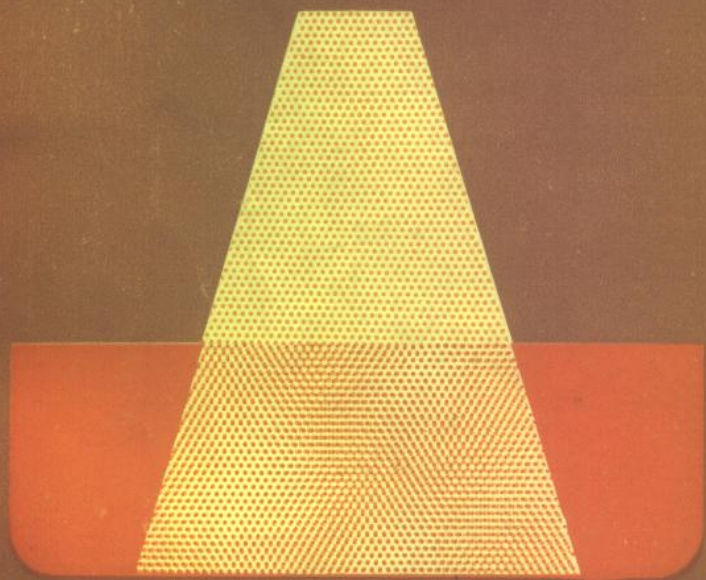


喷粉冶金理论和实践

上册



冶金工业出版社

喷粉冶金理论和实践

上 册

[苏] M. Ф. 西多连柯 著

田治洲 毛凤源 等译

耿树林 校

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书概述了在铁水罐、转炉、平炉、电炉中往生铁和钢中喷吹粉末材料以脱硫、脱磷、脱碳和脱氧的实验室和工业研究成果；提出了在各种设备中喷粉过程的基本参数，并探讨了喷粉过程的理论基础。

本书的主要对象是从事炼钢的科研人员、生产人员，对冶金专业的教师、大学生和研究生也有参考价值。

喷粉治金的理论和实践

上册

〔苏〕M.Φ.西多连柯 著

田治洲 毛凤源 等译

耿树林 校

*

冶金工业出版社出版

（北京灯市口74号）

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张8 1/4 字数218千字

1983年9月第一版 1983年9月第一次印刷

印数0,001~3,400册

统一书号：15062·3986 定价1.10元

出版说明

《喷粉冶金理论和实践》分上、下两册，是根据苏联冶金出版社出版的，М.Ф.西多连柯著的“Теория и практика продувки металла порошками”第一版(1973年)和第二版(1978年)分别翻译的。

上册分八章，分别介绍了在铁水罐车、转炉、平炉、电弧炉、感应炉中有关喷粉增碳、脱硫、脱磷、脱氧、去气、合金化等方面的工业性研究；叙述了喷吹各种粉剂的基本工艺和喷粉冶金的理论基础，并阐述了喷粉炼钢车间设计的一些特点。上册所涉及的研究成果及所介绍的工艺、设备等是国际上喷粉冶金的初期研究成果，对于进行喷粉冶金初期研究工作的我国冶金工作者有一定的参考价值。

下册分三章，研究了喷粉的水力学条件；讨论了脱磷和脱碳过程的基本理论；提出了工业生产条件下的工艺参数。下册较系统地阐述了喷粉冶金理论。其中，水力学模型试验及喷枪试验结果，以及一些理论计算对我国喷粉冶金试验研究工作有所裨益，

译校者分工如下：

上册	第一、四、七章	田治洲译
	第二章	毛凤源译
	第三章	赵惠英、耿树林译
	第五章	贾玉博译
	第六章	黄兆录译
	第八章	赵惠英译

全书由耿树林审校。

下册	第一章	李吉夫译
	第二章	知水译
	第三章	耿文范译

全书由知水审校。

前 言

近代冶金生产发展的主要特征是努力提高冶金设备的生产效率和技术经济指标,改善钢的质量和生劳动条件。

大多数的冶金反应是在相界面上进行的,其速度取决于反应物互相接触的总界面积。因此,冶金工作者应尽量采取一切措施加强炉渣与金属的搅拌。

喷粉就是在增加金属与喷吹材料的反应界面的同时,加强金属的搅拌。所有这些都会加速反应过程,并在造渣材料消耗量较少的情况下,最大限度地去除钢中的杂质。

正像早已指出的那样,喷粉工艺是六十年代开始发展起来的。将料喷入钢包、转炉、平炉和电炉中,以便使钢水脱硫、增碳、脱氧并加速成渣过程。为了处理高磷铁水,又采用了水冷喷嘴,将石灰粉喷入氧气转炉的铁水中,这就是法国研制的OLP法。1946~1948年间苏联曾在3吨侧吹转炉上试验过同样的工艺。

