

## 精炼钢包透气砖中喷粉颗粒的运动特性 \*

潘时松 朱苗勇

(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

**摘要** 在底喷粉条件下, 通过考虑颗粒与气体之间的相互作用, 对气 / 固两相流中的颗粒进行了受力分析. 建立了描述颗粒在垂直流中的基本运动方程, 确立了颗粒运动速度与时间及距离关系的解析式, 发现颗粒经过极短时间或距离加速后进入速度增加缓慢的平缓区. 为底喷粉工艺参数的制订及喷粉类透气砖的设计提供了理论依据.

**关键词** 喷粉, 底吹钢包, 颗粒, 垂直流, 透气砖

中图法分类号 TF769.2

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2007)05-0553-04

## MOTION CHARACTERISTICS OF INJECTED POWDER THROUGH POROUS BRICK MOUNTED IN THE BOTTOM OF REFINING LADLE

PAN Shisong, ZHU Miaoyong

School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004

Correspondent: ZHU Miaoyong, professor, Tel: (024)83686995, E-mail: myzhu@mail.neu.edu.cn

Supported by Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education

(No.NCET-04-0285)

Manuscript received 2006-10-10, in revised form 2007-01-13

**ABSTRACT** During powder injection in the bottom-blown ladle, the forces acting on particle were analyzed considering the interaction between gas and particle. The motion equation of particles was established in a vertical flow, and the relationship between the velocity of particles, moving distance and time was deduced, which shows that the velocity of small particles increases slowly after acceleration in short time or distance. According to the relational expressions, some parameters for structure design of slot plug and powder injection technics can be established.

**KEY WORDS** powder injection, bottom-blown ladle, particle, vertical flow, porous brick

喷粉冶金是利用气体作载体, 将粉剂或颗粒喷入熔池, 极大地增大了固 / 液反应面积和促进了传质, 从而提高了反应速度和粉剂颗粒的利用率. 国内外学者对此进行了大量的实验及理论研究<sup>[1-6]</sup>, 但在传统冶金(特别是钢包冶金)中, 通常的做法是通过由耐火砖制成的顶枪插入钢水中进行喷吹<sup>[7-10]</sup>, 部分耐火材料被侵蚀或脱落进入钢液中污染了钢水. 为了克服浸入式喷枪的不足, 一种通过透气砖从钢包底部进行喷吹的新装置在实验室冷态和热态条件下均获得成功, 并已申请了专利<sup>[11]</sup>. 目前未见进一步的报道.

本工作对颗粒在垂直流中的运动特性进行了研究, 为透气砖的设计及工艺参数的制订提供了理论依据.

### 1 颗粒在定常垂直流中的基本运动方程

为简化处理过程作以下假设: (1) 透气砖垂直于钢包底面安装; (2) 透气砖中气流为定常流; (3) 气体的粘度为常数; (4) 透气砖内气体为恒温; (5) 颗粒在透气砖入口速度为零, 且为稀相喷粉.

以上假设表明, 粉剂与壁面摩擦可忽略. 透气砖中的颗粒可视为定常垂直流中质量为  $m$  的粉剂颗粒, 它在垂直流中作加速运动时, 其受力情况如图 1 所示(图中,  $\vec{F}_g$  为颗粒受到的重力,  $\vec{F}_f$  为气体对它产生的浮力,  $\vec{F}_M$  为颗粒旋转产生的 Magnus 力,  $\vec{F}_d$  为粘性流体对颗粒的曳引阻力). 此外, 颗粒在气体中作加速或减速运动时, 要引起周围气体的加速或阻碍运动, 由于气体具有惯性, 表现为对颗粒的反作用力<sup>[12]</sup>, 称之为视质量力  $\vec{F}_{vm}$ .  $\vec{F}_{vm}$  的方向由气流和颗粒的加速度决定.

