

防  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着功能耐火材料的研究进展

□ 赵世柯 王 刚 江 莞 黄校先 郭景坤

中科院上海硅所高性能陶瓷和超微结构国家重点实验室 上海 200050

**摘 要** 连铸工艺中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在浸入式水口内壁附着造成的堵塞严重影响了生产效率, 开发防止  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着的新材料成为解决这一问题的主要方向。本文对几类具有防  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着作用的材料和防附着机理及其研究现状进行了介绍, 探讨了浸入式水口用耐火材料今后可能的研究重点。

**关键词**  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着机理, 功能耐火材料, 浸入式水口, 研究进展

连铸工艺是 20 世纪 70 年代发展起来的, 之后得到迅速推广和发展。浸入式水口是连铸系统中的一个重要部件, 现在各炼钢厂中普遍使用的浸入式水口是采用  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$  材料制作的。但是, 在多炉连铸过程中,  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$  质浸入式水口内壁常常因为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的附着而发生堵塞, 严重影响了生产效率。且附着物在浇注过程中容易脱落, 掉入钢水中, 导致钢流不稳, 从而影响钢坯的质量。在浇铸 Al 镇静钢、含 Al 钢、含 Ti 钢和稀土钢时, 堵塞现象尤其严重<sup>[1,2]</sup>。

为了解决这一问题, 耐火材料工作者开展了大量的研究, 开发出了一些有望解决  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着问题的新材料。由于这类材料除了起到普通耐火材料的作用外, 通常还可以通过与钢水反应以调整钢水的组成, 改善钢坯的质量, 因而又被称作功能耐火材料。本文主要介绍防  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着浸入式水口用材料方面的研究进展。

## 1 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 附着机理

炼钢过程中, 为了除去钢水中的氧, 常常加入一些 Al、Ti 等脱氧剂。关于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的附着机理, 研究表明, 附着在浸入式水口内壁的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  主要来自钢水中脱氧剂的氧化, 可以分成两种情况<sup>[2~4]</sup>:

(1) 脱氧剂和钢水中的氧发生反应, 形成以

$\text{Al}_2\text{O}_3$  为主要成分的聚结体。

(2) 耐火材料中的  $\text{SiO}_2$  和碳促使  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的形成。

通过上述两种途径形成的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在表面张力的作用下就会粘附在水口的内壁, 从而发生多炉连铸时的堵塞现象。此外, 水口内表面的温度梯度、粗糙程度及水口材料与钢水之间的润湿特性对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着也有重要影响。附着物的化学组成, 除了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  外, 还有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等。

## 2 防 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 附着的方法

根据  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的附着机理, 人们已经探索出一些较为有效的防  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着的方法。目前普遍采用的方法是从连铸系统耐火材料的不同部位向钢液中吹氩气, 吹入钢液中的氩气可使夹杂物上浮, 从而减小了脱氧生成物的附着频率。但是, 吹入钢液中过剩的氩气进入结晶器, 容易使结晶器内发生沸腾, 在钢坯内形成微气孔, 降低钢坯的质量<sup>[5]</sup>。改善水口结构虽可以在一定程度上防止  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的附着, 但同时也提高了制造成本。因此, 开发具有防止  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着功能的新材料成为当前解决这一问题的主要方向。

根据前面的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着机理可知, 如果所用材料与钢水不润湿或通过与钢水反应在界面上生成液相膜, 则钢水中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  很难附着在水口的内壁上, 附着的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  也很容易被流动的钢水冲走。目前开发出的防  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着材料, 主要就是这两方面进行考虑的。

### 2.1 与钢水润湿性差的材质

氮化物、碳化物、硼化物以及它们的复合材料与钢水润湿性差, 如果浸入式水口内壁采用这类材

\* 赵世柯, 男, 1970 年生, 博士。

收稿日期: 2001 - 03 - 09

编辑: 李光辉

料,钢水中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  就很难附着。例如,目前已开发出  $\text{BN}$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{ZrB}_2$  及  $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{BN} - \text{C}$ 、 $\text{BN} - \text{AlN} - \text{C}$  等材料,这些材料的采用可以有效地减少  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的附着<sup>[6]</sup>。但是,由于这些材料所用的原料须经人工方法合成,制造成本高,应用上难以推广<sup>[5,7]</sup>。

