

Technology Status and Development Trend of Slide Gate

Luju Zeng^{1,2}, Songlin Chen^{1,2*}, Dafan Zeng¹, Lei Chen^{1,2}, Xin Yan^{1,2}, Yawei Li³, Shaobai Sang³, Xianxun Yi³

¹Ruitai Materials Technology Co. Ltd., China Building Materials Academy, Beijing

²Energy-Saving and Environment-Friendly Refractories for Metallurgical Industry of Engineering Research Center Jiangsu Province, Yixing

³The State Key Laboratory Breeding Base of Refractories and Ceramics, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan

Email: *chensonglinc@126.com

Received: Jan. 23rd, 2014; revised: Feb. 18th, 2014; accepted: Feb. 25th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The history and technology status of slide gate are reviewed, and development trend of slide gate is described. It points out that metal-ceramic bond is an important binding mode to improve the performance of slide gate and un-fired and non-dipped pitch slide gate is the development trend in the future because of its being saving-energy and environment-friendly. Many technologies such as nano-catalytic technologies, composite binders technologies, metal-ceramic bonding technologies, and micro-porous technologies provide an effective technical support for industrial production and promotion applications of un-fired and non-dipped pitch slide gate.

Keywords

Slide Gate; Metal-Ceramic Bonding; Un-Fired and Non-Dipped Pitch; Development Trend

滑板的技术现状和发展趋势

曾鲁举^{1,2}, 陈松林^{1,2*}, 曾大凡¹, 陈磊^{1,2}, 闫昕^{1,2}, 李亚伟³, 桑绍柏³, 易献勋³

¹中国建筑材料科学研究总院瑞泰科技股份有限公司, 北京

*通讯作者。

²江苏省节能环保型冶金用高温耐火材料工程技术研究中心, 宜兴

³武汉科技大学耐火材料与高温陶瓷国家重点实验室培育基地, 武汉

Email: [*chensonglinc@126.com](mailto:chensonglinc@126.com)

收稿日期: 2014年1月23日; 修回日期: 2014年2月18日; 录用日期: 2014年2月25日

摘 要

本文回顾了滑板的发展历史和现状, 指出金属-陶瓷结合是提高滑板性能的重要结合方式。不烧不油浸滑板既节约能源又无污染排放, 是未来滑板的发展方向。纳米催化技术、复合结合剂技术、金属-陶瓷结合技术、微孔技术等为不烧不油浸滑板的工业化生产和推广应用提供了有效的技术支撑。

关键词

滑板; 金属-陶瓷结合; 不烧不油浸; 发展趋势

1. 引言

我国是世界第1大钢铁大国, 2012年全球粗钢总产量为15.478亿吨, 其中中国7.165亿吨, 占全球46.3%。钢铁工业产值占到全国工业总产值10%, 资产占全国工业资产总值的10.4%[1]。自上世纪60年代以来, 连铸工艺和技术被应用于钢铁工业, 连铸技术比传统模铸具有大幅提高金属收得率、提高铸坯质量、节约能源等显著经济优势, 已为世界各国普遍采用。连铸技术的发展彻底改变了炼钢车间的生产流程和物流控制, 为车间生产的连续化、自动化和信息技术的应用, 及大幅度改善环境和提高产品质量提供了条件[2]。

在连铸生产工艺中, 滑动水口系统是连铸机浇铸过程中钢水的重要控制装置, 能够精确地调节钢水从钢包到中间包的流量, 使流入和流出的钢水达到平衡, 从而使连铸操作更容易控制。滑动水口系统因其可控性好, 能提高炼钢生产效率而得到迅速发展。现在, 在钢包、中间包上国内外普遍使用了滑动水口系统。滑动水口系统由上水口、滑板和下水口组成。滑板是直接控制钢水流量和流速、决定滑动水口系统功能的部件, 被认为是滑动水口系统中最重要的部分。由于滑板使用过程中反复经受钢水的冲刷、化学侵蚀以及强烈的热冲击, 因此滑板为满足精确控流功能, 必须具有耐高温、强度高、抗侵蚀性能好、抗热震性能好、抗氧化性高和蠕变小等优良特性[3]-[6]。

