

# 含碳耐火材料的防氧化方法

李新健 柯昌明 李楠

武汉科技大学高温陶瓷与耐火材料湖北省重点实验室 武汉 430081

**摘要** 结合含碳耐火材料的抗氧化要求,对添加抗氧化剂技术、表面浸渍抑制氧化法与抗氧化涂层技术及其作用机理进行了综合介绍,并在此基础上对含碳耐火材料防氧化技术的研究方向提出了一些见解。

**关键词** 含碳耐火材料 抗氧化性 抗氧化剂 涂层技术 表面浸渍技术

碳(C)是化学稳定性极好的物质,在常温和普通环境下使用,几乎呈化学惰性。炭素材料具有很低的热膨胀系数和较高的热导率,在高温下长期使用不会软化,几乎不受酸、碱、盐类及有机物的侵蚀,是一种优质的耐火材料。另外,碳对熔渣具有难润湿性,在使用过程中具有优良的抗渣侵蚀性能。但是,在较高温度下,C却极易与氧化性气体(如 $O_2$ )发生化学反应,使得含碳耐火材料的优良性能损失殆尽。因此,为了防止含碳耐火材料的氧化,需对含碳耐火材料进行防氧化处理。本文对含碳耐火材料的各种防氧化方法进行了综合介绍,并在此基础上对含碳材料防氧化技术的研究方向提出了一些见解。

## 1 传统的防氧化方法

石墨易氧化是其固有的性质。提高含碳材料的防氧化能力,特别是高温条件下的防氧化能力,关键在于控制材料的脱碳速度。含碳耐火材料的传统防氧化方法大致有两大类:即添加剂法与表面浸渍抑制氧化法。

### 1.1 添加剂法

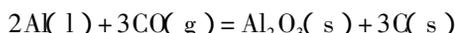
添加剂法的作用原理大致可以分为两个方面:一方面是从热力学角度出发,即在工作温度下,添加剂或其与C反应的生成物与O的亲合力比C与O的亲合力大,优先于C被氧化,从而起到保护C的作用;另一方面是从动力学的角度来考虑,添加剂与 $O_2$ 、CO或C反应生成的化合物能改变材料的显微结构,如增加致密度,堵塞气孔,阻碍O及反应产物的扩散等<sup>[1]</sup>。

目前,常见的添加剂主要有两类<sup>[2]</sup>:金属或合金细粉,非金属细粉。

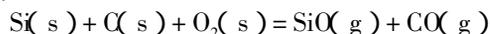
#### 1.1.1 金属或合金细粉

含碳材料中添加的金属细粉主要有Al、Si、Mg、

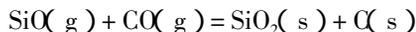
Ca等,其中Al、Si为最常见的抗氧化剂。在热处理过程中,Al和Si在材料中会发生反应。其中,Al把CO(g)还原成C(s),并生成 $Al_2O_3$ ,起到抑制C氧化的作用,反应式如下:



而且此过程伴随2.4倍的体积膨胀,造成材料组织的致密化,因此会抑制C的氧化;Si在材料中首先发生反应:

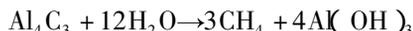


而后,反应产生的CO又可使SiO(g)进一步氧化成 $SiO_2$ :



因此,添加剂Al和Si的防氧化机理<sup>[3]</sup>,一方面是Al、Si在热处理过程中发生的物相变化降低了材料的显气孔率,使材料结构致密化,从而降低了氧化性气体(如 $O_2$ )与材料的有效接触面积;另一方面,Al、Si反应释放出的 $Al_2O_3$ 、SiO气体遇 $O_2$ 或 $CO_2$ 气体会反应生成固态的 $Al_2O_3$ 和 $SiO_2$ ,沉积在气孔内的固体表面上,阻塞气孔,抑制了气体的扩散,从而起到防氧化作用。

然而,值得注意的是,金属Al在1000℃以上会与C反应生成 $Al_4C_3$ ,而 $Al_4C_3$ 会与来自环境中的水蒸气发生反应:



