

上海喷射冶金讨论会

*Proceedings
of
Shanghai Symposium on Injection Metallurgy*

中文版

中国 上海 1982.11.

November 1982 Shanghai China

上海喷射冶金讨论会文集

PROCEEDINGS OF SHANGHAI SYMPOSIUM ON INJECTION METALLURGY

译编: 冶金部特殊钢情报网

出版: 大冶钢厂

印刷: 湖北省蕲春县印刷厂

定价: 4.00元

目 录

上海喷射冶金讨论会开幕词	(1)
喷射冶金在我国稳步发展(中国)	(2)
在底吹转炉中喷射石灰粉基熔剂进行钢水脱磷的机理(日本)	(3)
利用多孔塞砖吹气搅拌时钢包内的对流和混合(挪威)	(12)
水模型底吹过程中粉粒穿透气液界面数量的初步探讨(中国)	(22)
喷射冶金在蒂森各炼钢厂的发展和应用(德国)	(27)
钢包喷射冶金的现状(芬兰)	(36)
钢包喷粉冶过程的速率现象(中国)	(41)
用 $\text{CaF}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 渣料脱除铁水中的磷和硫(日本)	(47)
喷射冶金对铁水脱硅和脱磷的作用(日本)	(54)
喷射气泡和铁液间相互作用的动力学(日本)	(60)
钢铁生产中喷吹工艺的工业性应用(法国)	(65)
ARMCO 公司铁水和钢液喷粉脱硫的进展(美国)	(73)
斯堪的纳维亚喷枪公司钢包喷射冶金系统(瑞典)	(81)
铬钢在还原气氛下的脱磷(瑞典)	(86)
法国钢铁工业中喷吹冶金的实例(法国)	(90)
钢包喷粉的生产与分析(中国)	(98)
钒钛铁水喷吹脱硫(中国)	(103)
110吨钢包吹氩喷粉脱硫的试验研究(中国)	(106)
RH-IJ钢包中的环流特性与搅拌效率(中国)	(111)
不同脱硫剂对钢包喷粉脱硫率的影响(中国)	(117)
钢包钙处理对奥氏体不锈钢中非金属夹杂物的影响(中国)	(122)
底吹和复合吹炼炼钢过程中凝固铁的形成和长大(加拿大)	(127)
喷枪结构对鱼雷车中液体流动的影响(中国、瑞典)	(132)
精炼钢液中钙的热力学行为(瑞典)	(138)

上海喷射冶金讨论会开幕词

冶金部钢铁司付司长 喷射冶金技术协调

委员会主任 高级工程师 杨栋

女士们、先生们：

上海喷射冶金学术讨论会今天开幕了，我谨向大会和全体代表表示衷心的祝贺。

参加这次学术讨论会的有来自日本、瑞典、挪威、芬兰、西德、法国、美国和中国等八个国家共64名代表。我谨代表冶金部喷射冶金技术协调委员会向全体代表表示热烈的欢迎。

喷射冶金是一项值得重视的、近期发展起来的冶金技术，它的设备比较简单，操作方便，用于处理铁水和钢液等方面已取得明显的效果。近十多年来，国际冶金界对这一技术进行了广泛的研究。这次会议的主要目的是针对喷射冶金技术的理论、装备和工艺技术等进行学术交流和讨论。

我借此机会，将中国喷射冶金技术发展情况作一简要介绍（详细请看论文集）。在中国，1977年起，许多钢铁企业、大学和研究院、所相继开始研究喷射冶金技术，并取得了一定的进展。到1980年已在工业生产中比较广泛地应用了这项技术。例如：

- （1）铁水予处理。包括脱硫、脱磷、脱硅和提取钒、铌。
- （2）强化电炉炼钢工艺。
- （3）高铬钢水脱磷。
- （4）易氧化元素如Al、Ti、B、Re等的微量合金化。
- （5）钢包喷射冶金用于钢液脱硫和夹杂物性状的控制。

同时制造了适用于工业生产使用的各种形式的喷射冶金装置。目前全国各厂使用的钢包喷射装置容量从15吨到120吨。对喷射冶金过程的工艺原理、粉料特性以及应用理论等方面都做了一些研究工作。

中国是一个发展中的国家。为了实现四个现代化，为了在本世纪末实现钢铁产量翻一番，中国的冶金工作者正在努力地工作。而喷射冶金技术在冶金工业中的应用已引起我们极大的兴趣和注意。可以预言，通过高炉喷煤粉，经过铁水予处理脱硫、磷、硅实现转炉的无渣、少渣吹炼，进而采用钢包喷射技术以缩短冶炼时间，大幅度提高钢水质量，并与连续铸锭技术相结合从而达到节约能耗、简化工艺操作、提高生产率、提高质量、降低成本的目的。同时，喷射冶金技术还将用于铁合金生产和有色冶炼等方面。这一切将为冶金工业生产开创一个新局面。

我们深切地希望与国际上的同行们加强学术交流和讨论，共同发展喷射冶金技术，与此同时也将会增进中国冶金工作者与外国同行之间的了解和友谊。

在座的外国代表中，有喷射冶金研究工作者和技术发展厂家，不少朋友来过中国，也有不少朋友是头一次来。我们欢迎朋友们来看看我们的国家。我们将尽量利用这次短暂的时间安排一些参观活动。我们欢迎外国同行们多提宝贵意见。

祝大会成功，代表们身体健康。

谢谢大家！

一九八二年十一月一日

喷射冶金在我国稳步发展

冶金工业部 钢铁司
喷射冶金技术协调委员会 杨栋、卢尚汉

我国从1978年起就开始对喷射冶金的理论、装备和工艺技术进行系统的研究。到1980年,喷射冶金已逐步在我国获得广泛的工业应用,其中包括:

铁水喷粉脱硫、脱磷、脱硅、提钒、提铌;用喷粉强化电炉炼钢过程;易氧化微量元素的喷吹合金化;高铬钢液喷粉脱磷;钢包喷粉脱硫和使夹杂物变性净化。

与此同时,我国已生产各种类型的工业用喷粉罐及其控制系统,建立了15T—120T钢包喷粉站,开展了喷射冶金过程基础理论和粉剂的研究,并在一定条件下进行了以氮代氩作为载气等研究,都取得了一些进展。

喷射冶金在我国钢铁工业中的应用,正引起广大冶金工作者愈来愈广泛的兴趣和关注,它将在铁合金生产、有色金属冶炼等方面获得新的发展。

铁水喷粉预处理

我国幅员辽阔,矿产资源复杂。某些地区钢铁厂的铁水中含有较高的硫、磷、硅、钒、钛、铌等元素,如按传统工艺冶炼将导致操作上的困难,并使某些贵重元素无法回收。

采用喷吹氧化钙系脱硫剂处理高硫生铁($[S]=0.15\sim0.20\%$),可脱硫90%,喷吹后硫含量 $\leq 0.015\%$ 。采用 Na_2CO_3 系脱硫剂处理含钒铁水,可同时脱硫、脱磷、提钒,其平均脱磷率为75%,脱硫率70%,提钒率80—90%。 CaC_2 是一种传统的铁水脱硫剂,用以处理含钒铁水时,脱硫率为60%;处理含钛铁水时,脱硫率为71%;处理钒—钛铁水时,脱硫率可达78.3%。

有的企业还利用本地区天然碱作为铁水喷吹预处理的粉剂,也获得了较好的效果,其脱硫率为50—80%,脱硅率为30—40%,与 CaC_2 系处理效果相近。

除此以外,我国的大学和研究院、所还开展了铁水喷粉脱硫、提钒、提铌等方面的机理研究,并在此基础上提出了多种新型铁水喷吹用的粉剂和工艺方法。

电弧炉炼钢过程的强化

我国某些地区钢铁料含磷高,电弧炉中炉料熔清时含磷高达0.20%以上。为此,在氧化期采用氧气作载体,喷吹铁矿粉、石灰粉,使氧化时间比常法缩短30分钟,脱磷率达到90%以上。较多的电炉炼钢厂,还原初期采用喷吹脱氧剂的方法,使熔池强制脱氧,这样整个还原期可压缩到20分钟以内。采用上述方法,电耗可降低60—80KVA/T,正常情况下电炉钢锭成本可降低3~5%,至于普通钢厂的钢锭成本降低问题有待进一步研究。

在电炉返回吹氧法冶炼不锈钢时,吹氧渣中含有30%以上铬的氧化物,采用氩气载流,将Ca—Si+Al粉喷入熔池中钢渣界面,使之在激烈搅拌下反应,可显著提高渣中铬的还原速度及程度,再加上其它工艺措施,可使总铬回收率达到93—95%,冶炼时间缩短20~30分钟。