## 2.2 与钢水反应生成低熔点化合物的材质

根据采用与钢水反应生成低熔点化合物的材质可以减轻  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着的原理,人们一方面可以通过添加各种添加剂等措施对原有材质(如  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$  材料)进行改进,另一方面也可以开发出一些新材质。下面分别予以介绍。

### 2.2.1 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$ 材料的改进

文献[8]报道了各种添加剂对  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$  材料防  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着性的影响。 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$  基体材料由 75% 电熔刚玉和 25% 鳞片状石墨组成,外加 10% 的各种添加剂。这些添加剂包括碳酸钠系、钙系、氟化物系( $\text{LiF}$ 、 $\text{CaF}_2$ )和硼化物系( $\text{BN}$ 、 $\text{B}_4\text{C}$ )化合物,以及含钠玻璃系列。

将添加上述添加剂的试样浸渍于高温的钢水中,然后检测不同浸渍时间下各种试样的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着情况。浸渍试验结果表明,添加磷酸钠玻璃、 $\text{LiF}$ 、 $\text{CaF}_2$  等成分对抑制  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着是有效的,但添加  $\text{CaF}_2$  比添加磷酸钠玻璃和  $\text{LiF}$  效果更好。其原因被认为是这些添加剂可以在材料表面生成低熔点相,低熔点相容易被流动的钢水冲走,从而起到了防止  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着的作用。但是,添加磷酸钠玻璃和  $\text{LiF}$  的材料经长时间浸渍后, $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着量增加,因为这些添加物在高温下容易分解或蒸发,生成的低熔点相量少,无法维持持久的效果;而  $\text{CaF}_2$  在高温下不会发生分解或蒸发,能够通过与钢水反应不断地在材料表面生成低熔点相,从而可以长时间地抑制  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的附着。

Miyagawa 等<sup>[9]</sup>在研究浇铸不锈钢用浸入式水口时,将  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$  质材料中的刚玉相( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ )改用  $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$ ),发现不但可以改善材料的防  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着性能,同时也提高了材料的抗剥落性能。为了保持材料的强度,防止生成游离态的  $\text{Na}_2\text{O}$ ,所用的  $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$  均为粗颗粒,细粉部分仍用刚玉相。在连铸机上对材料的防  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着效果进行了检验。结果表明,采用  $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$  的材料只出现轻微的附着现象,附着物成分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Na}_2\text{O}$ 。

其机理是使用过程中  $\text{Na}_2\text{O}$  从  $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$  中释放出来在材料表面与钢水反应形成一层玻璃膜,抑制了附着。此外,由于  $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$  的热膨胀系数小,材料的抗热震剥落性也有一定程度的提高。

### 2.2.2 $\text{CaO} - \text{ZrO}_2 - \text{C}$ 材料

$\text{CaO} - \text{ZrO}_2$  系复合耐火材料是应连铸工艺发展的要求而开发出来的,主要用于连铸系统中的浸入式水口、长水口、整体塞棒和滑板。该系材料归纳起来主要有以下三种类型:

- (1)  $\text{CaO}$  稳定(或部分稳定)  $\text{ZrO}_2$  材料;
- (2) 以  $\text{CaZrO}_3$  为主晶相的材料;
- (3)  $\text{MgO} - \text{CaO} - \text{ZrO}_2$  材料。

实践证明,选用以  $\text{CaZrO}_3$  为主晶相的材料制造浸入式水口是防止  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着的有效方法,并已获得推广应用。其防止附着的机理与前面类似,即从  $\text{CaZrO}_3$  释放出来的  $\text{CaO}$  与钢水中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应生成低熔点的硅酸盐相。但是通过什么具体的反应生成低熔点相,以及生成相的组成、粘度等,尚未见专门的报道。而这些方面的研究资料对进一步提高材料的使用效果十分重要。

