

冶金生产技术丛书

YEJIN SHENGCHAN JISHU CONGSHU

电炉钢生产



冶金工业出版社

冶金生产技术丛书

电 炉 钢 生 产

大冶钢厂 编

冶金工业出版社

出 版 说 明

在毛主席的无产阶级革命路线指引下，我们冶金战线上的广大职工，继续贯彻执行**鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义**的总路线，高举“**鞍钢宪法**”的光辉旗帜，坚持**独立自主，自力更生，艰苦奋斗，勤俭建国**的方针，**抓革命，促生产**，夺取革命与生产的新胜利。

为了适应冶金工业发展的需要，根据广大冶金工人学习生产技术知识的迫切要求，我们组织编写了一套《冶金生产技术丛书》，介绍冶金工业采矿、选矿、有色金属冶炼和加工、炼铁、炼钢、轧钢、金属材料等有关生产技术操作和基本知识，供冶金工人阅读，并给从事于冶金工业的干部和技术人员参考。

《电炉钢生产》是这套丛书中的一种，是由大冶钢厂编写的。本书从生产实践的角度叙述了电炉钢生产过程，着重于生产操作，原理部分较浅显。由于本书主要是以大冶钢厂电炉钢生产实践为基础写的，虽然在某些章节中涉及了我国其他电炉炼钢厂的生产实践，但仍存在局限性。因此对本书中的资料，读者应根据本厂实际生产情况加以选用。

在编写过程中，各电炉钢厂及北京钢铁学院、东北工学院都提供了许多宝贵资料，给予了大力协助，特此致谢。

一九七七年一月

目 录

第一篇 冶炼部分

第一章 概述	1
第一节 钢的分类和钢号	1
第二节 炼钢方法简介	4
第三节 技术经济指标	21
第二章 机械设备	25
第一节 概述	25
第二节 炉子主体部分	34
第三节 电极夹持及升降系统	42
第四节 炉顶装料系统	51
第三章 电气设备	61
第一节 电弧炉电路的组成及主要电气设备	61
第二节 电极自动调节电路	68
第三节 电弧炉辅助传动系统电气装置	83
第四节 电弧炉系统的测量、保护及信号装置	84
第五节 电弧炉的电气操作及降低电能消耗的方法	88
第四章 原材料	91
第一节 钢铁料	91
第二节 造渣材料和氧化剂	102
第三节 脱氧剂和增碳剂	105
第四节 电极	107
第五章 炉衬	109
第一节 炉衬用耐火材料	109
第二节 炉衬的砌筑	117
第三节 炉衬的维修	126
第六章 配料、装料及熔化	134
第一节 配料	134

第二节	装料	144
第三节	熔化	146
第七章	氧化期	159
第一节	氧化方法	159
第二节	钢液的脱磷	160
第三节	钢液的脱碳	166
第四节	钢中气体和夹杂的去除	180
第五节	氧化期操作	184
第八章	还原期	191
第一节	钢液的脱氧	191
第二节	钢液的脱硫	203
第三节	钢液的精炼	208
第四节	温度控制和测量	218
第五节	钢液成分调整	226
第六节	出钢	240
第九章	冶炼安全与事故	245
第一节	冶炼安全	245
第二节	冶炼事故	247

第二篇 浇注部分

第十章	铸锭设备	254
第一节	盛钢桶	254
第二节	锭盘和中注管	268
第三节	钢锭模	271
第四节	保温帽	278
第十一章	铸锭工艺	290
第一节	铸锭方法	290
第二节	铸锭工艺和操作	291
第三节	保护浇注	298
第十二章	钢锭	310
第一节	钢锭的凝固	310
第二节	收缩和偏析	317

第三节	冷却和热处理	326
第四节	钢锭的表面缺陷	330
第十三章	真空处理和连续浇注	334
第一节	真空处理	334
第二节	连续浇注	341
第十四章	铸锭安全与事故	353
第一节	铸锭安全	353
第二节	铸锭事故	354