1940年第一次向钢包中喷吹石灰粉的试验是由V.依高鲁和G.白伦特进行的,后来又有许多人多次做过类似的试验。

许多试验已经证实,喷入的粉料与金属中的杂质之间的作用效果取决于喷吹参数——相互作用时间和反应相的搅拌强度等。但在过去的一些刊物中这些问题并未引起人们的注意。近年来,对气—粉流股与金属之间的相互作用,进行了一些研究。

掌握喷粉炼钢方法有一系列困难,其原因有三。首先,由于对工艺过程的理论基础的研究工作做得不够;其次,许多研究工作只从强化工艺过程的角度去研究这种方法,而没有在改进钢的质量以及喷粉炼钢可以使用的廉价的和非稀缺粉状材料方面进行研究;第三,目前都是采用手工业的制粉方法,向车间输送粉料也还没有采用机械化设备。

文献资料中，还未见到为工业试验准备粉料的报导。例如车间内的制粉、磨粉设备是采用人工装料，磨完粉料后需用人工筛选，以防止混入大颗粒。所有这些操作目前都处于手工操作阶段。最后，是用运输带将制好的粉料装入喷粉罐中。

大多数情况下，粉料是通过炉门，用喷枪喷入钢水中。这种操作需要大量的体力劳动，而且会散失不少热能。

用气体来输送粉料易于实现机械化和自动化。不仅可以简化车间的运输线，而且为改善生产组织，减少装卸工人和非技术工人的数量以及使原料和炉子工段的生产专业化创造有利条件。

往金属中喷粉的试验研究工作是在B.A.库德林和M.Φ.西多连柯领导下进行的。实验室的研究工作是在莫斯科业余冶金学院进行的，工业试验是在兹拉特乌斯特冶金工厂和“红十月”钢厂等进行的。

参加试验工作及提供材料的有Б.Я.巴克希茨基、Я.П.杜姆切夫、В.И.米钦科、Ю.В.波里雅科夫、В.С.李姆凯维奇、С.С.希夫科夫、Е.И.秋林、А.Г.费丹、С.Н.菲拉托夫、Г.А.哈辛、А.С.赫麦列夫、О.М.切霍莫夫、Ф.В.雅柯文科、А.С.祖勃列夫、И.А.马吉德松、Е.Д.莫希尔、Н.А.斯米尔诺夫、А.С.莫罗佐夫、Н.С.楚瓦钦、Г.М.巴利亚、Л.К.柯绥列夫、А.Я.维斯宁、А.С.库德梁夫采夫等人。

目 录

第一章 往钢中喷吹粉气流股时钢的脱碳	1
第二章 喷粉脱磷	10
第一节 脱磷反应的热力学及脱磷剂最佳成分的选择	10
第二节 钢液喷粉脱磷的动力学	20
第三节 转炉钢的脱磷	34
第四节 电炉钢的喷粉脱磷	40
第三章 喷粉脱硫	59
第一节 用固体石灰处理金属的热力学及动力学特征	59
第二节 铁水包内的生铁脱硫	78
第三节 转炉内生铁和钢的脱硫	95
第四节 平炉内钢的脱硫	100
第五节 电炉中钢液的喷粉脱硫	113
第四章 往金属喷吹增碳剂	130
第一节 往金属中喷吹增碳剂的若干特点	130
第二节 往生铁中喷吹增碳剂	148
第三节 在转炉中喷吹增碳剂	149
第四节 在平炉中喷吹增碳剂钢的脱氧与增碳	156
第五节 在电弧炉中向金属喷吹增碳剂	169
第五章 喷吹粉状材料使金属脱氧	173
第一节 非金属夹杂物的生成和去除的特征以及强化此 过程的方法	173
第二节 在试验设备上进行喷粉脱氧	182
第三节 在电弧炉上喷粉强化脱氧	199
第六章 喷吹粉状材料使金属合金化	210
第一节 合金在液态金属中的熔化及溶解过程的特征	210
第二节 钢液喷粉合金化的工业试验	213