加入  $\text{SiO}_2$  可以促使  $\text{CaZrO}_3$  的分解,同时又参与玻璃相的形成,为  $\text{CaO}$  扩散提供通道,因而可以进一步改善其使用效果<sup>[11]</sup>。另外,调整材料的相组成,提高材料的致密度,可以增加材料与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应的能力,也可以使其防止附着性能得到提高<sup>[6]</sup>。

### 2.2.3 $\text{CaO} - \text{TiO}_2 - \text{ZrO}_2 - \text{C}$ 材料<sup>[10]</sup>

由于  $\text{CaO} - \text{TiO}_2$  系化合物也能和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应生成低熔物,因此推测,采用该类材料也可以有效地防止  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的附着。同样可以推测, $\text{CaO} - \text{TiO}_2$  系化合物与  $\text{ZrO}_2$  的复合也将会起到同样的效果。

实验研究表明上述推测是正确的。在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着实验中,当采用  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{C}$  材料时,能看到平均厚度为 1.0 ~ 3.0 mm 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着层,而采用  $\text{CaTiO}_3 - \text{C}$ 、 $\text{CaO} - \text{TiO}_2 - \text{ZrO}_2 - \text{C}$ 、 $\text{CaTiO}_3 - \text{CaZrO}_3 - \text{C}$  和  $\text{CaZrO}_3 - \text{C}$  时,没有发现  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的附着现象。但在  $\text{CaO} - \text{TiO}_2 - \text{ZrO}_2 - \text{C}$ 、 $\text{CaTiO}_3 - \text{CaZrO}_3 - \text{C}$  和  $\text{CaZrO}_3 - \text{C}$  试样的工作面能看见平均厚度为 0.5 ~ 2.0 mm 的低熔点化合物层。与  $\text{CaZrO}_3 - \text{C}$  材料相比, $\text{CaTiO}_3 - \text{C}$  材料与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应速率快,生成的低熔点化合物的粘度低,因而在钢液中的浸渍蚀损量大。由于  $\text{CaTiO}_3 - \text{CaZrO}_3$  是一个连续固溶体系列,随着  $\text{ZrO}_2$  含量的增加,形成的低熔点化合物层增

厚,说明低熔点化合物的粘度增大,耐蚀性能提高,因而可以通过调整材料中的  $ZrO_2$  与  $TiO_2$  的比例来改善其抵抗钢水侵蚀的能力。

#### 2.2.4 O'-Sialon - $ZrO_2$ (-C) 材料

O'-Sialon -  $ZrO_2$  (-C) 是一类新的防  $Al_2O_3$  附着材料。O'-Sialon 是  $Si_2N_2O$  (氧氮化硅) 与  $Al_2O_3$  的固溶体,因其出色的高温性能和良好的抗氧化性而具有潜在的高温应用前景。1989年, Anseau 等<sup>[11]</sup> 将  $ZrO_2$  颗粒分散在 O'-Sialon 的基体中制得复合陶瓷材料,并申请了专利。O'-Sialon -  $ZrO_2$  复合材料十分稳定,几乎不发生分解反应,而  $\beta'$ -Sialon 在高温下将与  $ZrO_2$  反应生成氧氮化锆。O'-Sialon 基体中含有的  $ZrO_2$  一般在 15% ~ 25% (体积分数) 之间。

实验证明<sup>6,12,13</sup>, O'-Sialon -  $ZrO_2$  可以有效防止  $Al_2O_3$  的附着,且  $ZrO_2$  含量越低,实验效果越好。其防止  $Al_2O_3$  附着的机理被认为是 O'-Sialon 在高温下与  $Al_2O_3$  反应生成液相的缘故,生成的液相产物被流动的钢水冲刷而带走,从而达到防止  $Al_2O_3$  附着的目的。但是,防止附着能力好的材料抗钢水侵蚀性能往往较差,因为这两个性能对  $ZrO_2$  含量的要求是相反的。因此,需要通过实验确定  $ZrO_2$  的最佳含量,以求得最佳的综合性能。

