

崔更生 编著

XIANDAI
ZHUGANGJIAN
YEJIN ZHILIAN
KONGZHI
JISHU

现代铸钢件冶金质量控制技术



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

现代铸钢件冶金质量控制技术

崔更生 编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2007

内 容 提 要

本书分现代铸钢脱氧理论与实践、铸钢球化变质处理、电弧炉单渣炼钢工艺和奥氏体锰钢的现代进展等4章,系统介绍了减轻和防止钢液二次氧化的方法、铸钢球化变质处理的原理和应用经验、电弧炉单渣炼钢的应用和现代进展以及提高奥氏体锰钢综合性能的实用技术,以达到提高铸钢件冶金质量的目的。书中辅以大量国内外铸钢生产实例和各项技术的应用经验,以供读者参考。

本书可供钢铁冶金领域的生产、科研、设计、管理、教学人员阅读,也可供机械行业的有关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代铸钢件冶金质量控制技术/崔更生编著. —北京:
冶金工业出版社, 2007. 8

ISBN 978-7-5024-4353-5

I. 现… II. 崔… III. 铸钢件—铸造—质量控制
IV. TG26

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 124674 号

出 版 人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 刘小峰 (forrest_liuxf@sohu.com) 美术编辑 李 心

版面设计 张 青 责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 陈 鑫

ISBN 978-7-5024-4353-5

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2007 年 8 月第 1 版, 2007 年 8 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 9.75 印张; 259 千字; 300 页; 1-3000 册

30.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)



崔更生 高级工程师。1954年毕业于清华大学机械系铸造专业，同年在北京航空学院任教。后任峰峰矿务局机械总厂副总工程师，北京“铸造中心”和北京朝阳不锈钢铸造厂总工程师。曾任河北省铸造学会副理事长，华北铸造技术协作网秘书长。

长期从事铸钢的生产与研究，研试成功锌弹高压冒口、“四合一”喷丸清理室、矿车轮金属型浇注机、铸钢单渣熔炼球化变质处理工艺等。

著有《电弧炉铸钢熔炼》、《矿车轮金属型铸造工艺》等。在国内铸造刊物发表论文和译文 15 篇。

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定 价
耐磨高锰钢	45.00 元
特殊钢钢丝	59.00 元
钎钢与钎具	53.00 元
矿物直接合金化冶炼合金钢——理论与实践	26.00 元
中国电炉流程与工程技术文集	60.00 元
电炉炼钢 500 问(第 2 版)	25.00 元
电弧炉炼钢工艺与设备(第 2 版)	35.00 元
电炉炼钢原理及工艺	40.00 元
电炉炼钢学	30.00 元
现代电炉—薄板坯连铸连轧	98.00 元
炉外精炼	30.00 元
炉外精炼的理论与实践	48.00 元
炉外精炼及铁水预处理实用技术手册	146.00 元
铁水预处理与钢水炉外精炼	39.00 元
冶金技术概论	28.00 元
钢铁冶金原理(第 3 版)	40.00 元
炼钢工艺学	39.00 元
炼钢学	40.00 元
现代冶金学(钢铁冶金卷)	36.00 元
钢铁冶金学(炼钢部分)	35.00 元
冶金流程工程学	65.00 元
洁净钢——洁净钢生产工艺技术	65.00 元
超细晶钢——钢的组织细化理论与控制技术	188.00 元
钢铁冶金及材料制备新技术	28.00 元
2006 年—2020 年中国钢铁工业科学与技术发展指南	50.00 元
钢铁生产工艺装备新技术	39.00 元
冶金设备液压润滑实用技术	68.00 元
冶金工程设计·第 1 册·设计基础	145.00 元
冶金工程设计·第 2 册·工艺设计	198.00 元
冶金工程设计·第 3 册·机电设备与工业炉窑设计	195.00 元

双峰检

前 言

铸钢件广泛用于国民经济各工业部门。我国是铸钢件生产大国，近年来，铸钢件产量迅速增长，2005 年产量达到 322 万 t，占世界铸钢件总产量的 35%，居世界首位。