伴随较大的体积膨胀,从而对材料产生潜在的破坏作用。

含碳材料中添加的合金细粉主要有Al-Si、Al-Mg、Al-Mg-Ca合金,常用的主要有Al-Si、Al-Mg

\* 李新健:男,1981年生,硕士研究生。

E-mail: avatarlixinjian@126.com

收稿日期:2005-06-30

修回日期:2005-08-29

编辑:柴剑玲

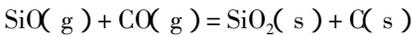
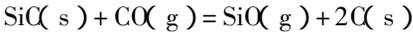
合金。合金的主要特点是共熔点比较低(低于金属粉的),而且具有比金属粉更高的活性,因此可以在低温下先于C氧化,从而使含碳材料达到防氧化的目的,是一种极为有效的添加剂。

### 1.1.2 非金属细粉

含碳材料中添加的非金属细粉主要有碳化硅、含硼添加剂和氮化物。

#### (1) 碳化硅

碳化硅(SiC)具有化学稳定性好,耐磨,热导率大,高温强度高,热膨胀系数小等优点。SiC在含碳材料内氧化时产生SiO气体,而SiO再与C氧化生成的CO反应生成SiO<sub>2</sub>,并把CO(g)还原成C(s)。基质中SiO<sub>2</sub>的析出起到了抑制材料中C氧化的作用,同时反应生成的C又补充了部分损耗的SiC。其反应式如下:



#### (2) 含硼添加剂

近年来,国内外对含硼抗氧化剂研究得比较多,主要集中在MgO-C和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C材料上。这一类的添加剂主要有B<sub>4</sub>C、CaB<sub>6</sub>、ZrB<sub>2</sub>、TiB<sub>2</sub>及Mg-B系原料和硼酸盐玻璃。其中Mg-B系原料是由硼和硼化镁构成的原料<sup>[5]</sup>,按元素的质量分数计,B约为83%,Mg约为12%。叶方保等<sup>[5]</sup>的研究指出:含硼化合物作为含碳耐火材料抗氧化剂,其抗氧化作用主要来自于B,B首先与O<sub>2</sub>或CO反应生成低熔点的B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(其熔点为550℃),而后B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>再与材料中的耐火氧化物反应生成高粘度、低熔点的硼酸盐,在材料表面形成液相保护层,从而阻止了O与C接触,达到保护C的作用。例如在铝碳耐火材料中,B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在较低温度下就生成了液相,见图1。

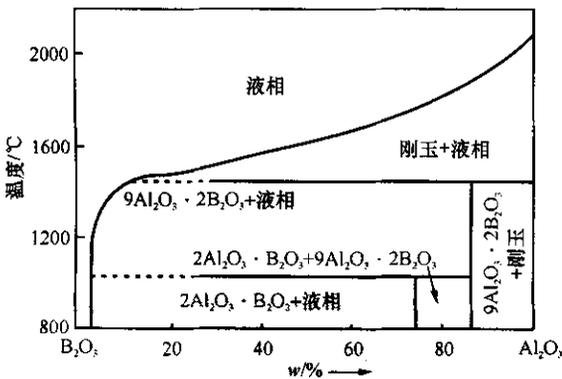


图1 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>二元相图

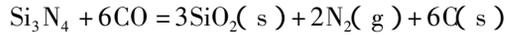
#### (3) 氮化物

含碳材料中的氮化物添加剂主要有AlN和Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>。其中AlN具有罕见的物理化学性质<sup>[6]</sup>:分解

温度高(2673 K),在气体、盐及金属介质中的化学稳定性高。AlN在含碳材料中氧化时,反应生成Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>并还原出C,起到防氧化的作用。反应式如下:



β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>具有化学稳定性和耐热冲击性好,高温强度和耐磨损性强等优异性能。它在含碳材料中氧化时,可以发生如下反应,最终生成SiO<sub>2</sub>(s)并还原出C(s):



徐国涛等<sup>[7]</sup>的研究表明:添加Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的含碳材料在埋炭烧成时,Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>表面或边缘与Al粉、石墨粉反应生成Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>、AlN、SiC或其他复合物及类似赛隆组成的固熔体,加入的Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>均匀分布于基质中,其加入量适宜时,材料的氧化速度较慢,抗氧化性能显著提高。可见,适当引入Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>可以提高含碳材料的抗侵蚀和抗氧化性能。这已经在研究烧成铝碳材料及混铁车用Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-C砖方面取得了良好效果<sup>[8]</sup>。