2. 滑板的发展和存在的问题

2.1. 烧成滑板的发展

1964~1965年, 德国和美国在连铸系统中首次采用滑板; 1967年, 滑板被引入日本, 之后滑板在生产工艺设计和制造上都得到长足的发展。迄今滑板经历50多年的发展已成为品种众多、工艺多样的功能性耐火材料。材质上分, 滑板经历了高铝质、刚玉-莫来石质、铝碳质、无硅铝碳质和铝锆碳质, 及碱性的镁尖晶石质、尖晶石碳质、镁尖晶石碳质和碳结合镁碳质, 还有锆质或锆环镶嵌式滑板; 结合形式上, 滑板经历了由陶瓷结合、碳结合向非氧化物结合、金属结合以及多种复合结合形式的发展; 组成方式上, 滑板由单一的材料向多种材料复合结构发展; 功能上, 滑板由控制钢水流量单一功能到控流和挡渣多功能方向发展; 工艺上, 由机压成型滑板到机压成型到机压、浇注、等静压成型大型的滑板多种方式[7]-[10]。

烧成铝碳滑板和铝锆碳滑板是目前国内大中型钢铁企业主流使用的滑板。铝碳质滑板是在早期高铝质滑板的基础上加入碳素材料发展而来的,以提高滑板抗侵蚀性能和抗热震性能,并经还原气氛下烧成后形成陶瓷-碳结合。传统的铝碳质滑板由于抗氧化性差且结构疏松,抗侵蚀性能差,抗热震性能欠佳。上世纪80年代后期,含锆原料被引入铝碳材料中开发了铝锆碳滑板,相对于滑板其他组分而言,氧化锆原料具有随着温度升高具有晶型转变并伴有体积收缩的特性,利用这一优点可以提高滑板材料的韧性和强度,同时 ZrO_2 也具有优良的抗侵蚀性能。将含锆原料引入到铝碳质材料中开发出的铝锆碳质滑板抗热震性能进一步提高,且其对不同组成的钢液耐侵蚀性强、适应性较好。在日本和欧洲还有新型滑板,如镁碳质、尖晶石碳质、氧化锆质等[11]-[14]。表1列出了5种材质滑板的理化制备和性能。

2.2. 烧成滑板存在的问题

我国100 t以上的大型钢包滑板主要以烧成铝锆碳材质为主,使用寿命2~4次。中小型钢包用滑板考虑到成本,材质主要为铝碳质,工艺分烧成、轻烧(中温处理)和不烧3种,寿命通常为1~3次。和国际先进产品相比有较大的差距。主要问题表现在四方面:1)滑板材料的中温和高温强度有待提高,以改善滑板材料的抗冲刷性和抗磨损性;2)滑板材料的抗热震性有待于提高,以提高其使用的安全性及连续使用炉数;3)碳含量较高滑板,碳素材料氧化后削弱了滑板材料的组织结构,加速了滑板材料的损毁,材料的抗氧化性能有待进一步提高;4)碳含量较高滑板使用过程中对钢液有增碳作用,难以满足洁净钢(特别是低碳钢和超低碳钢)连铸生产的要求[15]-[17]。

烧成铝锆碳滑板存在埋碳烧成高能源消耗、浸油工艺操作环境恶劣、氮化工艺设备复杂等缺点,同时,对新型洁净钢铝锆碳滑板连滑次数少、对洁净钢水有增碳污染等问题[18,19]。铝碳或铝锆碳滑板除配料、混炼、成型工序外,还需要埋碳烧成、浸油、打磨等工序,不仅生产周期长,设备复杂,工艺控制点多。因此,研究生产工艺简单、生产过程洁净、使用寿命长的不烧不油浸滑板成为研究的热点。

Table 1. Physical and chemical properties of alumina-carbon, alumina-zirconia-carbon, magnesia-carbon, spinel-carbon, zirconia-carbon slide gate

表 1. 铝碳质、铝锆碳质、镁碳质、尖晶石碳质、氧化锆质滑板的理化性能

		主流滑板			新型滑板	
		铝碳	铝碳锆	镁碳	尖晶石碳	氧化锆
物理性能	体积密度/ $g\cdot cm^{-3}$	2.8~3.00	3.06~3.18	2.94~3.09	2.90~3.15	4.98~5.35
	显气孔率/%	7.5~9.0	6.0~9.0	4~9	6~10	2~11
	耐压强度/MPa	130~200	150~230	130~180	160~190	150~560
	抗折强度/MPa(1400°C)	11~14	13~16	30~45	30~36	9~14
	热膨胀率/(1500°C)	-	1.0~1.1	1.94	1.26	1.03
化学成分/%	Al_2O_3	70~75	70~75	8~15	23.7	-
	MgO	-	-	80~90	75.3	-
	ZrO_2	-	7~10	-	-	93~97
	F.C	12~15	5~10	3~5	3~4.5	0~2.0
使用性能	适用性	普通钢, 洁净钢			碱性渣, 特种钢, 钙处理钢, 洁净钢, 汽车、造船、仪表品种钢	
	连滑次数	2~3			>4	