在铸钢件产量快速增长的同时，铸钢件的质量也有所提高，但远不能满足各工业部门对铸钢件质量日益增高的需求。当前，我国铸钢生产面临两大问题亟待解决。一是铸钢的冶金质量，特别是耐磨奥氏体锰钢。例如，绝大多数铸钢厂对铸钢中非金属夹杂物的形态和分布对铸钢质量的影响重视不够，未进行冶金控制；铸钢件的气孔、热裂、脆性断口和表面缺陷等冶金缺陷相当严重，而对这些缺陷产生的原因研究不足，防止不当，致使铸钢件的质量问题长期不能获得满意的解决。这直接影响到机械设备的使用寿命和工作时的可靠性，同时还影响到企业的经济效益和市场竞争力。为提高铸钢的冶金质量，国外广泛采用球化变质处理技术，效果显著，而我国铸钢厂却应用很少。因此，提高铸钢的冶金质量便成为我国铸钢生产亟待解决的首要问题。二是铸钢生产能耗。电弧炉是我国主要的铸钢熔炼设备，电弧炉被称为“电老虎”即因其炼钢电耗高。国外电弧炉早已广泛采用单渣炼钢工艺，美国一铸钢厂电弧炉单渣炼钢电耗为 $475\text{kW} \cdot \text{h/t}$ ，居世界先进水平，而我国多数工厂仍采用传统双渣炼钢工艺，电耗一般为 $800 \sim$

900kW·h/t, 有的高达 1000kW·h/t 以上, 而且双渣钢的冶金质量在某些方面还不及单渣钢。降低炼钢电耗是我国铸钢生产亟待解决的第二个问题。

因此, 为推动我国铸钢行业技术创新, 采用新技术和新工艺, 改进电弧炉传统炼钢工艺, 提高铸钢冶金质量, 降低铸钢件废品率, 节能降耗, 提高企业经济效益, 向各工业部门提供优质铸钢件, 特编写了《现代铸钢件冶金质量控制技术》一书, 以期对我国铸钢行业提高铸钢件质量和节能降耗有所裨益。

本书全面系统地论述了现代铸钢脱氧理论与实践、铸钢球化变质处理、电弧炉单渣炼钢工艺和奥氏体锰钢的现代进展。书中系统地论述了钢液的二次氧化和对铸钢件质量的影响, 以及减轻和防止钢液二次氧化的方法; 系统地阐述了铝对铸钢件质量的影响, 如铝对铸钢件气孔和针孔的影响、铝对铸钢件脆性断口的影响、铝对铸钢中夹杂物形态的影响和铝对铸钢晶粒的影响等, 并提出用钢中最佳残铝量控制铸钢的冶金质量; 系统地论述了铸钢球化变质处理原理和应用经验; 系统地介绍了国内外电弧炉单渣炼钢工艺的发展、应用和现代进展, 介绍了笔者研试成功的电弧炉单渣炼钢球化变质处理工艺; 系统地阐述了铸钢件的气孔和针孔、热裂、脆性断口和表面缺陷等冶金缺陷产生的原因、影响因素和防止方法, 具有一定的实用价值; 较系统地介绍了奥氏体锰钢的现代进展和冶金质量控制方法、高锰钢纳米变质剂悬浮强化变质处理以及高锰钢铸件热等静压处理技术等; 介绍了国内外 35 例铸钢球化变质处理和电弧炉单渣炼钢应用实例, 以及国内外 50 余种牌号的合金化

高锰钢、中锰钢和超高锰钢，可供读者参考。笔者认为，“铸钢单渣熔炼+喂线球化变质处理”是铸钢行业技术创新的理想“炼钢技术套餐”，有可能为电弧炉炼钢的节能降耗做出贡献；奥氏体锰钢的“氮化工程”是提高奥氏体锰钢件综合性能的重要的、有效的实用技术。

本书选材源于我国目前铸钢生产中存在和亟待解决的提高铸钢件质量和节能降耗问题与近年来国内外铸钢生产中有关提高质量和降低电耗的新技术，故特别适于铸钢厂（车间）在技术创新和节能工作中参考应用。

本书还可供从事电弧炉和感应炉炼钢的技术人员与中、高级炼钢工阅读，并可作为高等和中等院校相关专业的教学参考书，也可供科研院所和机械行业的相关技术人员研究相关技术时参考。