### 1.2 表面浸渍抑制氧化法

表面浸渍法抑制氧化反应一般靠隔离C表面活性点或形成玻璃状覆盖层来防止O<sub>2</sub>扩散,或与杂质形成稳定的盐,从而失去对C氧化的催化作用。但其一般限于1000℃以下的氧化防护。

表面浸渍法是针对碳材料具有多孔性的特点而发展起来的。其过程是通过抽真空或加压浸渍的方法,把液态玻璃、磷酸盐等物质压入材料中,封闭材料表面和内部的气孔,从而阻挡氧化性气体向材料内部的扩散,起到防氧化的效果。

浸渍磷酸和磷酸盐可以防止C在800℃以下的氧化。磷酸和磷酸盐一方面可以封闭材料中位错附近的碳网边缘的活性碳原子,提高氧化的起始温度;另一方面也可以起到充填气孔的作用,以阻止O<sub>2</sub>的输运。

碳材料内部浸渍硼化物或硼酸盐可以将C的氧化起始温度提高到900℃。硼化物或硼酸盐不但能够起到与磷酸盐相似的作用,而且还能够与C形成固熔体,提高材料的抗氧化能力。把熔融的高硼玻璃加压浸入到碳材料内部,浸渍率可以达到60%~75%,浸渍后的材料在1000℃以下的空气中氧化100h后,其质量损失率低于10%<sup>[9]</sup>。

## 2 涂层法

涂层法与传统的抗氧化方法不同,它需要解决涂层材料与含碳材料的化学相容性及机械相容性问题。此法是通过使外界O与材料中的C隔离来达到抗氧化目的的。

## 2.1 防氧化涂层原料的选择

在选择涂料用原料时,首先要考虑涂层与含碳耐火材料之间的热膨胀系数相匹配问题。 $\text{SiC}$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 等与C基体的热膨胀系数相近,且化学相容性好。

透气率是防氧化涂层的重要指标之一,要求涂层材料的透气率要小。稳定 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 和 $\text{ThO}_2$ 等具有很高的 $\text{O}_2$ 扩散速率,而 $\text{SiO}_2$ 的 $\text{O}_2$ 扩散速率较小,因此后者更适宜作氧的屏蔽材料<sup>[10]</sup>。另外,为了使涂层能在高温下长期、有效地工作,其挥发性一定要小。

在涂层的实际配制过程中,要分析涂层的具体使用环境,综合考虑以下因素(1)用作涂层的原料在高温下具有一定的粘度和流动性(2)与碳基体的热膨胀系数相近且化学相容性好(3)具有良好的化学稳定性,不易挥发(4)对氧的扩散速率低。

## 2.2 防氧化涂层的制备要求

### 2.2.1 涂料密度的控制

涂料密度对涂料的涂抹性有很大影响。如果涂料密度过小,则涂料太稀,涂抹性差,涂料易流失,导致涂层过薄而起不到保护作用;如果涂料密度过大,则涂层太稠,涂抹性也较差,涂层分布不均匀,从而降低防氧化效果。涂层的最佳密度范围一般在 $1.6 \sim 1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

### 2.2.2 涂料粒度的控制

需要严格控制涂料的粒度。涂料细磨可以使各组分均匀化,同时细颗粒的表面积大,能使涂料与基体的接触性好,且易熔融。但涂料也不宜过细,因为含碳制品表面的气孔率较高,具有较大的渗透性,过细的涂料易被制品表面吸收,而且涂料太细,表面张力大,易脱层。涂料粒度一般控制在 $<0.04 \text{ mm}$ 的颗粒含量为70%~90%即可使用<sup>[11]</sup>。

### 2.2.3 涂层厚度的控制

为了使涂料容易粘附在坯体表面上,要先将坯体表面的浮尘清除,然后均匀地涂刷涂料<sup>[11]</sup>。要注意控制适当的涂层厚度,涂层太厚则易剥落,而太薄又不能生成合适的釉层。涂层厚度一般控制在 $0.34 \sim 0.56 \text{ mm}$ 的范围内较合适。

