

冶金译丛

真空冶金

第一輯

冶金译丛編译委员会編



上海市科学技术編译館

13
31

編 者 的 話

随着科学技术的日益发展,各經濟領域对鋼的要求愈来愈高,为了适应这一需要,采用真空冶金这一新的冶炼方法甚为必要。

真空冶金是生产高純度金属和高质量合金的一项新技术,是用来冶炼各种特殊鋼、难熔金属和高温合金等,它是当代冶金工业中的一项重大成就。

本譯丛内容包括真空电弧炉熔炼、真空感应炉熔炼及鋼液的真空处理等,还編入了用于鋼液脱气的蒸汽喷射真空泵的文章。其中以工艺为主,并兼顧一些基本理論。可供从事鋼生产的工程技術人員、有关科研人員以及鋼鐵学院和技校的师生参考。

本專輯由上海市第一鋼鐵厂、上海市鋼鐵研究所和上海交通大学冶金系負責主編。由于我們水平有限,对选题、譯校和編排等方面定有不妥之处,望讀者批評指正。

編 者
1965年9月

目 录

真空自耗电弧熔炼的条件对熔池、鑄錠及电弧的影响	1
鋼在真空电弧炉中的重熔过程	17
鋼的真空自耗电弧重熔	24
真空自耗电弧熔炼	34
高质量鋼的真空电弧及真空感应炉熔炼	48
真空感应炉熔炼不銹鋼时坩堝材料对其成份的影响	54
真空感应炉熔炼金属及合金时的析气	60
金属在真空感应熔炼时用甲烷脱氧	65
各种鉄液在真空感应炉內的脱硫研究	69
鋼液除气的新发展	76
真空处理对合金鑄造性能的影响	84
用于鋼液脱气的蒸汽喷射真空泵	98

真空自耗电弧熔炼的条件对熔池、鑄錠及电弧的影响

八木芳郎等

提 要

为了研究真空自耗电弧熔炼的条件(如:电弧电流、电弧电压、炉内真空度和磁場)对熔池、鑄錠和电弧的影响,曾使用非自耗电小型电弧炉和試驗用的真空自耗电电弧炉进行了各种熔炼試驗,所得結果如下:

- (1) 在非自耗电小型电弧炉中观察了磁場对熔池的影响,証实了熔池是旋轉的;
- (2) 在各种条件下,使用真空自耗电电弧熔炼碳素鋼 SS 41,在同一电弧电流时,熔池深度随着炉内真空度的提高而减小;当輸入功率不变、炉内真空度改变时,熔池深度无多大变化;在 780 毫米汞柱氬气中熔炼时,熔池深度較真空熔炼时为深;在 60 高斯磁場下熔炼时,熔池深度略有增加;
- (3) 在同一电弧电流时,熔炼金属的量随着炉内真空度的提高而减少,真空熔炼鑄錠的表面状况比氬气中熔炼的差,在反极性真空熔炼时,鑄錠的表面状况显著恶化。同一輸入功率下,真空度和磁場改变时表面状况沒有大的变化;
- (4) 采用拉錠式自耗电电弧熔炼,即使在真空熔炼时也能改善表面状况;
- (5) 由于施加磁場使熔池旋轉,真空自耗电电弧熔炼鑄錠的晶粒就被細化;
- (6) 由于施加磁場,能使电弧集中,并能改变电弧方向;
- (7) 使用非自耗电电弧炉在氬气中熔炼时,由于施加磁場,电弧电压就能增加。施加磁場与增加炉内压力有同样的效果;
- (8) 用示波器记录真空自耗电电弧熔炼中的电流和电压,发现非常稳定。

一、緒 言

如把鋼鉄材料和耐热合金等进行真空自耗电电弧熔炼,就能利用此熔炼法所特有的精炼作用和凝固条件,获得杂质含量少的致密的鋼錠,材料性能或加工性能也得到显著的改善^[1-13]。

神戸制鋼公司研究所在开始研究真空自耗电电弧熔炼时,只以碳素鋼 SS 41 研究了熔炼条件对鋼錠的性质以及对内部结构的影响^[14]。

其后,真空自耗电电弧熔炼法在欧美得到了发展,近年来,据说已建有 25 吨或 50 吨的熔炼炉^[15]。在日本的各个特殊鋼厂里也逐渐开始应用^[16]。

鉴于这种状况,神戸制鋼公司也根据历来的經驗,正在对設計上或有关控制方式等問題重新进行种种研究和試驗^[17]。同时,为了促进工业規模的熔炼法或关于熔炼材料的各种性能的研究,在岩屋工厂里設置了鋼鉄材料专用的熔炼炉,在现场的規模下熔炼 1~2 吨的鋼錠。关于使用这种工业型真空自耗电电弧炉进行熔炼时的各种問題,或有关熔池温度和电弧的試驗等結果,还拟逐次加以报道。本文将主要根据試驗用真空自耗电电弧炉所进行的熔炼研

究,即关于熔炼时的电流、电压、真空度和磁場等熔炼条件对熔池、鑄錠和电弧的影响等研究結果加以报道。

二、熔炼条件对熔池的影响

在真空自耗电电弧熔炼中,自耗电电极被电弧热熔化,成为液滴落在水冷銅結晶器内。熔池面被电弧热所加热,但由于周围是水冷結晶器,因此被冷却。結果,在表面热和周围的冷却相平衡之处保持着一一定的熔融体积。在熔炼中熔池的状态如何,对真空自耗电电弧熔炼来說是极其重要的。还有,如果施加与电弧軸平行的磁場,电弧和熔池就受其影响。在本节中,叙述有关真空度和磁場对熔池影响的研究結果。

1. 磁場对熔池的影响

(用非自耗电电极小型电弧炉进行試驗)

在真空自耗电电弧炉中,如果施加与电弧軸平行的磁場,就能观察到熔池产生旋轉。在同一电弧电流下,磁場强度越强旋轉越快;且在同一磁場下,电弧电流越大旋轉越快。为了証实这种現象,使用非

200533

自耗电电极的小型电弧炉进行了试验。

1) 试验设备和方法

使用图1所示的小型电弧炉。炉内是气密的，电极是在水冷铜管的尖端都安上钨而成。结晶器用铜制成，如图所示进行水冷却。为了使相当于炉子下部的电弧区域和熔池的部分形成磁场，安置了线圈。线圈的形状如图2所示，以直径为2.9毫米的纱包铜丝卷绕10层，联接直流电源。用磁通计测定流经线圈的电流和线圈中心的磁通密度的关系，其结果示于图2。电弧炉的接线图如图3所示，电源使用400千伏安的直流发电机，电极接负极，炉体接正极。为了使电弧稳定，在回路中直接接入0.01欧姆的稳定电阻器。磁化线圈的电源则使用10千伏安的焊接用小型直流发电机。

