

钢铁译文

(增刊)



太原钢铁公司科技处

前 言

我公司广大职工得知“不锈钢热钢专业交流会”，在太原召开，很高兴。高兴的是全国各地的兄弟单位代表室内传递送来，我们可以学到很多宝贵经验。在此表示热烈欢迎。

为“专业交流会”的召开，我公司科研所和研究所的同志特编译了本增刊供代表们参考，以此为会议作些工作，本刊中可能有不少错误和缺点请批评指正。

编 者

1974.4.7.

目 录

国外氩氧法(AOD)冶炼不锈钢简介	1
不锈钢的连续铸造技术	19
从金属学角度看不锈钢	33
不锈钢的机械性能和物理性能	47
最新不锈钢	73
耐蚀用不锈钢的选择和问题	97
不锈钢的耐蚀性	115
可变形奥氏体不锈钢的组织图	132

国外氩-氧法(AOD)冶炼不锈钢简介

一、发展概况

随着航空、化工、海洋开发等科学和工业部门的发展，对不锈钢的耐蚀性提出了愈来愈高的要求，原来用铁或镍来抵消碳、氮等元素的不利影响的办法，已不能满足发展的需要，各工业部门普遍要求生产超低碳、超低氮型的不锈钢。为此，近几年来，世界上许多工厂都在不锈钢冶炼新工艺方面做了很多研究工作，找到了一些切实可行的新方法。氩-氧脱碳法就是其中之一。

氩-氧脱碳法是由美国联合碳化物公司休德分厂和乔斯松公司不锈钢分厂合作8年于1968年4月开发成功并投入工业生产的一种冶炼不锈钢的新方法。这个世界第一座工业氩-氧炉的容量为15吨。近年来，世界各国对这种冶炼方法给予了很高评价，氩-氧炉的建设也很盛行。据报道，从1968年起至1973年9月1日止，已投产和建设中，计划中的炉子就有36座，其中1968年1座，1970年4座，1971年10座，1972年5座，1973年8座和1974年5座。炉子最小容量为4吨，最大容量为90吨（见下表）。至1971年底，一些厂用这种工艺可成功生产的钢号有AISI—303，303pb，304，304L，305，308L，309，310，316，316L，316-Ti，317L，321，405，410，416，430，17-4PH，和17-7PH等。据称，美国大约有33%，欧洲有50%的不锈钢是用此法生产的。

国外氩-氧熔炼炉装配情况

国 别	炉容, 吨	投产年份	国 别	炉容, 吨	投产年份
西 德	18	1973	英 国	8	1971
西 德	35	1972	"	7	1972
意大利	10	1974	"	10	1971
"	70	1974	美 国	35	1971
"	20	1970	"	24	1973
"	55	1973	"	4	1970
日 本	15	1974	"	13	1972
"	10	1973	"	45	1973
"	80	1972	"	90	1972
"	55	1971	"	90	1974
"	60	1973	"	45	1970
"南非"	25	1972	"	15	1970
西班牙	14	1972	"	30	1971
"	10	1973	"	18	1971
瑞 典	55	1973	"	60	1971
"	55	1974	"	15	1968
英 国	45	1971	"	15/40	1971
"	16	1972	"	90	1971

注: 1. 数字统计至 1973年9月1日止

2. 资料来源: 美国“金属杂志”1973年10月号

二、基本原理：

冶炼过程中去除钢中过量杂质的普通方法是将其气体吹入钢液中，吹氧脱碳即为之一例。此时，吹入钢液中的氧与碳起反应，形成可以去除的挥发性的气体化合物。可是，在一定压力和温度下，钢液中的碳含量和铬含量之间存在着一定的平衡关系（图1）。这就是说，当不锈钢用氧脱碳时，若以高铬含量下把碳降到很低值，吹炼结束时的温度就会非常高，这将导致耐火材料的过度烧损，也会使钢中夹杂物增多。另外，如欲采用较低的温度把碳降到同样低水平，必然导致铬的大量烧损，甚至无法满足成分要求。