## 2.3 防氧化涂层的发展现状

单一原料的涂层因受到原料自身高温性能的影响而使得防氧化效果不是很好。例如: $\text{SiO}_2$ 涂层在 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上才具有一定的粘度和流动性,因此在 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下不能有效弥合裂缝,防氧化效果不好; $\text{B}_2\text{O}_3$ 涂层在 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下能明显防护C的氧化,但温度高于 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,因 $\text{B}_2\text{O}_3$ 的挥发速度较快而导致其抗氧化时间有限<sup>[10]</sup>。

多原料涂层法可以充分利用各原料不同的高温性能来减少温度骤变时裂纹的产生,从而在不同温度下取得较好的防氧化效果。例如:涂层中含有碳化物可降低涂层与基体之间的热膨胀系数差异,降低使用时的热应力;含有 $\text{SiO}_2$ 在高温下可与C反应形成致密的 $\text{SiC}$ 层,从而提高氧化物涂层与C之间的结合强度<sup>[12]</sup>。这种技术在实施中最好要考虑涂层由内到外的热膨胀系数的“梯度”化,但同时也要考虑到材料的透气率、耐火度、挥发性等一系列技术问题,因此,要想彻底解决上述矛盾是很困难的。

由于不同材料的热膨胀系数存在差异,因此多原料涂层在使用过程中难免会产生一些微裂纹。这些微裂纹不仅能为O的扩散提供快速通道,而且也会随使用时间的延长而进一步扩大,因此要求涂料自身具有“愈合”功能就显得格外重要<sup>[10]</sup>。但目前开发的含碳耐火材料的防氧化涂层尚有许多使用条件的限制,不能很好地实现“自愈合”功能。

## 3 今后的研究方向

含碳耐火材料已经得到了广泛应用,并取得了良好的使用效果,但如何进一步提高其使用性能,延长使用寿命,在很大程度上取决于其抗氧化性能的进一步提高,这仍然是国内外耐火材料研究的课题之一。涂层技术是含碳耐火材料防氧化的重要方法之一,但目前含碳耐火材料的防氧化涂层技术还不是非常成熟。涂层技术在碳-碳复合材料领域已经得到很好应用,若借鉴碳-碳复合材料的涂层技术,将会很好地改善含碳材料的防氧化性能。在添加抗氧化剂技术方面,还需要进一步研究新型高效的抗氧化剂。

## 参考文献

- [1] 张文杰,李楠. 碳复合耐火材料. 北京: 科学出版社, 1990: 51
- [2] Rigaud M. New additives in carbon-bonded refractories. *Ceramurgia*, 1997, 27(2): 81-87
- [3] 刘新曦. 铝碳滑板的高温强度、断裂行为和氧化过程与添加物Al、Si的关系. *耐火材料*, 1995, 29(2): 79-82
- [4] Yamaguchi A, Zhang S, Yu J *et al.* Behavior of antioxidants added to carbon-containing refractories. *UNITECR '95*: 341-348
- [5] 叶方保, 钟焰, Rigaud M. 含碳耐火材料用硼化物添加剂. *耐火材料*, 1997, 31(5): 297-301
- [6] 刘景林, 译. 氮化铝复合材料的氧化. *国外耐火材料*, 2003, 28(1): 40
- [7] 徐国涛, 杨熹文, 薛启文, 等. 氮化硅对烧成铝炭耐火材料的性能影响. *硅酸盐通报*, 1999(5): 18

(下转 142 页)

