

⑨ 45-5!

# 高钛型高炉渣炉内堵塞与液泛行为的研究

Research on Blocking and Flooding Behaviours  
of BF Slag Containing High  $TiO_2$  in Blast Furnace

TF 539.2

文光远  
Wen Guangyuan

裴鹤年  
Peng Henian

唐炜  
Tang Wei

(重庆大学冶金及材料工程系, 重庆, 400044; 第一作者 57 岁, 男, 副教授)

**摘要** 在实验室用高温熔滴炉模拟高炉冶炼过程, 对高钛型高炉渣在炉内的堵塞与液泛行为进行了实验研究, 研究了气体流速、 $TiO_2$  含量、 $TiO_2$  还原度和渣-焦界面性质对熔渣在炉内的堵塞与液泛的影响。

**关键词** 高炉; 高钛型炉渣; 堵塞; 液泛

炉渣 高钛渣

中国图书资料分类法分类号 TF 534

**ABSTRACT** Smelting process of BF has been patterned with the high-temperature melting-dropping furnace in laboratory, blocking and flooding behaviours of slag containing high  $TiO_2$  in BF have been tested, influences of gas velocity, content of  $TiO_2$ , reduced degree of  $TiO_2$  and interface properties of slag-coke on blocking and flooding of molten slag in BF have been researched.

**KEYWORDS** blast furnace; slag containing high  $TiO_2$ ; blocking; flooding

## 0 引言

四川攀西地区有极其丰富的钒钛磁铁矿资源, 我国对于钒钛磁铁矿高炉冶炼的研究已进行了 30 多年, 冶炼钒钛磁铁矿的攀钢高炉正式建成投产也已 20 多年了。大量的实验研究和生产实践资料表明, 高炉冶炼钒钛磁铁矿, 尤其是钒钛磁铁矿配比超过 80%, 高炉渣的  $TiO_2$  含量在 21% 以上时, 将面临许多特殊问题, 例如, 炉渣易粘稠, 流动性差和产生泡沫化等; 当高炉进行全钒钛磁铁矿冶炼时, 炉渣的  $TiO_2$  含量将达到 30%, 这些问题就将更为严重, 以至使高炉冶炼难以正常进行。因此, 欲进一步提高钒钛磁铁矿配比, 改善高炉冶炼的技术经济指标, 并进而实现全钒钛磁铁矿冶炼, 就必须研究和解决这些问题。

高钛型高炉渣的泡沫化是钒钛磁铁矿高炉冶炼的重大难题之一。关于它在炉外的现象和行为已进行了较透彻的研究<sup>[1-3]</sup>, 但关于它在炉内的行为, 由于研究设备和方法的困难, 至今尚未有人进行过仔细的研究。实际上, 由于高钛型高炉渣在炉内的泡沫化行为, 使得熔渣在高炉下部滴落带焦炭层中的透过性变差, 不能及时顺利地向下流动, 而易滞留在焦炭层

• 收文日期 1996-10-25

国家自然科学基金资助项目, 59274138

中,因此造成焦炭层空隙的堵塞和液泛现象,严重地影响了高炉的顺行和强化。基于这样的观点和认识,我们在实验室用高温熔滴炉模拟高炉冶炼过程,对高钛型高炉渣在炉内的泡沫化行为,即堵塞与液泛行为进行了实验研究。

## 1 实验研究内容与方案

将炉渣试样和焦炭按一定比例装入石墨坩埚,形成类似于高炉软熔带和滴落带的料柱;将石墨坩埚置于高温熔滴炉内,在升温过程中测试气体通过坩埚中的试样料柱时所产生的压差和料柱的压缩高度,直至温度达到熔滴炉允许的上限温度(1500℃)为止;取出和称量渣样的滴落量;取出石墨坩埚,观测料柱的变化和渣样的液泛情况;解剖坩埚,并进行显微镜观察,进一步观测和判断渣样的堵塞与液泛行为。最后,根据以上测试数据和结果来综合判断渣样在炉内的堵塞与液泛行为。

### 1.1 气体流速影响的实验

气体的流速在其它条件近似的情况下取决于气体的流量。所以,所谓气体流速的影响实际上也就是气体流量的影响。气体流速(也即气体流量)实验,不仅是为了考查气体流速对熔渣在炉内堵塞与液泛行为的影响,而且亦是为了选择一个适宜的气体流速,作为以后其他实验的一个恒定条件。采用以攀钢高炉现场渣为基础配制的TiO<sub>2</sub>含量为30%的炉渣作为试样;采用精氮作为实验气体(除渣-焦界面性质影响外,其他均采用精氮作为实验气体),其流量(V)分别为0.5 l/min、1.5 l/min和2.5 l/min。