第七章 往钢中喷粉时气体的行为	219
第一节 喷粉冶金时从钢水中去除氢和氮的特点.....	219
第二节 钢水的喷粉去氢.....	222
第三节 向钢中喷粉时氮的行为.....	230
第八章 喷粉炼钢车间设计的一些特点	232
第一节 电炉炼钢车间设计的基本情况.....	232
第二节 粉末材料生产车间的设计特点.....	233
第三节 喷粉冶金装置的构造.....	238
第四节 电炉喷粉冶炼操作的基本原理及粉料供应的综 合系统.....	244
参考文献	249

第一章 往钢中喷吹粉气流股时钢的脱碳

吹氧炼钢可以大大强化脱碳反应，但是由于吹氧区域温度升高，使铁的烧损增加，排放烟尘的数量增多。在平炉中吹氧，随着大量烟尘的发生会堵塞蓄热室格子砖并促使其熔化。

据现有资料^[147]记载，在平炉上，在用氧正常时，废气中的含尘量为5~11克/米³；在强化吹氧时，废气中含尘量为12~20克/米³，甚至可达30~50克/米³。

正如B.И.雅沃依斯基正确地指出的那样^[82]，这种现象在氧气转炉生产中具有完全特殊的意义，因为氧气转炉生产者是没有可靠的除尘设备，是不可能存在的。从转炉炉口冒出的炉气含尘可达30~120克/米³，氧气转炉反应区的温度可达2100~2300°C。

另一方面，产生的烟尘多，使铁损增多，从而降低了收得率。在40吨电弧炉中冶炼Cr18Ni10Ti钢，因吹氧造成的金属损失平均为炉料重的3%，甚至能达到7%^[148]。

防止铁挥发的有效措施是采用引进水蒸气、矿石粉、石灰石粉、石灰粉的办法降低反应区温度。这些材料能吸收一部分铁氧化时放出的热量，阻止氧化反应，或者促进伴随这些材料的加入而发生的吸热反应。

将上述材料加热到2000K，一公斤冷料所耗的热量（千卡/公斤）如下^[82]：

H ₂ O	5500	CaCO ₃	1300
Fe ₂ O ₃	1700	CaO	400

根据这些数据，很明显应该采用水蒸气，但是这对所放出的热量的利用是不合理的。

运用铁矿粉收益比较小，但从另一方面说，它有助于提高金属回收率。利用石灰石粉和石灰粉能加速脱磷反应。

B.И.雅沃依斯基^[82]提到使用喷粉降低喷出口区域温度的

方法有以下缺点:需要建造破碎设备和装设粉料的风力输送设备;而且,因粉料的磨损作用会降低风嘴的使用寿命。

但是这两个缺点是可以克服的,因为现代冶炼技术的发展趋势是完全不用块料,而是在全部冶金过程中都喷吹粉料。这样,就必须设计和建造专门的综合系统,这系统应包括粉料制备、运输和喷粉炼钢的整个过程。

为减少粉料的磨损作用,可以将高浓度粉料(用载气输送)和氧气分别输送到喷嘴的出口。从同心管道以高速度喷出的氧气,把由中心管道以低速送出的粉料吹散开(并使粉料加速)。从而促使气粉流股和钢液发生剧烈搅拌。

在10吨平炉上喷吹铁精矿粉的试验^[70]表明,随粉料浓度的提高(达到8~12公斤/米³),炉气含尘量从7.5~10克/米³下降到1~3克/米³。在流速很高时也没发现精矿粉被带走(在另外一部著作^[69]中,作者们提出含尘量从8.5克/米³下降到1.0~1.5克/米³)。

在较早期的著作中^{[4][5]},人们发现一个完全的例外,在氧气流股中含石灰粉的浓度在12~16公斤/米³甚至更高的情况下,生成微红色的烟。在另一些著作中^{[39][41]}曾提到喷石灰粉炼钢可以大大减少烟囱出来的烟尘的棕色。

作者们^{[5][39][41]}曾用石灰冷却反应区金属或石灰石分解吸热来解释这种现象。

据作者^[18]介绍,在平炉上,甚至在气体流股中石灰浓度变化很不明显的情况下(从0.48增加到1.9公斤/米³)就会减少烟尘的生成。在这些著作中也指出了石灰石相当有效的作用。

据文献^[218]报道,在120吨电弧炉和250吨平炉上,用类似吹氧用的喷嘴喷吹粉剂,既能脱碳,同时又能使烟尘大为减少。所用的粉剂都是炼钢用的材料:氧化铁皮、精矿粉,碎烧结料及合金元素的氧化物。这方法在英国及其他十三个国家取得了专利权。