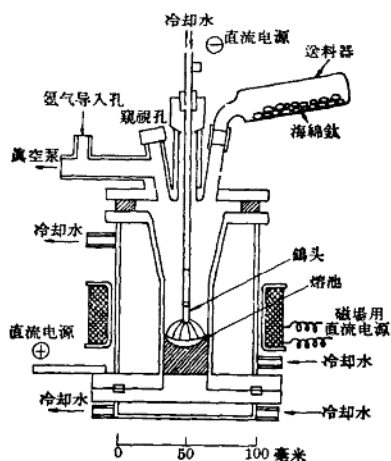


图1 用非自耗电电极小型电弧炉测定磁场影响的设备

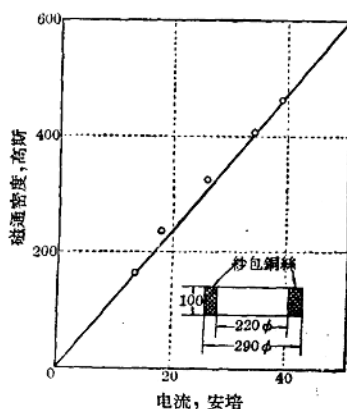


图2 产生磁场用线圈的形状与电流和磁通密度的关系

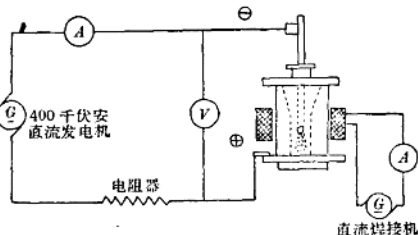
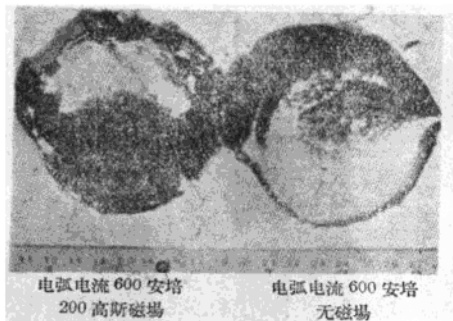


图3 非自耗电电极小型电弧炉和产生磁场用线圈的接线图

在熔炼之前，预先将炉内抽气至 10^{-2} 毫米汞柱，然后通入压力达780毫米汞柱的高纯度氩气。在炉底放入少量的海绵铁，使其与电极尖端接触以产生电弧。在海绵铁熔化完了之后，缓慢地添加送料器内的海绵铁约300克。在熔池和电弧达到稳定状态以后，使电极尖端和熔池面的间隔保持恒定约为40毫米，然后，施加各种强度的磁场，从窥视孔观察熔池的状态。

2) 试验结果和分析

在无磁场时，熔池而比较平静，但一施加磁场，就能观察到熔池开始旋转。在同一电流下磁场愈强旋转愈快；在同一磁场下，电流愈大旋转愈快。在磁场强的时候，由于旋转的结果，使周围隆起，而且电弧集中在结晶器的中心，因此周围成为半凝固状态。照片1是本试验中不施加磁场熔炼时和施加磁场熔炼时的铸锭的上部情况。后者是在施加磁场的状态下切断电源，都是铸锭完全凝固以后的状态。在有磁场的试验中，能观察到在周围由于旋转而产生波形，且周围隆起。



照片1 无磁场时和有磁场时铸锭的上部情况
(用非自耗电电极小型电弧炉进行试验)

为了分析以上的结果，把电极接负极、结晶器接正极进行熔炼时，电流就按图4所示的箭头方向流动。在熔池中，熔池成为导体，电流以其表面周围

和内部向熔池面中心箭头方向流动。这时,如果存在着电弧弧,则具有与磁场成直角的电流成分的导电(Fleming)左手定则而受到与磁场成直角方向的力。熔池即如图 4 中的,受到箭头方向的力,并按此方向旋转。由于旋转力的大小是和磁场强度及与其成直角方向的电流成分之积成比例,因而可以设想,当磁场愈强,且电流愈大时,旋转力就愈大,因此旋转速度也愈快。在熔池表面上,电流都与磁场成直角方向流动,流经熔池表面的电流最多,所以被认为熔池表面受力最大,与因熔池表面温度高而导致粘性低相结合起来,就使表面很快地旋转着。

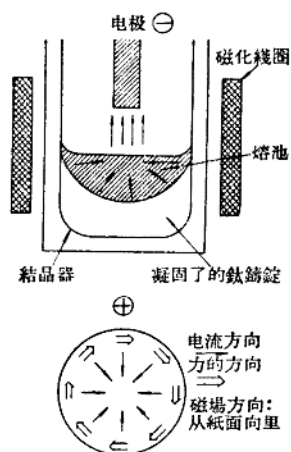


图 4 电弧炉中的电流分布和作用于熔池的旋转力的方向

以上的试验结果是用非自耗电电弧炉在 780 毫米汞柱氩气中熔炼的情况,但无论在自耗电电极的情况下,或者在真空熔炼的情况下,电流方向都一样,可以认为产生与此完全相同的现象。

2. 真空度和磁场对熔池的影响(以试验用真空自耗电电弧炉熔炼碳素钢 SS41 的试验)

1) 试验设备和方法

从上一节的试验可知,由于磁场的作用使熔池产生旋转,所以,为了用真空自耗电电弧炉来观察磁场强度作种种改变时对熔池的影响,同时为了研究炉内真空度对熔池状态的影响,因而将碳素钢 SS 41 在各种条件下进行了真空自耗电电弧熔炼。熔炼时的真空度是,780 毫米汞柱和 50 毫米汞柱的氩气, 10^{-1}

毫米汞柱和 10^{-3} 毫米汞柱的真空中。这种真空度是在炉体出口处测定的值。在无磁场和磁通密度为 20、40、60 高斯的情况下进行试验。在真空自耗电电弧熔炼中,通常将电极接负极、结晶器接正极,但在与此相反的情况下(称为反极性)也可进行试验。熔炼时的电流、电压是以电流为恒定时和以熔炼功率为恒定时(由于炉内真空度提高,电压就降低,因而要增加电流)的两种情况进行试验。此条件列于表 1。

表 1 熔炼条件

恒定条件	极性	真空度, 磁场	电压伏	电流安培	功率千瓦
电 流 性	正 极	780 毫米汞柱氩气 0, 20, 40, 60 高斯	40	1600	64
		50 毫米汞柱氩气 0, 20, 40, 60 高斯	35	1600	56
		10^{-1} 毫米汞柱真空 0, 20, 40, 60 高斯	24	1600	38.5
		10^{-3} 毫米汞柱真空 0, 20, 40, 60 高斯	22	1600	35.2
恒 定	反 极 性	780 毫米汞柱氩气 0, 20 高斯	40	1600	64
		50 毫米汞柱氩气 0, 20 高斯	35	1600	56
		10^{-1} 毫米汞柱真空 0, 20 高斯	20	1700	34
功 率 恒 定	正 极 性	780 毫米汞柱氩气 0, 60 高斯	40	1620	64.8
		50 毫米汞柱氩气 0, 60 高斯	35	1850	64.8
		10^{-3} 毫米汞柱真空 0, 60 高斯	26.5	2450	65

为了知道熔炼中的熔池状况,以一定量的电极进行自耗,不经封顶就在大电流的情况下切断电源,此时投入约 50 克硫化铁,或者约 2 毫米见方的铝片约 200 克和几毫米见方的金属钨约 25 克。在投入硫化铁的情况下,将钢锭纵剖,根据硫印就能容易地知道熔池的状况,但由于凝固时产生气体,恐怕在内部会有大的缩孔和熔池隆起。在投入铝的情况下,就不会这样,而且有熔点高、比重大的金属铝沉淀在熔池底部,可以确定熔池的深度。这种情况下,根据钢锭的宏观组织能知道熔池的状况。

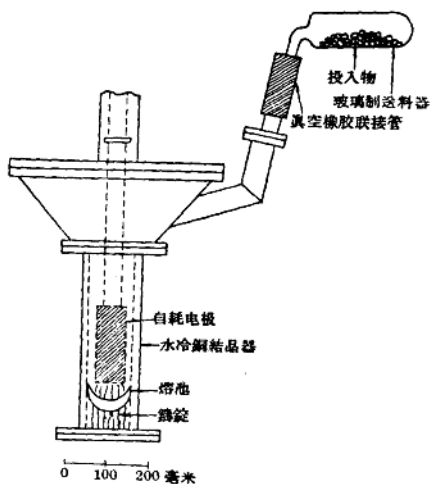
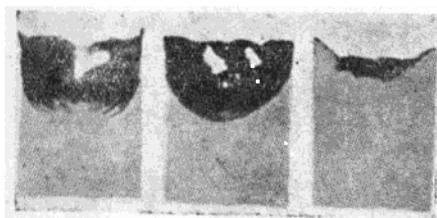