第三篇 几种钢的冶炼

第十五章	结构钢	363
第一节	概述	363
第二节	主要质量问题	371
第三节	硼钢的冶炼	373
第四节	铬锰钛钢的冶炼	377
第五节	铝钢的冶炼	381
第十六章	轴承钢	384
第一节	概述	384
第二节	主要质量问题	385
第三节	冶炼与浇注	385
第十七章	高速钢	394
第一节	概述	394
第二节	主要质量问题	396
第三节	冶炼与浇注	401
第十八章	不锈钢耐热钢	408
第一节	概述	408
第二节	主要质量问题	411
第三节	冶炼与浇注	413
第十九章	稀土元素在钢中的应用	429
第一节	概述	429
第二节	稀土在钢中的作用	430
第三节	主要质量问题 —— 稀土夹杂	433

第四节 冶炼特点435

第四篇 钢的检验和缺陷

第二十章 钢的检验方法440

第一节 宏观检验441

第二节 显微检验444

第三节 机械性能试验446

第四节 淬透性试验451

第二十一章 钢的缺陷453

第一节 概述453

第二节 宏观缺陷455

第三节 显微缺陷473

第一篇 冶炼部分

第一章 概 述

第一节 钢的分类和钢号

一、铁和钢

我们经常所说的铁和钢都是铁碳合金。含碳0.02~2%者就是钢（个别钢号含碳达2.3%），含碳2~6.67%者叫生铁。含碳量更高时，因脆性太大而无使用价值。含碳量极低（约0.02%）者叫纯铁，也叫工业纯铁，其应用不如钢和生铁广泛。通常民间所谓的熟铁，实际上就是含碳将近0.1%并含有大量夹渣的铁碳合金。

铁和钢中，不仅都含有碳，而且由于原材料及冶炼操作的影响，都还或多或少的含有某些残余元素和杂质，常见的残余元素有硅、锰、磷、硫、铜、铬、镍等。

碳素钢就是含有残余元素和杂质的铁碳合金，其产量大（占总产钢量的90%以上），价格低廉，应用广泛，但在力学、物理、化学、工艺等性能方面不能满足工业发展对它的更高要求。

合金钢就是为了满足对性能的更高要求而发展起来的。为了获得某种性能，有目的并按一定含量范围把某些元素加入钢中，这样的元素就叫合金元素，这种钢就叫合金钢。

常用作合金元素的金属元素有锰、铬、镍、钼、钨、钒、钛、铌、铝、铜、钴等，非金属元素有硅、硼、氮等。

二、钢的分类

在各种场合使用的钢类名称非常多，它们是在生产和使用中从不同目的和角度出发的简单称呼，有的可以顾名思义，有的与热处理和组织转变等知识有关，这里就列举几种常见的分类方法

和名称，由此可以大致了解各种钢类名称的来历。

(一) 按化学成分分类

1. 按是否有意加入合金元素，分为碳素钢和合金钢。

2. 按含碳量分为低碳 ($<0.25\%$)、中碳 ($0.25\sim 0.60\%$) 和高碳 ($>0.60\%$) 钢。

3. 按合金元素总含量分为低 ($<3\%$)、中 ($3\sim 10\%$)、高 ($>10\%$) 合金钢。

4. 按所含合金元素分为铬钢、锰钢、铬镍钢、铬锰钢、硼钢等。

(二) 按显微组织分类

1. 按奥氏体的分解转变方式，分为亚共析（先析出铁素体，再分解出珠光体）钢、共析（直接分解成珠光体）钢、过共析（先析出碳化物，再分解出珠光体）钢。铁碳合金的共析含碳量为 0.8% ，亚共析小于 0.8% ，过共析大于 0.8% 。合金元素溶入奥氏体时都使共析含碳量降低，但存在未溶入奥氏体的稳定碳化物时，因固定部分碳不参与共析反应而可能使钢的共析含碳量提高。某些高合金过共析钢，凝固时有莱氏体（奥氏体和碳化物的共晶体）形成，因而又称为莱氏体钢。