喷射冶金还可用于微量、易氧化元素的合金化,将Al、B、Ti、V、Ca、Re等粉剂用Ar气吹入熔池,可在一定程度上避免它们在炉气、炉渣中的烧损,以稳定成分,提高回收率。如有的工厂利用过去作为废弃物的自然粉化钛铁屑,喷入钢液冶炼18CrMnTi合金结构钢,钛的回收率可达50—60%,钢包喷粉合金化的钛回收率可达70%。而过去加入Fe—Ti块时,回收率为40—50%。钢锭成本可降低20元/吨。

高铬钢液的脱磷

由于不锈钢冶炼中返回料比例不断增加和高碳铬铁的应用,使原料中磷的问题日益严重,并有不断增

长的趋势。我国从1979年就开始了高铬钢液喷吹脱磷的试验研究,并于1980年在工业性试验中获得成功。在5T和15T电炉中,喷吹 CaC_2 系脱磷粉剂,使钢液的脱磷率达到25%左右,而钢中的铬、镍、锰等元素基本不变。现在该方法已成为工厂中原料处理或冶炼过程中解决磷高困难的一种生产性手段。

与此同时,对于高铬钢液中磷氧化的机理及其在渣中的稳定条件,也作了一定的探讨,取得了比较满意的结果。

钢包喷粉脱磷及使夹杂物变性

钢包喷粉,或称钙处理是钢铁工业中应用喷射冶金的一个主要形式。我国从1980年自行设计、建成第一套15T钢包喷吹系统以来,又陆续建成从15T到30T、120T的钢包喷吹站多个。1981年齐齐哈尔钢厂又从瑞典引进35T、100T的SL喷吹系统各一套。这些喷吹站分别与电弧炉、转炉、平炉相配合,用于冶炼极低硫钢、厚板、厚壁管用钢、易切削钢,以及要求纵、横向性能一致的合金结构钢等钢种。

经这些喷吹站的实践证明,它们是强有力的高效脱硫装置。可使处理后的钢中硫含量稳定在0.005%以下,最低可达0.001%以下。同时,经过钙处理的钢,由于钢中清洁度的提高,且钢中夹杂物已变形为细小的圆球状,故可在不降低强度的条件下,显著地提高钢的塑性、冲击韧性,并使钢材的纵横向性能趋于一致,在某些钢种的组织与性能方面(如18CrNiWA、30CrNi3MoA等),达到或超过了电渣钢的水平。

经过钢包喷吹站处理的钢液,工艺性能亦有十分明显的改善,浇注温度可降低10~20℃,水口不结瘤,也无包底,各盘的浇注温度也十分接近。

与此同时,钢包喷吹Ca—Si粉对特殊钢脱氧研究,今年亦取得了较好的效果。

结束语

喷射冶金在我国开展虽仅四年,但已获得了令人瞩目的进展。它作为炉外精炼的一种型式,其投资少、设备简单、能耗低、效率高。

目前我国既注视着国外喷射冶金发展的成功经验,又立足于本国的具体条件,使之能在我国钢铁生产中发挥显著的经济效益。同时,我们也看到,除在工业上继续试验和应用以外,还应在喷射冶金的基础理论方面深入地开展工作,才能使这一技术不断推向前进。

可以预料,随着喷射冶金技术的进一步发展,钢铁冶金生产工艺将得到彻底的改变。高炉不必去消耗更多的能源来降低铁水含S量,高S铁水可通过炉外喷吹脱S处理得到低硫铁水,这样转炉就可以采用少渣或无渣操作,多用废钢,然后在钢包中喷吹精炼,调整成份,同时钢水的流动性也获得改善,有利于连铸。这将大大节约能源,简化操作,提高质量,改善环境,使钢铁工业更适应现代化建设的需要。

在底吹转炉中喷射石灰粉基熔剂 进行钢水脱磷的机理

Osamu Haida, Shuji Takeuchi Tsutomu Nozaki Toshihiko Emi

Hitoshi Morishita and Fumio Sudo

(日本川崎钢铁公司)

摘 要

在底吹转炉中喷入氧气和仅23Kg/t的石灰—萤石混合物,用以进行铁水脱磷,在短短2—4分钟将铁水中的磷 $[\%P]$ 始由0.140脱至 $[\%P]$ 终=0.010。试验确定了顶渣作为固定反应器反应和从底枪喷入氧气和石灰粉在熔池中上升的瞬息反应,两者在脱磷中所起的作用。

无论是将萤石加进被喷入的石灰粉中或是加到生成的顶渣中,脱磷率100($[\%P]$ 始— $[\%P]$ 终)/ $[\%P]$ 始均达90—95%,而当不加萤石时,则降为50—70%。详细的分析表明,上述脱磷率的50

—70%是由于瞬息反应,其余的0%(不加萤石)—25—40%(加萤石)是由于固定反应器反应。从在熔池中上升的渣粒中取样,发现含 P_2O_5 10—30%,证实了瞬息反应的重要作用。

从实验室的补充试验发现,脱磷系按以下顺序进行:石灰粉粒和氧气先形成铁酸钙,在熔池中上升时,铁酸钙将P氧化为 P_2O_5 ,而它自身被还原为CaO,并与 P_2O_5 结合,形成 $3CaO \cdot P_2O_5$ 颗粒。

一、引言

五十年代人们曾致力于研究用石灰基熔剂进行铁水脱硅和脱磷,以提高平炉生产率。在顶吹转炉大发展以后,这方面的兴趣为之降低。但在日本,铁水脱硅已被恢复起来,作为把炼钢的渣量减少到最低限度的一项有效措施^[1]。然而铁水脱磷,尽管值得做工作^[2],3],过去却没有在实际上应用,这是由于加入氧化性的碱性熔剂以后,CO气泡的产生,导致出现严重的泡沫渣,妨碍了继续进行脱磷。不过对超低磷钢需求量的增加,以及降低损失于渣中的铁、以提高金属收得率的迫切要求,又为重新考虑铁水脱磷,以使炼钢过程合理化,提供很好的理由。从底吹转炉底部喷咀喷入石灰粉、萤石粉和氧气被设计为解决泡沫渣问题的一种办法。在近似固态、含氧化铁很少的顶渣下,短短2—4分就得到了90—95%的极高脱磷率。通过此项工作,打算弄清氧气底吹转炉的这一新喷吹作业,所以获得很高的铁水脱磷率的机理。

现在喷粉技术已经取得了很大进步,例如在某些炼钢实践中,提高了脱硫的反应效率。喷射法所以得到很高的反应效率,通常均解释为粉粒在熔化物中上升时,由于熔化物与粉粒之间具有很大的边界接触面积,因而提高了总的反应速度。然而最近的报告指出,对于脱硫,强烈的气体搅拌使得从顶部加入熔剂和从底部喷射熔剂一样有效^[4]。因此确定顶渣和喷粉在脱磷中所起作用的相对大小,在理论上和实践上都是重要的^[5]。

在本项研究工作中,用试验解释在氧气底吹转炉中,何以在不适宜进行脱磷的很低的氧位的铁水中得到很高的脱磷率,提出令人信服的脱磷的机理。

二、230t氧气底吹转炉铁水脱磷操作的结果

在230t氧气底吹转炉中进行的铁水脱磷处理的典型操作实践示于图1,石灰混以萤石,从底枪喷入,同时从炉子上部加入铁矿,以控制温度。上述处理所需时间仅仅短至2—4分。这一处理的特点

· 本文的一部分曾发表于“铁与钢”68, No13

(1982), 本文全文已送Trans. ISIJ发表

之一是尽管顶渣很粘,脱磷速度却极高。

如图2所示,氧化铁水中的硅所需的氧除外,氧耗量在 $10Nm^3/t$ 以下时,脱磷率 $R_P = 100([\%P]_{\text{始}} - [\%P]_{\text{终}}) / [\%P]_{\text{始}}$ 随耗氧量的增加而增加。图3显示处理前硅含量愈低,终点磷含量愈低。图4显示顶渣中的含铁量随加入的萤石量的增加而降低。顶渣中的萤石提高了渣子的流动性,加强了金属中碳对氧化铁的还原。

与此相反,渣中磷随渣中萤石量的增加而增加,示于图5。有趣的是把图4和图5联起来,显示氧化铁低一些,磷却脱的更好。这说明在此条件下,动力学因素对于脱磷,比热力学因素更重要。

三、试验

230t氧气底吹转炉

采用对吹炼进行动态控制的测头,它能以改造的子弹取样,样中包含沿金属熔池上升的石灰基渣粒。在正常炉次吹炼过程的不同时刻取金属样,样中渣粒的直径用显微镜测定,成分用扫描电镜(Electron Probe Micro Analysis)测量(见图像1)。在一个炉次的顶渣中,还加入 $BaCO_3$ 做示踪剂进行测量。在脱磷处理后,对顶渣渣样本身及所含金属粒进行化学分析。从炉口及炉底喷咀轮番加石灰块和喷石灰粉,以得到分别评价顶渣(固定反应器)和在金属熔池中上升的石灰粉(瞬息反应)的脱磷作用的数据。