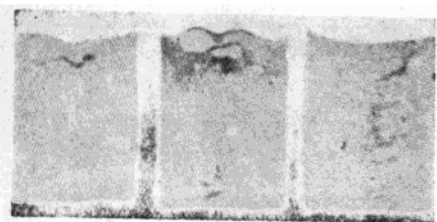
图5 试验用自耗电电弧炉的添加物投入装置

投入装置如图5所示,在与炉体连通的玻璃容器内放入需投物,在熔炼终了时使容器倾斜,投入添加物。

在施加磁场的情况下,由于电流一停止,熔池的



780 毫米汞柱 50 毫米汞柱 10-1 毫米汞柱
无磁场(熔炼终止时投入硫化铁)



780 毫米汞柱 50 毫米汞柱 10-1 毫米汞柱
20 高斯磁场

照片2 在各种炉内真空度和磁场强度下真空自耗电电弧熔炼的碳素钢 SS 41 的硫印
(反极性, 电流恒定)

旋转运动也就停止,所以在熔炼中的凝固部分和熔炼停止时的浇口部分的硫印状态是不同的,因此未添加硫化铁。熔炼终了之后,取出钢锭,从纵方向加以剖开,根据硫印(投入硫化铁时)或宏观组织(投入铝、金属钼时)来研究浇口的状况。

2) 试验结果

在投入硫化铁的场合下,出现硫印的界线,在投入铝和金属钼的场合下,出现宏观组织的界线,在其底部有未熔状态的钼沉淀,所以这些部分被认为是熔炼中的熔池。在780毫米汞柱氩气压中不施加磁场时,投入硫化铁的钢锭(照片3)的边界稍不明显,但在同一条件下熔炼而投入铝和金属钼时根据宏观组织来测定的浇口深度(照片4)大体相同。由此可知,在本试验中无论用那种方法,都能获得大致相同的結果。

照片3表示在正极性的各种条件下,使电流恒定为1600安培而用真空自耗电电弧熔炼的碳素钢 SS 41 的硫印。照片2是在反极性时的情况。

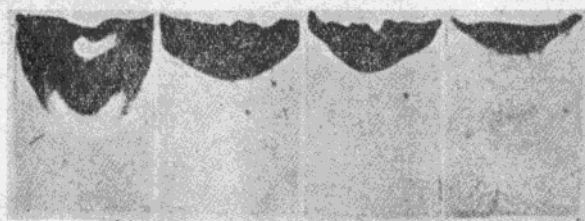
照片4表示在同一输入功率的各种条件下熔炼碳素钢 SS 41 时的宏观组织。此时投入了铝片和金属钼。从本试验的结果可以了解下列几点:

(1) 在熔炼电流恒定时,可以观察到随着炉内真空度的提高,熔池的深度变浅。无论电极的正负和磁场的强度如何,都有同样的趋势。如果炉内真空度提高,电压就降低,所以在电流恒定时,能获得降低熔炼功率的必然结果。

(2) 在反极性的场合,当炉内压力高时(780毫米汞柱,50毫米汞柱),熔池深度与在正极性时的情形无多大差别;但如果进行真空熔炼,就能观察到尽管输入与正极性时大体相同的功率,但熔池显著变浅。

(3) 如照片2、3中的硫印所示,在熔炼时施加磁场,发现硫化物有集中在钢锭中心部分的趋势。在炉内真空度为50毫米汞柱时较显著,但真空度再高时就不太明显。真空度提高后,发现有条纹状的硫化物偏析。这些事实已在以往的报道中^[1]叙述过,但原因还不清楚。

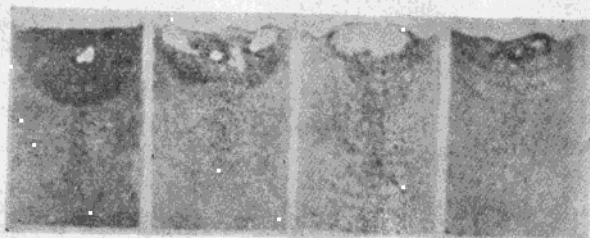
(4) 以恒定功率进行熔炼时,由真空度引起的熔池量的差别就减少。在780毫米汞柱的氩气中熔炼和10⁻³毫米汞柱的真空熔炼相比,氩气中熔炼时熔池较深。50毫米汞柱的氩气中熔炼与10⁻³毫米汞柱的真空熔炼的情形没有很明显的差别。在施加磁场的时候,熔池的形状较细长,因此有变深的趋势。



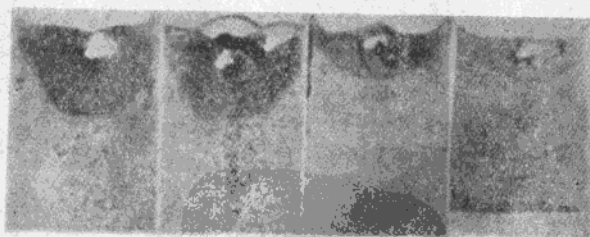
780 毫米汞柱 50 毫米汞柱 10^{-1} 毫米汞柱 10^{-3} 毫米汞柱
无磁場 (熔炼終止时投入硫化鉄)



780 毫米汞柱 50 毫米汞柱 10^{-1} 毫米汞柱 10^{-3} 毫米汞柱
20 高斯磁場

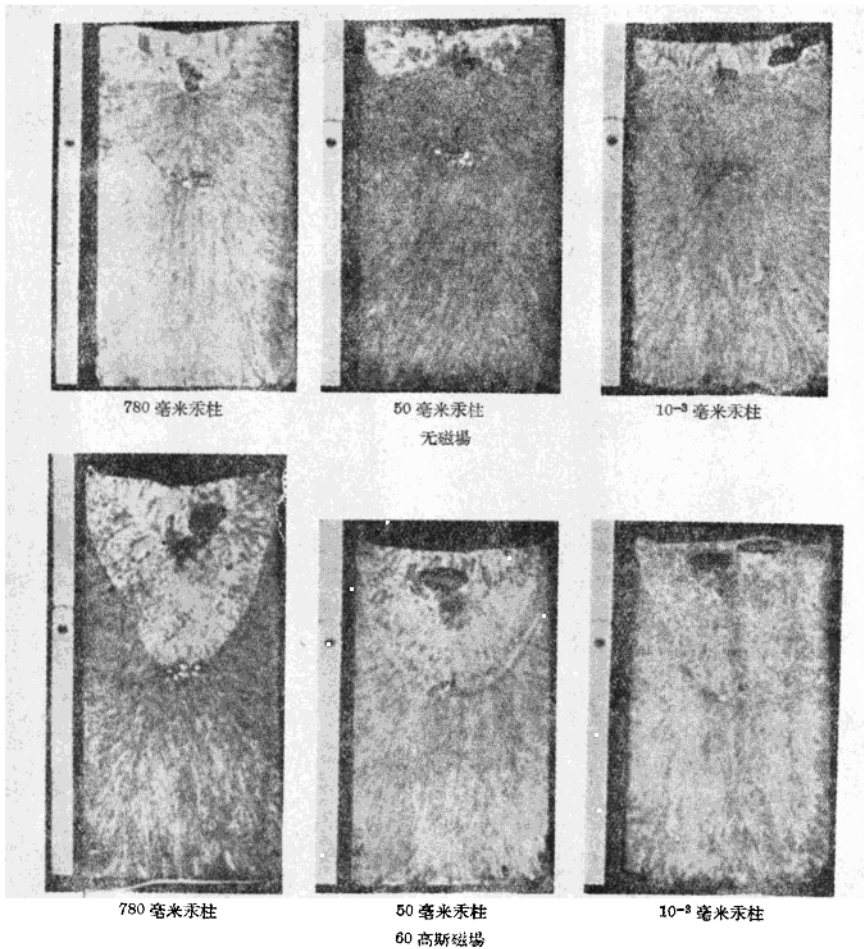


780 毫米汞柱 50 毫米汞柱 10^{-1} 毫米汞柱 10^{-3} 毫米汞柱
40 高斯磁場



780 毫米汞柱 50 毫米汞柱 10^{-1} 毫米汞柱 10^{-3} 毫米汞柱
60 高斯磁場

照片3 在各种炉内真空度和磁場强度下真空自耗电弧熔炼的碳素鋼 SS 41 的硫印
(正极性, 电流恒定)