3. 不烧不油浸滑板成为滑板未来发展的趋势

3.1. 不烧不油浸滑板的突出优势

不烧不油浸滑板相对烧成滑板由于具有能耗少、工序少、周期短、效率高、成本低、无污染等优点，是滑板走向环保、节能的发展必然趋势。表 2 为烧成滑板和不烧不浸滑板的工艺和性能的比较。

由于不烧不油浸滑板未经烧成处理，其结构与性能与使用条件密切相关，尤其是材料结构会随着使用温度的变化而变化，其性能也会相应发生变化；并且使用过程中滑板的不同部位的温差较大，而且性能要求也不相同。从应用的角度来讲，材料的结构或性能在使用过程中不发生明显的变化，尤其是力学性能不发生明显变化较为理想。因此，对材料的组分设计，尤其是结合系统的设计尤为重要。目前，滑板的结合方式除碳结合外，还有金属结合和陶瓷结合等形式[20,21]。单纯利用碳结合难以获得理想的中低温强度，只要采用复合结合系统才有可能同时获得较高的低温(400℃~500℃)强度、中温(600℃~900℃)强度、高温(1000℃~1600℃)强度。除材料强度外，材料还必须具有一定的韧性和抗热震性。这两种性能对材料的结构提出了更高的要求。若通过合理设计材料组分，适当引入一些增强增韧相或增加材料中的能量耗散机制，也可能在获得高强度的同时提高材料的抗热震性[22]-[24]，减少材料的剥落损坏。

3.2. 不烧不油浸滑板性能的改进

尽管不烧不油浸滑板相对烧成滑板具有能耗少、工序少，周期短，效率高，成本低、无污染等优点，但是，不烧不油浸滑板在使用过程中大量存在扩孔大、易剥落或开裂等问题，其结合强度和抗热震性有待进一步提高。由于不烧不油浸滑板未经烧成过去，其在使用过程中，尤其是在中温区(500℃~600℃)，由于结合剂酚醛树脂的碳化裂解，滑板强度急剧下降而造成滑板变形甚至开裂。为解决或弱化这问题，通常在不烧滑板中添加大量金属铝，但过多铝粉容易造成富集和局部粘料剥落，尤其在滑板的浇钢口，由于金属含量高，在使用时，金属快速生产陶瓷相而产生应力导致剥落，另外，还可能生成易水化相 Al_4C_3 、 AlN ，极大增加了滑板水化的风险[25]-[28]。

影响不烧不油浸滑板的性能因素除配方外，关键是结合系统。结合系统不仅关系到滑板的强度，也关系到滑板的显微结构和性能。作为滑板的结合系统，单纯依赖某种树脂不能满足滑板低温(400℃~500℃)强度、中温(600℃~900℃)强度、高温(1000℃~1600℃)强度的稳定性，必须选用复合结合系统；同时，还

Table 2. Process and performance comparison between fired slide gates and un-fired and non-dipped pitch slide gates
表 2. 烧成滑板和不烧不油浸滑板工艺和性能比较

品种	烧成滑板	不烧不油浸滑板
工艺/性能		
烧成	烧成，	不烧
能耗	能耗高	无烧成能耗
浸油	需浸油	不需浸油
排放有毒气体	有毒气体	无有害气体
设备	复杂	简单
工艺过程	工艺复杂，难以控制	工艺相对程序少，但技术含量高
生产周期	长	短
工作环境	恶劣	洁净
劳动强度	大	一般
使用性能	性能相对稳定	扩孔大、易剥落或开裂

需通过引入多种金属粉末和特种纳米添料、和对碳源石墨化处理以改善滑板的结合系统,才能使得这种金属-陶瓷结合的不烧不浸滑板具有较高的低温强度、中温强度和高温强度。北京科技大学将金属过渡相的思想应用到耐火材料中等,研究了金属过渡相复合耐火材料,认为金属只起过渡作用,在材料制备过程中逐步与其它原料反应生成良好的基质,并与颗粒紧密地复合在一起[29]-[31]。其中,金属相在材料中所起的作用如下:1) 金属相熔点低于材料的烧成温度,可以起到烧结助剂的作用,提高材料的致密度;2) 金属的塑性可对材料起增韧作用,从而改善了其抗热震性能;3) 材料在非氧化气氛下使用时,工作表面生成非氧化物新相,并降低材料的显气孔率,从而提高了材料的抗渣侵蚀性能。