5t氧气底吹转炉

在上述的取样和测定之外,还在三个不同高度,插入带有三个定氧测头的测枪,在吹炼中测定金属熔池中氧的活度。

实验室试验

为模拟喷射热的三相边界(氧气/熔剂/铁水),如图6所示,用烧结的 $CaO + (2-5\%)CaF_2$ 做的氧枪头被插入镁砂坩埚内感应熔化的铁水之中,从氧枪头的中心孔吹氧(5升/分)10—30秒(系列1, 2)。还进行了将烧结的45%CaO—50% Fe_2O_3 —5% CaF_2 做的枪头插入铁水中不吹氧的试验(系列3)。三个系列试验的铁水成分见表1。在这些试验中,铁水温度保持在 $1370 \pm 10^\circ C$ 不变。吹炼后,沿纵向中心线将枪头切开,用扫描电镜分析测定断

面上反应层P和Fe的分布。

表1 用石灰进行实验室规模的脱磷
试验所用铁水的成分

系 列	C	Si	P	S
1	3.3	0.008	0.21	0.035
2	3.2	0.032	0.29	0.035
3	3.8	0.021	0.18	0.022

四、结果与讨论

1、在金属熔池中上升的渣粒的成分和大小的分布

在脱磷处理中从金属熔池中取得的渣粒，如图像1所示为球形，意指系液态。从开吹起0.5—1分的脱硅阶段，渣粒的主要成分为CaO和SiO₂，在脱磷阶段则为CaO，SiO₂和P₂O₅。应注意如表2所

表2 悬浮在金属渣池中的渣粒的典型化学成分(%)

时间	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	T.Fe	MnO	MgO	S	F
46"	38.2	44.2	tr.	1.4	1.2	2.40	0.88	tr.
47"	40.7	40.8	tr.	0.5	7.3	0.60	0.50	tr.
46"	40.7	43.1	tr.	1.1	1.3	2.40	0.44	tr.
46"	38.9	44.5	tr.	1.9	1.3	2.60	0.59	tr.
3'38"	48.4	10.9	29.6	1.0	0.3	2.80	0.68	tr.
2'25"	66.3	14.7	10.4	9.9	0.6	0.30	0.44	2.75
2'25"	58.6	13.3	19.3	0.9	0.3	0.81	1.19	2.00
2'25"	60.4	14.8	17.3	0.9	0.5	0.40	0.83	1.05

示，(%T.Fe)只有(1—2%)计算，如图7所示，渣粒中的P₂O₅在碱度超过1.5时，随碱度的增加而增加，并接近于4CaO·P₂O₅或3CaO·P₂O₅之值，据报告系石灰脱磷的反应产物。^{[6][7]}渣粒形成后上浮到弯月面，考虑到其碱度范围为3—6，P₂O₅高达10—30%，看来此为在铁水处理中所以得到显著脱磷作用的主要因素。

如图8所示，在吹炼中渣粒的氧化硅随时间急剧下降，由脱硅阶段开始时的(50%)计算，到脱磷阶段的(10%)计算。这一观测支持了以下看法，即脱硅阶段形成的渣粒来自喷入的石灰粉及脱硅的反应产物—氧化硅。

渣粒还包含喷入的萤石。观测到的渣粒的CaF₂/CaO比，如图9所示，比按喷入熔剂成分的

计算值为小。还有，这些比值很分散，意味喷入的石灰粉在某种程度上与萤石粉凝结为一体，但凝结的频率低，不能使CaF₂/CaO比保持常数。

为什么在脱磷阶段，当氧化硅的生成可忽略不计，在生成的渣粒中发现氧化硅，可以解释如下：悬浮的有氧化硅的渣粒—脱硅阶段生成的渣粒或顶渣加入物—与喷入的石灰粉凝结起来，把生成的渣粒的碱度降到3—6。以下事实显示顶渣加入物的出现：示踪剂加入量为顶渣中含BaO 1.86%，在该炉的四个渣粒中发现的BaO为0.69，0.72，0和0%。

如图10所示，渣粒的平均直径近似喷入的石灰粉，证实了以上所说—喷入的石灰粉为渣粒的基本组成物。渣粒按重量百分比的粒度分布在小直径区低于喷入的石灰粉，这与上面所说石灰粉由于与氧化硅、顶渣加入物、脱硅来的渣粒凝结在一起而变粗是一致的。

2、顶渣的脱磷作用

图11为230吨氧气底吹转炉从顶部加石灰块，和从底部喷入石灰粉，轮番脱磷的结果，总的石灰耗量(喷射+顶部加入)保持常数。图中的横座标为在1中所提脱磷阶段喷入的石灰量。吹炼操作中全部石灰均由顶部加入，R_P之值估计为25—40%——曲线与纵座标之交点。此值较喷石灰粉操作(图中的实点)——固定反应器反应之外，瞬息反应起主要作用时——低50—70%。

这表明图1所示的新处理法，磷的大部分——总R_P的50—70%——靠喷入石灰粉的瞬息反应脱去。另方面顶渣靠固定反应器反应自然地去除铁水中的磷，占总R_P的25—40%。

3、顶渣中加入萤石的脱磷效果

在正常处理中，萤石和石灰粉及氧气一起从底部喷咀喷入，R_P高达90—95%；在另外的操作中，萤石从顶部加入，而石灰粉和氧气从底部喷入，R_P也高达93%。但在后一情况下，不加萤石时，R_P之值降至(24%)计算——(69%)计算。这一降低可与固定反应器反应获得的R_P(25—40%)相比，因此可以得到结论：萤石的加入，强化了固定反应器反应；不加萤石时，顶渣很难脱去铁水中的磷。

萤石强化顶渣脱磷的机理，可以解释为由两个影响所致：一是渣铁间磷分配的平衡常数K_P²的提高；再一是由于炉渣粒度降低，反应速度提高。

按Turkdogan^[8]公式，对脱磷的前面一个影响，可由式①看出：

$$\log Y_{P_2O_5} = -1.12 (22N_{CaO} + 15N_{MgO} + 13N_{MnO})$$

$$+ 12N_{FeO} + 31N_F - 2N_{SiO_2}) + 0.54 \dots \dots (1)$$

$\gamma_{P_2O_5}$: P_2O_5 的活度系数;

N_i : 渣中各组分 i 的克分子比

如图 4 所示, 顶渣中的全铁量 ($\%T \cdot Fe$), 随萤石加入量的增加而减少。此处, 含萤石 3% 的渣子称之为 α 渣, 含萤石 6% 的渣子称之为 β 渣。由图 4 看出, α 渣与 β 渣的 ($T \cdot Fe$) 分别为 9% 和 3%。

求出 α 渣与 β 渣其他组元的平均成分, 代入①式, 得到②式:

$$(\gamma_{P_2O_5}^\alpha / \gamma_{P_2O_5}^\beta) = 83.5 \dots \dots (2)$$

应用 Turkdogan^[3] 给的平衡常数 — (3) 式, 可以得到 α 渣与 β 渣磷平衡常数之比, (K_P^α) α 可设其等于 (K_P^α) β , 因在计算渣子的平均成分时, 系处于相同的温度范围 — 1325°C — 1375°C 内。

考虑到萤石对提高 FeO 活度 — a_{FeO} 的影响, 由图 11, 从 α 渣和 β 渣的成分可得 a_{FeO}^α 和 a_{FeO}^β , 和 $(a_{FeO}^\beta) / (a_{FeO}^\alpha)$ 变为 0.40, 将这些值代入 (4) 式, 可得 (5) 式:

$$K_P^\alpha = \frac{a_{P_2O_5} \cdot (\%P_2O_5)}{a_{FeO} S \cdot [\%P]^2} \dots \dots (3)$$

$$(\frac{(\%P_2O_5)}{[\%P]^2})_\beta / (\frac{(\%P_2O_5)}{[\%P]^2})_\alpha =$$

$$\frac{(K_P^\alpha)_\beta \cdot (a_{FeO}^\beta)^5 \cdot \gamma_{P_2O_5}^\alpha}{(K_P^\alpha)_\alpha \cdot (a_{FeO}^\alpha)^5 \cdot \gamma_{P_2O_5}^\beta} \dots \dots (4)$$

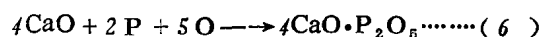
$$(\frac{(\%P_2O_5)}{[\%P]^2})_\beta / (\frac{(\%P_2O_5)}{[\%P]^2})_\alpha = 0.86 \dots \dots (5)$$

这意味磷的热力学分配系数由于渣中加入萤石而降低了, 因为萤石降低 ($\%FeO$) 的影响大于降低 $\gamma_{P_2O_5}$ 的影响。

在图 12 中给出了观测的渣铁间磷的分配系数值及其与按 Healys 公式的计算值之比较。观测值较计算值小很多, 表示尽管顶渣含高 ($\%P_2O_5$) 和低 ($\%T \cdot Fe$) (见图 1), 在热力学上, 它还可进一步脱磷。此点为下列事实所证实: 渣内金属滴较金属本体^{*}的 ($\%P$) / ($[\%P]$) 值高。对改进固定反应器反应来说, 增加总的反应速度要比提高磷的平衡分配系数更重要。因此为什么 R_p 随萤石加入量的增加而增加, 其原因是萤石使顶渣的粘度降低, 强化了总的脱磷速度。