- ( 1 ) 22 - 27
- [ 14 ] 钟香崇. 矾土基耐火材料的研究与发展. 耐火材料, 1997, 31 ( 3 ) :125 - 130
- [ 15 ] 杨丽明, 译. TiO<sub>2</sub> 添加剂对 Al - Si - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系中相形成的作用. 国外耐火材料, 1996, 21( 10 ) :45 - 49
- [ 16 ] Tripathi H S ,Banerjee G. Effect of chemical composition on sintering and properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> system derived from sillimanite beach sand. Ceramics International, 1999, 25 ( 1 ) :19 - 25
- [ 17 ] Sen S K ,Aggarwal P S. Effect of TiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> on sintering of sillimanite. Ceramics International, 1994, 20( 5 ) :299 - 302
- [ 18 ] Mitra N K ,Mandal A ,Maitra S *et al.* Effect of TiO<sub>2</sub> on the interaction of dehydroxylated kaolinite with Al( OH )<sub>3</sub> gel in relation to mullitisation. Ceramics International, 2002, 28( 3 ) :235 - 243
- [ 19 ] Hong S H ,Messing G L. Anisotropic grain growth in diphasic - gel - derived titania - doped mullite. J Am Ceram Soc, 1998, 81( 5 ) :1269 - 1277
- [ 20 ] 郭玉香, 张玲, 龚叔菊, 等. 莫来石 - 钛酸铝复相材料的研究. 鞍山钢铁学院学报, 2001, 24( 1 ) :8 - 10
- [ 21 ] 夏胜杰, 朱秀英. ZrSiO<sub>4</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 对铝硅系耐火材料抗热震性的影响. 耐火材料, 1998, 32( 4 ) :192 - 194

**Effect of TiO<sub>2</sub> on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> system refractories/Yin Yucheng ,Liang Yonghe ,Wu Yunyun ,*et al*//Naihuo Cailiao. - 2006, 40( 2 ) :139**

The distribution of TiO<sub>2</sub> in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> refractories especially in high alumina bauxite was summarized. Effects of TiO<sub>2</sub> on the structures and properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> system refractories were also introduced by analyzing the inter-reaction between TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> during the sintering process of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> raw material and application of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> products.

**Key words :** TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> system refractories, Structure, Properties

**Author 's address :** The Hubei Province Key Lab of Ceramics and Refractories, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China



**( 上接 135 页 )**

- [ 8 ] 桂明玺, 译. 混铁车用加 β- Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiC - C 砖. 国外耐火材料, 1992, ( 6 ) :23 - 27
- [ 9 ] 张伟刚, 成会明, 沈祖洪, 等. 炭材料抗氧化研究进展( I ): 实现炭材料抗氧化的主要途径. 炭素, 1997, ( 2 ) :1 - 6
- [ 10 ] 刘开琪. 含炭耐火材料抗氧化涂料的配制及抗氧化原理. 耐火材料, 2000, 34( 1 ) :20 - 22
- [ 11 ] 韩文瑞, 周川生, 张学翠. 铝炭耐火制品防氧化涂料的研制与使用. 耐火材料, 1991, 25( 3 ) :168 - 170
- [ 12 ] 崔素芬, 译. 石墨制品防氧化用自凝性涂层. 国外耐火材料, 1998, 23( 4 ) :35 - 38

**Review of research on oxidation resistance of carbon-containing refractories/Li Xinjian ,Ke Changming , Li Nan//Naihuo Cailiao. - 2006, 40( 2 ) :133**

According to the requirements of oxidation resistance of carbon-containing refractories, the technologies of adding antioxidants, improving anti-oxidation by surface soaking and coating are reviewed. In addition, the characteristics and anti-oxidation mechanism of all improving anti-oxidation methods are also presented. On the principle foundation, the research direction of oxidation resistance technologies for carbon-containing refractories is suggested.

**Key words :** Carbon-containing refractories, Oxidation resistance, Antioxidants, Coating technology, Surface soaking method

**Author 's address :** The Hubei Province Key Lab of Ceramics and Refractories, Wuhan University of Sci & Tech, Wuhan 430081, China

# 含碳耐火材料的抗氧化方法

作者: [李新建](#), [柯昌明](#), [李楠](#), [Li Xinjian](#), [Ke Changming](#), [Li Nan](#)  
 作者单位: [武汉科技大学高温陶瓷与耐火材料湖北省重点实验室](#), 武汉, 430081  
 刊名: [耐火材料](#) **ISTIC** **PKU**  
 英文刊名: [REFRACTORIES](#)  
 年, 卷(期): 2006, 40(2)  
 被引用次数: 6次