本书精选收入的国内外专家重要的科研成果和宝贵的生产经验，使本书的内容更臻丰富和实用，笔者在此特致以诚挚的敬意和感谢。

书中如有偏颇或不足之处，恳请广大读者指正。

崔更生

2006年8月20日于北京

目 录

第一章 现代铸钢脱氧理论与实践.....	1
第一节 钢液的脱氧.....	2
一、钢液的扩散脱氧.....	2
二、钢液的沉淀脱氧.....	5
第二节 钢液的二次氧化	20
一、二次氧化对铸钢件质量的影响	21
二、二次氧化再脱氧产物	22
三、钢液二次氧化的影响因素	25
四、减少钢液二次氧化和再脱氧产物的方法	29
五、防止浇注时钢液二次氧化的方法	31
第三节 铝对铸钢件质量的影响	33
一、铝对铸钢中 Al_2O_3 数量的影响	34
二、铝对铸钢件气孔和针孔的影响	35
三、铝对铸钢件脆性断口的影响	43
四、铝对铸钢中硫化物形态的影响	49
五、铝对铸钢晶粒度的影响	57
六、铸钢中残铝量	58
第四节 钢液终脱氧工艺	59
一、终脱氧加铝量	59
二、终脱氧加铝方法	62
参考文献	67
第二章 铸钢球化变质处理	70
第一节 铸钢中非金属夹杂物的形态	70

一、铸钢中非金属夹杂物形态的分类	71
二、铸钢中夹杂物形态控制技术的发展概况	72
三、铸钢球化变质处理的实质与特点	73
第二节 铸钢球化变质剂	74
一、稀土金属球化变质剂	74
二、碱土金属球化变质剂	76
三、复合球化变质剂	77
第三节 铸钢球化变质处理原理	79
一、碱土金属球化变质处理原理	79
二、稀土金属球化变质处理原理	89
第四节 铸钢球化变质处理技术应用实例	98
一、钢包投入法球化变质处理应用实例	100
二、钢包喂线球化变质处理技术及其应用实例	118
三、铸钢球化变质处理的功能	125
参考文献	126
第三章 电弧炉单渣炼钢工艺	128
第一节 电弧炉单渣炼钢概论	128
一、国外电弧炉单渣炼钢工艺的应用与发展简史	130
二、国内电弧炉单渣炼钢工艺的应用与发展简史	135
第二节 碱性电弧炉单渣炼钢应用实例	138
一、国外电弧炉单渣炼钢应用实例	138
二、国内电弧炉单渣炼钢应用实例	142
三、电弧炉单渣熔炼的铸钢质量	149
四、电弧炉单渣炼钢的经济效益	178
第三节 电弧炉单渣炼钢球化变质处理工艺	181
一、冶金厂单渣炼钢工艺的进展	182
二、单渣炼钢球化变质处理工艺	185
参考文献	205

第四章 奥氏体锰钢的现代进展	207
第一节 高锰钢	208
一、高锰钢的化学成分.....	209
二、高锰钢的显微组织.....	226
三、高锰钢的铸造性能.....	228
第二节 合金化奥氏体锰钢	229
一、合金元素对高锰钢组织与性能的影响.....	230
二、合金化奥氏体锰钢的分类与应用.....	254
第三节 现代奥氏体锰钢熔炼工艺	267
一、直接还原铁熔炼高锰钢.....	267
二、高锰钢变质处理工艺.....	270
三、奥氏体锰钢吹氮复合变质处理工艺.....	276
四、高锰钢包内与型内双重变质处理工艺.....	278
五、高锰钢无硅复合变质剂变质处理工艺.....	279
六、高锰钢纳米变质剂悬浮强化变质处理工艺.....	281
第四节 热等静压处理技术	283
一、热等静压处理技术及其发展概况.....	283
二、高锰钢铸件的热等静压处理.....	284
第五节 奥氏体锰钢冶金质量的控制	285
一、奥氏体锰钢化学成分的控制.....	285
二、奥氏体锰钢晶粒度的控制.....	287
三、高锰钢中夹杂物及其形态的控制.....	296
参考文献	299