4、喷射石灰粉 (过度反应) 脱磷的热力学

由于缺少 1370°C 下低氧化铁 ($\%T \cdot Fe$) = 1—2 渣的可靠的平衡数据, 如何从热力学上解释图 7 中的数据有待在将来进行研究。因此试图在已知的平衡常数基础上, 对 (6) 式的脱磷反应, 半定量地估算一下石灰脱磷的热力学。



好几个研究工作者^{[13]—[15]}曾研究确定此反应的标准自由能变化。所得结果非常一致。

Aratani 等所得最新数值^[15]为

$$\Delta G^\circ = -442,000 + 196T \dots \dots (7)$$

利用 (7) 式和 $e_P^{(c)} = 0.198$ ^[16] 计算出的含碳 $[\%C] = 3.7$ 的铁水的 $[\%P]$ 和氧活度之间的平衡关系, 见图 13, 利用文献^[17]建议的平衡常数和 $e_C^{(c)} = f(T, \%) = 0.16 - 0.18$ ^[18], 在 1370°C 和 $P_{CO} = 1 \text{ atm}$ 下, 计算出的 $[\%C]$ 和 a_O 的平衡关系, 图 13 和图 14 指出在与 $[\%C] = 4$ 平衡的 $a_O = 0.0001$ 下, 不发生石灰脱磷反应。这一结论与图 7 所示的试验结果不一致——即在碱度为 3—6 的渣粒的 P_2O_5 浓度高达 10—30%, 似乎趋近 $3CaO \cdot P_2O_5$ 的相当值, 而在碱度再增高时, 趋近 $4CaO \cdot P_2O_5$ 的相当值。

*当附着在金属滴的渣未去净时, 这种金属滴的磷分配系数高于金属本体, 这是由于渣中含 ($\%P_2O_5$) 高 (见图 12 空心点位于实心点之右的三对点线)。

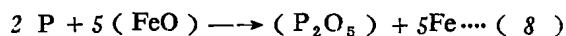
为解释以上的不一致, 在 5 吨氧气底吹转炉上, 测定了金属熔池的氧活度。测定结果示于图 15。有趣的是所有测定的 a_O 值均大于 0.004, 为平衡值之 40 倍。看来十分可能, 在高供氧强度下, 即使熔池被气体激烈搅拌, 喷嘴附近区的含氧量也是过饱和的。如图 13 所示, 在此区 $a_O = 0.004$ 用石灰把磷脱至 $[\%P] = 0.001$ 在热力学上是可能的。

图 16 为顶渣的 ($\%T \cdot Fe$) 和悬浮于渣中的金属滴的 $[\%C]$ 之间的关系。由金属本体到大的金属滴, 金属的含碳量有所降低, 到小的金属滴更加降低。这种降低可以解释为金属滴的碳被渣脱去, 以达渣/铁平衡。这样, 可以把图中最低点联成的曲线, 当做 ($\%T \cdot Fe$) 和 $[\%C]$ 之间的平衡关系。图 14 中右侧的座标值系从图 16 的这个曲线得到。由图 14 得知, ($\%T \cdot Fe$) = 1—2 的渣粒 (见表 2) 的氧活度, 相当于 0.004—0.008 的金属熔池氧活度, 这与上述直接测定结果是一致的。从金属熔池中含氧过饱和的说法可以导出有趣的结论——氧化铁含量低如 ($\%T \cdot Fe$) = 1—2 所反映的氧活度, 足以用

石灰把铁水中的磷脱到 $[\%P]_{\text{终}} = 0.001$ 。

5、实验室规模的试验之结果

实验室规模试验，烧结枪头反应层用扫描电镜分析之一例见图像2。在吹氧时，与铁水接触的枪头表面有一高 P_2O_5 含量层（表面反应层），厚度为（50 μm ）计算。氧化铁经过石灰粒间界进一步穿入枪头内。表面反应层的 P_2O_5 浓度被发现并非永远高，如图17系列1所示，它随氧化铁浓度的增加而降低。图中的虚线由（8）式计算得来。



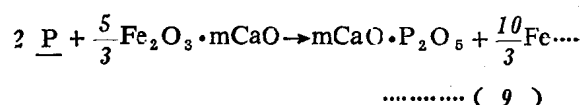
关于 $(\%T \cdot Fe)$ 和 $(\%P_2O_5)$ 的关系，试验和计算非常一致，以及氧化铁穿过表面反应层，深深透过枪头，支持了上述石灰脱磷的机理，如石灰首先与由吹氧而生成的氧化铁结合，然后其生成物——铁酸钙按（8）式进行铁水脱磷。从系列1试验观察到， P_2O_5 含量随氧化铁浓度的减少而增加的程度，比按（8）式预计的更甚。这是由于在铁酸钙中可能存在 Fe_2O_3 或由气体供给了部分氧，或把铁水局部氧化到反应地点。

把系列1的结果外推至 $(\%FeO) = 0$ ，得出 $(\%P_2O_5) = 48$ ，比起对应 $4CaO \cdot P_2O_5$ 的 $(\%P_2O_5) = 39$ 来说，与对应 $3CaO \cdot P_2O_5$ 的 $(\%P_2O_5) = 46$ 更一致。这与用石灰进行钢水脱硫，认为其反应产物为 $4CaO \cdot P_2O_5$ [6], [14], [15] 是相反的。这种区别的原因，现在还没有弄清。然而在讨论瞬息脱磷反应时，重要的是，即使在由于铁水中有丰富的碳而产生的还原条件下，也已显示用石灰得以顺利地进行铁水脱磷，其反应产物含高 P_2O_5 。

还应注意，在图17中系列2的 P_2O_5 含量比系列1低很多。这是由于表面反应层氧化硅含量有差别所致。系列1 $(\%SiO_2) = 2$ ，而系列2 $(\%SiO_2) = 24$ 。铁水中的硅被发现生成氧化硅，它严重阻碍了用石灰进行脱磷。这与图7所示脱磷开始时硅差不多已预先脱净，和渣粒的碱度增至1.5以上的操作结果，非常一致。

图像3所示为不吹氧时，浸入铁水的烧结枪头（原始成分：45%CaO—50% Fe_2O_3 —5% CaF_2 ）的反应层之扫描电镜X光照片。在枪头最外层出现高 P_2O_5 （45%）和低 $T \cdot Fe$ （1.8%）的（B）层，接着是 $(\%P_2O_5) = 27.5$ 和 $(\%T \cdot Fe) = 15.4$ 的（A）层。

上述关系可能是铁酸钙中的 Fe_2O_3 为 P_2O_5 所代替的过渡阶段。图18所示为插入图中三个不同成分枪头的 $(\%T \cdot Fe)$ 和 $\%P_2O_5$ 的观测到的关系。图中的虚线为按（9）式计算所得结果：



这些线系由假设枪头中的 Fe_2O_3 之氧全部只用于脱磷反应计算而来。这些由计算得到的线与在23%CaO和35%CaO枪头观测到的结果非常一致。这意味铁酸钙中的氧，多耗于脱磷，很少耗于脱碳。

这些图强有力地证明了前面假设的石灰脱磷的反应模型之第二步。铁酸钙之为强铁水脱磷剂是因为供氧剂——氧化铁——与 P_2O_5 的稳定剂——石灰的同时存在和很好合作。

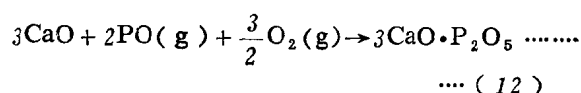
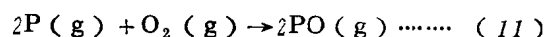
应强调氧气和石灰粉一起喷入的好处——利用氧气氧化铁发出的热量，避免温度降。当大量氧化铁与石灰一起喷入，以支持铁酸钙的生成和获得同样的脱磷率 R_p 时，也许不能得到这种好处。

6、喷石灰粉脱磷（瞬息反应）

前两段所述的热力学讨论和实验室规模的试验之结果，将用于本段，以导出氧气底吹转炉喷石灰脱磷瞬息反应的模型。

Förster及其合作者^{[19], [20]}设计了一个数学模型，予示氧气底吹转炉喷石灰粉的脱磷反应。在他们的研究中，没有研究脱磷反应为喷射所强化的详细机理。

