

# 基于显微边界形貌分形特征的耐火材料侵蚀维数研究

□ 陈仕华<sup>1,2)</sup> 洪彦若<sup>2)</sup> 孙加林<sup>2)</sup>

1) 宝钢集团西马克德马格宝钢工程有限公司 上海 201900

2) 北京科技大学材料科学与工程学院 7005 A

**摘要** 通过对侵蚀残砖的显微边界形貌研究发现:耐火材料的抗侵蚀性能和基于显微边界形貌分形特征的分形维数存在良好的线性关系。根据分形维数的定义和含义,作者提出了一种基于分形理论的耐火材料侵蚀维数  $R_f$  (Refractory fractal) 的概念和抗侵蚀分类建议。根据耐火材料的使用经验和实绩而定义的  $R_f = [1.0, 1.0 \sim 1.15, 1.15 \sim 1.20, \geq 1.2]$  数值范围,可以用于耐火材料抗侵蚀性能的评判、分类,并且可用于设计选型和编制相对应的耐火材料的残余安全厚度的日常维护规程等。

**关键词** 耐火材料,抗侵蚀性,边界形貌,分形,侵蚀维数

在高性能耐火材料研究中,尽可能提高材料的抗渣、抗碱、抗液态金属侵蚀等性能是研究人员长期的目标。通过分析侵蚀试样的显微结构照片,根据侵蚀的深度和侵蚀界面等的直观描述,确实可以比较直观及定性地判断试样的抗侵蚀性能。但是,由于目前尚无量化的判断方法,因此难以做到不同研究人员之间的判断结论相一致。鉴于目前非线性学科中分形理论在工程领域的蓬勃发展,作者通过基于耐火材料侵蚀残砖的显微边界形貌分形特征的研究,提出一种基于分形理论的耐火材料侵蚀维数的概念和抗侵蚀分类建议。

## 1 分形理论

### 1.1 分形几何学的基本概念

分形几何学最初由法国数学家曼德勃罗 (Mandelbrot B B) 于 1973 年首次提出分维和分形几何的设想<sup>[1]</sup>。分形几何学主要研究一些具有自反演性的不规则图形,具有自平方性的分形变换和自放射分形集等<sup>[2]</sup>。曼德勃罗定义<sup>[1]</sup>:(1)满足下式条件  $\text{Dim}(A) > \dim(A)$  的集合  $A$ ,称为分形集。其中,  $\text{Dim}(A)$  为集合  $A$  的 Hausdorff 维数(或分维数),  $\dim(A)$  为其拓扑维数。一般说来,  $\text{Dim}(A)$  不是整数,而是分数。(2)部分

与整体以某种形式相似的形,称为分形。

### 1.2 分形维数的计算方法

常用的计算方法有<sup>[2-6]</sup>:盒计数法,容量维、柯尔莫哥洛夫维、信息维、关联维、雷尼(A Renyi)维等。其中最简单的是盒计数法。

盒计数法:对于给定的对象,用边长为  $\varepsilon$  的单元格填充它,然后统计和边界曲线相交的单元格数目  $N$ 。改变  $\varepsilon$  的大小,可以得到不同的  $N$  值。将  $\varepsilon$  和  $N$  的对数值在“双对数”坐标纸上标出来,往往会得到一条直线,此直线的斜率的绝对值就是对象的分形维数  $d$ 。用数学关系表达就是:

$$d = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)} = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}$$

## 2 残砖的显微边界形貌和分形特征

侵蚀残砖的显微边界形貌是一个二维分形集,其轮廓线是一维分形集。一般来说,侵蚀表面的显微形貌的分形维数  $d_s$  和轮廓线的分形维数  $d_p$  之间存在  $d_s = d_p + 1$  的对应关系<sup>[5]</sup>,因此,可以通过检测轮廓线的分形维数的方法来研究侵蚀表面的分形特征。

从微观上观测,所有的边界形貌都呈现粗糙而不光滑。此外,显微表面的轮廓线随着图形放大倍数的增加,边界轮廓线也不断放大。研究表明:(1)显微表面的轮廓随放大倍数的增大,不是趋近于直线,而是保持形状大体相似,即显微表面具有几何自相似和自仿射的特征<sup>[7]</sup>;(2)分形维数具有相对性。对两个不同物体的分形维数进行比较时,应当尽可能地在基本相似的观测条件下。