颗粒垂直上升过程中, 因为 Magnus 力垂直于气流运动方向, 所以  $\vec{F}_M$  力对颗粒的运动速度不产生影响, 则

\* 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 NCET-04-0285

收到初稿日期: 2006-10-10, 收到修改稿日期: 2007-01-13

作者简介: 潘时松, 男, 1977 年生, 博士生

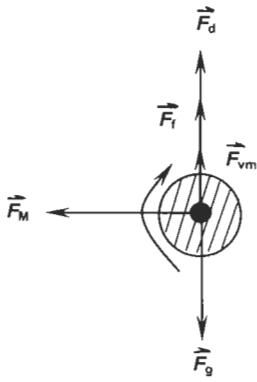


图 1 颗粒在垂直流中的受力示意图

Fig.1 Schematic diagram of the forces acting on particle in vertical current

颗粒运动的微分方程如下:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = |\vec{F}_d + \vec{F}_f + \vec{F}_g + \vec{F}_{vm}| \quad (1)$$

其中

$$F_d = C_d \frac{\pi d_p^2 \rho_g (v_g - v_p)^2}{4} \quad (2)$$

$$F_f = \frac{\pi}{6} \rho_g d_p^3 g \quad (3)$$

$$F_g = -\frac{1}{6} \pi \rho_p d_p^3 g \quad (4)$$

$$F_{vm} = \frac{1}{12} \pi d_p^3 \rho_g \frac{d}{dt} (v_g - v_p) \quad (5)$$

以上各式中,  $m$  为质量, kg;  $v$  为速度, m/s;  $t$  为时间, s;  $\rho$  为密度, kg/m<sup>3</sup>;  $d$  为直径, m; 下标 p 和 g 分别代表颗粒和气体. 式 (2) 中, 曳引阻力系数  $C_d = a/Re^k$  (系数  $a$  和  $k$  由 Reynolds 数  $Re$  的大小决定<sup>[13]</sup>, 而 Reynolds 数  $Re = [d_p(v_g - v_p)]/\nu$  (其中,  $\nu$  为运动粘度, m<sup>2</sup>/s)). 将  $C_d$  值以及式 (2—5) 代入式 (1), 整理后得

$$(2\rho_p + \rho_g) \frac{dv_p}{dt} = \frac{3}{2} a \left(\frac{d_p}{\nu}\right)^{-k} \frac{1}{d_p} \rho_g (v_g - v_p)^{2-k} + 2\rho_g g - 2\rho_p g \quad (6)$$

## 2 运动方程求解

颗粒在气流中从静止开始加速, 速度  $v_p$  不断增大,  $v_g - v_p$  则反之, 气体流过颗粒表面的 Reynolds 数  $Re$  也相应减小, 造成曳引阻力系数  $C_d$  随颗粒速度  $v_p$  的变化而变化. 故颗粒运动根据曳引阻力系数  $C_d$  的取值可以分为以下 3 种情况讨论:

(1) 当  $1 \times 10^3 < Re < 2 \times 10^5$  时,  $a=0.44$  且  $k=0$ , 颗粒运动服从 Newton 阻力定律

(2) 当  $1 < Re \leq 1 \times 10^3$  时,  $a=10$  且  $k=1/2$ , 颗粒运动服从 Allen 定律.

(3) 当  $Re \leq 1$  时,  $a=24$  且  $k=1$ , 颗粒运动服从 Stokes 定律.

### 2.1 颗粒加速完成后的速度 $v_p(t')$

当颗粒加速完毕后  $v_p$  为定值, 不随  $t$  变化, 设此时时间为  $t'$ , 则  $t = t'$ ,  $dv_p/dt=0$ . 设  $v_t$  为颗粒在静止流体中的自由沉降速度, 则有

$$\frac{1}{6} \pi d_p^3 (\rho_p - \rho_g) = C_d \frac{\pi d_p^2 \rho_g v_t^2}{4}$$

可得

$$v_t^{2-k} = \frac{4gd_p^{1+k}(\rho_p - \rho_g)\nu^{-k}}{3a\rho_g} \quad (7)$$

对于式 (6), 当  $dv_p/dt=0$  时, 则

$$(v_g - v_p)^{2-k} = \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} g \frac{4}{3a} d_p^{1+k} \nu^{-k} = v_t^{2-k} \quad (8)$$

从式 (8) 可以看出, 当颗粒加速完毕做等速运动时, 颗粒运动速度是气流速度与自由沉降速度之差.