照片 4 在各种炉内真空度和磁场强度下真空自耗电弧熔炼的碳素钢 SS41 的宏观组织, 熔炼终止时投入铝和金属钎 (正极性, 功率恒定)

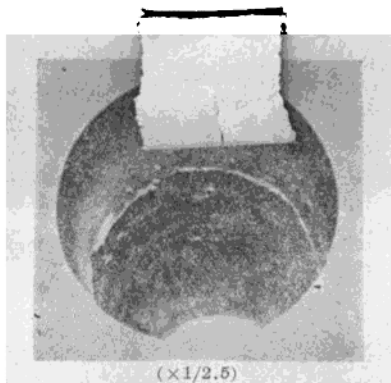
三、熔炼条件对鑄錠的影响

1. 炉内真空度、磁场和极性对鑄錠表面状况的影响

一般地说, 在真空自耗电弧熔炼时, 熔融的金属从熔池面或电极上飞溅飞起, 或者蒸发了的金属附着在结晶器上。在熔池以上几十毫米处很显著。附着的程度随熔炼条件而变化, 如果熔炼电流大, 熔池的温度就高, 飞溅或蒸发的金属量也多。又在氩气

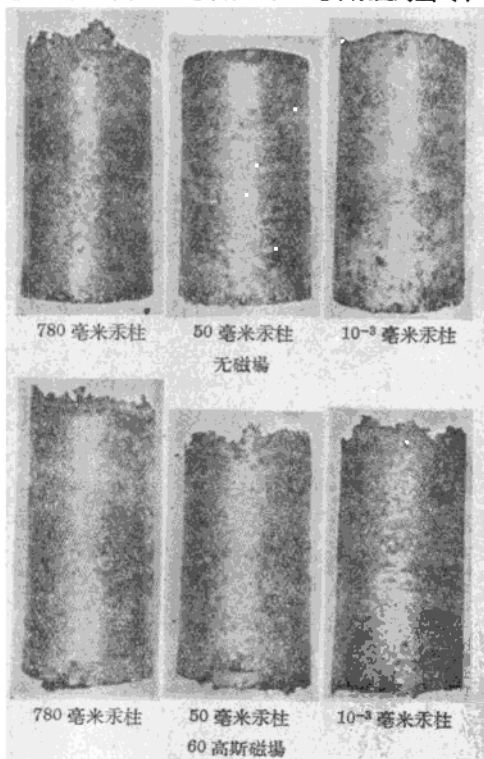
中熔炼时, 熔池面的变动很激烈, 飞溅也多; 在真空熔炼时, 熔池面比较平静, 但金属的蒸发很厉害, 故飞溅就多。将碳素钢 SS41 在 10^{-3} 毫米汞柱真空中进行自耗电弧熔炼时, 结晶器上附着物的状况示于照片 5。

另一方面, 随着熔炼的进行, 熔池面上升, 就会把附着在结晶器上的飞溅和飞溅物熔在里面。为此, 最好是熔池的温度高, 熔融金属量多。因而, 从这种意义上来说, 最好是熔炼电流大。但如果也考虑到飞溅和飞溅现象, 那么为了使鑄錠的表面状况良好, 要有最适当的熔炼电流。



照片5 结晶器内壁附着物的状况
(取出钢锭,从结晶器上部来看)

炉内真空度提高,电压就减小;故若熔炼电流恒定,则熔炼功率相应减小。因此,如要观察炉内真空度或磁场对铸锭的表面状况的影响,认为在同一功率下熔炼时进行比较最为适当,所以在前述表1的炉内真空度为780毫米汞柱、50毫米汞柱的氩气中

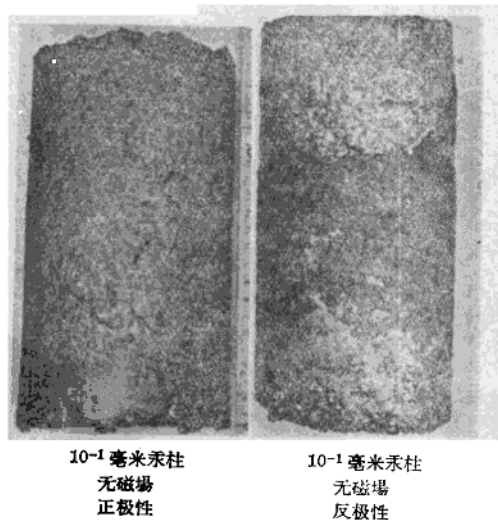


照片6 在各种条件下真空自耗电弧熔炼的碳素钢 SS41 钢锭的表面状况
(以功率恒定进行熔炼)
($\times 1/4 \times 8/10$)

和 10^{-3} 毫米汞柱真空中进行熔炼,分别把不施加磁场时和施加 60 高斯磁场时的铸锭表面状况进行比较。又如后所述,在真空熔炼时由于电压梯度小,电极和熔池面间距离的变动很难体现在熔炼中的电压上,因此,电极和熔池面间的距离恐怕会过分分离开,或过分接近而产生短路。这时,即使在同一电流下表面状况也会显著恶化。所以在本试验中,操作上就必须注意不产生这种障碍,用最适当的条件进行熔炼,因此所得的结果大致可以认为是标准状态。

于上述条件下熔炼的钢锭的表面状况示于照片6。大致都呈现良好的表面状况,尤其是在表面上没有大的缺陷。在780毫米汞柱的氩气中熔炼时,钢锭的表面呈现金属光泽,而在 10^{-3} 毫米汞柱的真空中熔炼时,发现表面的金属光泽呈现浅白色的状态,融化较差。可以认为,这是由于先前附着在熔池面上方的喷镀金属的影响。在50毫米汞柱的氩气中熔炼时,呈现780毫米汞柱氩气中熔炼和 10^{-3} 毫米汞柱真空中熔炼时的中间状态。

其次,以反极性熔炼碳素钢 SS41 时,表面状况比正极性时差,特别在真空熔炼时显著恶化。照片7是在 10^{-1} 毫米汞柱的真空中熔炼的钢锭的表面状况,在反极性时似乎在钢锭的表面蒙上一层壳而显著恶化。从这种状态看出,反极性时飞溅的附着量很大,融化又差,可以认为此两者结合起来是使表面状况恶化的原因。



照片7 在真空中以正极性和反极性自耗电弧熔炼的碳素钢 SS41 钢锭的表面状况

这些现象随熔炼材料的阴极和阳极的特性而变化,上述结果是观察碳素钢而得到的。另外也有由于熔炼中有无施加磁场和磁场强弱不同,而表面状况会发生变化的^[10],但在本试验中还不能下定论。