金属-陶瓷结合不烧不油浸的环境友好型滑板是在金属过渡相理论体系的指引下发展的新型滑板。通过复合结合剂,引入多种金属粉末和种纳米添料、和对碳源石墨化处理能使得这种金属-陶瓷结合的不烧不油浸滑板具有较高的低温强度、中温强度和高温强度。且滑板在使用过程中反应生成金属-陶瓷结合相,形成的多结晶集合相填充在气孔内,有利于提高材料的强度。同时,随温度的升高,陶瓷相将CO还原成C,从而抑制碳的氧化,加入Sialon/Si₃N₄、AlN等特种添加剂还将改善滑板的抗侵蚀性、抗热震,抗折强度等性能[32]-[35]。金属-陶瓷结合不烧不油浸的环境友好型滑板的研究已受到各国科研人员的关注。

3.3. 新型纳米催化金属-陶瓷不烧不油浸滑板工业化生产和应用

铝碳滑板的损毁情况主要是由于碳的损失而造成,其中主要为碳的氧化和碳的溶解。为解决碳氧化等问题,常用入抗氧化添加剂的一些添加剂有金属铝(Al)、硅(Si)、铝镁合金(Al-Mg)、镁(Mg)、碳化硅(SiC)、碳化硼(B₄C)、硼化锆(ZrB₂)、硼化钙(CaB₆)等金属、非金属以及各种非氧化物。利用添加剂与氧更强的结合能力来达到阻止碳与氧的结合作用,同时还利用热处理过程中非氧化晶须的生成来加强铝碳滑板的性能[36]-[39]。

滑板中氧化物颗粒的大小、鳞片石墨和树脂碳的分布状态、微气孔的分布状态、初始裂纹尺寸、数量和分布等都会对材料的力学性能及抗热震性能产生重要影响。在Al₂O₃-C、MgO-C等含碳耐火材料中引入不同形态和粒度的金属Al粉、单质Si粉、炭黑及SiC等原料,在耐火材料制备过程或使用过程中,原位反应生成碳化物、氮化物以及各种形态的晶须等,均可改善了耐火材料的高温力学性能和抗热震性[40]-[43]。氧化铝初晶细小、氧化铝和二氧化锆共晶部分呈镶嵌组织的颗粒可以提高滑板耐火材料的抗热震性。

瑞泰科技研究的纳米催化金属-陶瓷结合不烧不油浸的环境友好型滑板的特点主要有:1) 添加了含铁催化剂(硅铁纳米粉和氮化硅铁纳米粉)。碳素作为滑板此类碳复合耐火材料的重要组分,焦碳和碳黑都属于无定形碳,无定形碳与石墨的性能相比,导热系数小,缺点在于气孔率高,须经浸渍沥青焦油填隙处理。加入含铁催化剂,在滑板服役过程中,经中温区(600℃~700℃)时,无定形碳在催化剂作用下,焦化获得碳纳米管,由于碳纳米管具有高比表面积和高反应活性,能在较低温度下能快速和添加的金属铝反应,形成高强度的陶瓷结合,且降低了滑板的气孔率,使材料不要经过浸渍沥青焦油工艺处理。2) 引入有机硅、酚醛树脂和聚羧酸复合树脂结合剂。有机硅、酚醛树脂和聚羧酸复合树脂结合剂对滑板原料具有良好的润湿性,提高了混练质量和砖坯的体积密度,降低砖坯的显气孔率3%~5%,使滑板无需浸渍沥青焦油填隙处理。另外引入复合树脂结合剂,使得滑板在生产和服役过程中,材料的结合方式除树脂结合、碳结合外,还有金属塑性结合,金属-陶瓷结合等多种形式,获得较高的低温(400℃~500℃)强度、中温(600℃~900℃)强度、高温(1000℃~1600℃)强度。降低了材料的强度对温度的敏感性,保持了材料强度一致性,并提高材料的抗热震性。3) 引入增强增韧相锆英砂,在滑板服役过程中锆英砂能分解得到氧化锆,而氧化锆具有随着温度升高晶型转变并伴有体积收缩的特性,可提高滑板材料的韧性和强度,同