Turkdogan^[7]也设计了下述氧气底吹转炉的脱磷反应模型：



上述模型用于解释氧气底吹转炉吹炼终点所测的分配系数，何以较按Balanjiva公式的计算值有正偏差（脱磷更佳）。但没有企图用试验证明此假设的公式。

如上所述，设计的模型对于新设计的脱磷处理的高效率及其机理，未作满意的解释。相反，本项研究所得结果的综合—图19—可以清楚地解释脱磷处理的全部特征。

在图19中，在氧气底吹转炉的火点处，考虑有可观数量的氧化铁产生，尽管此氧化物在熔池中上升时，为 $[Si]$ 和 $[C]$ 所还原^[21]。这样，喷入的石灰粉有很好的机会与氧化铁结合在火点处生成铁酸钙。由于它的熔点低，铁酸钙至少部分熔成球状，上升时在短时间内即被 $[Si]$ ， $[C]$ ，和 $[P]$ 还原。

虽然三熔质为铁酸钙滴选择氧化程度, 现在还不能从理论上预计, 但实验室规模的试验已经清楚地显示铁酸钙首先为 $[\text{Si}]$, 然后为 $[\text{P}]$ 还原, 分别生成 $\text{CaO}-\text{SiO}_2-(\text{FeO})$ 和 $\text{CaO}-\text{P}_2\text{O}_5-(\text{FeO})$ 颗粒。这些渣粒在金属熔池中上升, 通过与顶渣加入物和先前生成的悬浮的富氧化硅渣粒凝结, 而在某种程度上改变成分。新设计的处理方法的脱磷, 主要是由于渣粒上升到弯月面, 富 P_2O_5 渣粒从熔池中去的结果。

此模型令人满意地描述了230吨氧气底吹转炉脱磷处理中观测到的渣粒特征, 即形状为球形, 碱度随吹炼时间的增加而增加, 脱磷阶段渣粒 P_2O_5 含量高。按这个模型, 当 $[\text{Si}]$ 足够低时, 渣粒可以得到高的 P_2O_5 含量, 与加入的顶渣和脱硅阶段生成的渣粒的凝结可忽略。这很好地解释了当碱度增加时, 渣粒的 P_2O_5 含量增至相当于 $3\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$ 或 $4\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$ 之值。

五、结 论

通过氧气底吹转炉的底部氧气喷嘴, 喷入石灰(20kg/t)和萤石的混合物已经发展为铁水脱磷的一种有效方法。此法的脱磷率高达90—95%, 对比之下, 当把熔剂从顶部加入炉中时, 脱磷率为25—40%。它建议喷入的石灰在金属熔池中上升到弯月面时(瞬息反应)进行铁水脱磷。

氧活度的测定揭示在喷嘴附近区域存在氧的过饱和, 使得用石灰粉把铁水的磷脱至 $[\%P]_{\text{终}}=0.001$, 在热力学上成为可能。另一方面, 实验室规模的试验, 显示通过中空石灰喷头供氧对铁水进行脱磷, 当 $[\%Si]$ 低于0.003%时, 生成物的成分接近 $3\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$ 。这里, 通过生成铁酸钙进行脱磷, 因此从性质上说进行得非常迅速。

这些结果引导出一种概念, 即喷入的石灰粉, 当穿过喷嘴前的射流区时, 形成弥散的铁酸钙细粒, 有效地对铁水进行脱磷。这个概念已为脱磷处理时, 发现在金属熔池中上升的渣粒的高 P_2O_5 (10—30%)成分所证实。这个10—30%的高 P_2O_5 成分, 较上面的脱磷产物 $3\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$ 的相应值低。此差别是由于脱磷产物与其他带氧化硅的渣粒凝结在一起, 但它仍比顶渣高得多。这样, 喷入石灰粉快速高效瞬息脱磷反应的试验事实, 很好地解释了新处理方法的特性——脱磷率高, 而石灰耗量低, 处理时间短。

参 考 文 献(略)

北京钢铁学院 周荣章译

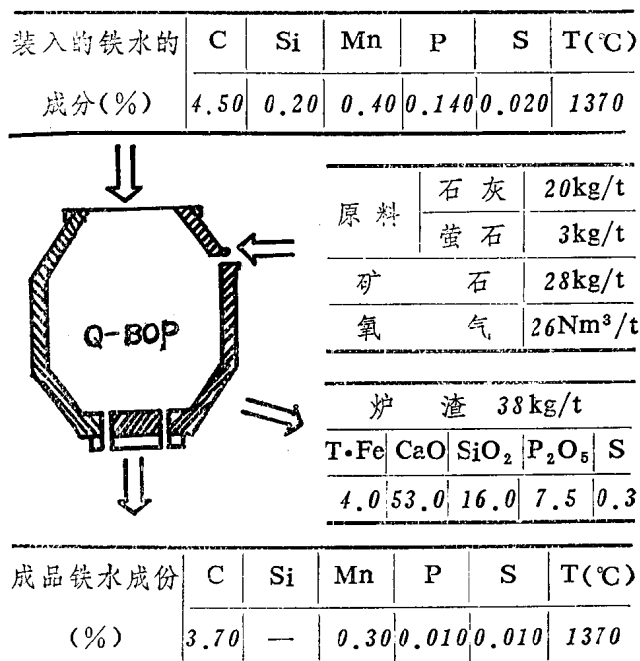


图1 用氧气底吹转炉进行脱磷处理的略图

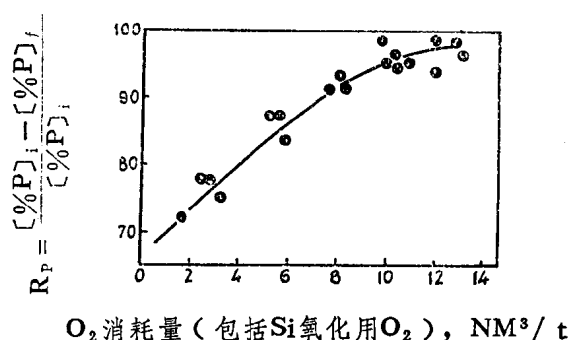


图2 脱磷率与氧耗量的关系

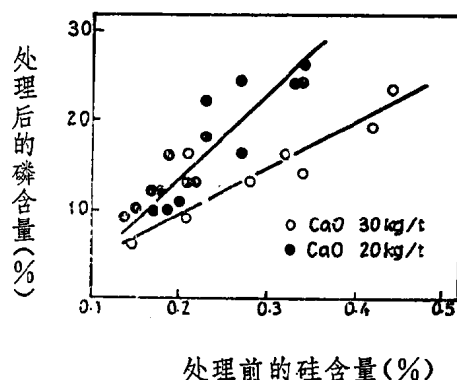


图3 铁水初始硅含量对脱磷的影响

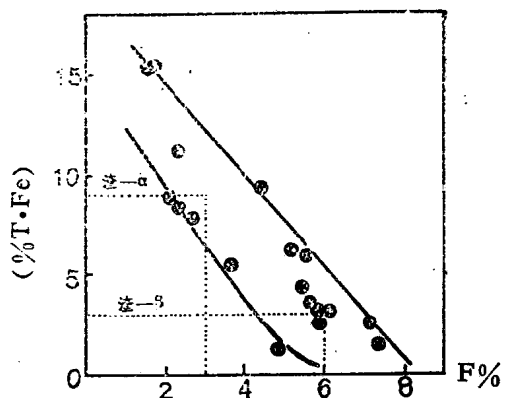


图4 渣中(T, Fe)与(F)含量的关系

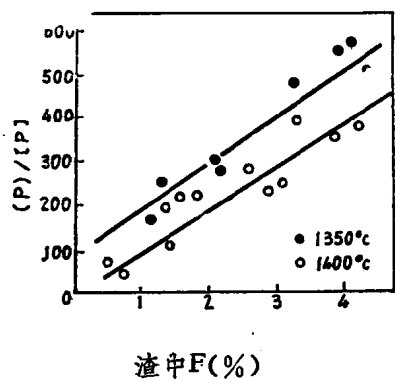


图5 渣中(F)含F%对磷分配系数的影响

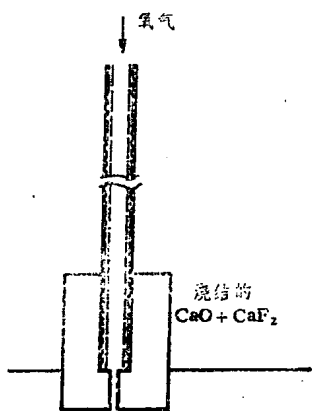


图6 用石灰进行铁水脱磷的实验室试验简图

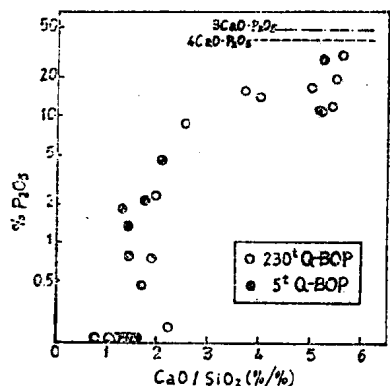
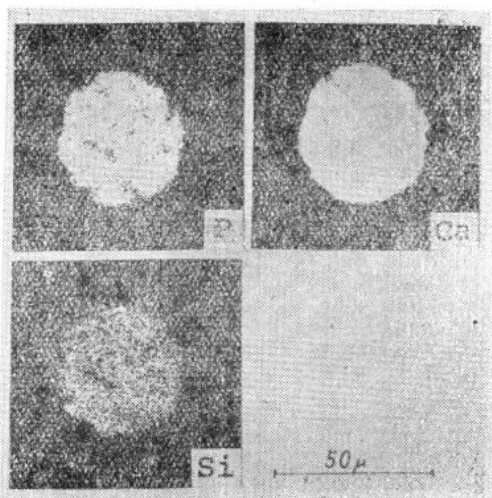