第一章 现代铸钢脱氧理论与实践

早在酸性底吹转炉炼钢法问世不久，冶金工作者便了解到氧是与铸钢件的气孔和非金属夹杂物关系极为密切的元素，氧在炼钢过程中起着重要的作用。但直到第一次世界大战时，“脱氧”这一术语才首次出现于冶金文献中。

众所周知，传统电弧炉熔炼铸钢的全过程分为熔化期、氧化期和还原期，即“三期”熔炼工艺。

现代电弧炉熔炼铸钢时，绝大部分均经过氧化精炼。在氧化期均需外界供氧使产生碳—氧反应，以去除钢中的磷、气体（氢、氮）和非金属夹杂物。这样，在氧化期结束时，钢液中的氧含量便高于成品钢中的允许值。因此，必须对钢液进行充分脱氧，使钢中氧量达到最低水平，以获得健全的致密铸钢件。

脱氧是电弧炉熔炼铸钢的主要任务之一。脱氧方法分为扩散脱氧、沉淀脱氧和综合脱氧三种方法。

理论研究与实践证明，钢液脱氧是浇注前的最后一项关键的工艺操作，它直接关系到铸钢的冶金质量。脱氧又是铸钢单渣熔炼和球化变质处理技术的核心。因此，研究现代脱氧理论与实践便具有重要的意义。

氧在钢中主要以 FeO 的形式存在，它能大量地溶于钢液中。此外，还有部分氧以化合物的形式存在于钢中。

氧对铸钢质量的有害影响，是由于氧在液态和固态钢中的溶解度相差悬殊而造成的。例如， 1600°C 时，氧在纯铁液中的溶解度为 0.23% ；而室温下，氧的最大溶解度为 0.05% 。因此，如果钢液脱氧不良，便会对铸钢的质量产生严重的危害性，氧对铸钢质量的影响如下：

(1) 氧对铸钢件气孔的影响。钢液浇入铸型后，在钢液凝固过程中，氧在钢液中的溶解度随着温度的下降而显著降低。因此，析出的氧便与钢液中的碳发生碳—氧反应，所产生的 CO 气泡便使铸钢件产生气孔，导致铸钢件报废。钢液中的氧含量愈高，愈容易产生气孔。因此，钢液必须充分脱氧。

(2) 氧对铸钢件热裂的影响。研究证明，钢液氧含量高时会加剧硫对铸钢的有害影响，在钢液凝固过程中，FeO 与 FeS 便形成低熔点（940℃）的共晶，并以薄膜状的形式分布于晶界上，因而容易造成铸钢件的热裂缺陷。

(3) 氧对铸钢中非金属夹杂物的影响。在钢液凝固过程中，析出的氧除与碳反应外，还会与钢液中的铝、钛、硅、锰等元素发生化学反应，而形成非金属夹杂物。这些夹杂物不能浮出铸件，而滞留于钢中。钢液中氧含量愈高，夹杂物的数量愈多，铸钢的性能愈低。

(4) 氧对铸钢力学性能的影响。研究证明，铸钢中氧含量愈高，其力学性能愈低。

本章将以钢液的脱氧，钢液的二次氧化，铝对铸钢件质量的影响和钢液终脱氧工艺为专题进行较全面和系统的论述。

第一节 钢液的脱氧

钢液的脱氧方法分为扩散脱氧、沉淀脱氧和综合脱氧。

一、钢液的扩散脱氧

(一) 扩散脱氧原理

扩散脱氧是一种传统的脱氧方法，在还原期稀薄渣造好后，将粉状脱氧剂加于渣面上，通过降低渣中的氧量而达到降低钢液中氧量的目的。扩散脱氧的原理是分配定律，即在一定温度下，当氧在熔渣与钢液中的溶解度达到平衡时，FeO 在钢液与熔渣间的浓度有一定的比值，即：

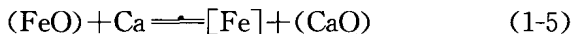
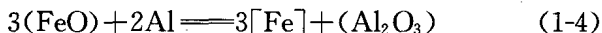
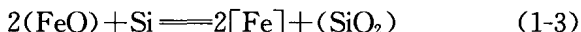
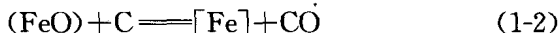
$$L_o = \frac{(\Sigma \text{FeO})}{[\text{O}]} \quad (1-1)$$