### 2.2 颗粒在加速段的瞬时速度与时间的关系

对式 (6) 进一步整理后得

$$\frac{dv_p}{(v_g - v_p)^{2-k} - v_t^{2-k}} = \frac{3}{2} a d_p^{-1-k} \nu^k \frac{\rho_g}{2\rho_p + \rho_g} dt \quad (9)$$

(1) 当  $k=0$  且  $a=0.44$ , 式 (9) 可写为

$$\frac{dv_p}{(v_g - v_p)^2 - v_t^2} = \frac{3}{2} a_1 \frac{1}{d_p} \frac{\rho_g}{2\rho_p + \rho_g} dt \quad (10)$$

式中,  $a_1=0.44$ . 对式 (10) 积分得

$$t = \frac{2d_p(2\rho_p + \rho_g)}{3a_1\rho_g} \left( -\frac{1}{2v_t} \ln \left| \frac{(v_g - v_p) - v_t}{(v_g - v_p) + v_t} \right| + C_1 \right) \quad (11)$$

(2) 当  $k=1/2$  且  $a=10$ , 式 (9) 可写为

$$\frac{dv_p}{(v_g - v_p)^{3/2} - v_t^{3/2}} = \frac{3a_2\nu^{1/2}\rho_g}{2d_p^{3/2}(2\rho_p + \rho_g)} dt \quad (12)$$

式中,  $a_2=10$ . 对式 (12) 积分, 整理得

$$t = -\frac{2d_p^{3/2}(2\rho_p + \rho_g)}{9a_2\nu^{1/2}\rho_g} \left[ \ln \frac{(\sqrt{v_g - v_p} - \sqrt{v_t})^2}{v_g - v_p + \sqrt{(v_g - v_p)v_t} + v_t} + \frac{8\sqrt{3}}{3} \arctan \left( \frac{2\sqrt{v_g - v_p} + \sqrt{v_t}}{\sqrt{3v_t}} \right) - C_2 \right] \quad (13)$$

(3) 当  $k=1$  且  $a=24$ , 式 (9) 可写为

$$\frac{dv_p}{v_g - v_p - v_t} = \frac{3a_3\nu\rho_g}{2d_p^2(2\rho_p + \rho_g)} dt \quad (14)$$

式中,  $a_3=24$ . 对式 (9) 积分并整理, 得

$$t = \frac{2d_p^2(2\rho_p + \rho_g)}{3a_3\nu\rho_p} [\ln(v_g - v_p - v_t) + C_3] \quad (15)$$

以上常数  $C_1$ ,  $C_2$  和  $C_3$  的值根据初始条件 ( $t=0$  且  $v_p=0$ ) 以及函数的连续性性质来确定. 当  $v_p=0$  时,  $Re_{(0)} = v_g d_p / \nu$ ; 随着颗粒速度  $v_p$  的增大, Reynolds 数  $Re$  呈递减趋势.

当  $1 \times 10^3 < Re_{(0)} < 2 \times 10^5$  时, 颗粒运动依次进入服从 Newton 阻力定律、服从 Allen 定律和服从 Stokes 定律. 将把  $t=0$  且  $v_p=0$  代入式 (11), 得到  $C_1$ ; 在  $Re = 1 \times 10^3$  时, 式 (11) 与式 (13) 相等, 得到  $C_2$ ; 在  $Re=1$  时, 式 (13) 与式 (15) 相等, 得到  $C_3$ .

当  $1 < Re_{(0)} \leq 1 \times 10^3$  时, 颗粒运动依次进入服从 Allen 定律及服从 Stokes 定律. 将  $t=0$  且  $v_p=0$  代入式 (13), 得到  $C_2$ ; 在  $Re=1$  时, 式 (13) 与式 (15) 相等, 得到  $C_3$ .

当  $Re_{(0)} \leq 1$  时, 颗粒运动服从 Stokes 定律. 将  $t=0$  且  $v_p=0$  代入式 (15), 得到  $C_3$ .

综上所述,  $Re_{(0)}$  决定常数  $C_1$ ,  $C_2$  和  $C_3$  的取值.