时氧化锆具有优良的抗侵蚀性能[44]-[47]。

纳米催化金属 - 陶瓷结合不烧不油浸的环境友好型滑板具有优异的抗氧化性、抗热震性、抗侵蚀性，其主要的性能耐压强度 ≥ 120 MPa、常温抗折强度 ≥ 15 MPa、高温抗折强度 ≥ 12 MPa、体积密度 ≥ 3.0 g/cm³、显气孔率 $\leq 3.0\%$ 。纳米催化金属 - 陶瓷结合不烧不浸的环境友好型滑板应用于某钢厂的连铸大型钢包，可连续滑动 4 次以上，还用于马某山钢厂的转炉挡渣，取得了优良的使用业绩。由于其工艺过程不烧节约能源消耗，符合节能减排趋势；不浸沥青作业环境洁净，无污染气体排放，属环境友好型耐火材料升级产品，符合国家节能减排和低碳经济政策下重点推广和保护的新型材料要求，以获高新技术产品称号，有望大规模的工业化推广应用。

4. 结语

随着快速、高效连铸技术的发展及钢种的增加，滑板的使用条件日益苛刻，并且钢厂要求提高滑板寿命以满足多炉连铸需要，适用性广、生产周期短、成本低、能耗少、无污染的金属 - 陶瓷结合不烧不油浸的环境友好型滑板具有重要的推广价值。

致 谢

本文得到国家科技支撑计划(No. 2013BAE03B01-10)；江苏省科技基础计划(No. BM2013206)；宜兴市科技计划(No. 20130419032713)资助，在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 世界钢铁协会 (2013) 2012 年全球钢铁产量报告.
- [2] 刘玠 (2006) 连铸及炉外精炼自动化技术. 冶金工业出版社, 北京.
- [3] 张煦等 (2007) 连铸用滑板的发展概况及其损毁机理. *耐火材料*, **3**, 225-229.
- [4] 龚江宏 (2002) 陶瓷材料断裂力学. 清华大学出版社, 北京.
- [5] 陈方等 (2009) 加入 Si, Si/Al 对高碳 Al₂O₃-C 材料抗热震性的影响. *硅酸盐通报*, **3**, 421-425.
- [6] 石凯等 (2007) Al₂O₃-Al-C 材料加热过程的变化. *耐火材料*, **1**, 22-25.
- [7] 周川生 (2003) 连铸耐火材料的新进展. *连铸*, **1**, 5-7.
- [8] Kurshina, Y., et al. (2003) Improvement of Brick Texture and Shape for Valve Plate. *Shinakawa Technical Report*, **46**, 45-58.
- [9] 李亚伟等 (2001) 含氮铝炭质滑动水口生产与使用. *武汉科技大学学报(自然科学版)*, **4**, 331-333.
- [10] 杨晓春等 (2003) 金属 - 氮化物结合滑板的研制与应用. *耐火材料*, **5**, 271-273.
- [11] 徐利华等 (2004) 铝炭质滑板的抗侵蚀特征分析. *耐火材料*, **4**, 242-244.
- [12] Mohamed, E., et al. (2004) Carbon Based Refractories. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, **112**, 517-532.
- [13] Mark, R.S., et al. (2009) Composite Design Technology for High Performance Slide Gate. *Proceedings of UNITECR*, Salvador, 13-16 October 2009, 250-253..
- [14] Mark, R.S., et al. (2009) Improved Basic Carbon Refractory Material for Slide Gate Plate Application. *Proceedings of UNITECR*, Salvador, 13-16 October 2009, 249.
- [15] 贺智勇等 (2004) 铝炭质滑板在浇铸钙处理钢时的化学侵蚀. *耐火材料*, **5**, 316-317.
- [16] 杨晓春 (2003) 金属 - 氮化物结合刚玉质滑板抗损毁机理研究. 河北理工学院硕士学位论文, 河北.
- [17] 岳卫东等 (2006) 低碳 Al₂O₃-β-Sialon 烧成滑板的热机械性能及显微结构. *耐火材料*, **5**, 342-345.
- [18] 陈永强等 (2008) 浸渍沥青对不烧铝炭质滑板性能的影响. *耐火材料*, **6**, 455- 457.
- [19] 张雪松等 (2007) 镁碳砖用中间相沥青 - 酚醛树脂结合剂的研制. *耐火材料*, **4**, 271-273.
- [20] 肖国庆等 (2005) 材料物理性能. 中国建材工业出版社, 北京.
- [21] 李亚伟等 (2005) 热处理温度对有机硅树脂结合不烧铝炭质滑板性能的影响. *耐火材料*, **5**, 321-325.