式中 L_o ——氧的分配系数。

如果将粉状脱氧剂加于渣中，渣中 (FeO) 势必降低，而使氧在渣与钢液间的平衡遭到破坏。为了达到新的平衡，钢液中的氧必然向渣中扩散。因此，不断降低渣中 (FeO) 便可相应地降低钢液中的氧量，氧的扩散一直进行到钢液中的氧达到与渣中氧相平衡为止。这种通过氧的扩散过程使钢液中的氧转入渣中而达到降低钢液中氧量的方法，称为扩散脱氧。

扩散脱氧时，常用含有强脱氧元素的粉状脱氧剂。如炭粉、硅铁粉、硅钙粉、铝粉与碳化钙等。这些脱氧剂的 C、Si、Al、Ca 等元素进入渣层后便将 (FeO) 还原，从而使渣中 (FeO) 降低。

常用脱氧元素的扩散脱氧反应如下：



由上述脱氧反应可知，扩散脱氧的脱氧产物进入炉气或被熔渣所吸收，因而脱氧产物不沾污钢液。但扩散脱氧是在渣中或钢渣界面上进行的，氧由钢液向渣中扩散的速度较慢，并受到许多因素的影响。因此，扩散脱氧欲达到一定的脱氧效果需要较长的时间。故扩散脱氧的生产效率低，电能消耗高。而且在某些情况下，钢的质量并不一定高。

关于影响扩散脱氧效果的诸因素，在许多冶金文献中均有较详细的阐述，故不再赘述。下面重点综述扩散脱氧时还原渣的脱氧能力。

(二) 还原渣的脱氧能力

В. А. Григорян^[1]结合其他研究者的研究成果，阐述了还原

渣的脱氧能力。

还原渣的脱氧能力问题，在炼钢实践中具有重要的意义，为解决此问题，首先应将在某一成分的还原渣作用下，钢液中氧的实际活度 $a_{[O]实际}$ 与平衡状态下氧的活度 $a_{[O]平衡}$ 做一比较。如果 $a_{[O]实际} < a_{[O]平衡}$ ，则还原渣便起脱氧作用。

Д. Я. Поволоцкий 等人的研究表明，对于中、高碳钢而言，扩散脱氧所起的作用是比较小的。在还原期的前半期，钢液中氧的活度取决于碳，而且在大多数情况下，碳低于与还原渣平衡时氧的活度。例如，如钢液中含 C 0.7%，则与碳平衡的氧的活度 $a_{[O]} = [\%O] = 0.003$ ，而与此相对应的还原渣中(FeO)的平衡活度为 $a_{(FeO)} = [\%O] / [\%O]_{饱和} = 0.003 / 0.23 = 0.013$ 或 (FeO) 1.5%。

还原期前半期含(FeO) > 1.5%的还原渣，对钢液不起脱氧作用。大多数情况下，低碳钢中氧的活度大于与还原渣平衡时的活度。但是，即使在这种情况下，用炭粉进行扩散脱氧，钢液中的氧也不会降至小于与碳平衡的浓度。当用硅铁粉脱氧时，只有在钢液中硅的浓度同时提高的情况下，中、高碳钢中的氧量才会显著地降低。

在实际条件下，钢液与气相间的平衡，一般是达不到的，而沉淀脱氧则具有此优点，即在较短的时间内便可达到所要求的脱氧程度。

另据文献[2]介绍，长期的电弧炉生产实践发现长时间的扩散脱氧并非良策，它不但影响生产率的提高，而且钢中溶解的氧量降低很少，甚至还略有升高。例如，钢液预脱氧后，氧量为 0.005%~0.008%，如不再加 Si、Al 等强脱氧剂，经扩散脱氧后，钢中氧则回升至 0.006%~0.009%，可见扩散脱氧的效果很低。