要注意的是:当观测距离或角度发生极大变化时,例如在宏观和微观两种状态下对同一物体进行观测时,分形维数有可能变化。但是,一旦上述观

\* 陈仕华,男,1963年生,博士研究生,高级工程师。  
收稿日期:2002-06-17 编辑:李光耀

测的基准参数确定,轮廓线的分形维数是惟一的。

### 2.1 典型侵蚀边界线的分析

耐火材料在使用过程中,由于不可避免地要和炉气、炉渣和(或)金属熔体等反应,在耐火材料的工作面附近形成渣层、反应层、渗透层和未反应层,从而在相邻的界面之间存在边界线。

在耐火材料的抗(渣、碱、铁等)侵蚀研究中,目前通用的办法是在显微镜下估计出各层的平均厚度,然后除以侵蚀试验的时间,得到单位时间内的侵蚀深度,并以此作为抗侵蚀性能的评估标准。由于相邻层之间的沿轮廓线不规则,其边界线的分形维数 $>1$ 。因此,在研究过程中,要取得各层的厚度并不容易。此外,用各层的平均厚度的方法有可能掩盖局部已经严重侵蚀的细节。这也是目前在耐火材料行业中经常出现的检测指标相同,甚至更优,但是实际使用效果相差很大的原因之一。

图1为模拟的试样侵蚀边界线。试样的平均侵蚀厚度相同,但是其实际的边界线相差较大。在图中的明显不均匀侵蚀曲线上,可以发现若干个尖锐的高侵蚀点,在耐火材料的实际使用过程中,具有均匀侵蚀厚度的耐火材料基本不存在,而出现不均匀侵蚀是绝对的。决定耐火材料使用寿命的参数不是均匀侵蚀厚度,而恰恰是局部的最大侵蚀厚度(深度)。

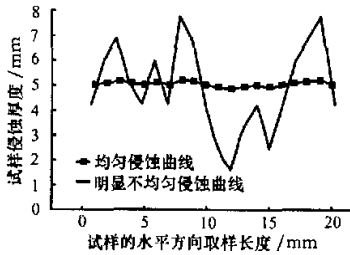


图1 具有相同侵蚀厚度的两种模拟侵蚀曲线图

Fig. 1 Two kinds of imitative boundary curves with the same average corrosion thickness

### 2.2 典型侵蚀边界线的获取和处理

图2是作者根据实际应用过程中耐火材料的实际侵蚀结果和对耐火材料的抗侵蚀特性的评判习惯,就具有良好的抗侵蚀形貌、中等抗侵蚀形貌和较差抗侵蚀形貌,在大量的显微照片中选取的具有代表性的几幅抗渣侵蚀照片,然后用分形方法对图中的抗渣侵蚀后的边界线进行了分形维数分析和计算。