O'-Sialon 可由  $Si_3N_4$  和  $SiO_2 - Al_2O_3$  混合物(或粘土)为原料通过较为简单的工艺制得,因此在成本价格上具有一定的竞争能力。关于 O'-Sialon -  $ZrO_2$  (-C) 材料,目前的研究还不够充分,如果能进一步降低生产成本,优化材料的性能,有望使其在钢铁连铸工艺中发挥更大的作用。

#### 2.3 无碳材料的开发

耐火材料中 C 与  $SiO_2$  是促使  $Al_2O_3$  生成的原因之一,如果耐火材料中不含 C,  $Al_2O_3$  的附着现象将有一定程度的减轻。此外,C 氧化是引起表面粗糙的重要原因,而且 C 的存在也使材料具有较高的热导率,热损失大。因此,开发无碳材料防止  $Al_2O_3$  附着近年来逐渐引起人们的重视。目前已开发出来具有防止  $Al_2O_3$  附着功能的无碳耐火材料,一类是  $Al_2O_3 - SiO_2$  系<sup>[2,14]</sup>, 一类是  $Al_2O_3 - MgO$  系<sup>[14,15]</sup>。由于无碳材料的开发历史很短,它们防止  $Al_2O_3$  附着的机理并不十分清楚。但有两点是肯定的,采用无碳材料一方面减少了  $Al_2O_3$  来源,另一方面使用过程中材料表面可以保持光滑的特性。

目前,这两类材料在实际中均已得到应用。几种无碳耐火材料的理化性能列于表 1。其中在  $Al_2O_3 - MgO$  系添加  $CaZrO_3$  的材料使用效果最好。

表 1 无碳耐火材料的理化性能

性能	$Al_2O_3 - SiO_2$			$Al_2O_3 - MgO$		
w/%	$Al_2O_3$	92.1	76.8	63	76	43
	$SiO_2$	7.7	22.8	35	-	-
	MgO	-	-	-	23	17
	$CaZrO_3$	-	-	-	-	40
显气孔率/%	24.2	24.1	20.1	23.5	19.6	
体积密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	2.72	2.35	2.55	2.68	2.93	
抗折强度/MPa	4.4	3.0	7.2	7.5	7.1	

#### 2.4 有潜力的铝酸钙质材料

抗热震性能是耐火材料的一个重要性能,热膨胀系数小的材料通常具有良好的抗热震性。 $CaAl_4O_7$  的热膨胀系数在  $CaO - Al_2O_3$  系的化合物中是最低的(约为  $4.95 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),且熔点较高(1750  $^\circ\text{C}$ ),很适合作耐火材料,直到近年才受到高度重视。Jonas 等<sup>[16,17]</sup> 研究了  $CaAl_4O_7$  质材料,包括  $CaAl_4O_7 - CaZrO_3$  和  $CaAl_4O_7 - MgAlO_4$  两种( $CaAl_4O_7$  和这两相在高温下有很好的相容性)。 $CaAl_4O_7$  质材料由于保持了较低的热膨胀系数,具有出色的抗热震性能,与  $CaZrO_3$  复合的材料有望起到防止  $Al_2O_3$  附着的作用,因而被认为是浸入式水口用很有希望的候选材料。

### 3 结语

从上面的介绍中可以看出,目前在防止  $Al_2O_3$  附着材料的开发和研究方面已取得一些可喜的进展,但是,仍然存在一些问题需要进一步探讨。

(1) 防附着机理的研究。虽然人们已经开发出一些材料,能够比较有效地解决  $Al_2O_3$  的附着问题,但是对于每种材料防止附着的机理还不是十分清楚。弄清各种材料的防附着机理,可以改善其使用效果,延长其使用寿命,同时也可作为开发新材料提供有益参考。