2. 按正火组织分为珠光体、贝氏体、马氏体、奥氏体钢。正火（空冷）时，实际冷却速度随钢的截面增大而减小，冷却愈慢，愈趋于获得上述较前面的组织。

3. 按加热及冷却时有无相变和在室温的主要组织，分为铁素体、半铁素体、半奥氏体和奥氏体钢。

(三) 按冶炼方法或质量分类

1. 按炼钢炉分为平炉钢、转炉钢、电弧炉钢等。

2. 按脱氧程度分为沸腾钢（不脱氧）、镇静钢（完全脱氧）、半镇静钢（半脱氧）。

3. 按磷、硫含量及其他质量水平分为普通钢、优质钢和高级优质钢。

(四) 按制造零件的工艺分类

1. 按制造零件的热处理方式，把所用钢分为调质钢、低温回火钢、渗碳钢、氮化钢等。

2. 按制造零件的加工成形方式分为压力加工用钢和切削加工用钢。

(五) 按用途分类

在标准中主要根据钢的用途来分类，一般分为结构钢、弹簧钢、工具钢、轴承钢、不锈钢耐热钢等。下面介绍的钢号表示方法就是主要根据这种分类方法来划分的。

三、钢号表示方法

钢的产品牌号即钢号，一般都用数字和字母来表示，各国钢号表示的内容有冶炼方法、质量等级、化学成份、性能、组织、状态、用途等。

我国国家标准规定的钢号表示方法，主要是用数字和元素符号表示钢的化学成份，个别钢类和合金用汉语拼音字母和编号数字代表其他内容。

(一) 优质碳素钢和合金钢

概略地说，钢号前面的数字表示碳的千分之几或万分之几的平均含量整数，后面是所含合金元素化学符号及其百分之几或千分之几的平均含量整数。

1. 含碳量 结构钢和弹簧钢前面用两位数字表示含碳量的万分之几，其他钢类前面用一位数字表示含碳量的千分之几。高速工具钢、轴承钢、碳含量 $\geq 1\%$ 的合金工具钢和含碳约 0.1% 的不锈钢耐热钢，可不标出含碳量。

2. 合金元素 一般都在元素符号后面标明其百分之几的平均含量整数（若为 1% 时可不标出），但轴承钢含铬量用千分之几表示。

3. 其他内容 碳素工具钢前面都冠以字母T。轴承钢前面冠以字母G，以别于合金工具钢。某些钢号前面有字母Y者为易切削钢，末尾带A者为高级优质钢。

(二) 普通碳素钢

牌号前面用A、B、C相应表示甲（保证机械性能）、乙（保证化学成分）、特（二者都保证）类钢，后面的数字代表成分编号。有时在中间插入字母J、S、D相应表示碱性、酸性、顶吹转炉钢。末尾带F或b者，表示沸腾钢或半镇静钢。

（三）电工用硅钢和纯铁

电工用硅钢牌号前面冠以字母D，后面两位数字的第一位代表含硅量等级，第二位代表电磁性能高低；再后有0或00者，代表冷轧钢片晶粒取向程度。有时在D与数字间插有G、H、R，相应表示检验时磁场条件的强、中、弱。

电工用纯铁牌号用字母DT和随后的编号数字表示。有时末尾带A或E代表电磁性能较好或特别好。

（四）高温合金和精密合金

高温合金牌号用字母GH和随后的编号数字表示。

精密合金牌号，在字母J前面冠以分类编号数字（代表软磁、永磁、弹性、膨胀、电阻、电偶、热双金属等合金类别），后带牌号编号数字。

第二节 炼钢方法简介

“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。”随着生产和科学技术的发展和提高，炼钢方法也在不断发展。

最早出现的现代炼钢方法为1856年的底吹酸性转炉炼钢法，随后出现的主要炼钢方法为1864年的平炉炼钢法，1874年的底吹碱性转炉炼钢法，1897年的侧吹酸性转炉炼钢法，1951年我国工人阶级创造的侧吹碱性转炉炼钢法，1952年出现的氧气顶吹转炉炼钢法（LD法），近年来又发展了氩氧吹炼法（AOD）。电炉炼钢法是1898年出现的，但它很快发展为生产特殊钢的主要方法。

随着航空、造船、电子、石油化工等工业以及尖端科学技术的迅速发展，对钢和合金的性能提出了更高的要求。所以近三十年来又发展了真空感应电炉、真空电弧炉、电子束炉等多种熔炼

方法，近十五年来电渣重熔法也得到了广泛的发展和应用。

平炉、电弧炉、氧气顶吹转炉是我国目前广泛采用的炼钢方法，此外尚使用部分侧吹空气和氧气转炉。

国外在炼钢方面的发展趋势是，氧气顶吹转炉钢的比重逐年增长，平炉钢比重则相应下降，电弧炉钢的比重近年来稍有上升，与此同时并逐渐发展氧气底吹转炉和真空电渣重熔等。

现将各种炼钢方法简要介绍如下：

一、转炉炼钢法

转炉炼钢法的共同特点是，设备简单，投资少，收效快，冶炼时间短，生产率高，成本低，不从外部引进热源，而是利用氧与一定温度的铁水中的元素碳、硅、锰、磷反应放出大量的热使钢液获得必要的温度（一般达到1600°C左右）来进行冶炼的。