图像处理程序:首先,对上述显微边界形貌的电镜照片用 Photoshop 软件进行黑白高反差数值化

处理形成图3,然后根据原始图像的高( $H$ )和宽

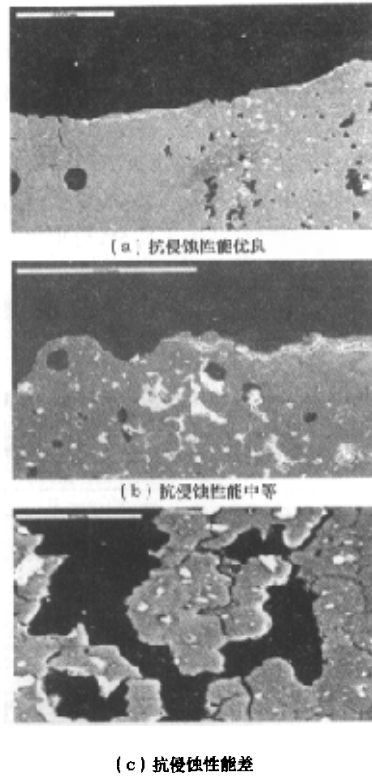


图2 侵蚀残砖的典型显微边界形貌

Fig. 2 The typical micro boundary images of used bricks

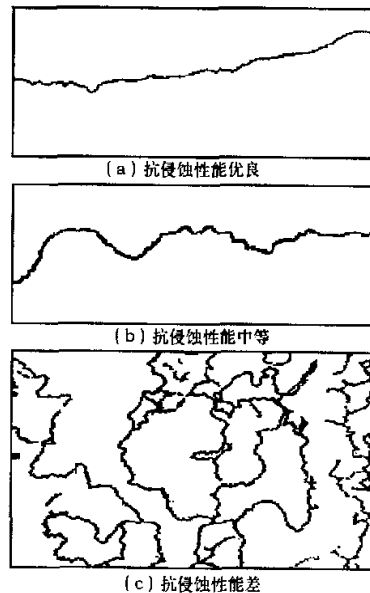


图3 分维计算用侵蚀残砖的典型显微边界轮廓图

Fig. 3 Micro boundary lines of Fig. 2 for the calculation of  $P_f$

(W)尺寸以及图像分辨率,定义盒计数用单元格边长 $\varepsilon$ , $\varepsilon = \min(H, W)$ 。在本试验研究中, $\varepsilon$ 的取值为1~10 mm,然后由软件根据预定的 $\varepsilon$ 值对图3进行自动分割和覆盖,最后统计图中与边界相交的盒子单元格数量 $N(\varepsilon)$ 。

从对上述显微结构照片进行的分形数据分析中(图4)可以明显地发现:边界轮廓线的分形维数呈现直线状,分形维数差距明显,分形维数和耐火材料的抗侵蚀性能具有良好的线性关系。显微边界轮廓线的分形维数可以作为耐火材料抗侵蚀性能的一个数值化指标。

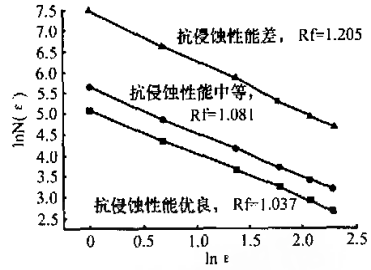


图4 侵蚀残砖的典型显微边界分形曲线  
Fig. 4 Rf curves of typical micro boundary images of the used bricks

### 2.3 耐火材料侵蚀维数的研究

表1 侵蚀残砖的典型显微边界形貌的分形维数统计和计算值  
Table 1 Rf statistic and calculation values of typical micro boundary images of used bricks

序号	单元格尺寸		单元格数量及对数值						斜率(分形维数d或Rf) (以 $\varepsilon=1$ 为参考点)		
	$\varepsilon/\text{mm}$	$\ln \varepsilon$	N/个			$\ln(N)$			A	B	C
			A	B	C	A	B	C			
1	1	0	157	276	1729	5.056	5.620	7.455	-	-	-
2	2	0.69315	76	127	724	4.331	4.844	6.585	1.046693	1.11984	1.255876
3	4	1.3863	38	62	340	3.638	4.127	5.829	1.023347	1.077164	1.173166
4	6	1.7918	25	40	200	3.219	3.689	5.298	1.025456	1.078003	1.203834
5	8	2.0794	18	30	147	2.890	3.401	4.990	1.041565	1.067211	1.18535
6	10	2.3026	14	24	107	2.639	3.178	4.673	1.049772	1.060698	1.208411

斜率(分形维数d或Rf)平均值:Rf(A)=1.037,Rf(B)=1.081,Rf(C)=1.205

根据分形维数的定义和表1的计算结果,对于耐火材料而言,可以定义一个具有明确含义的耐火材料侵蚀维数Rf,并对Rf进行抗侵蚀性能分类。

Rf=1:耐火材料的骨料和基质相具有相同的抗侵蚀性能,在侵蚀过程中,材料表面始终呈现光滑表面或不发生侵蚀,属于理想耐火材料。

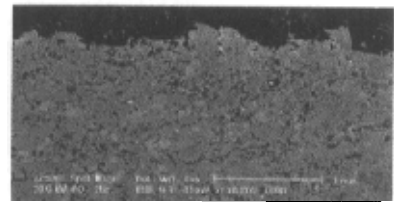
Rf=1.0~1.15:侵蚀表面的边界曲线基本呈现光滑状态,耐火材料的残余安全厚度可以根据理论值进行估计,属于具有优良抗侵蚀性能的耐火材料。