- [22] 王继刚等 (2002) B_4C 在石墨高温粘接过程中的组成和结构变化及改性机理. *新型炭材料*, **2**, 16-21.
- [23] 王国飞 (2009) 过渡金属化合物掺杂酚醛树脂及其在铝碳材料中应用. 武汉科技大学硕士学位论文, 武汉.
- [24] 岳卫东等 (2006) 金属 Al-Si 复合不烧铝碳滑板材料的热机械性能及显微结构. *耐火材料*, **3**, 177-180.
- [25] Aneziris, C.G., et al. (2009) Interactions of Carbon Nanotubes in Al_2O_3 -C Refractories for Sliding Gate. *Proceedings of UNITECR*, Salvador, 13-16 October 2009, 8-11.
- [26] 李友胜等 (2007) 加入 Si 粉对低碳铝镁碳材料性能的影响. *耐火材料*, **4**, 245-248.
- [27] 刘新红等 (2007) Si 粉加入量对刚玉制品性能、组成和结构的影响. *耐火材料*, **1**, 13-17.
- [28] 方磊等 (2007) 单质 Si 粒度和含量对烧成 Al_2O_3 - ZrO_2 -C 材料强度与结构的影响. *耐火材料*, **3**, 183-187.
- [29] 洪彦若等 (2003) 非氧化物复合材. 冶金工业出版社, 北京.
- [30] Zhong, X.C. (2008) Progress in Research and Development of Refractory Oxide-Non Oxide Composites. *China's Refractories*, **17**, 1-5.
- [31] 牛森森等 (2010) Al 粉加入量对凝胶粉结合铝镁不烧砖力学性能的影响. *硅酸盐通报*, **4**, 930-934.
- [32] Zhong, X.C. (2007) Refractory Oxide-Non-Oxide Composites. *American Ceramic Society Bulletin*, **86**, 62-66.
- [33] 王林俊等 (2004) Al 和 Si 对 MgO - Si_3N_4 复合材料强度和显微结构的影响. *耐火材料*, **6**, 420-422.
- [34] 石凯等 (2007) 金属 Al-Si 结合 Al_2O_3 -C 滑板的性能和使用. *耐火材料*, **3**, 205-207.
- [35] 卜景龙等 (2005) 金属-氮化物结合刚玉滑板的结构与性能. *硅酸盐学报*, **2**, 253-257.
- [36] 高振昕等 (2007) 滑板组成与显微结构. 冶金工业出版社, 北京.
- [37] 钟香崇 (2008) 氧化物-非氧化物复合材料研究开发进展. *耐火材料*, **1**, 1-4.
- [38] Kiyota, Y., et al. (2003) Development of Basic Sliding Nozzle Plate for Steel Ladle. *耐火物*, **12**, 572-578.
- [39] Chert, D.J., et al. (2009) Preparation of ZrB_2 Based Hybrid Composites Reinforced with SiC Whiskers and SiC Particles By Hot-Pressing. *Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, **27**, 792-795.
- [40] 李新士等 (2006) 单质硅加入量对铝碳材料力学性能和抗氧化性能的影响. *耐火材料*, **1**, 77-78.
- [41] 李有奇等 (2006) 金属 Zn 粉对烧成 Al_2O_3 -C 材料性能和显微结构的影响. *硅酸盐通报*, **5**, 158-161.
- [42] 岳卫东等 (2002) 低碳 Al_2O_3 - β -SiAlON 烧成滑板的热机械性能及显微结构. *耐火材料*, **5**, 342-345.
- [43] Rigaud, M., et al. (2002) Alumina and Magnesia Based Castables Contain Graphite: A Comparison. *Iron and Steel Maker*, **10**, 45-51.
- [44] Pavel, B.S., et al. (2010) Theoretical Study of Elastic Properties of SiC Nanowires of Different Shapes. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **10**, 4992-4997.
- [45] Gamier, V., et al. (2005) Influence of SiC Whisker Morphology and Nature of SiC/ Al_2O_3 Interface on Thermomechanical Properties of SiC Reinforced Al_2O_3 Composites. *Journal of the European Ceramic Society*, **25**, 3485-3493.
- [46] 任楨等 (2010) 加入 Al 粉和 Si 粉对低碳 MgO - Al_2O_3 -C 材料性能的影响. *耐火材料*, **1**, 38-40.
- [47] 卜景龙等 (2009) ZrO_2 -AlN 复相材料的制备与性能研究. *陶瓷*, **2**, 28-32.