### 2.3 颗粒运动速度与距离的关系

(1) 当  $k=0$  时, 式 (10) 变化后有

$$dt = \frac{2d_p(2\rho_p + \rho_g)}{3a_1\rho_g} \frac{dv_p}{(v_g - v_p)^2 - v_t^2} \quad (16)$$

设运动距离为  $L$ , 则

$$\begin{aligned} L &= \int v_p dt = \frac{2d_p(2\rho_p + \rho_g)}{3a_1\rho_g} \int \frac{v_p dv_p}{(v_g - v_p)^2 - v_t^2} \\ &= \frac{d_p(2\rho_p + \rho_g)}{3a_1\rho_g} \left[ -\frac{v_g}{v_t} \ln \left| \frac{v_g - v_p - v_t}{v_g - v_p + v_t} \right| + \right. \\ &\quad \left. \ln |(v_g - v_p)^2 - v_t^2| \right] + C_4 \end{aligned} \quad (17)$$

(2) 当  $k=1/2$  时, 式 (12) 变化后有

$$dt = \frac{2d_p^{3/2}(2\rho_p + \rho_g)}{3a_2\sqrt{\nu}\rho_g} \frac{dv_p}{(v_g - v_p)^{3/2} - v_t^{3/2}} \quad (18)$$

则

$$\begin{aligned} L &= \int v_p dt = \frac{2d_p^{3/2}(2\rho_p + \rho_g)}{3a_2\sqrt{\nu}\rho_g} \int \frac{v_p dv_p}{(v_g - v_p)^{3/2} - v_t^{3/2}} \\ &= \frac{2d_p^{3/2}(2\rho_p + \rho_g)}{3a_2\sqrt{\nu}\rho_g} \left[ 2\sqrt{v_g - v_p} + \frac{1}{3} \left( -\frac{v_g}{\sqrt{v_t}} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \sqrt{v_t} \ln \frac{(\sqrt{v_g - v_p} - \sqrt{v_t})^2}{v_g - v_p + \sqrt{(v_g - v_p)v_t} + v_t} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \frac{2(v_g + v_t)}{\sqrt{3v_t}} \arctan \left( \frac{2\sqrt{v_g - v_p} + \sqrt{v_t}}{\sqrt{3v_t}} \right) \right] + C_5 \end{aligned} \quad (19)$$

(3) 当  $k=1$  时, 式 (14) 变化后得

$$dt = \frac{2d_p^2(2\rho_p + \rho_g)}{3a_3\nu\rho_g} \frac{dv_p}{v_g - v_p - v_t} \quad (20)$$

则

$$\begin{aligned} L &= \int v_p dt = \frac{2d_p^2(2\rho_p + \rho_g)}{3a_3\nu\rho_g} \int \frac{v_p dv_p}{v_g - v_p - v_t} \\ &= \frac{2d_p^2(2\rho_p + \rho_g)}{3a_3\nu\rho_g} [-v_p - (v_g - v_t) \cdot \\ &\quad \ln(v_g - v_p - v_t)] + C_6 \end{aligned} \quad (21)$$

以上常数  $C_4$ ,  $C_5$  和  $C_6$  的值根据初始条件 ( $v_p=0$  且  $L=0$ ) 以及函数的连续性性质确定, 确定方法与  $C_1$ ,  $C_2$  和  $C_3$  的相同.

### 3 实验结果和讨论

在速度为 150 m/s 的氮气流中, 不同直径的石灰颗粒速度与时间的关系如图 2a 所示. 由图可知, 颗粒直径越小, 运动初期速度增加越快, 具有很大的加速度, 很快趋近  $v_p(t')$ ; 之后进入平缓区, 速度增加较小而所需的时间却突然增加. 直径为 2.00 mm 的石灰颗粒, 用 1.57 s 加速到 139 m/s, 而颗粒运动至 12.82 s 时, 速度也只达到 139.88 m/s. 直径为 0.02 mm 的石灰颗粒, 在  $0.93 \times 10^{-2}$  s 时, 速度即达到 148.61 m/s; 其后段曲线