Rf=1.15~1.20:侵蚀表面的边界曲线呈现比较粗糙状态,耐火材料的残余安全厚度必须根据理论值进行适当放大,属于具有中等抗侵蚀性能的耐火材料。

Rf $\geq$ 1.20:侵蚀表面的边界曲线呈现明显的高低起伏状态,耐火材料的残余安全厚度不能根据理论值进行估计。假如只能选用此类材料,必须在实际使用过程中,经常检测耐火材料的最大侵蚀厚度(深度),以确保使用安全,属于具有较差抗侵蚀性能的耐火材料。

Rf=2:在侵蚀介质的作用下容易发生结构开裂和溃散,一般不能推荐作为耐火材料使用。

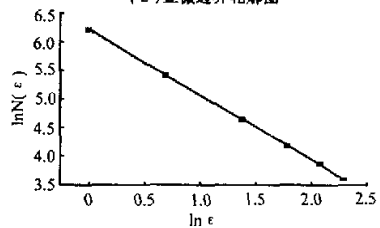
### 2.4 耐火材料侵蚀维数的验证



(a)显微边界形貌



(b)显微边界轮廓图



(c)分形曲线图

图5  $\beta$ -Sialon 结合刚玉砖的显微边界形貌和分形曲线图  
Fig. 5 The micro boundary image and Rf curve of  $\beta$ -Sialon bonded corundum bricks

选用经过实验室静态抗铁水侵蚀试验以后的 $\beta$ -Sialon结合刚玉砖的扫描电镜照片进行耐火材料侵蚀维数的验证。从图5可以发现,当单元格边长 $\varepsilon$ 在1~10 mm时,试样边界形貌的分维曲线呈现良好的直线状态。 $R_f=1.074337$ ,位于[1~1.15]区域, $R_f$ 的计算值和实际的抗铁水侵蚀性能相吻合。

### 3 结论

研究表明,耐火材料的抗侵蚀性能和基于显微边界形貌分形特征的分形维数存在良好的线性关系。根据分形维数的定义和含义,作者认为可以定义一个具有明确含义的耐火材料侵蚀维数 $R_f$ 用于减少不同的研究人员在评判耐火材料抗侵蚀性能的差异。

根据耐火材料的使用经验和实绩而定义的 $R_f$ [1.0,1.0~1.15,1.15~1.20, $\geq 1.2$ ]数值范围,可

以用于耐火材料抗侵蚀性能的评判和分类,也可用于设计选型和编制相对应的耐火材料的残余安全厚度的日常维护规程等。

### 参考文献

- 1 Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature. New York: Freeman W H, 1982:25
- 2 李文超,何鸣鸿.分形及其在耐火材料中的应用研究.耐火材料,1997,31(2):113~117
- 3 刘华杰.分形艺术.湖南:湖南科学技术出版社,1998
- 4 Hang Y Z. Influence of temperature during the nitrification process of silicon. Foreign Refractory, 1993, 12:20~22
- 5 汪慰军,吴昭同,陈历喜,等.基于分形的表面形貌特征描述与评定参数的研究.计量学报,1998,19(2):12~15
- 6 陈国安,葛世荣.用分析几何表征工程表面的几个问题.润滑与密封,1998(3):3~7
- 7 刘小君.表面形貌的分形特征研究.合肥工业大学学报(自然科学版),2000,23(2):237~239

Research on refractories corrosion fractal based on the fractal characteristics of micro boundary/Chen Shihua, Hong Yanruo, Sun Jialin//Naihuo Cailiao. -2003, 37(2):78

Based on the research of micro boundary image of used bricks, the authors found that, there is excellent linear relationship between the anti-corrosion characteristics of refractories and the fractal index of micro boundary image of used bricks. According to the definition of fractal, the authors present a new concept of refractory fractal ( $R_f$ ) and a proposal of grading of refractory corrosion base on the research of fractal characteristics of micro boundary. The value of  $R_f = [1.0, 1.0 \sim 1.15, 1.15 \sim 1.20, \geq 1.2]$  defined on the experience of refractories can be used for the judgment and grading of anti-corrosion characteristics, and also can be used for refractories choice and made the management rule of safety thickness of lining, etc.