### 1.2 TiO<sub>2</sub>含量影响的实验

本实验是考查不同的TiO<sub>2</sub>含量对熔渣堵塞与液泛的影响。以攀钢现场渣(其化学成分见表1)作为基础,添加化学试剂熔制为不同TiO<sub>2</sub>含量的渣样。其TiO<sub>2</sub>含量分别为0.96%(安阳钢铁厂普通高炉渣)、15%、22.16%(攀钢高炉渣)和30%。

表1 攀钢高炉渣化学成分 (%)

CaO	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO	MnO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	S
27.08	25.23	22.18	12.33	9.31	2.06	0.66	0.23	0.285	0.191	0.45

### 1.3 TiO<sub>2</sub>还原度影响的实验

该实验的渣样同样是采用攀钢现场渣配加试剂熔制而成,其TiO<sub>2</sub>含量为30%。渣样中TiO<sub>2</sub>的还原度是利用在熔制渣样时渣样与石墨坩埚反应的时间来控制:在恒温(1450℃)和有氮气存在的条件下,反应时间越长,TiO<sub>2</sub>的还原度越高,生成TiC、TiN和Ti(C,N)等越多。TiO<sub>2</sub>的还原时间(τ),即渣样与石墨坩埚的反应时间分别取为30 min、90 min、150 min和210 min。

### 1.4 渣-焦界面性质影响的实验

该实验的渣样与上述TiO<sub>2</sub>系列最后一个渣样相同,即渣样的TiO<sub>2</sub>含量为30%。高钛型高炉渣冶炼的一个特殊性质就是渣焦反应生成的碳氮化钛能改变渣焦界面的性质,使熔渣能够润湿焦炭表面并使润湿性增强,从而能够使熔渣在焦炭层中堵塞和液泛。为了验证这一推论的正确性,采用还原性发生炉煤气(CO约30%,N<sub>2</sub>约70%)进行实验,以此检验熔渣的

堵塞和液泛行为是否会增强。

## 2 实验设备与方法

渣样的堵塞与液泛行为实验在以高温熔滴炉为主体的装置上进行。该装置的结构如图 1 所示。

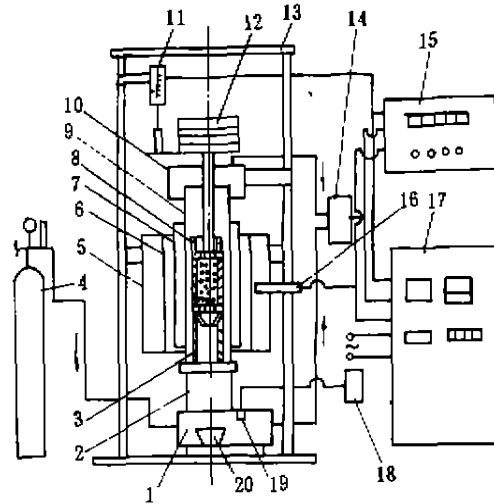


图 1 炉渣堵塞与液泛实验装置示意图

1. 取样箱；2. 金属管座；3. 石墨管座；4. 气瓶；5. 炉壳；
6. 保护套；7. 硅碳电阻管；8. 石墨坩埚；9. 刚玉管；
10. 密封罩；11. 位移计；12. 砝码；13. 支架；14. 压差变送器；
15. 函数记录仪；16. 热电偶；17. 温控器与记录仪；18. 报警器；
19. 光敏电偶；20. 样杯

炉渣试样在 1450℃ 下熔化配制，冷却后经破碎和筛分，其粒度为 3~7 mm。实验用焦炭取自重钢高炉现场，其粒度为 8~10 mm。实验前将渣样和焦炭放入烘箱，在 105℃ 下烘烤 2 h。