(2) 综合性能和效益的考虑。前面介绍的  $CaO - ZrO_2 - C$  和 O'-Sialon -  $ZrO_2$  (-C) 等材料的抗侵蚀性能是随着防附着性能的提高而降低的。采用无碳耐火材料,防附着性能有所改善,抗热震性可能会成为主要问题。因此,以后的研究开发中必须考虑材料综合性能的提高。此外,降低材料的制造成本也是非常重要的。

(3) 新材料、新工艺的研究。要解决  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着问题, 必须对原有材料进行改进或选用新的材料, 而以新材料替换原有材料是解决这一问题的根本途径, 为此必须注意新材料的开发研究。另外, 对耐火材料传统工艺进行改造或采用新工艺, 是提高耐火材料使用性能和效益的又一重要方向。如将高性能陶瓷材料的研究方法和先进的制备技术与传统的耐火材料工艺结合起来, 有望获得具有高的性能价格比的材料。作者<sup>[18]</sup>在这方面已做了一些工作, 初步取得了良好效果。

### 参考文献

- 1 孙传水.  $\text{ZrO}_2 - \text{CaO} - \text{C} - \text{SiO}_2$  质浸入式水口. 耐火材料, 1997, 31(6): 342 ~ 344
- 2 李存弼译. 连铸用浸入式水口  $\text{Al}_2\text{O}_3$  堵塞的防范. 国外耐火材料, 1999, 24(6): 39 ~ 44
- 3 张利华译. 浸入式水口的堵塞. 国外耐火材料, 1993, 18(5): 22 ~ 27
- 4 覃琴译. 连铸浸入式水口结瘤机理及其对策. 国外耐火材料, 1993, 18(8): 48 ~ 54
- 5 李红霞, 王金相, 姬宝坤. 防止  $\text{Al}_2\text{O}_3$  堵塞浸入式水口复合材料的研制. 耐火材料, 1996, 30(4): 184 ~ 187
- 6 Hoggard D B, Park H K.  $\text{O}'\text{-Sialon} - \text{zirconia}$  and its refractory application. Am Ceram Soc. Bull, 1990, 69(7): 1163 ~ 1166
- 7 陈肇友. 钢铁工业用耐火材料的发展动向. 耐火材料, 1994, 28(6): 309 ~ 314, 349

- 8 孙莉娟译. 各种添加剂对铝碳质耐火材料的氧化铝附着性的影响. 国外耐火材料, 1994, 19(8): 63 ~ 65
- 9 Nobuo Miyagawa, Mitsuru Ando, Shigeaki Takahashi, et al. Application of  $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$  containing immersion nozzle for continuous casting of stainless steel. Taikabutsu, 1995, 47(7): 331 ~ 340
- 10 Makoto Nakamura, Takashi Yamamura, Osamu Nomura, et al. A study on  $\text{CaO} - \text{TiO}_2 - \text{C}$  material to prevent alumina buildup. Taikabutsu, 1996, 48(7): 386 ~ 393
- 11 Anseau M R, Lawson J M, Slasor S. Ceramic Material, U S Pat No. 4804644, 1989 - 02 - 14
- 12 仲维斌, 李文超, 钟香崇.  $\text{O}'\text{-Sialon} - \text{ZrO}_2$  质复合材料与钢水中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的反应. 耐火材料, 1996, 30(2): 63 ~ 68
- 13 柯昌明, 李楠, 李水全, 等.  $\text{O}'\text{-Sialon} - \text{ZrO}_2 - \text{C}$  系材料抗  $\text{Al}_2\text{O}_3$  沉积性能. 耐火材料, 1998, 32(3): 125 ~ 127
- 14 Fumihiko Ono, Toshiyuki Muroi, Kazumi Oguri. Improvement of alumina-silicate materials to anti-clogging. Taikabutsu, 1999, 51(9): 507 ~ 508
- 15 Kunio Furukawa, Masanmi Nishikawa, Hisahiro Hattori. Investigation of materials for preventing alumina buildup in casting nozzle. Taikabutsu, 1999, 51(8): 430 ~ 435
- 16 Jonas S, Nadachowski F, Szwagierczak D. A new non-silicate refractory of low thermal expansion. Ceramics International, 1998, 24: 211 ~ 216
- 17 Jonas S, Nadachowski F, Szwagierczak D. Low thermal expansion refractory composites based on  $\text{CaAl}_4\text{O}_7$ . Ceramics International, 1999, 25: 77 ~ 84
- 18 赵世利. 两种锆质耐火材料的制备和性能研究: [博士学位论文]. 上海: 中国科学院上海硅酸盐研究所, 2000