因此，扩散脱氧是一低效率的脱氧方法。还原期钢液中氧的浓度既不取决于氧的分配定律，又不取决于渣中脱氧反应的发展程度，而主要取决于沉淀脱氧。

二、钢液的沉淀脱氧

沉淀脱氧是电弧炉和感应炉熔炼铸钢时应用最广的一种脱氧方法。沉淀脱氧是将块状的锰铁、硅铁、铝或其他复合脱氧剂，直接加入钢液中进行脱氧。沉淀脱氧的概念起源于沉淀反应，因为凡是由钢液中析出氧化物的过程多属于沉淀反应的过程，沉淀脱氧又称强制脱氧。

脱氧除了将钢液中溶解的氧量降至无害的数值外，另一重要任务便是排除脱氧产物，即排除非金属氧化物，以获得较洁净的钢液。

钢液沉淀脱氧时，钢液中总氧量的降低是由于脱氧产物排除的结果。

因此，钢液的沉淀脱氧即排除脱氧产物。所以，研究脱氧产物的形成与排除便具有重要的意义。

近代对铸钢脱氧过程的研究证明，从脱氧剂加入钢液开始直至钢液凝固为止的全过程中，都有脱氧产物的形成。由于脱氧产物的形成时间和排除条件不同，而对铸钢质量的影响也不一样，В. И. Явойский^[3]研究碳钢和低合金钢脱氧过程时，建议脱氧产物依其形成时间而分为三类：

一次脱氧产物——在炉内或包内加入脱氧剂后立刻形成的脱氧产物；

二次脱氧产物——已脱氧的钢液在其冷却至液相线之前所形成的脱氧产物；

三次脱氧产物——在液相线与固相线之间凝固时所形成的脱氧产物。

这三类脱氧产物，一般称为内生脱氧产物。

因此，我们根据脱氧产物形成的时间和排除条件，可进一步了解沉淀脱氧时这三类脱氧产物对铸钢质量的影响。

研究表明，在所用脱氧剂的种类及其加入量适宜的情况下，由于一次脱氧产物具有聚集、长大和上浮的有利条件，故绝大部分均能排出钢液。因此，一次脱氧产物对成品铸钢中非金属夹杂

物总量的影响不大。

出钢后，钢液在包内镇静过程中，钢液温度降低不多，氧的溶解度变化不大。当钢液浇入铸型后，随着温度降至液相线，氧的溶解度发生变化，平衡发生移动，使脱氧反应重新进行而形成二次脱氧产物，但不能排出铸件。

钢液在凝固过程中继续发生脱氧反应而形成三次脱氧产物，同样不能浮出铸件，而滞留于正在成长着的树枝状晶体之间，因其尺寸较小，分布较均匀，故又称显微氧化物夹杂物。因此，三次脱氧产物对铸钢的质量有决定性的影响。业已证明，三次脱氧产物与钢液的二次氧化无关，它只取决于钢液中的氧量。通常在铸钢中所看到的氧化物夹杂物，绝大部分是三次脱氧产物。

（一）沉淀脱氧原理

根据现代脱氧理论，沉淀脱氧时，钢液中脱氧产物的形核、聚合长大、上浮和排除，不仅取决于脱氧产物的熔点、密度，而且在更大的程度上还取决于脱氧产物与钢液间的界面张力、钢液的温度、黏度以及脱氧过程中的动力学因素等。

钢液的沉淀脱氧分为炉内沉淀脱氧和包内沉淀脱氧。关于炉内沉淀脱氧时，在引力场中脱氧产物的形核、聚合长大、上浮和排除的冶金过程，在冶金文献中均有详细的和系统的阐述。鉴于本书所论述的铸钢单渣熔炼和球化变质处理均基于包内处理，因此，这里仅就包内沉淀脱氧的原理及其特点进行叙述。

包内沉淀脱氧是热力学和动力学融为一体的复杂的脱氧过程，其特点是脱氧反应，脱氧产物的形核、聚合长大、上浮和排除的全过程是在瞬间完成的。

研究证明，采用强脱氧剂包内沉淀脱氧时，脱氧产物可迅速排出钢液，而获得理想的脱氧效果。在长期包内沉淀脱氧的实践中发现铝脱氧时所形成的高熔点的 Al_2O_3 ，虽为固态颗粒，但其排除的速度是很快的。

Plöckinger^[4]曾系统地研究了电弧炉氧化性钢液出钢时，在包内加入不同种类的脱氧剂所生成的脱氧产物的排除速度。研究