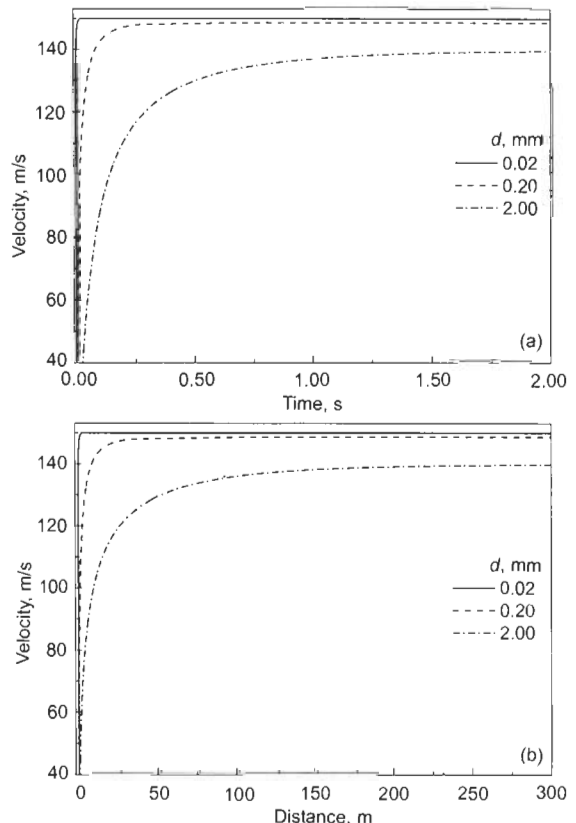


图 2 氮气流中石灰颗粒速度与时间及距离的变化曲线  
Fig.2 Relationships between the velocity of lime particle and time (a) and distance (b) in nitrogen current

几乎垂直于纵坐标轴, 颗粒运动进入平缓区, 需用较长的时间来完成较小的速度增量。

不同直径的石灰颗粒速度与运动距离关系如图 2b 所示。从图中可以明显看出, 小颗粒运动曲线位于大颗粒运动曲线的左侧, 直径越小则运动曲线越陡。这表明小直径颗粒经过短距离加速后进入平缓区, 而大直径颗粒却需要运动较长的距离才进入平缓区。

在速度为 150 m/s 的氮气流中, 直径为 0.20 mm、不同密度颗粒的速度与时间的关系如图 3a 所示 (图中分别示出 CaO, MgO 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等 3 种颗粒)。从图可见, 大密度颗粒的曲线位于小密度颗粒曲线的下方且曲率也小。这表明大密度颗粒需要比小密度颗粒更长的运动时间才能进入平缓区。图 3b 示出直径为 0.20 mm、不同密度颗粒的速度与运动距离的关系。从图可见, 运动曲线的曲率是按照 CaO→MgO→Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的顺序依次减小, 则颗粒进入平缓区的运动距离依次增加。

在喷射冶金中为提高粉剂的利用率, 要求喷吹的颗粒速度大于临界速度。钢包底吹喷粉颗粒的加速是在透气砖内完成的, 所以必须选用合适高度的透气砖, 确保颗粒在穿过透气砖的高度内获得足够的速度。在不考虑其它影响条件下, 颗粒的直径越小越好, 但过小的颗粒直径会降低

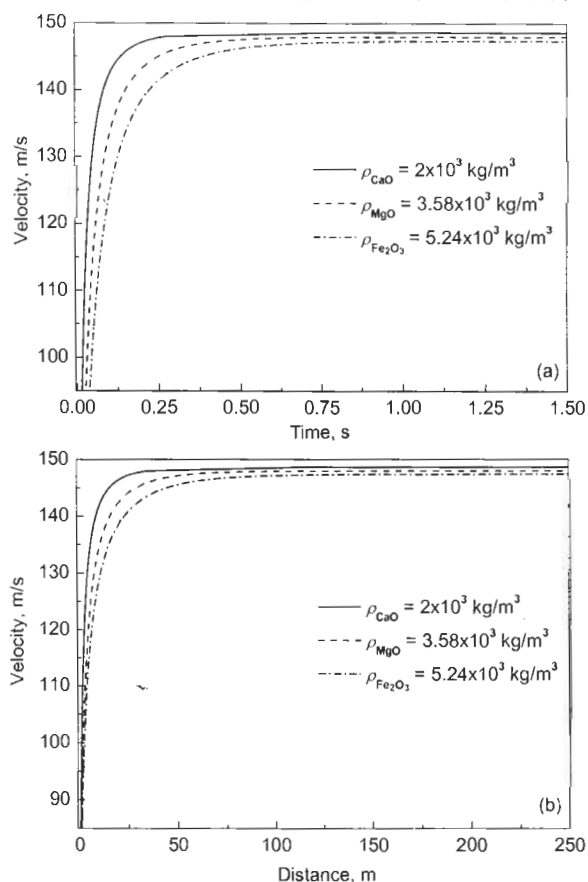


图 3 氮气流中不同密度颗粒速度与时间及距离关系的比较

Fig.3 Relationships between velocity of different density particle and time (a) and distance (b) in nitrogen current ( $d=0.20$  mm)