Research development in functional refractories for preventing  $\text{Al}_2\text{O}_3$  adhesion/Zhao Shike, Wang Gang, Jiang Wan, et al//Naihuo Cailiao. -2001, 35(6): 359

$\text{Al}_2\text{O}_3$  adhesion on the innerface of submerged nozzles decreases the productivity greatly in continuous casting process of steel-making industry. Many materials, which are expected to be hardly wettable to molten steel or form low melting point phases by reacting with molten steel, are briefly reviewed concerning their performances and mechanisms for preventing  $\text{Al}_2\text{O}_3$  adhesion in this paper. Several promising materials are prospected and some possible trends are suggested.

**Key words:**  $\text{Al}_2\text{O}_3$  adhesion mechanism, Functional refractories, Submerged nozzle, Research development

**Author's address:** The State Key Lab on High Performance Ceramics and Superfine Microstructure, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

## 防A1203附着功能耐火材料的研究进展

作者: [赵世柯](#), [王刚](#), [江莞](#), [黄校先](#), [郭景坤](#)  
 作者单位: [中科院上海硅所](#)  
 刊名: [耐火材料](#) **ISTIC** **PKU**  
 英文刊名: [REFRACTORIES](#)  
 年, 卷(期): 2001, 35(6)  
 被引用次数: 5次

### 参考文献(18条)

1. [孙传水](#) [ZrO<sub>2</sub>-CaO-C-SiO<sub>2</sub>质浸入式水口](#) 1997(06)
2. [李存弼](#) [连铸用浸入式水口A1203堵塞的防范](#) 1999(06)
3. [张利华](#) [浸入式水口的堵塞](#) 1993(05)
4. [覃琴](#) [连铸浸入式水口结瘤机理及其对策](#) 1993(08)
5. [李红霞](#); [王金相](#); [姬宝坤](#) [防止A1203堵塞浸入式水口复合材料的研制](#) 1996(04)
6. [Hoggard D B](#); [Park H K](#) [O' -Sialon - zirconia and its refractory application](#) 1990(69)
7. [陈肇友](#) [钢铁工业用耐火材料的发展动向](#) 1994(06)
8. [孙莉娟](#) [各种添加物对铝碳质耐火材料的氧化铝附着性的影响](#) 1994(08)
9. [Nobuo Miyagawa](#); [Mitsuru Ando](#); [Shigeaki Takahashi](#) [Application of β -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> containing immersion nozzle for continuous casting of stainless steel](#) 1995(47)
10. [Makoto Nakamura](#); [Takashi Yamamura](#); [Osamu Nomura](#) [A study on CaO -TiO<sub>2</sub> -C material to prevent alumina buildup](#)[外文期刊] 1996(48)
11. [Anseau M R](#); [Lawson J M](#); [Slasor S](#) [Ceramic Material](#) 1989
12. [仲维斌](#); [李文超](#); [钟香崇](#) [O' -Sialon-ZrO<sub>2</sub>质复合材料与钢水中A1203的反应](#) 1996(02)
13. [柯昌明](#); [李楠](#); [李水全](#) [O' -Sialon-ZrO<sub>2</sub>-C系材料抗A1203沉积性能](#) 1998(03)
14. [Fumihiko Ono](#); [Toshiyuki Muroi](#); [Kazumi Oguri](#) [Improvement of alumina-silicate materials to anti-clogging](#)[外文期刊] 1999(09)
15. [Kunio Furukawa](#); [Masanmi Nishikawa](#); [Hisahiro Hattori](#) [Investigation of materials for preventing alumina buildup in casting nozzle](#) 1999(51)
16. [Jonas S](#); [Nadachowski F](#); [Szwagierczak D](#) [A new non-silicate refractory of low thermal expansion](#)[外文期刊] 1998
17. [Jonas S](#); [Nadaehowski F](#); [Szwagierczak D](#) [Low thermal expansion refractory composites based on CaAl<sub>4</sub>O<sub>7</sub>](#)[外文期刊] 1999(1)
18. [赵世柯](#) [两种锆质耐火材料的制备和性能研究](#)[学位论文] 2000