**Key words:** Refractories, Corrosion resistance, Boundary characteristic, Fractal, Corrosion fractal

**Author's address:** Baosteel (Group) Corporation, SBE, Shanghai 201900, China

(上接77页)

Effects of corundum types on properties of alumina - zirconia - carbon materials/Shi Gan, Yue Weidong, Li Ming, et al//Naihuo Cailiao. -2003, 37(2):75

The alumina - zirconia - carbon specimens were prepared with dense fused corundum, white fused corundum and tabular alumina as major starting materials separately. The properties at room temperature, hot MOR, abrasion resistance, slag corrosion resistance, thermal shock resistance and the microstructure of the specimens were investigated and compared. The integrate properties of the specimen prepared with dense fused corundum are almost as excellent as those of prepared with tabular alumina, better than those of prepared with white fused corundum.

**Key words:** Alumina - zirconia - carbon, Slide plate, Corundum, Hot modulus of rupture, Abrasion resistance, Slag resistance, Thermal shock resistance, Microstructure

**Author's address:** Luoyang Institute of Refractories Research, Luoyang 471039, China

# 基于显微边界形貌分形特征的耐火材料侵蚀维数研究

作者: 陈仕华, 洪彦若, 孙加林  
作者单位: 陈仕华(宝钢集团西马克德马格宝钢工程有限公司, 上海, 201900; 北京科技大学材料科学与工程学院), 洪彦若, 孙加林(北京科技大学材料科学与工程学院)  
刊名: 耐火材料 ISTIC PKU  
英文刊名: REFRACTORIES  
年, 卷(期): 2003, 37(2)  
被引用次数: 4次

## 参考文献(7条)

1. Mandelbrot B B [The Fractal Geometry of Nature](#) 1982
2. 李文超; 何鸣鸿 [分形及其在耐火材料中的应用研究](#) 1997(02)
3. 刘华杰 [分形艺术](#) 1998
4. Hang Y Z [Influence of temperature during the nitrification process of silicon](#) 1993
5. 汪慰军; 吴昭同; 陈历喜 [基于分形的表面形貌特征描述与评定参数的研究](#)[期刊论文]-[计量学报](#) 1998(02)
6. 陈国安; 葛世荣 [用分析几何表征工程表面的几个问题](#) 1998(03)
7. 刘小君 [表面形貌的分形特征研究](#)[期刊论文]-[合肥工业大学学报\(自然科学版\)](#) 2000(02)

## 本文读者也读过(8条)

1. 苏红梅. SU Hong-mei [XRF法定测定铁矿石中全铁](#)[期刊论文]-[金属材料与冶金工程](#)2010, 38(3)
2. 李坚强. 王文武. 甘菲芳. 吴吉光 [铁浴式熔融还原渣对镁铬材料侵蚀的研究](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2011, 45(1)
3. 吴润. 伍林. 杨英歌. 从善海. 吴章汉 [纳米ZnO晶须的分形维数及其特征](#)[期刊论文]-[武汉科技大学学报\(自然科学版\)](#)2004, 27(3)
4. 刘秋霞. 姜宏. 赵会峰. Liu Qiuxia. Jiang Hong. Zhao Huifeng [CaF<sub>2</sub>对硅质耐火材料的侵蚀](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2000, 34(5)
5. 沈建国. 于景坤. Shen Jianguo. Yu Jingkun [Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-C耐火材料抗CaO-SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O渣侵蚀性能研究](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2005, 39(5)
6. 尹洪基. 朱德先. 胡飘. 张涛. 王金相 [高铬砖与煤渣侵蚀反应的初探](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2010, 44(3)
7. 何金贤 [铁矿石中全铁的测定](#)[期刊论文]-[科技信息](#)2009(19)
8. 刘春红 [对真空感应炉中二次炼钢用耐火材料的侵蚀性研究](#)[期刊论文]-[耐火与石灰](#)2010, 35(4)

## 引证文献(4条)

1. GU Huazhi. WANG Houzhi. XUE Haitao. DENG Yongyue [Slag Resistance of Magnesite-chrome Brick Impregnated with Chrome-bearing Sols](#)[期刊论文]-[中国耐火材料\(英文版\)](#) 2009(1)
2. 韩波. 张海军. 钟香崇. 矾土基β-Sialon结合刚玉-碳化硅复合材料抗冰晶石侵蚀性能的研究[期刊论文]-[硅酸盐通报](#) 2007(4)
3. 贾勇 [基于分形理论的陶瓷装饰图案设计CAD软件](#)[学位论文]硕士 2005
4. 涂军波 [硅\(铝\)-刚玉-氮化硅材料的研究](#)[学位论文]博士 2004

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_nhc1200302005.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_nhc1200302005.aspx)