## 参考文献(12条)

1. [张文杰](#); [李楠](#) [碳复合耐火材料](#) 1990
2. [Rigaud M](#) [New additives in carbon-bonded refractories](#) 1997(02)
3. [刘新彧](#) [铝碳滑板的高温强度、断裂行为和氧化过程与添加物Al、Si的关系](#) 1995(02)
4. [Yamaguchi A](#); [Zhang S](#); [Yu J](#) [Behavior of antioxidants added to carbon-containing refractories](#)
5. [叶方保](#); [钟焰](#); [Rigaud M](#) [含碳耐火材料用硼化物添加剂](#) 1997(05)
6. [刘景林](#) [氮化铝复合材料的氧化](#)[期刊论文]-[国外耐火材料](#) 2003(01)
7. [徐国涛](#); [杨熹文](#); [薛启文](#) [氮化硅对烧成铝炭耐火材料的性能影响](#)[期刊论文]-[硅酸盐通报](#) 1999(05)
8. [桂明玺](#) [混铁车用加β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-C砖](#) 1992(06)
9. [张伟刚](#); [成会明](#); [沈祖洪](#) [炭材料抗氧化研究进展\(I\):实现炭材料抗氧化的主要途径](#) 1997(02)
10. [刘开琪](#) [含炭耐火材料抗氧化涂料的配制及抗氧化原理](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2000(01)
11. [韩文瑞](#); [周川生](#); [张学翠](#) [铝炭耐火制品防氧化涂料的研制与使用](#) 1991(03)
12. [崔素芬](#) [石墨制品防氧化用自凝性涂层](#) 1998(04)

## 本文读者也读过(7条)

1. [于景坤](#) [含碳耐火材料的发展及其应用](#)[会议论文]-2006
2. [宋希文](#). [刘国齐](#). [苏有权](#). [王峰](#). [安胜利](#) [含碳耐火材料的热扩散系数](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2007, 41(6)
3. [李有奇](#). [柯昌明](#). [李楠](#). [LI Youqi](#). [KE Changming](#). [LI Nan](#) [铝碳质滑板材料抗氧化研究进展](#)[期刊论文]-[材料导报](#) 2005, 19(10)
4. [孙荣海](#). [刘百宽](#) [碳质耐火材料](#)[期刊论文]-[国外耐火材料](#)2005, 30(6)
5. [欧阳德刚](#). [OUYANG De-gang](#) [含碳耐火材料抗氧化涂料的现状与发展趋势](#)[期刊论文]-[工业加热](#)2005, 34(4)
6. [李伟](#) [含碳耐火材料的自修复功能](#)[期刊论文]-[耐火与石灰](#)2009, 34(1)
7. [桂明玺](#) [含碳耐火材料中碳的定量分析技术](#)[期刊论文]-[国外耐火材料](#)2002, 27(6)

## 引证文献(6条)

1. [邓建国](#). [刘东亮](#). [李新跃](#) [车用石墨密封环抗氧化陶瓷涂层的研制](#)[期刊论文]-[陶瓷](#) 2009(8)
2. [PENG Dejiang](#). [HE Zhongyang](#). [LIU Baikuan](#) [Antioxidant Coating of SEN for Thin Slab Con-casting](#)[期刊论文]-[中国耐火材料\(英文版\)](#) 2008(2)
3. [王志强](#). [朱伯铨](#). [方斌祥](#). [万洪波](#) [B4C和Si组合抗氧化剂对低碳MgO-C砖抗氧化性能的影响](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2008(3)
4. [邹明](#). [李伟](#). [蒋明学](#). [姚嘉斌](#). [高旭东](#) [镁碳砖在接触LF炉炉渣以后的抗氧化行为的研究](#)[期刊论文]-[硅酸盐通报](#) 2008(3)
5. [王利娜](#). [王海龙](#). [陈德良](#). [张锐](#) [铝碳质滑板抗氧化涂料的制备与性能研究](#)[期刊论文]-[硅酸盐通报](#) 2010(4)
6. [刘广华](#). [姚金甫](#). [田守信](#). [赵斌元](#) [Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C耐火材料抗氧化性研究进展](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2011(2)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_nhc1200602015.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_nhc1200602015.aspx)