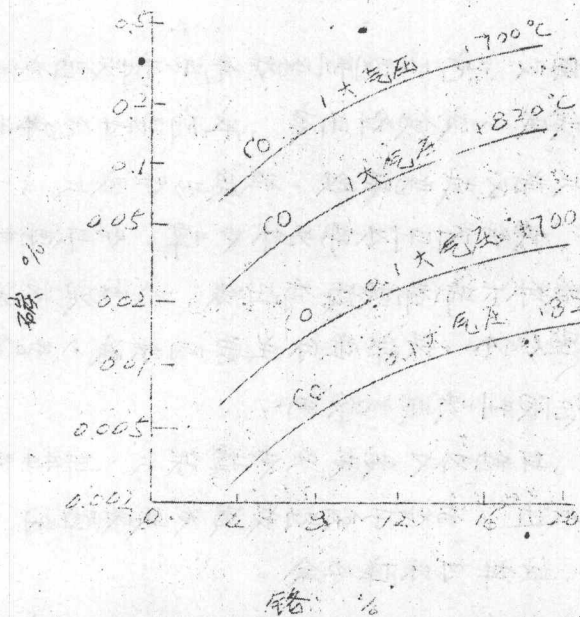


图1 碳—铬平衡关系图

因此，在电弧炉中用一般工艺冶炼超低碳不锈钢是较困难的。

然而，在温度、铬含量和氧浓度都不变的条件下，如果降低由脱碳反应形成的钢液面上的CO分压，那么C和O形成CO的反应就比 $3Cr + 2O \rightarrow Cr_3O_4$ 反应进行得更快，因而使上述平衡朝着降低碳含量的方向移动。AOD法

就是用氩气稀释CO，降低钢液面上CO的分压，促进碳—氧反应的一个实际运用。由于这种操作可在非真空条件下降低CO分压，故可在铬含量基本不变的情况下把最终碳含量降低到较低水平。

例如，如图1所示，在 700°C 和 $P_{\text{CO}} = 1$ 大气压时，含铬1.9%的钢液在不产生铬氧化的条件下，只能脱碳到0.35%左右；如果要把CO分压降低到0.1大气压，那么，就可把含铬1.9%的钢液中的碳含量降低到0.03%，也不致使铬产生氧化。这就是AOD法的基本原理。

三、设备简况

AOD系统的设备主要包括炉体，支撑和摇炉用的耳轴环，倾动机构，喷气风口和气体控制装置。此外，它还应带有若干附属装置，如集尘装置，加合金装置，为倾动炉体进行测温 and 取样的装置、炉体干燥和予热设备，以及炉体更换吊钩等。AOD炉简图见图2。

AOD炉的炉体与转炉相似，它由钢制的炉壳和耐火砖衬构成。炉身下部侧墙与炉体中心线成一一定倾斜角度，这有助于气体沿侧壁上升到炉口、减轻炉口上部区域的侵蚀。在盘形炉底上，一般都按装有三个底座，这样，倾炉时不需另外支撑，炉子即可稳定站立。炉身上端和头部锥体下端都设置凸缘，为此是将这两部分相互连接构成一个完整炉体。头部锥体主要用来注入和倒出钢水，同时，在吹炼时还能限制飞溅的作用。

炉体按装在耳轴环内，耳轴环又按装在支撑架上。耳轴环的中心线位于炉内钢液面的上述，当炉子倾动装置发生故障时，炉体定会转回到直立位置上，这样可保障安全。

炉体倾动速度一般可分两种，出钢和吹炼时用低速，其它操作时使用高速。整个操作期间，炉体保持直立位置，装料、取样、测温、出渣和出钢时，则将炉体倾倒至水平或中间位置。

吹入精炼气体的设备是由气体控制系统和包括风口区内的炉体侧配管设备组成的。风口设在炉体后侧墙下部靠近炉底的地方，风口数目各厂有所不同，有两个、三个或四个的。风口多做成

