示<sup>[14]</sup>。

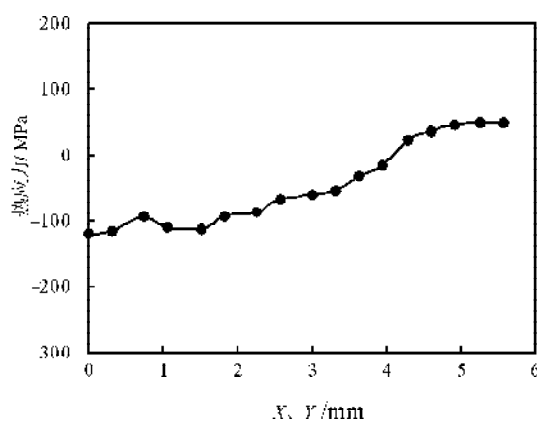
计算时, 假设材料各向同性, 物性参数不随温度变化而改变, 无塑性变形。喷嘴的成分分布指数  $n=1$ ,

梯度层数 5 层, 其中喷嘴出口表层  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{W,Ti})\text{C}$  的体积分数为 50%, 其它各层由外向内依次递减, 分别为 45%、40%、35% 和 30%; 喷嘴总长度 13 mm。设定梯度陶瓷喷嘴材料的热压烧结温度为 1700 °C, 保温后冷却至室温 20 °C, 温度变化为 1680 °C。由于喷嘴不同梯度层材料的物性参数不同, 将使制备后的喷嘴内部产生残余应力<sup>[15,16]</sup>。

通过分析可得到图 7 所示的梯度功能陶瓷喷嘴的残余应力分布曲线。



a) 喷嘴出口端面的轴向应力



b) 喷嘴内孔的轴向应力

图7 陶瓷喷嘴残余热应力分布曲线

Fig. 7 Residual thermal stress distribution of ceramic nozzle

由图 7 a) 可见, 喷嘴出口端面在直径 10 mm 的圆环内, 其轴向残余应力数值为负值; 而图 7 b) 则显示内孔轴向在离出口处 3 mm 的范围内其残余应力为负值。这也就是说, 喷嘴出口部位形成了有利的残余压应力, 其中喷嘴出口内径处的残余压应力最大, 数值为 119 MPa。

上述分析结果与图 4 所示出口部位的热应力在方向上正好相反。因此, 梯度陶瓷喷嘴出口部位的残余压应力将对喷嘴工作时内部的热应力产生抵消作用, 从而有效减少喷嘴发生热冲击损伤。

利用图 4 a) 所示的设计模型, 作者已成功制备出热压  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{W,Ti})\text{C}$  梯度功能陶瓷水煤浆喷嘴, 并投入现场试验。从目前的试验结果来看, 新型梯度功能

陶瓷水煤浆喷嘴的抗热冲蚀性能较均质陶瓷喷嘴要好。如果通过优化喷嘴材料的组成分布和制备工艺,

增大喷嘴内部的残余压应力,有望进一步提高陶瓷水煤浆喷嘴的抗热冲蚀磨损能力。

表 1 梯度陶瓷水煤浆喷嘴各层的物理性能参数

Table 1 Physical properties of CWS ceramic nozzles

| (W, Ti) C 体积分数 / % | 密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 热导率 $k / (\text{W} \cdot (\text{mK})^{-1})$ | 线膨胀系数 $\alpha / \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ | 弹性模量 $E / \text{GPa}$ | 泊松比 $\nu$ |
|--------------------|---|---|---|-----------------------|-----------|
| 30                 | 5.66  | 35.16                                       | 7.660   | 424.7                 | 0.242     |
| 35                 | 5.94  | 34.35                                       | 7.522   | 432.6                 | 0.239     |
| 40                 | 6.22  | 33.55                                       | 7.386   | 440.7                 | 0.235     |
| 45                 | 6.50  | 32.77                                       | 7.251   | 448.9                 | 0.232     |
| 50                 | 6.78  | 32  | 7.117   | 457.2                 | 0.229     |

## 4 结论

1) 水煤浆喷嘴工作时具有环境温差大、冲蚀介质多相、冲蚀角度多变、工作应力多种等特点;

2) 陶瓷水煤浆喷嘴磨损表面具有多种特征,其中出口部位存在的较大热应力是导致其磨损失效的主要原因;

3) 梯度功能陶瓷水煤浆喷嘴内部的残余压应力能有效缓解喷嘴工作时的热应力,提高喷嘴的抗热冲蚀磨损能力。

## 参考文献:

- [1] 新野正之, 平井敏雄, 渡边龙三. 倾斜机能材料——宇宙机用超耐热材料を目指して[J]. 日本复合材料学会志, 1987, 13(6): 257-260.
- [2] Dolbow E, Gosz M. On the computation of mixed-mode stress intensity factors in functionally graded materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(9): 2557-2574.
- [3] Yue Z Q, Xiao H T, Tham L G. Boundary element analysis of crack problems in functionally graded materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40 (13-14): 3273-3291.
- [4] Tekmen C, Ozdemir I, Celik E. Failure behaviour of functionally gradient materials under thermal cycling conditions [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 174-175: 1101-1105.
- [5] Vena P, Gastaldi D. A Voronoi cell finite element model for the indentation of graded ceramic composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2005, 36(2): 115-126.
- [6] Zhao Jun, Ai Xing, Li Yanzheng, et al. Thermal shock resistance of functionally gradient solid cylinders[J]. Materials Science and Engineering, 2006, 418 (A): 99-110.
- [7] Szafran M, Konopka K, Bobryk E, et al. Ceramic matrix composites with gradient concentration of metal particles[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007, 27(2-3): 651-654.
- [8] Andertov á J, Havrda J, Tl á skal R. Preparation of functionally graded alumina ceramic materials with controlled porosity[J]. Studies in Surface Science and Catalysis, 2007, 160: 629-637.
- [9] 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, 1998.
- [10] Deng Jianxin, Ding Zeliang, Yuan Dongling. Erosion wear mechanisms of coal-water-slurry (CWS) ceramic nozzles in industry boilers[J]. Materials Science and Engineering, 2006, A417: 1-7.
- [11] Ding Zeliang, Deng Jianxin, Li Jianfeng. Wear behavior of ceramic nozzles in coal water slurry burning[J]. Ceramics International, 2004, 30(4): 591-596.
- [12] Shirley C, Tsai, Truc Vu. Atomization of coal-water slurry using twin-fluid jet atomizer[J]. Fuel, 1987, 66: 1596-1602.
- [13] 夏德宏, 李小民, 赵禹民. 长寿命水煤浆喷嘴燃烧器的实验研究[J]. 冶金能源, 2003, 22(1): 42-46.
- [14] 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[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [15] 米谷茂. 残余应力的产生和对策[M]. 朱荆璞, 邵会孟译. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [16] 严宗达, 王洪礼. 热应力[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.

(责任编辑: 张亦静)