图7 渣粒的(%P₂O₅)随渣粒的碱度的增加而增加



照片1 脱磷处理悬浮在金属熔池中的渣粒扫描镜图像之例

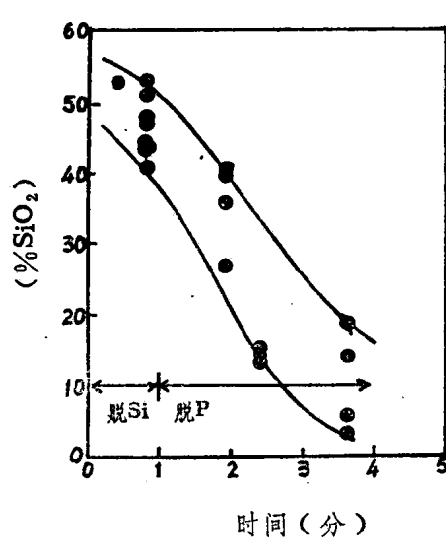


图8 渣粒的(%SiO₂)随吹炼时间的增加而减少

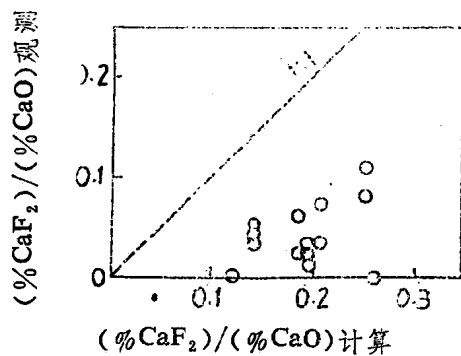


图9 观测到的悬浮于金属熔池中的渣粒所含CaF₂与氧化钙之比与计算值之比

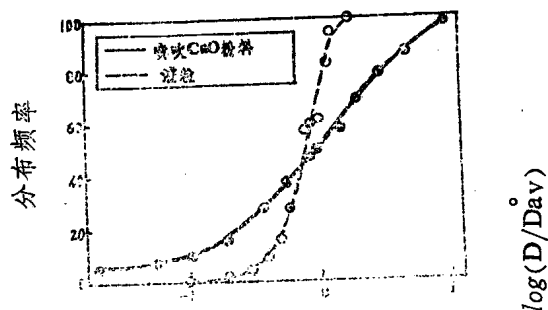


图10 喷入的石灰和悬浮在熔池中的渣粒的粉粒直径D的分布(D⁰均: 喷入的石灰粉的平均直径)