发现喷吹石灰粉的数量达到 OLP 法所使用的那样多也不能

防止烟尘产生，尽管与吹纯氧比较起来烟尘的数量减少了^[4]。但是，这项工作比较有意义的结果是获得了这些方法所排出烟尘质点的电子显微照片。OLP法形成的烟尘质点比碱性转炉炼钢法形成的大。这一点，看来可能有利于烟尘捕集作业，并有利于提高排放到大气中去的废气纯度。

在10吨平炉中喷吹铁精矿粉的脱碳速度比吹纯氧快，但当脱碳速度高于0.10~0.13%/分时出现金属喷溅，并且，喷吹开始时金属的过热度越高，碳的氧化速度越快。

在供粉速度小于50公斤/分时，金属升温速度同通常工艺操作下的速度没有区别，但脱碳速度高于原工艺的3~5倍。若供粉速度提高，超过50公斤/分，即升温速度降低，但是，就是在喷吹精矿粉的速度高于83公斤/分时，也没发现金属有降温现象。喷吹石灰或石灰石粉炼钢时，升温速度比喷吹精矿粉时快，但脱碳速度下降。

采用纯氧炼钢时，人们发现^[70]渣中氧化铁含量急剧增加，达到50%，这不仅降低了钢水的收得率，而且对金属吸收热量不利。

喷吹精矿粉炼钢，渣的平均氧化能力比普通熔炼方法稍高一点。当大量耗用精矿粉，并且强化供应时，由于固体氧化剂消耗超出了氧化熔池杂质的需要，将有过剩的精矿粉没被利用而残留下来，从而使渣子的氧化能力急剧提高。

引证前人的重要结论^[70]，是想说明一个观点：喷吹精矿粉炼钢，金属的烧损随精矿粉消耗数量与吹氧量比值的增加而减少。收得率可提高2.5%（绝对值）。

在莫斯科业余冶金学院炼钢教研室的试验室里，研究了喷吹气粉流股时，碳、锰和铬的熔体的脱碳过程的若干特点^{[148][150][151]}。试验是在50公斤碱性感应炉中进行的。炉料重30公斤左右，原始含碳量为0.35~0.80%，原始含锰和含铬量在规格范围的下限。吹炼前金属温度为1560~1580℃，吹炼后温度变成1580~1620℃。

在文献[152]中叙述了喷吹粒度小于1毫米的粉状材料所使用的装置的结构。粉料是通过带有直径为8毫米的石英嘴的喷枪吹到金属中去的。载气的输送压力为0.35~0.40大气压，耗气量约0.2米³。载气流股中粉料的浓度波动在0~8公斤/米³范围内，每炉的吹炼时间一样，都是2分钟。

图1和图2是向金属喷吹含少量的铁的氧化物的粉料混合物或纯石灰粉时，脱碳速度与喷粉浓度的关系曲线。从图上可以看出曲线的最大值相当于1~2公斤/米³。但含锰量为5.3~6.3%的金属除外。

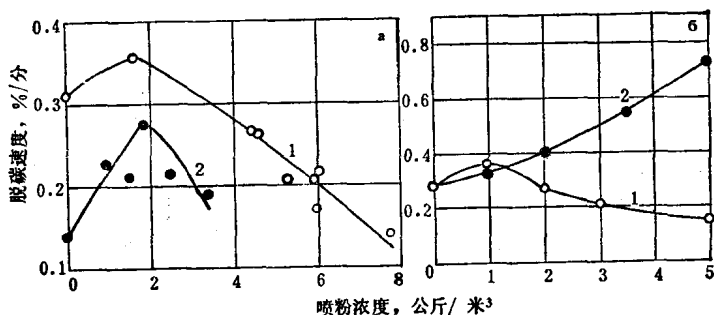


图1 氧气载粉浓度与脱碳速度间的关系

a—混合粉料组成比例：石灰粉：铁的氧化物：萤石粉=7.5：1.5：1.0

1—风嘴插入金属；2—风嘴位于金属与炉渣界面

6—风嘴插入金属

1—喷石灰粉；2—喷铁的氧化物粉

我们在10吨平炉上进行的试验也获得了氧气流中石灰粉或石灰粉的浓度与脱碳速度的类似的极值关系，这些数据发表在杜涅茨的著作中（图3）。

根据文献[49]的数据，我们也得到了类似的研究成果。对上面得到的关系进行研究，并且从气粉流股中的粉料浓度与脱碳速度的关系间有可能存在最大值这一原则来看，这里所得到的结果在某种程度上接近于图4上的结果（因为作者[49]没有给自己提出研究脱碳过程的任务，所以因各因素的影响，使点子分散）。