2. 用拉錠式真空自耗电弧熔炼改善表面状况

假如飞溅和喷镀金属对表面状况的影响很大,那么,一般认为若不使熔池面上升而保持在一定的位置进行熔炼,就能获得良好的表面状况。因此,可以采用拉錠式自耗电弧熔炼来观察表面状况。设备的说明示于图6。在铸锭进行凝固的炉底下面安装拉錠用的支持杆,由此能使炉底向下移动。这个支持杆从冷却室底部通过真空密封而露出在大气中。开始时,炉底位于结晶器的较上方,金属液在其上面凝固,当达到90毫米高度时,将炉底逐渐下降,经常使熔池面保持在一定的位置进行熔炼。只要使炉底下降的速度与铸锭的成长速度保持一致即可。炉底下降速度可以从电极的下降速度、熔池面的结晶器直径和电极直径算出。预先计算好此值,将熔炼中的电压保持恒定,一面进行拉锭,一面进行熔炼。

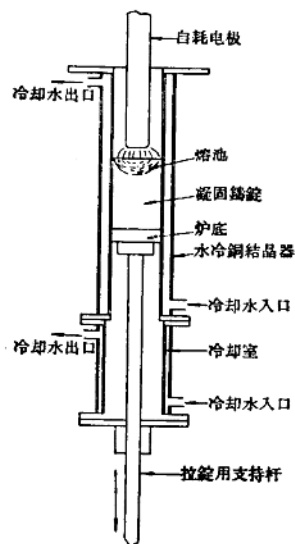
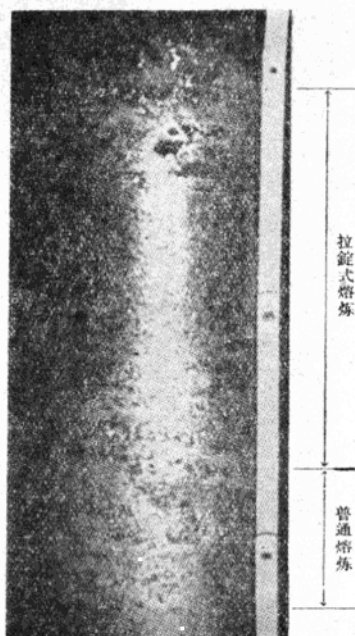


图6 拉錠式真空自耗电弧熔炼设备

用拉錠式电弧熔炼法在 10^{-3} 毫米汞柱真空中熔炼的铸锭的外观示于照片8,与同一功率下真空熔炼铸锭的表面状况相比,拉錠熔炼的部分呈现金属光泽,表面状况得到改善。由于这种方式的熔炼法可改善表面状况,因此能有效地提高产品的收得率。



照片8 拉錠式真空自耗电弧熔炼的碳素钢SS41 铸锭的表面状况

3. 磁场对铸锭的宏观组织的影响

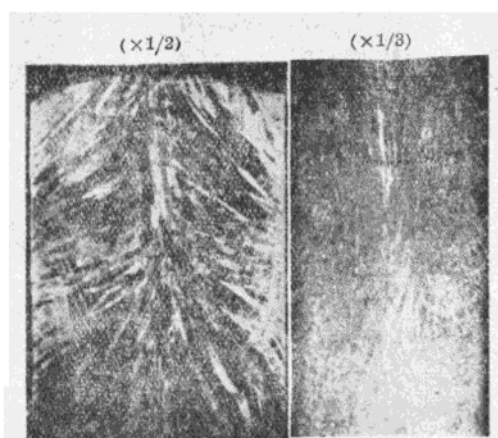
真空自耗电弧熔炼中,如果在纵向施加磁场,熔池就旋转。可以设想,熔池一面旋转一面凝固,将对铸锭的初次结晶产生某些作用。由于上节试验中所用的碳素钢SS41很难明显地显示出宏观组织,因此改用能明显地观察到初次结晶的纯镍作为试验材料,研究磁场对铸锭的影响。

以试验用真空自耗电弧炉于 10^{-1} 毫米汞柱的真空中在不施加磁场时和施加50高斯磁场时两种条件下熔炼纯镍;熔炼条件都是电流1600安培,电压24伏,功率38.5千伏安。把熔炼的铸锭在纵向剖开,观察其宏观组织。

照片9表示宏观组织,在不施加磁场时,初次结晶自周围倾斜地向上方伸长,但若施加磁场,晶粒就明显地细化,没有发现伸长的初次结晶。

如果施加磁场,熔池就在搅拌状态下凝固,因而凝固时产生的晶核多,而且能妨碍初次结晶的成长。在其他的Inconel^[10]、Timken 16-25-6^[11]合金中,也能观察到由于施加磁场而使晶粒细化。

有些材料,例如Fe-Cr-Al系合金等,晶粒的粗大化会显著地妨碍加工性能。在真空自耗电弧熔炼



照片9 无磁场时和 50 高斯磁场下,真空中(10⁻¹毫米汞柱)自耗电弧熔炼的纯钛的宏观组织
(腐蚀液:王水)

法中,由于其凝固条件而使初次结晶细长发展是很普遍的,为了防止其发展并使晶粒变小,曾采用了在熔池中施加超声振动等方法^[19,20],但施加磁场也可说是使晶粒细化的有效方法。

四、熔炼条件对电弧的影响

不用说,在真空自耗电弧熔炼中,电弧起了主要的作用。然而,尽管电弧现象很早就被知道,但对其本质来说未知的方面还很多,特别是对于像在本熔炼中使用的大电流电弧的研究几乎还未进行。还有,在真空自耗电弧熔炼中阴极时时刻在消耗着,阳极的高度逐渐上升。这样,两极点经常变化,同时在熔炼中直接观察电弧颇困难,因此,在研究上还有许多问题。

所谓电弧区域,在现象上由阴极电压降区、弧柱电压降区和阳极电压降区三部分组成,电子、电离的金属蒸汽和电离的保护气体等带电粒子一方面产生复杂的运动,一方面维持着恒定的电弧。因此,如果存在磁场,电弧当然就受其作用,而且,保护气体的压力与电弧现象也有着重要的关系。

然而,如上所述,由于在真空自耗电弧熔炼中直接观察电弧较困难,因而作者们首先用非自耗的钨电极小型电弧炉研究磁场对于在 780 毫米汞柱氩气中的电弧的影响的基本性质,然后在试验用真空自耗电弧炉中,于各种熔炼条件下熔炼碳素钢 SS 41 时,用电磁示波器记录熔炼中的电流、电压的状况,

研究电弧的稳定性。

1. 磁场对电弧的影响(用非自耗电极小型电弧炉进行试验)

1) 设备和试验方法

使用前述图 1~3 所示的试验设备。用第 2 段中的试验设备和方法一节所述的同样的方法,使熔池和电弧成为恒定状态,在熔池面和电极尖端之间恒定地保持 40 毫米。于这种状态下,使磁通密度在 0~600 高斯范围内作种种变化时,测定电弧的状态和电弧的电流、电压。这些测定位置示于图 3。在测定电压时为了避免由导体的电阻引起的电压降的影响,因此从尽可能接近电弧的位置抽出测定电压用的接线端子。也就是把水冷铜电极的尖端和结晶器的接线端分别与电压表的接线端子联接。

2) 试验结果

(1) 磁场对电弧的形状和方向的影响

无磁场时,电弧的阳极点在熔池面上移动,但如果施加磁场,就能观察到移动消失,阳极点在熔池面的中心保持恒定,弧柱部分变细。若磁化线圈倾斜,则如图 7 所示,电弧也倾斜。关于这些现象可以作如下的解释。