每次实验取渣样 95 g、焦炭 76 g，即渣样与焦炭质量之比为 1.25 : 1，这是模拟高炉采用高钛型炉渣操作时的情况。石墨坩埚外径 54 mm，内径 46 mm，高 210 mm，底部为锥形漏斗，装样时先在坩埚底部垫上钻有若干小孔的石墨底板。焦炭分两部分装入，70% 装在坩埚下部，30% 装在最上部；渣样装在两层焦炭的中间。试样装完后，在其上面放置钻有若干小孔的石墨压板和石墨压杆；将石墨坩埚放入熔滴炉内的石墨底座上；将密封罩移至刚玉管上方，开启电动机，令密封罩下降至荷重砝码将压杆压紧和密封罩将刚玉管端口压紧为止；将位移计放置在砝码底部的托板上，并调好零位；开启高温炉、控温系统、检测系统和函数记录仪，开始升温进行实验。先由手动控制升温速度，每分钟 5~7℃，当温度升至 100℃ 时转为自动控制升温，先快后慢，其速度为 8~2℃ /min。升温一开始就接通氮气，流量为 0.5 l/min，目的是保护坩埚和底座，排除炉内空气，形成中性气氛；当渣样的温度升至 900℃ 时，氮气流速改为指定流量，除气体流速影响实验外，此值均为 1.5 l/min。温度达到 1500℃ 时，实验完

毕,手动降温,将氮气流量调到 0.5 l/min,防止石墨件和试样氧化,当温度降至 200℃时,停止通氮气。炉子冷却后,取出样杯,称量滴落渣重量;取出坩埚,进行观测、解剖和显微镜下观察。

### 3 实验结果

气体流速、TiO<sub>2</sub> 的质量分数 wTiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub> 还原度和渣-焦界面性质影响实验的气体压差  $\Delta p$  和渣样滴落量  $\Delta w$  列于表 2; 气体压差随温度的变化如图 2~图 5 所示。

表 2 各系列实验的气体压差和渣样滴落量

系列	编号	wTiO <sub>2</sub>	$\tau$ (min)	实验气体		最高 $\Delta p$		$\Delta p$ /kPa			$\Delta w$ (g)
				种类	V (l/min)	$\Delta p$ (kPa)	t /°C	1450°C	1470°C	1500°C	
气体 流速 系列	L <sub>1</sub>	30	30	N <sub>2</sub>	0.5	4.41	1420	1.86	1.89	1.72	
	L <sub>2</sub>	30	30	N <sub>2</sub>	1.5	8.34	1410	3.82	2.84	2.45	15.6
	L <sub>3</sub>	30	30	N <sub>2</sub>	2.5	11.18	1410	7.36	4.22	2.85	
TiO <sub>2</sub> 含量 系列	T <sub>0</sub>	0.96		N <sub>2</sub>	1.5	6.28	1370	1.13	0.61	0.53	65.2
	T <sub>1</sub>	15	30	N <sub>2</sub>	1.5	6.97	1380	1.86	1.81	1.77	46.2
	T <sub>2</sub>	22.18		N <sub>2</sub>	1.5	7.06	1390	2.65	2.42	2.16	21.3
	T <sub>3</sub>	30	30	N <sub>2</sub>	1.5	8.34	1410	3.82	2.84	2.45	15.6
TiO <sub>2</sub> 还原度 系列	R <sub>0</sub>	30	30	N <sub>2</sub>	1.5	8.34	1410	3.82	2.84	2.45	15.6
	R <sub>1</sub>	30	90	N <sub>2</sub>	1.5	8.99	1420	4.51	3.24	2.64	
	R <sub>2</sub>	30	150	N <sub>2</sub>	1.5	9.12	1430	5.10	3.33	2.80	
	R <sub>3</sub>	30	210	N <sub>2</sub>	1.5	9.45	1440	5.69	3.53	3.04	13.4
渣焦界面 性质系列	G <sub>1</sub>	30	30	N <sub>2</sub>	1.5	8.34	1410	3.82	2.84	2.45	15.6
	G <sub>2</sub>	30	30	CO+N <sub>2</sub>	1.5	9.80	1390	5.64	4.22	2.84	10.3

注: L<sub>2</sub>、T<sub>1</sub>、R<sub>0</sub>、G<sub>1</sub> 为同一实验,为了便于比较,故以不同的编号记入各系列中