转炉炼钢法可分为底吹转炉炼钢法、侧吹转炉炼钢法、顶吹转炉炼钢法三种，侧吹碱性转炉炼钢法是我国工人阶级创造的炼钢方法，经过无产阶级文化大革命，又有了新的发展用氧气吹炼代替空气吹炼，使钢的质量进一步提高。

转炉生产的钢种目前主要为低碳结构钢和少量合金钢。

二、平炉炼钢法

平炉实际上是一种反射炉，它由炉顶、炉膛、炉头、上升道、蓄热室、沉渣室、烟道等组成。

虽然和平炉冶炼过程中，化学反应也放出热量，但是平炉炉体庞大，散热面积大，仅仅由废气、漏气和炉衬所引起的热损失，就比化学反应所产生的热量多三倍以上。因此，平炉炼钢必须引进大量的外来热源。

按炉体结构形式的不同，平炉分为固定式和倾动式两种。根据所用耐火材料的性质，平炉分为碱性和酸性两种。平炉炼钢法仍是目前主要的一种炼钢方法。

三、电弧炉炼钢法

电弧炉炼钢法是我国和世界各国目前生产特殊钢的主要方法。

电弧炉炼钢方法是以电能作为热源的，它的优点是：

1. 热效率高，一般在65%以上；
2. 温度可以灵活掌握。在冶炼过程中，通过对电流和电压的控制，可以根据操作和钢种的需要，灵活掌握冶炼温度；
3. 炉内气氛可以控制。在冶炼过程中，根据需要，既可造成炉内的氧化性气氛，也可造成还原性气氛，这是转炉和平炉无法达到的，因此碱性电弧炉具有更好的去除钢中磷、硫和其他杂质的条件，有益于提高钢的质量，钢的化学成份也容易掌握；
4. 与平炉比较，设备简单，主体部分仅为变压器和炉壳，因而基建费用低，投产快。

电弧炉炼钢法也有它的缺点，主要为：

1. 电弧是点热源，炉内温度分布不均匀，熔池各部位钢液温度相差较大；
2. 炉内空气或水分，在电弧作用下解离出大量氢、氮，使钢中氢、氮含量一般高于平炉（电炉钢中一般含有： $H0.005\sim 0.008\%$ ， $N0.005\sim 0.010\%$ ）。

根据炉衬的性质，电弧炉分碱性和酸性两种。碱性电弧炉炼钢是本书的基本内容，这里只简略地介绍酸性电弧炉炼钢法。

酸性电弧炉炉衬用酸性耐火材料砌筑而成，造酸性渣，没有去除钢中磷、硫的能力，必须使用低磷、硫的金属料，所以未得到广泛采用，一般用于铸钢车间。

酸性钢应用于铸钢件上，是由于它比碱性钢具有较好的流动性，能满意地充满铸型，这点对于薄壁和形状复杂的铸件显得特别重要。酸性钢流动性好的原因在于：

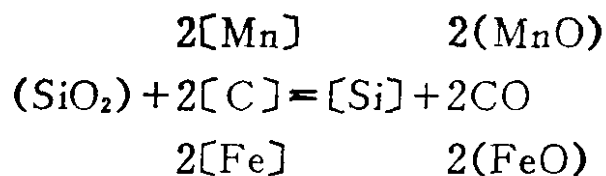
1. 酸性渣的电阻大于碱性渣，在相同电压和电流下，电弧较短，对炉衬的有害影响较少，因此在酸性炉熔炼过程中可使用较高的二级电压，钢液温度也就较高；
2. 钢液的流动性还与钢中非金属夹杂物的含量和形状有关。实践证明，夹杂物含量增加，钢液流动性降低，而酸性钢夹杂少且全部为球状，故流动性较好。

除这点外，酸性钢在铸件上的获得应用，还在于铸造车间在生产过程中产生约40%的废钢，从而部分提供了适用于酸性炉的原料来源。其次，钢铸件快速结晶的特点，可以减少磷、硫在铸件中的偏析程度，因而容许钢中有较高的磷、硫含量，这在一定意义上就扩大了酸性炉原料的供应范围。