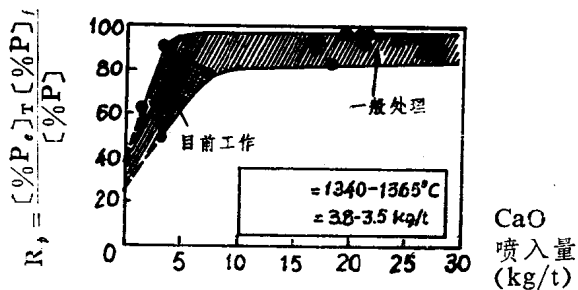


图11 脱磷阶段, 总石灰耗量为常数时, 脱磷率随石灰喷入量的降低而降低

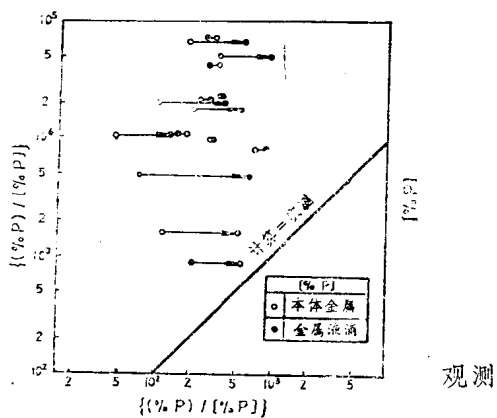


图12 渣铁间磷的分配系数的观测值与计算值 (按Healy公式) 之比较

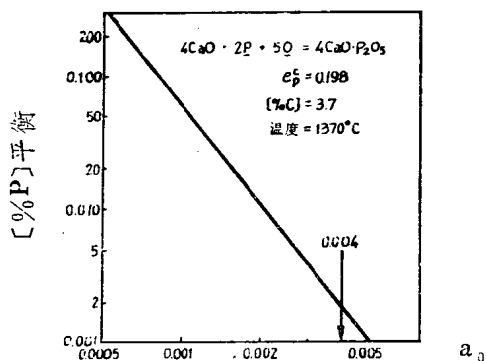


图13 用石灰进行铁水脱磷时, [%P]和氧活度, a_o , 之间的平衡关系

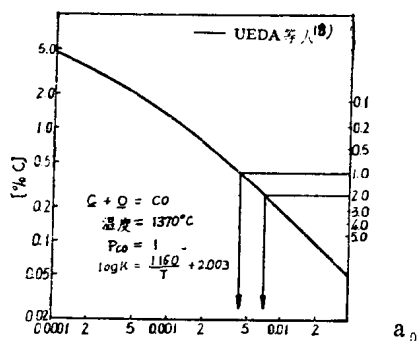


图14 金属熔池中[%C], (%T.Fe)和氧活度 a_o 的平衡关系

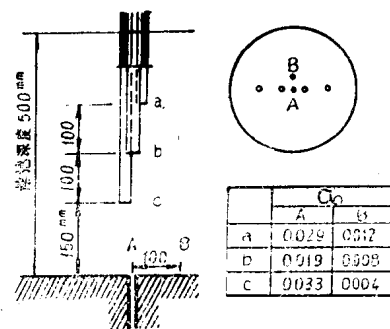


图15 吹氧时熔池中观测到的氧活度— a_o

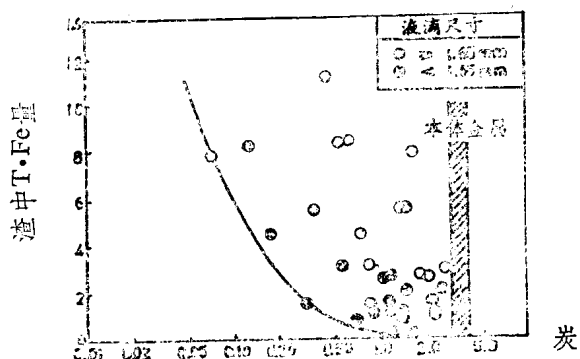


图16 顶渣的(%T.Fe)和包含在渣中的金属滴的[%C]之间的关系

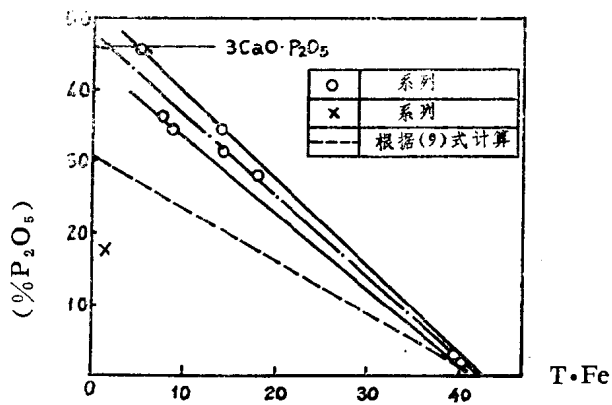


图17 (95—98%) CaO—(2—5%) CaF₂ 枪头(系列1和2)反应层表面的(%P₂O₅)和(%T.Fe)之间的关系

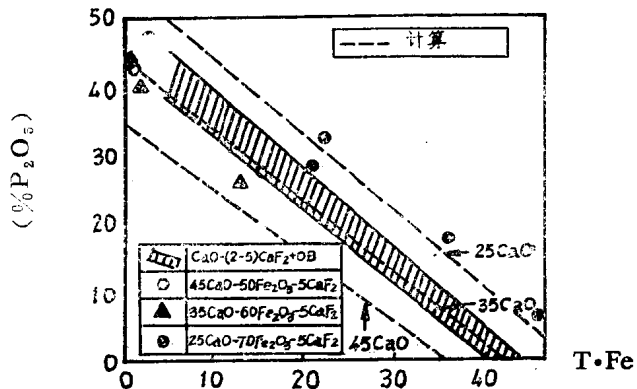


图18 由CaO—F₂eO₃—CaF₂组成的枪头的表面反应层中(%P₂O₅)和(%T.Fe)之间的关系

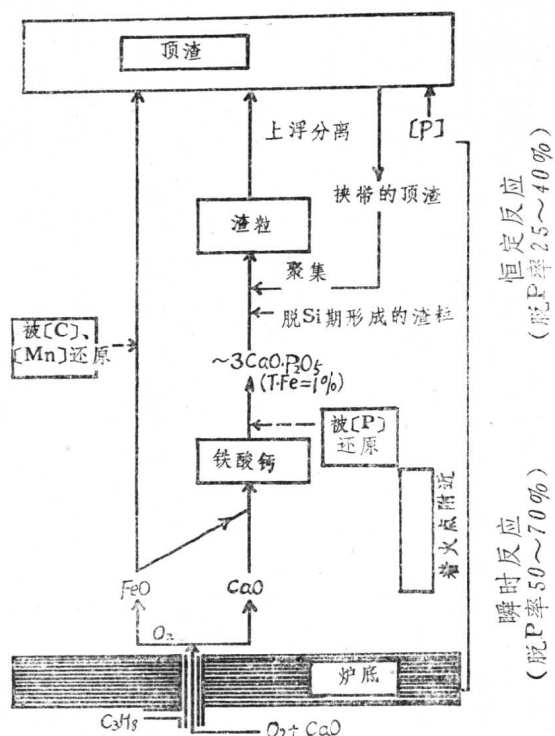
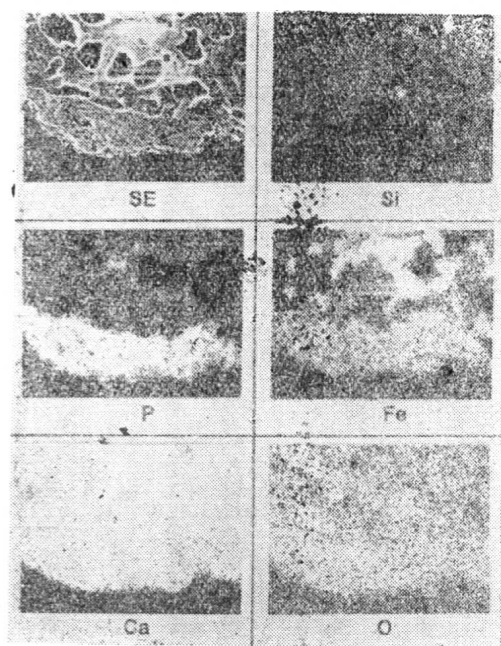
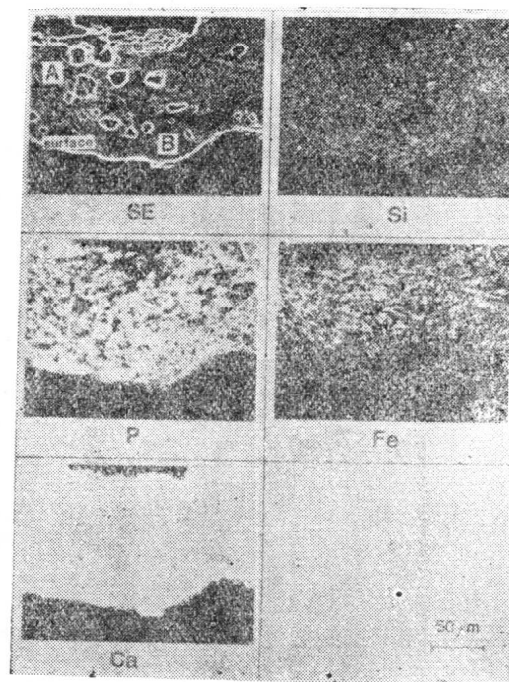


图19 Q-BOP铁水脱磷的机理



照片2 由95%CaO—5%CaF₂组成的枪头,在向铁水吹氧后,其表面上的反应层之扫描电镜照片



照片3 由45%CaO—50%Fe₂O₃—5%CaF₂组成的枪头,其表面上的反应层之扫描电镜分析

利用多孔塞砖吹气搅拌时钢包内的 对流和混合

教授 T.A. 耳恩 研究生 S.T. 约翰逊

引言

为了计算液体金属向炉衬的传质和传热, 必须知道边界层外熔池内金属的流动速度。同时, 只有当熔体中的对流和紊流扩散到足以消除分层现象, 并使颗粒处于悬浮状态时, 才能使颗粒的熔解和反应得以顺利进行。本文讨论了有关速度的问题。

液体金属中, 获得对流的方法有: 利用气泡穿过熔池时引起的搅拌; 利用电磁感应如感应炉^[1,2], 以及利用机械搅拌器等^[3]。本文研究气泡搅拌下的对流。

众所周知, 用数值求解和其它方法来确定紊流环流中的流谱及速度分布是一项十分艰巨的任务^[4,5,6]。对于气泡—熔体两相流, 还面临着如何确定气泡射流与熔体间的边界条件的难题。舍克里^[6]在对钢包流动数值计算的论文中, 将所求得的速度分布与其模型实验结果进行了比较, 看来两者是相当一致。

由于在确定紊流双方程模型^[4,5]中的常数时, 面临着如何确定气体射流和熔体间的边界条件的难题, 还由于在数值求解和换算数值结果方面存在的困难, 因此, 本文概述了另一种能得到完整分析解的方法。作为一个简单例子, 本文用这种方法来分析求解轴对称气泡在圆柱熔池中产生的对流流动, 并将理论结果与实验结果进行了比较。

在将多孔塞偏心放置的情况下, 作者也进行了一些模型实验。

本文还将理论计算速度与工业炼钢熔池中的实测速度作了比较。

理论

在气体搅拌的液体金属熔池中, 存在着一定的速度分布。各点速度值决定于点的位置、气体流量、熔池的几何尺寸以及液体金属的物理属性。此外, 另一些因素如温度等也可能影响液体金属的速度。

根据流体力学的能量方程, 可以得到

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{2} \rho \vec{u}^2 \right) + \frac{1}{2} \rho \vec{u}^2 (\nabla \cdot \vec{u}) + \rho \vec{u} \cdot (\nabla u) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) u_i \quad (1)$$

这里对 i 和 j 依次从 1 到 3 完成两次求和。方程 (1) 表示了动能的守恒。所采用的坐标系是直角坐标系, z 轴是垂直轴。重力位势为 $U = -gz$, 而流动为不可压缩流。此外, 由于气泡还供给系统以能量, 故若将供给单位质量流体的功率用 $\dot{\epsilon}$ 表示, 则可将 $\rho \dot{\epsilon}$ 加到式 (1) 的右边, 于是得到

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{2} \rho \vec{U}^2 \right) - \rho u_z g = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} u_i) + \rho \dot{\epsilon} \quad (2)$$

式中 u_z 是 z 方向的速度分量。

在稳定流的条件下, 我们得到

$$u_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} \rho \vec{u}^2 \right) - \rho u_z g = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) u_i + \rho \dot{\epsilon} \quad (3)$$

现在可以引进 $\vec{u} = \vec{\bar{u}} + \vec{u}'$, 其中 $\vec{\bar{u}}$ 是时均速度, $\vec{u}'$ 是脉动速度。对于不可压缩流, 若将式 (3) 时均化, 则得

$$\begin{aligned} & \bar{u}_j \bar{u}_i \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i) + \bar{u}_i' \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i' u_j') + \bar{u}_i' u_j' \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i) \\ & - \bar{u}_z g = - \frac{\partial \bar{P}}{\rho \partial x_j} \delta_{ij} \bar{u}_i - \frac{\partial \bar{P}'}{\rho \partial x_j} \delta_{ij} u_i' + \\ & v \bar{u}_i \frac{\partial^2}{\partial x^2 j} \bar{u}_i + v u_i' \frac{\partial^2}{\partial x^2 j} u_i' + \dot{\epsilon} \end{aligned} \quad (\delta_{ij} \text{—克朗克尔符号}) \quad (4)$$

式中已经对不可压缩流应用了应力张量 σ_{ij} 的下述表达式:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \sigma_{ij} = -\delta_{ij} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2}{\partial x_j^2} u_i \quad (5)$$