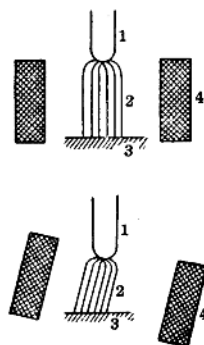


图 7 磁化线圈垂直时(上)和倾斜时(下)电弧的形状

1—钨电极; 2—电弧; 3—熔池; 4—磁化线圈

为了解释磁场内带电粒子的运动而在图 8 中垂直于纸面施加磁通密度为 B 高斯的磁场时,如果自 O 点在 X 轴方向以 V 速度入射粒子,那么粒子就由磁场的的作用而改变方向,在半径为 $\frac{mV}{eB}$ 的圆形轨道上运动。此轨道由下式^[21]求得:

$$x^2 + \left(y - \frac{mV}{eB}\right)^2 = \left(\frac{mV}{eB}\right)^2$$

m ——带电粒子的质量,克

V ——入射速度,厘米/秒

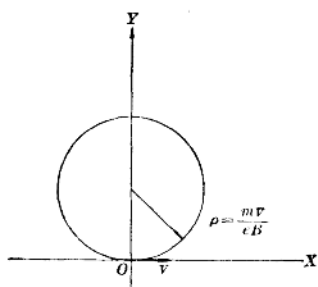
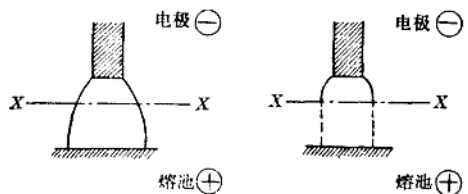


图8 磁场内带电粒子的运动

e ——电荷, 厘米克秒制电磁单位

B ——磁通密度, 高斯

在电弧炉内, 一般情况下电极、熔池和电弧处于图9(a)所示的状态, 但现在在X-X面以下的电弧轴方向施加了磁通密度为 B 高斯的磁场。在X-X面以下入射的粒子(大部分是电子), 大部分与电弧轴线具有某些倾斜。如果其速度为 V , 那么轴向的分量 V_p 不受磁场作用, 与轴成直角方向, 即水平方向的分量 V_H 受到磁场的作用, 如前所述: 描绘出半径为 $\frac{mV_H}{eB}$ 的圆弧。



(a) 无磁场时电弧的形状

(b) 在X-X面以下有轴向的磁场时电弧的形状

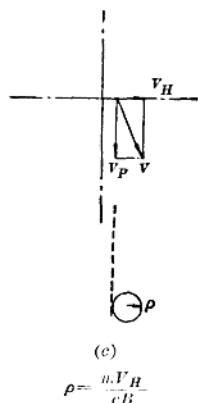


图9 磁场对电弧形状的影响(1)

因此, 结果是电子在X-X面以下作螺旋运动, 移向下方, 在电弧区域作用着复杂的力。如果基于上述想法来计算电子的回转半径, 以 $m=9 \times 10^{-28}$ 克^[21], $e=1.59 \times 10^{-20}$ 电磁单位^[21], $B=300$ 高斯, 在30伏电场中电子获得的速度为 $V \approx 3.25 \times 10^{-8}$ 厘米/秒^[20]来进行估计, 则 $\rho=0.06$ 厘米。

实际的 V_H 比上述的还要小, 故 ρ 可能为更小的值。因此, 在X-X面以下, 电弧的形状就不向横向扩展, 如图9(b)所示, 可认为垂直地指向熔池面。当为电离的离子时, 离子从熔池面向电极方向前进, 而且旋转方向与电子时相反, 因而结果与电子同方向旋转。倘若磁场从再上方开始, 电弧区域可能更加集中在中心部分。以上被认为是磁场存在下电弧集中在中心部分的原因。下面考虑磁场与电弧轴线倾斜时的情况。图10中, 当磁场存在于X-X面下方并垂直于X-X面时, 则平行于X-X面的速度分量受到磁场的作用而产生旋转运动; 垂直于X-X面, 即与磁场同一方向的速度分量不受作用, 按原方向前进, 其结果如图10所示, 电弧被弯曲。这就是磁化线圈倾斜时电弧倾斜的原因。

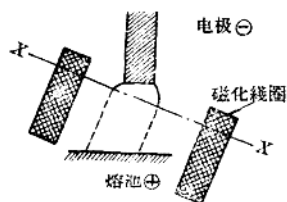


图10 磁场对电弧形状的影响(2)

综上所述, 在780毫米汞柱氩气压的非自耗电极电弧熔炼中, 由于磁场的作用, 电弧集中在中心部分, 并且利用改变磁场的方向, 就能够改变电弧的方向。

(2) 磁场对电弧电流和电弧电压的影响

图11是用前面所述的方法, 测定熔炼中的电流和电压的关系的结果。一般来说, 电弧呈现下垂的特性, 如果电弧电流增加, 电弧电压就减少; 然而, 若电弧电流增加, 从某一点起电流和电压的特性就成为正特性; 前者叫低强度电弧, 后者叫高强度电弧^[15]。其状况如图12所示。在本试验中, 电流和电压呈现正特性的部分被认为是高强度电弧区域。

图13表示磁通密度与电弧电压的关系。如果磁场很强, 那么呈现电弧电压增加的特性。

如前所述, 如果施加磁场, 带电粒子就产生螺旋运动。因此, 粒子的平均自由行程必须沿着圆弧来

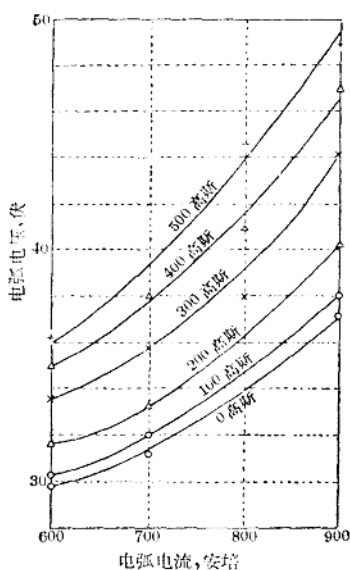


图 11 各种磁場下电弧电流和电弧电压的关系

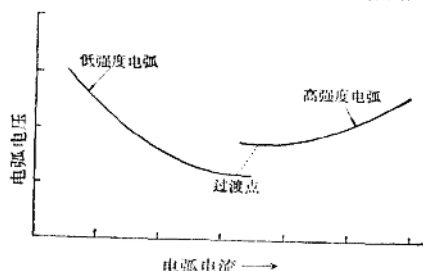


图 12 电弧特性的一般趋势

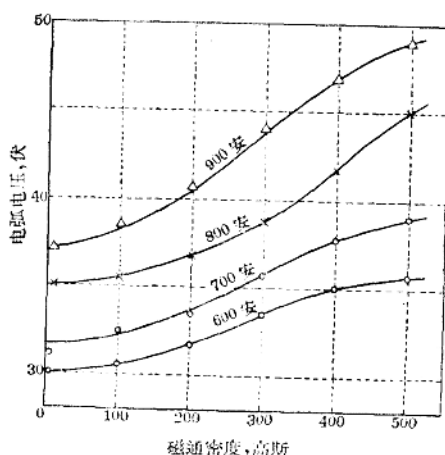


图 13 780 毫米汞柱氩气中非自耗电弧熔炼时磁通密度对电弧电压的影响
(图中的数字为电弧电流)

测定，在继续到产生第二次碰撞之间的距离要比无磁场时短，故带电粒子前进一定距离所产生的碰撞次数因施加磁场而增加。这种现象与增加气体密度是等效的^[23]。

随着保护气体压力的增加，电弧电压增大，这是由许多人所阐述的^[23]。在本试验中发现，倘若磁场增大，电弧电压就增加，从以上的分析认为，这个结果是妥当的。以上是在 780 毫米汞柱氩气中熔炼的情况。在真空中熔炼时，因为电极被烧红，故用非自耗电电极在真空中熔炼是不可能的，亦不能进行试验。