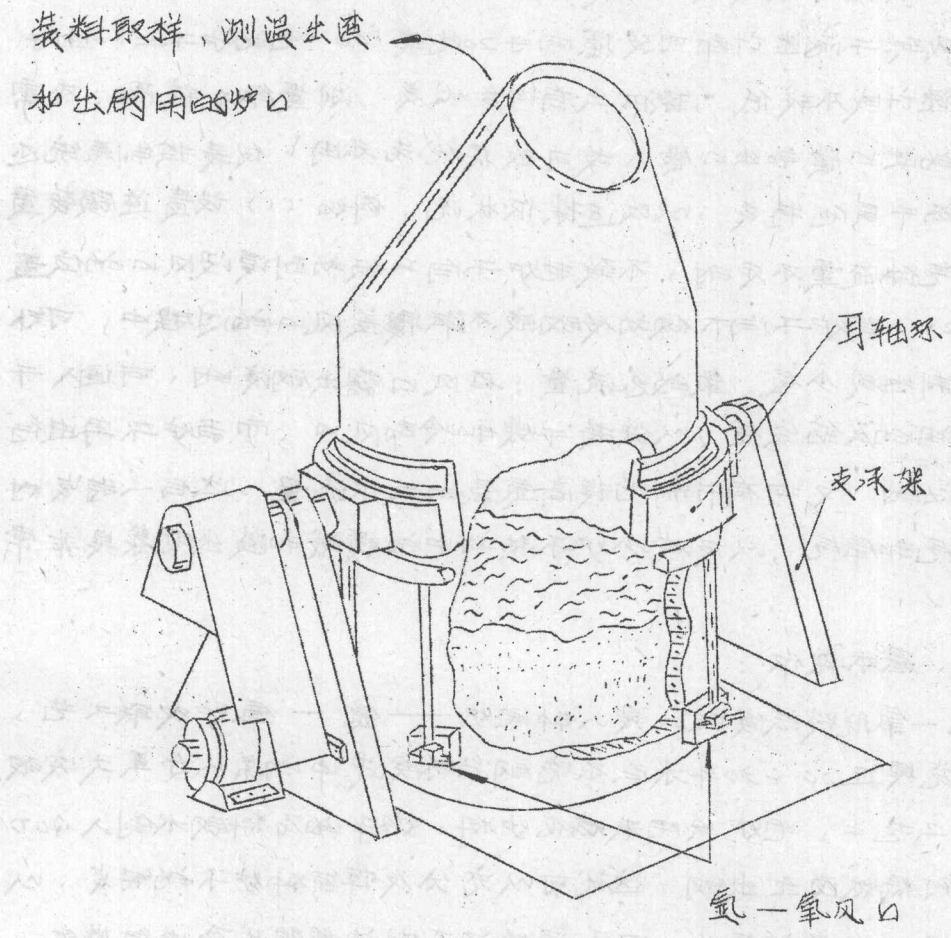


图2 AOD 炉简图

可拆卸式的，以便于更换。气体控制系统用来控制、混合和测量所使用的氮气和氧气。据各钢厂条件、炉子大小和吹炼操作的不同，AOD系统所用仪表的形式和规格有很大差异。据报道，锐孔流量计或转子流速计都可考虑用于20吨或100吨的炉子上。由于转子流速计成本较低，操作上有许多优点，测量能力较高，不需要特殊的进口管和出口管，故可优先考虑采用。仪表控制系统还应具备若干其他特点，以改进操作状况，例如（1）设置连锁装置，保证在气体流量不足时，不致把炉子向上倾动到浸没风口的位上；（2）当炉子向下倾动使钢液不能覆盖风口的过程中，可暂时有节制地减少氮、氧的总流量；在风口露出钢液时，可通入干燥不含油的压缩空气，以保持干燥和冷却风口；而当炉子不再进行反倾动时，又可有所制地提高氮氧的工作流量。这后一特点对节约氮气和氧气，以及减少炉子转动中的飞溅和溢出现象是非常有利的。

四、基本操作：

氮—氧脱碳法实际是一种电炉——氮—氧炉双联工艺，它可以说是在20~30年来已不锈钢冶炼实践中的某一个重大突破。在这种工艺中，电炉只用来熔化炉料，熔毕的炉料钢水倒入AOD炉中进行精炼直至出钢，这就可以充分发挥每种炉子的特点，以非常接近于终不被氧化、可取消铬还原期的理想状态进行操作，提高生产率和产品质量、降低成本。

电炉可以用不锈钢废钢或廉价的高碳铬铁合金做为炉料。炉料的组成应能保证熔毕成分大体上处于所炼不锈钢的成分范围内（碳、硅和硫除外）。由于AOD工艺的铬回收率很高，一般为97~99%，故可将熔毕钢液的铬含量控制在成品规格的上限附近（如意大利ILSSA VIOLA钢厂、吹炼17.5~18.5%铬的304钢时，电炉钢液的铬含量控制在18~18.5%范围内），这样，在