### 本文读者也读过(7条)

1. [赵瑞](#), [王新福](#), [刘国齐](#), [闫广周](#), [Zhao Rui](#), [Wang Xinfu](#), [Liu Guoqi](#), [Yan Guangzhou](#) [连铸用浸入式水口\(SEN\)的发展](#)[期刊论文]-[河南冶金](#)2006, 14(4)
2. [曲月华](#), [王翠艳](#), [QU Yue-hua](#), [WANG Cui-yan](#) [X-射线荧光光谱法测定铝质耐火材料中主次成分](#)[期刊论文]-[冶金分析](#)2006, 26(4)
3. [赵世柯](#), [黄勇](#), [汪长安](#), [黄校先](#), [郭景坤](#) [ZrO<sub>2</sub>-莫来石复合耐火材料的反应烧结制备和抗热震性研究](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2002, 36(2)

4. 尹高, 曹旗, Yin Gao, Cao Qi 连铸“三大件”生产线专用设备的研制与应用[期刊论文]-耐火材料2000, 34(1)
5. 郭胜惠, 彭金辉, 陈菓, 张利波, 张世敏, GUO Sheng-hui, PENG Jin-hui, CHEN Guo, ZHANG Li-bo, ZHANG Shi-ming 电熔氧化锆在微波场中的吸波特性和升温行为[期刊论文]-中南大学学报(自然科学版) 2009, 40(4)
6. 周子民, 朱再兴, 谢东江, 李浩, 陈伟, 张永星, ZHOU Jie-min, ZHU Zai-xing, XIE Dong-jiang, LI Hao, CHEN Wei, ZHANG Yong-xing 常功率平热源法测试耐火材料热物性的研究[期刊论文]-中南大学学报(自然科学版) 2011, 42(5)
7. 赵世柯, 施鹰, 黄校先, 郭景坤, 吴金源, 胡培, Zhao Shike, Shi Ying, Huang Xiaoxian, Guo Jingkun, Wu Jinyuan, Hu Pei CaO稳定ZrO<sub>2</sub>耐火材料的相组成和热膨胀[期刊论文]-耐火材料2000, 34(1)

#### 引证文献(5条)

1. 谢丽君, 王福明, 李文超, 张作泰, 徐骏 热压烧结合成CaO-ZrO<sub>2</sub>-BN复合材料的研究[期刊论文]-硅酸盐学报 2004(8)
2. 段锋, 平增福, 蒋明学, 李庭寿, 高云琴 浸入式水口Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>附着堵塞机理及防止办法[期刊论文]-耐火材料 2004(3)
3. 马北越 镁铝尖晶石耐火材料的合成及其性能研究[学位论文]硕士 2005
4. 尹国祥 ZrO<sub>2</sub>-CaO-C浸入式水口抗Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>附着性能的改善机理研究[学位论文]硕士 2007
5. 姚永宽 稀土钢连铸粉剂开发及中间包水口结瘤机理研究[学位论文]博士 2004

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_nhcl200106019.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_nhcl200106019.aspx)