2. 真空自耗电弧熔炼中电弧的稳定性 (用真空自耗电弧炉进行试验)

1) 试验方法

如前所述，因为直接观察真空自耗电弧熔炼中电弧的稳定性是困难的，因此当把碳素钢 SS 41 在各种条件下进行真空自耗电弧熔炼时，先用电磁示波器记录电流、电压的状况，再进行研究。

如图 14 所示，测定电流用的接线端子与电流表用的分流器相联接，测定电压用的接线端子分别与结晶器和水冷铜电极的尖端相联接。

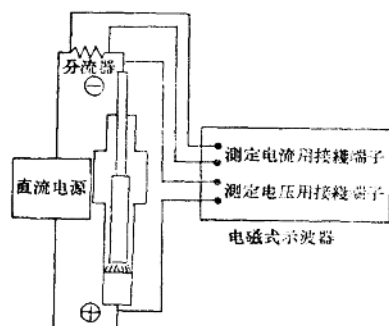


图 14 用电磁示波器测定真空自耗电弧熔炼中的电流、电压的回路

2) 试验结果和分析

在各种条件下，即在炉内压力为 780 毫米汞柱、50 毫米汞柱的氩气中和 10^{-3} 毫米汞柱的真空中，在不施加磁场时和施加 60 高斯磁场时，用真空自耗电弧炉熔炼了碳素钢 SS 41，其电流、电压的状况示于图 15、16*。从图中可看出如下几点：

(1) 在 780 毫米汞柱氩气中熔炼时，电流、电压都发生剧烈的变化。

* 原文误为图 15~18。——译者注

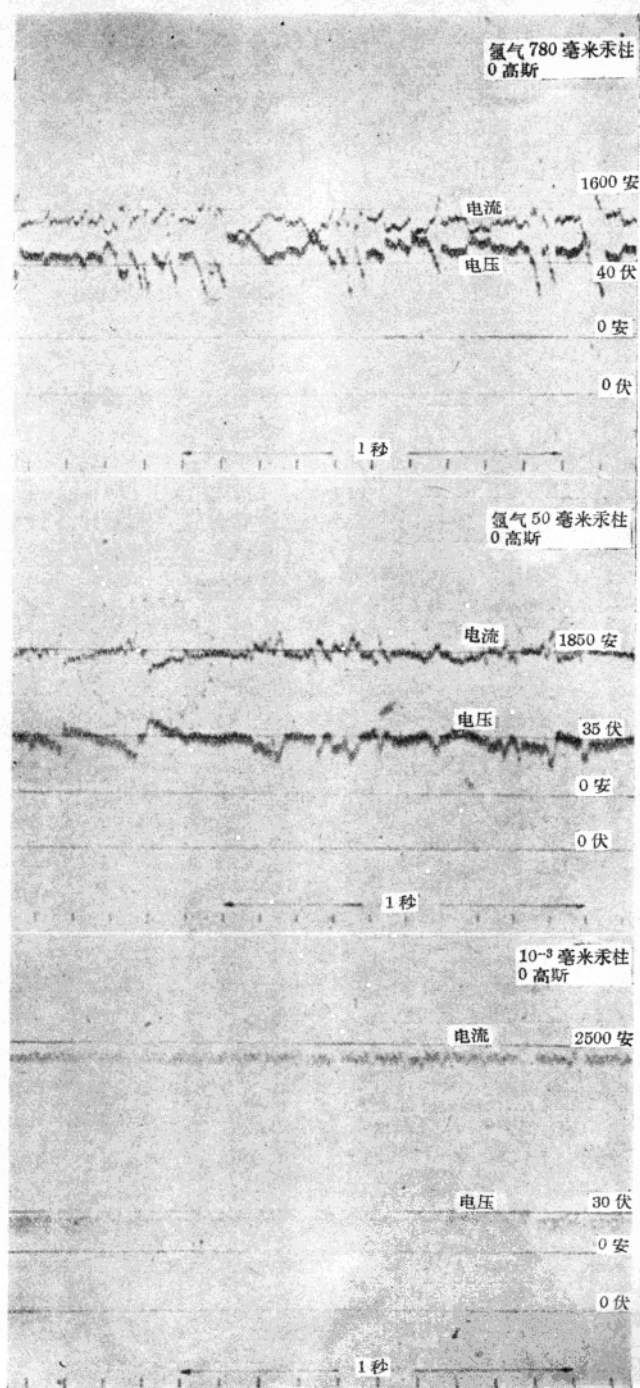


图 15 用各种炉内压力真空自耗电弧熔炼碳素钢 SS41 时，
熔炼中的电流、电压的状况 (无磁场)

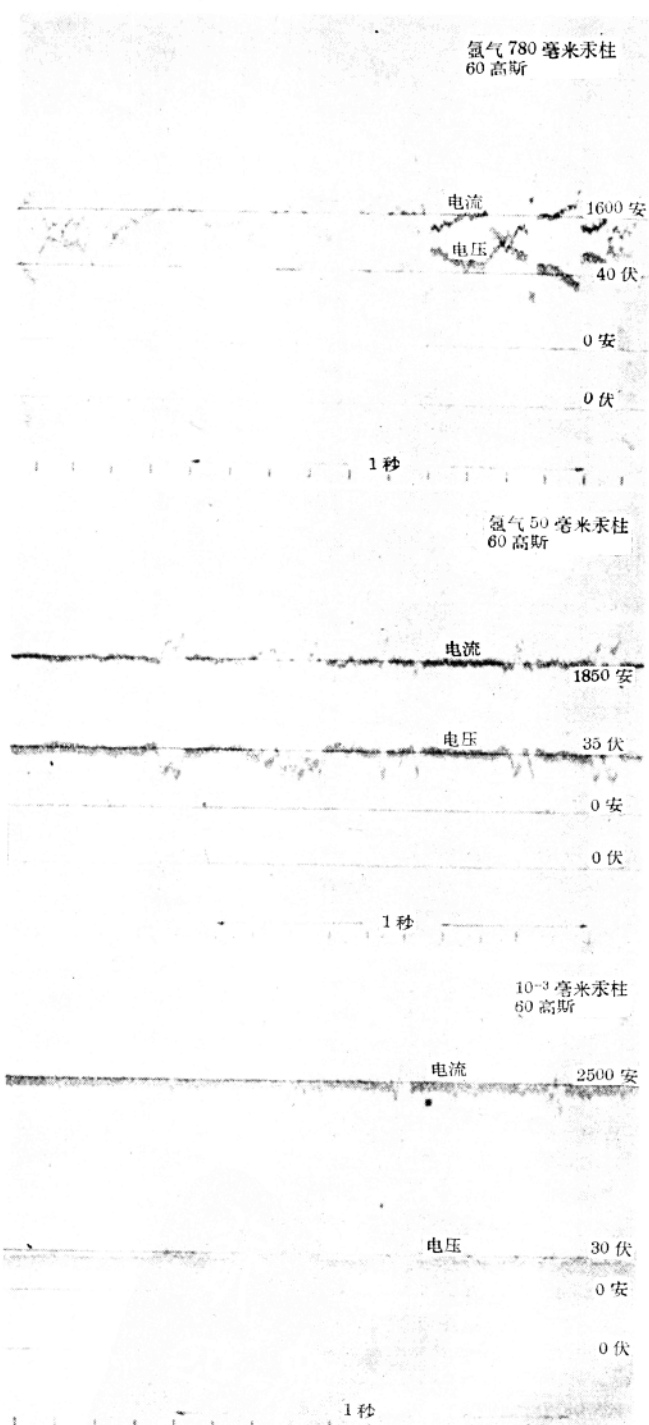


图 16 用各种炉内压力真空自耗电弧熔炼碳素钢 SS41 时, 熔炼中的电流、电压的状况 (60 高斯磁场)