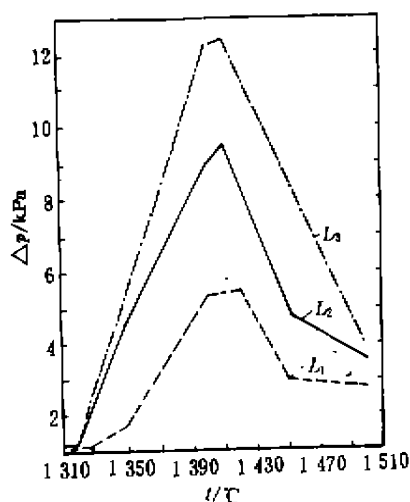


图 2 气体流速系列的气体压差随温度的变化

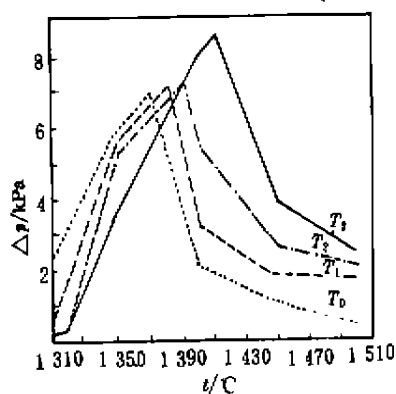


图 3 TiO<sub>2</sub> 系列气体气压差随温度的变化

### 3.3.2 Ti(C,N)的生成量

为了解样层中高熔点物质 Ti(C,N)的生成情况,对部分解剖坩埚进行了显微镜观察。除 T<sub>0</sub> 外,在被解剖的坩埚剖面上,用肉眼就可以看到在渣焦界面处都有数量不等的金黄色物质存在,这实际上就是 TiC、TiN 及其固溶体 Ti(C,N)。对 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 和 R<sub>3</sub> 和 G<sub>2</sub> 等坩埚解剖的制片进行显微镜观察发现:随着渣样中 TiO<sub>2</sub> 含量的增加,Ti(C,N)的数量增多;从 T<sub>1</sub> 到 T<sub>3</sub>,渣焦界面的情况变化明显,T<sub>1</sub> 的渣焦界面聚集的 Ti(C,N)主要为细线状,而 T<sub>2</sub> 主要为细带状,T<sub>3</sub> 的宽带状明显增多,这表明,随着 TiO<sub>2</sub> 含量的增加,不仅 Ti(C,N)的生成量增加,而且渣焦界面聚集的 Ti(C,N)量也增多;R<sub>3</sub> 与 T<sub>3</sub> 的主要区别在于渣中有更多的 Ti(C,N)出现,这是由于 R<sub>3</sub> 的渣样在熔制时有更长的反应时间,因而 TiO<sub>2</sub> 的还原度更高所致;G<sub>2</sub> 与 T<sub>3</sub> 比较,渣焦界面富集的 Ti(C,N)量更多,且以 TiC 为主,这是由于用发生炉煤气作实验时 TiO<sub>2</sub> 的还原度提高所致。

## 4 分析讨论

根据上述测试数据和结果可以看出各种因素对高钛型炉渣的堵塞与液泛的影响。

### 4.1 气体流速对堵塞与液泛的影响

由上述实验结果可见,气体压差 $\Delta p$ 、渣样滴落量和坩埚内渣样性状的变化均表明,随着气体流量(也即流速)的增加,高钛型熔渣在焦炭层中的堵塞与液泛现象逐渐出现和加重。这由液泛理论<sup>[4]</sup>很容易得到解释。根据液泛理论,当流量比( $f \cdot r$ )和液泛因子( $f \cdot f$ )<sup>2</sup>的乘积超过  $10^{-3}$ 时就有可能发生液泛。按照前述实验条件进行计算,在氮气流量为 0.5 l/min、1.5 l/min 和 2.5 l/min 的条件下, ( $f \cdot f$ )<sup>2</sup>( $f \cdot r$ ) 分别为  $0.368 \times 10^{-4}$ 、 $0.991 \times 10^{-3}$  和  $4.731 \times 10^{-3}$ 。由此可见,气体流量为 0.5 l/min 时不可能发生液泛,而在 1.5 l/min 和 2.5 l/min 时有可能发生液泛;由于高钛型炉渣胀泡性能强,并能改变焦炭的润湿性,故熔渣易在焦炭层中发生堵塞和液泛。所以,本实验的 L<sub>2</sub> 和 L<sub>3</sub> 均发生了液泛,而且 L<sub>3</sub> 比 L<sub>2</sub> 的液泛严重。