AOD炉精炼时，一般无须补加或只少许加些低碳铬，就可使成品钢的铬含量达到最终规格。

通常，当废钢和合金均已全熔并调节好钢液温度后，电炉即可出钢。出钢程序一般是，先将钢液倒入转送盛钢桶、取样做全分析（据以计称AOD炉的氧—氧吹炼，和调节最终化学成分。）浇出熔渣并称钢液重量，然后倒入AOD炉中，添加碱性渣进行脱碳精炼。据报道，电炉出钢至出钢的时间一般为三小时左右。钢液倒入AOD炉后，测温并通过风口吹入氧氧混合气，将炉子旋转至直立位置后，即可开始吹炼。

开始吹炼时的钢液温度一般约在 $1500 \sim 1550^{\circ}\text{C}$ 。AOD炉是冷炉时，电炉钢液温度要提高一些。若所得钢液温度过低，可加“硅”“燃烧”进行调整以提高温度；若温度过高，可加入废钢或用氨气进行冲洗使钢水冷却。

AOD炉是以反应气体（氧气）和杂质之间的放热反应为主要热源来维持必要的熔池温度的。熔池温度控制适当对发挥AOD工艺的优越非常重要，温度过低，惰性气体的有益作用不能很好地发挥，过高地提高熔池温度，耐火材料寿命就要降低，而且合金组分也易于氧化。

根据电炉钢液的化学成分和钢液重量，可计算出吹入氧的总量、总吹炼时间和各成分所需的调整数量。吹炼中所用气体的数量，压力和速度应符合普通顶吹氧气转炉的要求。惰性气体（例如氮）通入炉内的时间没有严格规定，可以在整个去除杂质的过程中随反应气体一起通入，也可在吹炼初期先单独通入反应气体，而在精炼过程中再补充通入惰性气体，这要看所处理的材料、附加气体的成本和热的利用效果如何而定。在碳含量被去除到接近常压平衡值时，和在低于常压平衡值的整个期间内都通入惰性气体，则脱碳反应进行得更为有利，而且也不导致铬的严重氧

化。在实践中，一些厂都是在去除杂质的整个过程中吹入氧—氧混合气的。

为使熔池温度控制适当，尽量减少铁的氧化，提高脱碳效率，吹炼时，必须随碳含量的降低不断改变氧—氧混合比。比较理想的是连续地改变氧—氧比，不过在实践中一般地将吹炼操作分3~4阶段（ $O_2:Ar = (4:1), 3:1, 2:1, 1:2$ ）进行就足够了。氧气和氩气的消耗量主要取决于起始碳和硅含量以及终碳含量。容量不同的AOD炉的氧气和氩气使用状况列举如下：

炉容, 吨	氧: 氧	氧, 标呎 ³ /时	氧, 标呎 ³ /时
20	1:3	7400	22500
	1:2	10600	20000
	2:1	20600	10000
100	1:3	40000	120000
	1:2	53000	106000
	2:1	106000	53000

在各阶段吹炼结束时，一般要进行取样和测温。

在吹入氧气量达到所要求的碳含量之后，立即用硅还原，回收损失于渣中的部分硅，在还原末期取样做全分析，并根据添加必要的少量合金进行调整。在此期间内吹入氩气，以强化钢液搅拌，使温度和成分更加均匀，每次氩调节好钢液时最终温度应立即出炉。

由于现在耐火材料的寿命较短，平均20炉左右，一周内还必须修炉1~2次，故为实现连续操作，AOD炉应设置三个炉壳，一个在使用，一个在冷却和准备换衬，一个在换衬和干燥。

目前，AOD炉的处理时间是1.5~2.5小时，因此1台电炉

可对应1台AOD炉，因为有可能把处理时间进一步缩短到1小时左右，故将未融以2台电炉对应1台AOD炉。同以用两个电炉生产相比，1对1双联法的产量可提高10%，若采用一对1的双联法进行生产，预计产量可进一步提高50%。

从上面还可以看出，AOD炉操作简便，适应性强，工艺过程较易控制，不管起始碳和铬含量是多少，都可稳定地把碳降低到所要求的规格（包括超低碳），回收96~98%以上的铬；炉内温度一般也不会超过 1700°C ~ 1730°C ，因而许多工厂都是从第八炉开始就生产出了成品（如美国东部不锈钢公司投产前处理的700多炉钢，炉炉化学成分都符合于要求）。

五、钢的质量：

据报道，从生产标准型和超低碳型300系和400系钢的情况来看，氧—氧炉钢的质量比电炉钢好，气体和有害元素含量较低，微观纯净度较好，有优良的机械加工性能，而且产品质量的再现性也很好。