颗粒的动能。依据以上导出的速度与时间及距离的关系式, 选择合理的载气流速度和颗粒直径及密度, 再结合颗粒动能, 可为喷吹工艺参数的制订提供理论依据。

#### 4 结论

(1) 考虑重力、浮力、视质量力及曳引阻力对颗粒的影响, 建立了垂直流中的颗粒运动速度与时间及距离的数学模型。该模型可用于喷粉过程中载气流速和颗粒直径及密度参数的选取, 也可为喷粉透气砖参数设计提供参考。

(2) 垂直流中的颗粒运动速度增加有一平缓区。

(3) 垂直流中的小颗粒可经过极短的时间及距离加速至趋近于颗粒运动终速  $v_p(t')$ 。

#### 参考文献

- [1] Engh T A, Larsen K, Venas K. *Ironmaking Steelmaking*, 1979; 6: 268
- [2] Robertson D G C, Conochie D S, Castillejos A H. In: MEFOS (Metall Forschningsstationman) and Jernkontoret, eds., *SCANINJECT 2, Proc 2nd Int Conf on Injection Metallurgy*, Party 1, Lulea, Swed: MEFOS and Stockholm, Swed: Jernkontoret, 1980: 4.1
- [3] Farias L R, Robertson D G C. In: Iron & Steel Society of AIME, ed., *Application of Mathematical and Physical Models in the Iron and Steel Industry, Proc 3rd Process Technology Conf*, Warrendale, PA: Iron & Steel Society of AIME, 1982: 106
- [4] Yamanoglu G, Guthrie R I L, Mazumdar D. *Can Metall Q*, 1999; 38(1): 61
- [5] Luo J J, Peng Y C, Xiao Z Q. *Eng Chem Metall*, 1994; 15: 243  
(罗建江, 彭一川, 肖泽强. 化工冶金, 1994; 15: 243)
- [6] Zhu R, Wang X H, Di L. *Spec Steel*, 2000; 21(4): 9  
(朱荣, 王新华, 迪林. 特殊钢, 2000; 21(4): 9)
- [7] Liu S P, Luo X G, Wen G Y. *Iron Steel*, 2002; 37(2): 7  
(刘守平, 罗小刚, 文光远. 钢铁, 2002; 37(2): 7)
- [8] Tian P, Wang H Z, Song M T. *Steelmaking*, 2003; 19(6): 41  
(田鹏, 王会忠, 宋满堂. 炼钢, 2003; 19(6): 41)
- [9] Tang P, Wen G H, Xue W F, Xiong Y C, Long Y J, He H X, Zhao Z X. *Res Iron Steel*, 2004; 32(5): 9  
(唐萍, 文光华, 薛伟锋, 熊银成, 龙怡菊, 何宏侠, 赵知祥. 钢铁研究, 2004; 32(5): 9)
- [10] Zhao C L, Zou Z S. *Chin Metall*, 2006; 16(10): 29  
(赵成林, 邹宗树. 中国冶金, 2006; 16(10): 29)
- [11] Zhu M Y, Zhou J A, Pan S S, Sha J. *Chin Pat, CN200510047980.1*, 2005  
(朱苗勇, 周建安, 潘时松, 沙骏. 中国发明专利, CN200510047980.1, 2005)
- [12] Zhang Y J, Wang H Y, Zhang Z P. *Two-Phase Hydrokinetics*. Beijing: Beijing Aeronautical and Astronautical Institute Press, 1986: 264  
(张远君, 王慧玉, 张振鹏. 两相流体动力学. 北京: 北京航空学院出版社, 1986: 264)
- [13] Oeters F. *Metallurgy of Steelmaking*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmpH, 1994: 224