根据熔炼钢种的质量要求，酸性电弧炉炼钢分为氧化法和返回法两种。对高质量铸件或钢锭用氧化法，对普通质量的用返回法生产。实践证明，含铬合金结构钢的返回法冶炼，与碱性炉比较，在酸性炉中铬的收得率高。

酸性法的冶炼过程与碱性法相似，现介绍一下主要段阶的基本特点。

熔化期：在酸性电弧炉中金属料的熔化与碱性电弧炉没有任何区别。在熔化期应特别注意炉底上钢液的过热，防止炉底损坏。钢液过热通常是由两种原因造成的，一是炉内不合理的布料，当电极下装有轻薄小料时，电极能迅速下伸到炉底，使炉底薄层钢液长期过度受热；二是炉料架桥，熔化缓慢，也使炉底钢液激烈过热，当架桥形成时应及时处理，可用氧气烧垮，或抬起电极将冷料加入电极井内，冷却钢液，并使钢液与料桥接触。钢液过热后，钢液中的碳、锰、铁会使炉衬中的SiO₂还原，其反应为：



结果炉底受到损坏，钢中硅增加，氧化期碳—氧反应困难。

为了减少钢液热损失和吸气量以及防止炉衬被铁氧化物侵蚀，熔池形成后，应立即加石英砂造渣。

氧化期：酸性电弧炉的氧化期没有脱磷任务，只是去除钢液中的气体和非金属夹杂物并将钢液加热到出钢温度。

与碱性渣相反，在酸性渣中，氧化铁全部或大部分同二氧化硅形成硅酸盐，不以自由态存在，因此氧化期碳的氧化速度低，

约为碱性法的一半，同样硅、铬的氧化也比较困难，尤其是硅。原因在于钢液中悬浮有很多的二氧化硅颗粒，硅氧化后生成的 SiO_2 仍然留在反应区。而锰相反，它在酸性渣下能够完全氧化，因锰的氧化产物氧化锰一俟生成后立即与钢液中悬浮的 SiO_2 化合为低熔点的硅酸盐，迅速离开反应区。

当钢液过热时，在氧化期还可能产生硅的还原过程，还原的硅又与钢中氧作用，使熔池沸腾现象停止。此时应该往炉中加入石灰或石灰石，改变炉渣成分，降低自由态(SiO_2)浓度，提高自由态(FeO)含量，这不但有利于阻止硅的还原，而且也有利于杂质的氧化。

在氧化期，酸性渣中没有磷的氧化物，可以不扒渣直接还原，而不致影响钢的质量。

还原期：酸性渣没有脱硫能力，还原期的任务只是钢液的脱氧和调整钢液的化学成分。

脱氧方法有三种，即沉淀法、扩散法和硅还原法。

硅还原法的脱氧反应是吸热反应，要求较高的温度，因而增加了钢中的气体含量；另外，硅的还原量由于熔池温度的波动，变化较大，使钢的成分难以控制，冶炼时间也长，所以这种方法在实际生产中没有普遍采用，常见的是沉淀法和扩散法。

(一) 沉淀法

它是最常用的一种脱氧方法，其实质是将与氧的亲合力大于铁的块状脱氧剂加入炉内使钢液直接脱氧。这种方法的特点是脱氧速度大，冶炼时间短，但由于脱氧反应在钢液内部进行，因而钢中含有较多的非金属夹杂物。

常用沉淀脱氧剂主要是硅铁、锰铁和铝。从减少锰的烧损着眼，脱氧剂加入顺序应为：先加硅铁，在出钢前加锰铁和铝。为了提高钢的纯洁度，使用复合脱氧剂硅钙和硅锰钙最为合理。

复合脱氧剂同氧和硫都有很大的亲合力，它们在使钢液脱氧的同时，也与硫形成熔点远高于 FeS 的硫化物： Al_2S_3 ， CaS ， MnS 。这些硫化物在钢液凝固过程中能够成为晶核，而隐藏在