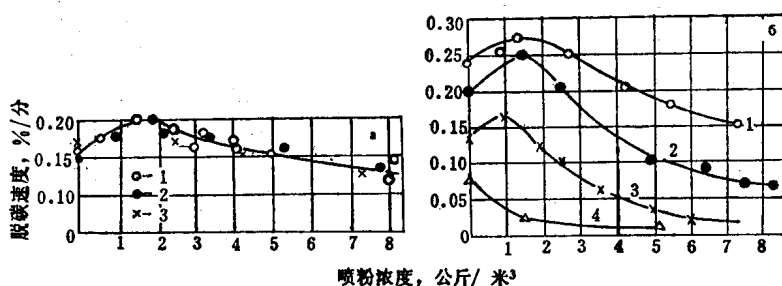


图 2 金属含锰、铬量不同时，氧气载粉浓度与脱碳速度间的关系（混合粉料的组成如图1a）

a—金属中含铬量，%

1—0.5~1.0；2—1.3~1.4；3—4.35~5.17

б—金属中含锰量，%

1—0.56~0.63；2—1.5~1.60；3—2.2~2.5；4—5.3~6.3

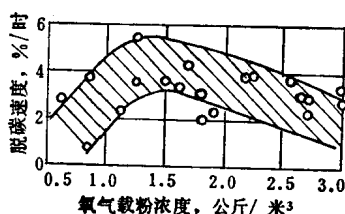


图 3 在10炉平炉上吹氧时，氧气流股中，石灰粉和石灰石的浓度与脱碳速度的关系

观察图 4 上的数据可以推测出这个操作过程有下列特点：脱碳速度最大值是在气流载粉浓度等于1.5~3公斤/米³的时候；将粉料中萤石提高到20~25%，脱碳速度最大值向气流载粉浓度较低方向移动；只有在粉料中含萤石量在20~25%的时候，当粉料高于或低于临界浓度，碳含量才对脱碳速度发生影响。

毫无疑问，上述观点需要在专门的实验条件下加以验证，但是萤石在粉料中的特殊作用看来是有的。这一点将在后面说明。

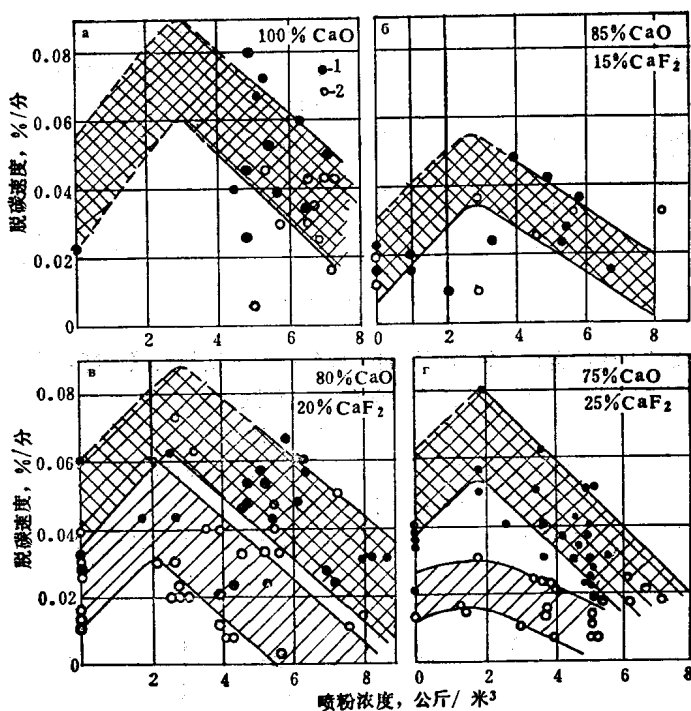


图 4 5吨电炉吹氧熔炼时，脱碳速度与氧气中载粉浓度的关系

1—喷吹结束时，含碳量高于0.3%；

2—喷吹结束时，含碳量低于0.2%

a—100%石灰粉；b—85%石灰粉、15%萤石粉；g—80%石灰粉、

20%萤石粉；r—75%石灰粉、25%萤石粉

上述试验关系曲线的上升段，看来与一氧化碳气泡生成容易有关；同时可以看出，曲线下降段十之八九与过程温度条件恶化有关，而且在氧气流股中不氧化混合物的浓度提高时，脱碳速度的下降与炉子容量无关（图5）。