1、氢含量：300和400系不锈钢的氢值都是1~4PPM，比相应的电炉不锈钢的氢值降低了25~85%，达到了真空重熔材料的水平。

2、氮含量：400系钢和300系钢的氮值分别比同一化学成分电炉钢的氮值低50%和30%。

3、氧含量：氧值约比电炉钢低25~30%。

4、铅：铅含量高，热加工性不良，易于报废，到AOD工艺可使铅含量降到0.001%或更低水平。

5、硫：在精炼期，从氧—氧炉浇除渣渣，加入石灰、萤石和一些硅，可十分容易地将硫含量降低到0.01%或更低水平。

6、氧—氧将钢的夹杂物细小，分布也均匀，只有个别炉次的电炉钢才能与之相比，这说明氧含量的降低使产品质量提

得了改善。

7. 工具磨损量大之减少，证明钢的切削性有很大改善。另件的光洁度也较高。此外，轧制的扁坯和板坯表面质量都较好。

六、耐火材料

炉用耐火材料应具有良好抗机械侵蚀性、抗剥落性和耐渣蚀性。砖衬寿命是随最高吹炼温度而变化的，最高吹炼温度可以用吹炼速度、开始温度和起始硅含量来控制。虽然做了一些工作，但目前砖衬寿命仍较低、平均约40炉，主要是风口区侧墙和渣线附近侵蚀严重。因此，一些厂都将继续对耐火材料和吹炼工艺进行研究，期望进一步延长砖衬寿命，这是AOD法今后发展中必须很好解决的问题。

七、精炼气体

从理论上，除空气外，精炼用气体中的惰性气体也可使用氩、氦、氖、氪、氙等。但在实际操作中，最初是使用纯氩和纯氧做精炼气体。近来，已研究出根据两种使用比较便宜的粗氩（98% Ar、2% N₂）或使用一部分氮气代替氩来使用纯氩的新操作技术。

八、结 语

同原来的电炉为比较，这种改联工艺具有如下优点：

1. 几乎可全部用不锈钢或廉价的高碳铬铁合金代替昂贵的低碳铬作为渣的原料，故成本降低了。
2. 因电炉只用来熔化炉料，故其生产率提高100%。
3. 因电炉操作条件（温度低）对耐火材料有利，故其耐火材料耗量大幅度降低了，而且电极的单位消耗也减少了。
4. AOD炉渣的回收率高，在98%以上。
5. AOD工艺操作简单、适应性强，工艺过程较易控制，

再巩固而稳定，将来有可能同电子计算机相结合，使操作实现完全的自动化。

6. AOD炉建设费用低。

7. 脱硫容易。

8. 气体含氧减少，夹杂物细化，分佈也均匀，提高了钢的质量。

予料，今后几年内要进一步改进设备和操作工艺，以解决目前所面临的主要的耐火材料问题之后，这种双联工艺将有可能发展成为冶炼不锈钢的普通操作方法。

附录 几个工厂的操作数据

1. 美国乔斯林公司 1968 年初、1969 年底的数据

(1). 1968 年 12 月投产了世界上第一座二块氢-氧炉，炉容 15 吨、直径 9 呎，高 13 1/2 呎。用一台 5/10 马力的电机，1600:1 减速轮系，驱动速度为 0.28 和 0.56 转/分。为适应应丰满及起至能力的前提下实现连续操作，1969 年将炉壳改为可更换式，炉壳中砖衬尺寸有所减小，炉壳总重由 80000 磅降低到 54000 磅。

(2). 该厂主要是生产普通碳合金的不锈钢。自 1969 年 7 月 28 日起，所生产的 300 系、400 系和沉淀硬化型不锈钢 100% 均用地炉法生产。投产时，采用 1 对 1 式的双联操作，自 1969 年 10 月开始，采用 2 对 1 式（电炉对 AOD 炉）的双联法。

(3). AOD 炉衬厚度：原来约 6 吋，工作高 12 吋（1969 年结构改革时改为 9 吋）。炉衬材料原为 93% 镁砖，后改为 60% 镁-铬砖，在向渐改不利操作条件下，曾持续吹炼了 39 炉，比 93% 镁砖寿命提高一倍。实践证明，直接打接的 50~60% 镁-铬砖的使用寿命和经济效果较好。1969 年炉子寿命仍较低，只有 30~40 炉。炉头炉体是用氧化铝材料打结而成的。炉子设两个风口，