式(4)对于压强P,已用时均压强 $\bar{P}$ 和脉动压强P'来代替。

下面进一步引进无因次变量:

$$x_i = L \cdot \xi_j \quad (6)$$

$$\bar{u}_i = u_0 \cdot \eta_i \quad (7)$$

$$\overline{u'_i u'_j} = u_0'^2 \gamma_{ij} \quad (8)$$

$$\overline{u'^2_i} \cdot \overline{u'^2_j} = u_0'^3 \cdot \delta_{ij} \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} \right)^2 = \overline{u'^2_0} \beta_{ij} / L^2 \quad (10)$$

$$P = P_0 \cdot \alpha \quad (11)$$

$$\overline{P' u'_j} = \overline{P'_0 u'_0} \cdot \epsilon_j \quad (12)$$

若对式(4)作无因次化的运算,则得

$$\begin{aligned} & \eta_i \eta_j \frac{\partial}{\partial \xi_j} \eta_i + \frac{u_0'^3}{2u_0^3} \frac{\partial \delta_{ij}}{\partial x_j} + \frac{u_0'^2}{u_0^2} \left[\gamma_{ij} \frac{\partial \eta_i}{\partial \xi_j} + \right. \\ & \left. \gamma_{ji} \frac{\partial \eta_j}{\partial \xi_j} + \frac{\eta_j}{2} \frac{\partial \gamma_{ii}}{\partial \xi_j} \right] - \frac{\eta_3 g L}{u_0^2} = - \frac{P_0}{\rho u_0^2} \frac{\partial \alpha}{\partial \xi_j} \eta_j - \\ & \frac{\overline{P'_0 u'_0}}{\rho u_0^3} \frac{\partial x_j}{\partial \xi_j} + \frac{\nu}{u_0 L} \left[\eta_i \frac{\partial^2}{\partial \xi_j^2} \eta_i + \frac{u_0'^2}{u_0^2} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial \xi_j^2} \gamma_{ii} \right. \right. \\ & \left. \left. - \beta_{ij} \right) \right] + \frac{\epsilon L}{u_0^3} \end{aligned} \quad (13)$$

从式(13)可以确定下述无因次组合:

$$\frac{\overline{u'^2_0}}{u_0^2}, \frac{u_0'^3}{u_0^3} \quad \text{紊流强度} \quad (14)$$

$$\frac{g L}{u_0^2} \quad \text{弗鲁德数} \quad (15)$$

$$\frac{P_0}{\rho u_0^2} \quad \text{欧拉数}$$

$$\frac{u_0 L}{\nu} \quad \text{雷诺数} \quad (16)$$

$$\frac{\epsilon L}{u_0^3} \quad \text{列维奇数} \quad (17)$$

由于列维奇首先讨论了无因次组合 $\epsilon L/u_0^3$ 的重要意义,故我们把 $\epsilon L/u_0^3$ 称为列维奇数。

在雷诺数很大和紊流强度很小的情况下,式(13)可简化为

$$\begin{aligned} & \eta_i \eta_j \frac{\partial}{\partial \xi_j} (\eta_i) - \frac{\eta_3 g L}{u_0^2} \\ & = - \frac{P_0}{\rho u_0^2} \frac{\partial \alpha}{\partial \xi_j} \cdot \eta_j + \frac{\epsilon L}{u_0^3} \end{aligned} \quad (18)$$

若将上式再变换成有因次变量,则得

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \bar{u}_i^2) - \bar{u}_3 \cdot g = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} \bar{u}_j + \epsilon \quad (19)$$

对体积V积分式(19),得

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \int_V \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \bar{u}_i^2) dv = \int_V \left[\bar{u}_3 g - \right. \\ & \left. \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{P} \bar{u}_j) \right] dv + \int_V \epsilon dv \end{aligned} \quad (20)$$

应用高斯定理,上式变为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \int_S (\bar{u}_j \bar{u}_i^2) \cdot n_j \cdot ds = \int_V (\bar{u}_3 g + \epsilon) dv - \\ & \int_S \left(\frac{\bar{P} \bar{u}_j}{\rho} \right) n_j \cdot ds \end{aligned} \quad (21)$$

式中S是体积V的界面, n_j 是该表面的单位法线矢量的分量(见图1)。

对于圆柱形熔池中的环流流动,选取V和S如图1所示,由于通过每个圆柱平面流动是连续的,故可得到

$$\int_0^a \bar{u}_3 r dr = 0 \quad (22)$$

因此,式(21)中的项 $\int_V \bar{u}_3 g dv$ 等于零。如果 $\bar{P}$ 只是Z的函数,则式(21)中的最后一项也等于零。因为在壁面和底面上速度的法向分量为零,故式(21)可简化为

$$\pi \int_0^a \bar{u}_z (\bar{u}_r^2 + \bar{u}_z^2) r dr = 2 \pi \int_0^Z \int_0^a \epsilon r \cdot dr \cdot dz \quad (23)$$

严格地说,在自由表面附近 $\bar{P}$ 还依赖于r,这时,在式(23)的右边就需要加上一项

$$-\frac{1}{\rho} \int_S \bar{p} u_j n_j ds.$$

在边界层中,由于雷诺数不再远大于1,因此式(21)或(23)就不再适用。为了计算壁附近的速度分布、质量传递和热量传递,必须求解相应的边界层方程。本文将给出边界层计算所需要的“熔体整体速度”。

除建立能量平衡外,还需建立质量平衡(对于不可压缩流体):

$$\text{div } \vec{u} = 0 \quad (24)$$

式中 $\vec{u}$ 是速度矢量,若将上式对体积 V 积分,则得

$$\int_S u_j n_j ds = 0 \quad (25)$$

最后,还须确定气泡供给单位体积熔体的能量。在气泡作等温膨胀的情况下,则有

$$\rho \int_V \dot{\varepsilon} dv = \alpha \dot{Q}_2 P_2 l_n (P_1/P_2) \quad (26)$$

式中 $\dot{Q}_2$ 和 P_1 是气体的体积流量和气体进入体积 V 时的压强, P_2 是气体离开体积 V 时的压强(见图1)。 α 表示气泡供给对流流动的能量在气泡膨胀总能量中所占的份数。对于单个气泡, α 可以表示成气泡上的压阻(或形阻)力与总阻力的比值。由于表面摩擦直接导致粘性耗散而生成热,故它对于对流流动没有贡献。由文献[10,11]可知, $\alpha \approx 0.3$ 。虽然这个值是对单个气泡确定的,但本文假设它也适用于连续气泡(气泡射流)。

关于中心气泡射流在圆柱钢包中引起的流动的计算

建议对 u_r 选用满足式(22)的下述解:

$$u_r = u_c J_0(k_1 r) f(Z/H) \quad (27)$$

式中无因次函数 $f(Z/H)$ 和特征速度 u_c 还有待确定, $J_0(k_1 r)$ 是大家熟悉的零阶贝塞尔函数[12]。现在可以由如下形式的式(24)来确定 u_r :

$$\frac{\partial(r u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(r u_z)}{\partial z} = 0 \quad (28)$$

将式(27)代入上式,即得

$$\frac{\partial(r u_r)}{\partial r} = -r J_0(k_1 r) \cdot u_c \cdot f'(Z/H)/H$$

或

$$r u_r = - \int_0^r r J_0(k_1 r) dr \cdot u_c \cdot f'(Z/H)/H$$

$$= -r J_1(k_1 r) u_c \cdot f'(Z/H)/k_1 \cdot H$$

最后得到

$$u_r = -J_1(k_1 r) u_c \cdot f'(Z/H)/k_1 H \quad (29)$$

在边壁处($r=a$)法向速度为零的条件给出

$$J_1(k_1 a) = 0 \quad (30)$$

或

$$k_1 a = 3.8317$$

能量平衡关系式(23)和(26)给出

$$\pi \int_0^a u_z (u_r^2 + u_z^2) r dr = \frac{\alpha}{\rho} \cdot \dot{Q}_2 \cdot P_2 l_n (P_1/P_2) \quad (31)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = 1 + \frac{\rho \cdot g \cdot z}{P_2} \quad (32)$$

式中各量采用国际单位制。

对于

$$\frac{\rho \cdot g \cdot z}{P_2} < \frac{1}{2}$$

$$\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \approx \frac{\rho \cdot g \cdot z}{P_2} \quad (33)$$

将式(27)、(29)和(33)代入式(31),即得

$$\frac{\pi a^2 \cdot u_c^3}{k_1^2 a^2} \int_0^{k_1 a} J_0(V) \cdot f \cdot J_0^2(V) \cdot f^2 + \frac{J_1^2(V) f'^2}{(k_1 H)^2} V \cdot dv = \alpha \cdot \dot{Q}_2 g H \cdot \frac{Z}{H} \quad (34)$$

若选取特征速度 u_c 为

$$u_c = \left(\frac{\alpha \dot{Q}_2 g H \cdot k_1^2 a^2}{0.42 \cdot \pi \cdot a^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (35)$$

则式(34)简化为

$$\int_0^{k_1 a} \frac{J_0(V) \cdot f(y)}{0.42} (J_0^2(V) \cdot f^2(y) + \frac{J_1^2(V) \cdot f'^2(y)}{(k_1 H)^2}) V \cdot dv = y \quad (36)$$

根据数值积分可得

$$\int_0^{k_1 a} J_0^3(V) \cdot V \cdot dv = 0.42 \quad (37)$$

$$\int_0^{k_1 a} J_0(V) \cdot J_1^2(V) \cdot V \cdot dv = 0.21$$