### 4.2 TiO<sub>2</sub> 含量和堵塞与液泛的关系

实验结果表明,随着渣样中 TiO<sub>2</sub> 含量的增加,熔渣在焦炭层中的堵塞与液泛逐渐出现和加重。TiO<sub>2</sub> 含量为 0.96% 的安阳钢铁厂高炉渣样(T<sub>0</sub>)没有发生液泛;TiO<sub>2</sub> 为 15% 的 T<sub>1</sub> 也基本未发生液泛,而 TiO<sub>2</sub> 为 22.18% 的攀钢高炉渣(T<sub>2</sub>)和 TiO<sub>2</sub> 为 30% 的 T<sub>3</sub> 均发生了液泛,而且 T<sub>3</sub> 比 T<sub>2</sub> 的液泛更严重。这是由于随着 TiO<sub>2</sub> 含量的增加,Ti(C,N)的生成量增多,胀泡性增强,渣焦界面因聚集的 Ti(C,N)量增多而使熔渣对焦炭的润湿性增强<sup>[5,6]</sup>,因而熔渣在焦炭层中的透过性变差,滞留量增多,液泛现象加重,于是焦炭层的透气性降低,故气体的压差升高。由此可见,高钛型炉渣,特别是当 TiO<sub>2</sub> 含量在 24% 以上时,在炉内高温区的焦炭层中容易发生熔渣堵塞与液泛,导致炉况不顺。这是高钛型高炉渣的一大特性,亦是高钒钛磁铁矿配比高炉冶炼的一大难题。

### 4.3 TiO<sub>2</sub> 还原度和渣焦界面性质对堵塞与液泛的影响

由实验结果可见,随着 TiO<sub>2</sub> 还原时间的增长,熔渣的堵塞与液泛加重;当用还原性的发生炉煤气代替氮气时,堵塞与液泛也加重。实际上,这二者的实质是一样的,只不过是实验的条件不同而已。因为在同样的 TiO<sub>2</sub> 含量(30%)情况下,随着渣样在熔制时 TiO<sub>2</sub> 被石墨碳还原的时间的增长,TiO<sub>2</sub> 的还原度提高,渣中 Ti(C,N)量增加,熔渣体粘度升高,渣焦界面富集

### 3.3.2 Ti(C,N)的生成量

为了解样层中高熔点物质 Ti(C,N)的生成情况,对部分解剖坩埚进行了显微镜观察。除  $T_0$  外,在被解剖的坩埚剖面上,用肉眼就可以看到在渣焦界面处都有数量不等的金黄色物质存在,这实际上就是 TiC、TiN 及其固溶体 Ti(C,N)。对  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  和  $R_3$  和  $G_2$  等坩埚解剖的制片进行显微镜观察发现:随着渣样中  $TiO_2$  含量的增加,Ti(C,N)的数量增多;从  $T_1$  到  $T_3$ ,渣焦界面的情况变化明显, $T_1$  的渣焦界面聚集的 Ti(C,N)主要为细线状,而  $T_2$  主要为细带状, $T_3$  的宽带状明显增多,这表明,随着  $TiO_2$  含量的增加,不仅 Ti(C,N)的生成量增加,而且渣焦界面聚集的 Ti(C,N)量也增多; $R_3$  与  $T_3$  的主要区别在于渣中有更多的 Ti(C,N)出现,这是由于  $R_3$  的渣样在熔制时有更长的反应时间,因而  $TiO_2$  的还原度更高所致; $G_2$  与  $T_3$  比较,渣焦界面富集的 Ti(C,N)量更多,且以 TiC 为主,这是由于用发生炉煤气作实验时  $TiO_2$  的还原度提高所致。

## 4 分析讨论

根据上述测试数据和结果可以看出各种因素对高钛型炉渣的堵塞与液泛的影响。

### 4.1 气体流速对堵塞与液泛的影响

由上述实验结果可见,气体压差  $\Delta p$ 、渣样滴落量和坩埚内渣样性状的变化均表明,随着气体流量(也即流速)的增加,高钛型熔渣在焦炭层中的堵塞与液泛现象逐渐出现和加重。这由液泛理论<sup>[4]</sup>很容易得到解释。根据液泛理论,当流量比( $f \cdot r$ )和液泛因子( $f \cdot f$ )<sup>2</sup>的乘积超过  $10^{-3}$ 时就有可能发生液泛。按照前述实验条件进行计算,在氮气流量为 0.5 l/min、1.5 l/min 和 2.5 l/min 的条件下, ( $f \cdot f$ )<sup>2</sup>( $f \cdot r$ )分别为  $0.368 \times 10^{-4}$ 、 $0.991 \times 10^{-3}$  和  $4.731 \times 10^{-3}$ 。由此可见,气体流量为 0.5 l/min 时不可能发生液泛,而在 1.5 l/min 和 2.5 l/min 时有可能发生液泛;由于高钛型炉渣胀泡性能强,并能改变焦炭的润湿性,故熔渣易在焦炭层中发生堵塞和液泛。所以,本实验的  $L_2$  和  $L_3$  均发生了液泛,而且  $L_3$  比  $L_2$  的液泛严重。