晶粒中心，因此降低了硫对钢的有害作用。

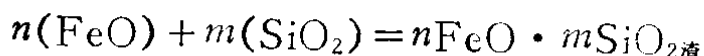
脱氧元素的脱氧能力在不同性质的渣系中表现是不一样的。与碱性渣比较，在酸性渣中，硅的脱氧能力较低，而锰、铝的脱氧能力则得到提高。这是由于，酸性钢液中存在着过饱和的二氧化硅颗粒，硅的脱氧产物（ SiO_2 ）形成之后仍然停留在反应区，而锰、铝的脱氧产物（ MnO ， Al_2O_3 ）形成之后立即与 SiO_2 化合成低熔点的硅酸盐（ $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ， $n\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SiO}_2$ ）；具有较好的上浮条件，迅速离开了反应区。这个特点也就决定了在同一脱氧工艺下酸性钢含有的非金属夹杂物比碱性钢少。

（二）扩散法

它是通过渣层使钢液间接脱氧的方法，其特点是，脱氧速度较低，冶炼时间长，但由于脱氧反应不是在钢液内部而是通过渣层进行的，从而钢中夹杂物含量较少。

在碱性渣中，钢液的扩散脱氧仅仅是依靠脱氧剂的作用来完成的，而在酸性渣中钢液的扩散脱氧表现为两种方式，除脱氧剂的作用外，炉渣本身也具有扩散脱氧的能力。

在酸性渣中， SiO_2 浓度很大， FeO 全部或大部分都与之化合成铁硅酸盐，其反应为：



因而渣中不存在自由态氧化铁，这一特点说明，即使渣内不加入脱氧剂，酸性渣也能促进扩散脱氧。

渣面上加入焦炭粉、硅钙合金、铝等脱氧剂时，既存在炉渣的扩散脱氧，又存在脱氧剂的脱氧作用，因而提高了炉渣的扩散脱氧能力。

在渣中 FeO 被还原和形成铁硅酸盐后，根据分配定律，钢液中 FeO 又转入炉渣，依此降低钢中的氧含量。

综合上述，可以看出，与碱性电弧炉炼钢法比较，酸性法的主要缺点是不能去除钢中的磷、硫，对原材料的限制较严，由于在冶炼过程中硅还原的不可避免性，所以不适用于低硅钢的冶炼。但也具有一些优点：

1. 酸性炉衬使用寿命长，热停工少，作业率高；冶炼过程不能去除磷、硫，熔炼时间短，因而具有较高的生产率；

2. 因冶炼时间短，电极、电能、耐火材料等单位消耗少，同时酸性耐火材料便宜，返回法冶炼的合金收得率高，从而钢的成本较低；

3. 钢中夹杂物含量少，且夹杂呈球形，因而钢的力学性能好。

四、双联炼钢法

双联炼钢法有多种方式，其中主要有平炉和电弧炉、酸性转炉和电弧炉、碱性转炉和电弧炉双联三种。新近发展起来的双壳炉—盛钢桶精炼法和氩氧炉炼钢法实际上也是双联炼钢法。

(一) 平炉—电弧炉双联法

由于配合上的困难和产量低的缘故，国内外都采用不多。

(二) 转炉—电弧炉双联法

在电弧炉与转炉双联方式中，是采用酸性转炉还是碱性转炉将取决于生铁的成分。转炉所需的铁水，在可能条件下，应力求由高炉直接供给，在条件不具备时，则采用化铁炉供给的办法，这样又可称为化铁炉—转炉—电弧炉三联炼钢法。

转炉和电弧炉双联炼钢就是在转炉内将钢水含碳量吹炼到电炉所需要的值，然后将钢水倒入盛钢桶或铁水包，装入电炉中。钢水在电炉内升温后，根据钢水碳、磷含量，进行部分氧化或直接还原精炼。此法是提高电炉生产率、满足对高级优质钢日益增长的需要和补足废钢来源不足的有效途径。就钢的质量而言，不论气体含量或机械性能都与电炉单炼没有差异。不足之处是钢的成本比电炉略高，生产组织调度要复杂些，但如采用高炉铁水直接热装转炉，这种缺点是可以克服的。因此电炉和转炉双联法仍不失为电炉优质高产的良好方法。

(三) 双壳炉—盛钢桶精炼炉（桶炉）双联法

为提高电弧炉钢的产量和质量，近年来在电弧炉炼钢和真空处理的基础上，又发展了双壳炉—盛钢桶精炼炉的双联炼钢方法。