招称已设计了八种新风口,其寿命不低于炉衬寿命;在不更换风口的情况下,曾生产了500多炉钢,可以说风口的浸蚀已不成为问题了。转送盛钢桶寿命从1968年的平均30炉提高到1969年的50炉以上。

(4). 电炉操作:按大约0.5%碳和0.5%硅的熔毕成分配料。铬和锰按规格下限配,并根据熔清成分调节至下限。熔池温度要提高到 1567°C ,若AOD炉是冷的,则要提高到 1650°C 。出钢至出钢时间,1968年平均为3小时(日产8炉钢),1969年缩短到2小时40分以下(日产9炉以上)。

(5). AOD炉操作:钢水入炉后立即开始氮-氧吹炼,温度通常在 $1482-1510^{\circ}\text{C}$ 。吹炼根据氧气输入量分两个阶段进行控制的:在第一阶段中,氧气需用量取如下近似值,即以钢料成分为准,每降碳0.01%,需50呎³氧,每去硅0.01%,需40呎³氧,而 $\text{Fe}+\text{C}+\text{Mn}$ 的氧化而耗用的氧为3000呎³。氧气输入速度用250呎³/分,从而可计算出第一阶段的吹炼时间。此时,氧气输入量为1250呎³/分,即氧:氮=2:1。在第二阶段中,对调氧和氮的输入量,即氧:氮=1:2,并规定吹炼5分钟把碳降到0.06%,20分钟降到0.03%,30分钟降到0.01%以下。

第二阶段结束后,立即加最终加入物,并用输入速率为250呎³/分的纯氮搅拌4~7分钟。计算最终加入物数量基本上以电炉钢液重量为基础,铬根据从电炉钢液中回收97%计算,还原用硅量以予计及脱碳过程中氧化2.3%铬来确定,不加入化学脱氧剂。

钢液的最高温度为 $1650\sim 1760^{\circ}\text{C}$ 。平均处理周期是75分钟,最长38分,在设备出事故的极端情况下,时间最长的一次是3小时21分。

1969年把第一阶段的气-钢比从2:1降低到1½:1,吹炼时间也相应延长了,这就可在某一阶段内获得较低碳含量,同时由于氩气的稀释作用较强,铬的氧化也减少了。第二阶段吹炼时间因而也可缩短以节省氩气。如此改变吹炼工艺后,铬的总氧化量就从1968年的2.3%降低到1969年的平均1.6%左右(超低碳钢平均为2.0%)。AOD炉的处理周期此时为1小时40分。

1968年投产后头89炉钢的综合数据如下:

脱碳开始条件

	平均值	范围
碳 %	0.576	0.25 ~ 1.197
硅 %	0.44	0.09 ~ 1.25
铬 %	17.97	11.79 ~ 26.48
°C	1493	1418 ~ 1566

脱碳结束条件*

	平均值	范围
碳 %	0.039	0.004 ~ 0.11
铬 %	15.66	9.13 ~ 22.2
°C	1681	1588 ~ 1760
时间, 分	42	22 ~ 65

* 25 炉的数据

平均操作数据*

铬回收率, %	96.6
金属收得率, %	97.8
氧气消耗, $\text{m}^3/\text{吨钢}$	656
氮气消耗, $\text{m}^3/\text{吨钢}$	560

* 85炉的数据

(6)、材料消耗: 由于工艺的改进, 除氧气消耗量提高一些外 (原因: (1) 用氮气搅拌控制硫量、(2) 低碳不锈钢生产比例较大, (3) 为改进一般产品的质量采取了一些措施), 其它消耗均有降低。

	1968 年底	1969 年底
电极	14½ 磅/吨钢	10 磅/吨钢
电炉补炉材料	——	比1968年减少50%
铬渣总氧化量	2.3%	平均 1.6% (超低碳钢为 2.0%)
氧气用量	656 $\text{m}^3/\text{吨钢}$	610 $\text{m}^3/\text{吨钢}$
氮气用量	560 $\text{m}^3/\text{吨钢}$	590 $\text{m}^3/\text{吨钢}$
低碳铬铁用量	——	下降到 7.7 磅/吨钢
总硅量	32 磅/吨钢	27 磅/吨钢
AOD炉耐火材料费	6 美元/吨钢	3 美元/吨钢