### 4.2 $TiO_2$ 含量和堵塞与液泛的关系

实验结果表明,随着渣样中  $TiO_2$  含量的增加,熔渣在焦炭层中的堵塞与液泛逐渐出现和加重。 $TiO_2$  含量为 0.96% 的安阳钢铁厂高炉渣样( $T_0$ )没有发生液泛; $TiO_2$  为 15% 的  $T_1$  也基本未发生液泛,而  $TiO_2$  为 22.18% 的攀钢高炉渣( $T_2$ )和  $TiO_2$  为 30% 的  $T_3$  均发生了液泛,而且  $T_3$  比  $T_2$  的液泛更严重。这是由于随着  $TiO_2$  含量的增加,Ti(C,N)的生成量增多,胀泡性增强,渣焦界面因聚集的 Ti(C,N)量增多而使熔渣对焦炭的润湿性增强<sup>[5,6]</sup>,因而熔渣在焦炭层中的透过性变差,滞留量增多,液泛现象加重,于是焦炭层的透气性降低,故气体的压差升高。由此可见,高钛型炉渣,特别是当  $TiO_2$  含量在 24% 以上时,在炉内高温区的焦炭层中容易发生熔渣堵塞与液泛,导致炉况不顺。这是高钛型高炉渣的一大特性,亦是高钒钛磁铁矿配比高炉冶炼的一大难题。

### 4.3 $TiO_2$ 还原度和渣焦界面性质对堵塞与液泛的影响

由实验结果可见,随着  $TiO_2$  还原时间的增长,熔渣的堵塞与液泛加重;当用还原性的发生炉煤气代替氮气时,堵塞与液泛也加重。实际上,这二者的实质是一样的,只不过是实验的条件不同而已。因为在同样的  $TiO_2$  含量(30%)情况下,随着渣样在熔制时  $TiO_2$  被石墨碳还原的时间的增长, $TiO_2$  的还原度提高,渣中 Ti(C,N)量增加,熔渣体粘度升高,渣焦界面富集

的Ti(C,N)量增多,故堵塞与液泛加重;而用发生炉煤气代替氮气进行实验时,由于还原气氛增强,TiO<sub>2</sub>的还原度也提高,渣中Ti(C,N)量,尤其是渣焦界面聚集的Ti(C,N)量因此而增多,所以,堵塞与液泛也加重。因此不难得出结论,抑制TiO<sub>2</sub>的过还原,是抑制、减轻和消除高钛型高炉渣炉内堵塞与液泛的主要方法和途径之一。

## 5 结 论

1) 高钛型高炉渣的胀泡性能强,渣中TiO<sub>2</sub>的还原和熔渣与焦炭表面润湿性的改变,是高钛型炉渣在炉内容易发生堵塞与液泛的主要原因。

2) 随着TiO<sub>2</sub>含量的增加,炉内熔渣的堵塞和液泛逐渐加重。当TiO<sub>2</sub>含量超过20%以后,有明显的堵塞与液泛现象发生。特别是当TiO<sub>2</sub>含量超过24%以后,炉内熔渣的堵塞与液泛现象更加严重。

3) 随着渣中TiO<sub>2</sub>的还原和渣焦界面Ti(C,N)的生成和聚集,熔渣的堵塞与液泛加重。抑制渣中TiO<sub>2</sub>的过还原是减轻和消除炉内熔渣堵塞与液泛的主要途径之一。

4) 随着气体流速的增加,熔渣的堵塞与液泛逐渐出现和加重。为防止和减轻高钛型炉渣在炉内的堵塞与液泛,高炉的风量应适宜。

## 参 考 文 献

- 1 王喜庆. 高炉冶炼高钛型炉渣泡沫成因浅析. 攀枝花钢铁, 1982, (1), 1
- 2 潘竞业. 高炉冶炼钒钛磁铁矿泡沫渣生成原因及消泡方法. 四川冶金, 1986, (1), 16
- 3 裴鹤年, 白晨光. 高钛型高炉渣泡沫化机制的探讨. 钢铁, 1989, (12), 7
- 4 Sherwood T K et al. Flooding Velocities In Packed Columns. Industrial and Engineering Chemistry, 1938, (30), 765~768
- 5 詹星. 小高炉冶炼钒钛磁铁矿解剖研究. 钢铁钒钛, 1984, (2), 3
- 6 施月循, 王文忠. 铁渣与焦炭界面性质的研究. 钢铁钒钛, 1989, (2), 16