在实验室的感应炉中喷吹氧化铁粉的试验没有表现出上述的规律性（图16）。但是必须考虑到，由于试验条件限制，没能把氧气载粉浓度提高到5公斤/米³以上。（因为这时脱碳反应具有

“爆炸式”的特性)。虽然如此,也应当用具有最大值的曲线来描述这种关系。按反应热平衡的近似计算,这个最大值应该接近氧化铁浓度为 $10\sim 20$ 公斤/米³的区域。

由于金属中存在着铬和锰,脱碳速度的最大值有些下降,而且锰的影响更为显著,这想必是因为它同氧有较高的亲和力的缘故(图2)。

从图6可以看出,将粉料1中氧化铁的含量提高到30%,可以取得脱碳率的最大值。将粉料中萤石比例提高到20%,在氧化

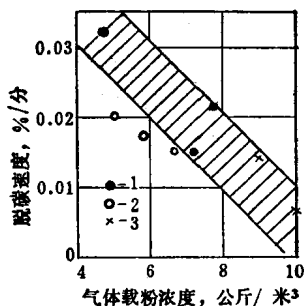


图5 不同容量电弧炉喷粉熔炼时氧气载粉浓度与脱碳速度的关系

1—5吨;2—30吨;3—80吨(数据引自文献〔3〕)

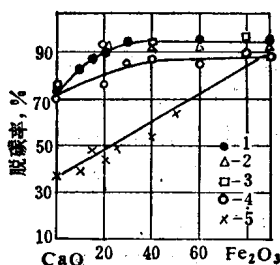


图6 粉料中铁矿粉和萤石粉的不同组成与脱碳程度的关系

a—载气为氧气

1— $\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$; 2— $\text{CaO} + 10\% \text{CaF}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$;

3— $\text{CaO} + 20\% \text{CaF}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$; 4— $\text{CaO} + \text{CaF}_2$;

6—载气为氩气

5— $\text{CaO} + 10\% \text{CaF}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$

铁含量为20%时，脱碳率就达到了最大值（粉料3）。

在喷吹无氧化剂粉料4的情况下，金属的脱碳率有些下降。当用氩气喷吹含氧化剂粉料5时，脱碳率随粉料中氧化铁含量的增加按比例增长（脱碳率40%的那一点，是因为在用氩气喷吹无氧化剂粉料5时，吸入了大气中的氧）。对照图6上的数据，可得出这样的结论，气体氧和喷吹铁的氧化物参加脱碳反应过程的情况是不同的。例如，用氩气喷吹粉料5时，当氧化铁的组成为30%时，脱碳率约为10~15%（绝对值）。用氧气喷吹无氧化剂粉料4时，甚至使脱碳率大约提高10~15%（绝对值）。可见金属的总脱碳率为95%，其中绝大部分是靠吹纯氧完成的。

从分析碳氧化动力学曲线(图7)中可以看出，碳氧化速度最快是在吹炼初期(这一时期要到金属中的含碳量降到0.1%时为止)。

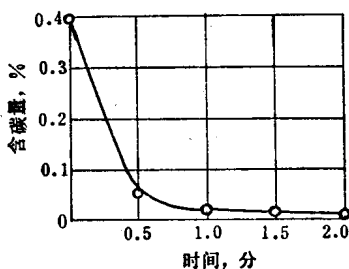


图7 以氩气为载气喷吹氧化铁和萤石粉炼钢时碳氧化的动力学曲线（氧化铁与萤石粉的比例为9:1）

必须指出，在试验室感应炉喷粉炼钢的很多场合，可观察到粉尘的降低。但是，由于大量的金属喷溅，定量地确定喷粉对减少金属烧损的影响是不可能的。

综上所述可以指出，氧气载粉喷吹炼钢是降低废气中粉尘，减少金属烧损的有效而且先进的方法，它能够通过改变载气中粉料浓度的办法，强化并调整吹炼期的脱碳速度和金属温度。

大有希望的是该方法还可以用来冶炼超低碳钢。尤其是在电弧炉中，在脱碳的同时兼顾脱磷是合理的，这在资料[153]中有

所叙述，即在 8 吨电弧炉中以氧气为载气，喷吹石灰粉和氧化物（比例为 1 : 1）的混合粉料，耗量为 12 公斤/吨，同时进行脱碳、脱磷。

研究用气粉流股喷吹金属进行脱碳的过程时，应在寻找最优粉料配比和合理的喷吹制度方面做工作。