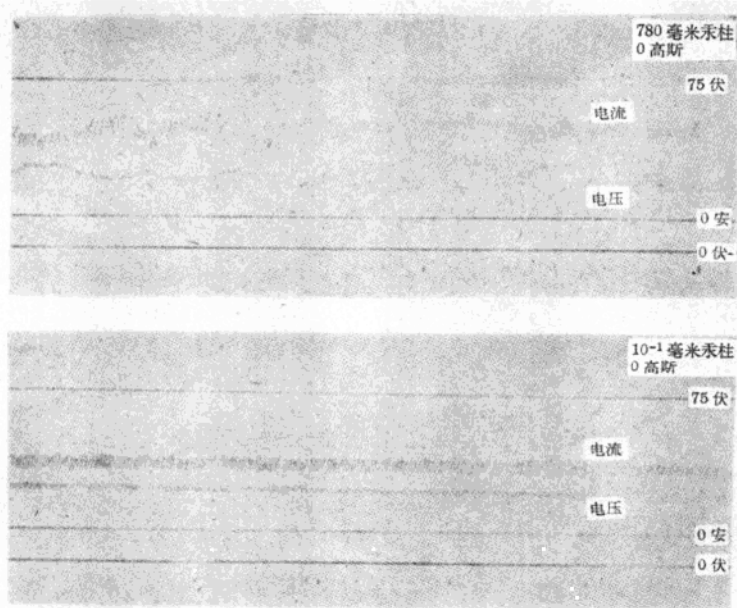


图 17 780 毫米汞柱氩气和真空中自耗电弧熔炼钛时的电流、电压的状况
(用工业用真空自耗电弧炉, 电流约为 10,000 安培)

随着炉内压力的降低, 变化逐渐减小, 在 10^{-3} 毫米汞柱的真空中熔炼时, 电流、电压均显著稳定。无论极性的正反、磁场的有无和强弱如何, 这种趋势相同, 这是非常显著的特点。并且, 这种现象在所有的材料中是共同的。图 17 是用工业用真空自耗电弧炉熔炼钛时的电流和电压的状况。由图可知, 在 780 毫米汞柱氩气中熔炼时, 其变动很激烈, 然而在 10^{-1} 毫米汞柱真空中熔炼时就稳定。

(2) 熔炼中的电压随着炉内压力的降低而下降。

(3) 在非自耗电电极式电弧熔炼时, 磁场有着使电弧的阳极点稳定的趋势, 而在真空自耗电电弧熔炼时, 磁场的影响不明显, 电流、电压的状况均不因磁场的有无而变化。

已经讲过, 一般说来, 电弧在其两极分别形成阳极点和阴极点, 由此燃起电弧。在氩气中熔炼时正极性的情况下, 在电极上形成阴极点的那部分被加热熔融, 逐渐滴落下来。因此, 电弧的长度逐渐缩短, 电压减少, 电流增大。在熔融部分落下之前, 阳极和阴极几乎处在接触的状态。由此使电流急剧增加, 电压接近于零。这样, 熔融部分终于落下, 但在那一瞬间电弧被切断, 电压急剧上升, 电流成为零。然后, 马上在其他部分形成阴极点和阳极点, 重复同

样的过程。图 15、16 的氩气中自耗电电弧熔炼的电流、电压之状况就是在反复短路状态形成的。另外, 在氩气中熔炼时, 氩气被加热, 产生对流, 这也被认为是电流、电压变动的一大原因。

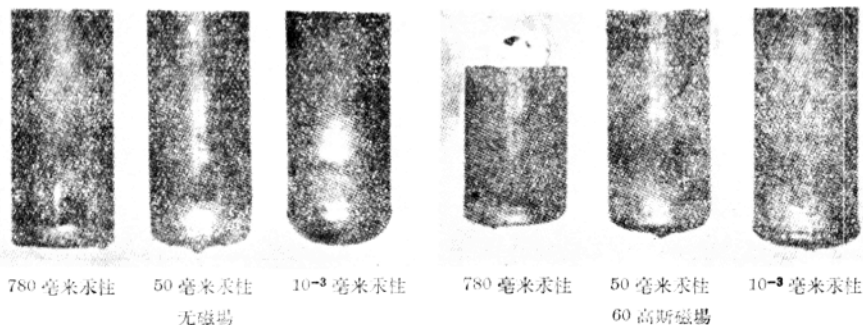
另一方面, 一般认为^[24]在真空中电弧的阴极和阳极的状态是不同的。在氩气中, 电极上明显地形成阴极点, 由此点产生电弧, 而在真空中, 不是仅仅产生一点阴极点, 而是从电极下面和侧面的下端到 20~30 毫米的上方一样地被加热, 一样地产生电弧。

在熔炼时能明显地观察到, 电极尖端部分的较上方也被加热。被加热部分的金属熔融并集中在电极尖端, 最后成为液滴落下^[24]。由于这样, 电弧长度就不再象在氩气中熔炼时那样地变化, 电弧也不切断, 故电弧电流和电压的变动就减少。在真空中熔炼时, 当电极尖端和熔池面接近的时候, 从电极尖端落下的熔融金属也与熔池面接触, 所以在那一瞬间也成为短路状态。图 18 表示由那种现象所引起的状态。

从熔炼中止后电极尖端的形状, 也能推知阴极的电弧状态由于真空度不同所引起的差异。照片 10 表示在各种条件下(功率恒定, 在 780 毫米汞柱、50 毫米汞柱氩气和 10^{-3} 毫米汞柱真空中熔炼,



图 18 在真空中自耗电弧熔炼碳素钢 SS41 时的短路状况



照片 10 各种条件下真空自耗电弧熔炼的碳素钢 SS41 的电极尖端的状态

0 高斯和 60 高斯磁场中熔炼)熔炼碳素钢 SS41, 于大电流熔炼状态中止时的电极尖端的状态。在 780 毫米汞柱氩气中熔炼时, 尖端呈平面状, 在 10^{-3} 毫米汞柱真空中熔炼时成为圆弧形。如前所述, 这种现象是由于: 前者明显地形成阴极点, 只有此点被加热, 而且阴极点只能在最接近熔池面的电极下面产生, 结果只有电极下面被加热熔融。由此, 尖端成为平面状。后者不只是尖端, 在较上方也被加热, 由于那部分也被熔融, 故成为圆弧形。在 50 毫米汞柱氩气中熔炼时, 呈现两者之间的状态。磁场的有无并不引起差异。

另外, 在真空熔炼时电弧的电位梯度比在氩气中熔炼时小^[25]。因此, 当电极尖端和熔池面之间的距离改变时, 电压无多大变化。这一点也被认为是在真空中熔炼时电流、电压稳定的原因之一。由于电弧现象是极为复杂的, 与许多因素有关, 因此, 很难一概地加以叙述。但上述情况被认为是在真空中电弧的电流和电压稳定的一种理由。

在真空中电弧的电流和电压能稳定, 这在实际操作上是有利的; 但另一方面, 由于电极间距离改变时电弧电压无多大变化, 因而恐怕有时会造成长度过短而形成短路, 有时电弧长度过长而有可能产生所谓电弧^[26]。特别是电弧的产生, 会损伤水冷铜结晶器, 招致水的侵入, 成为爆炸事故的原因, 因此是极其危险的。为此, 在实际操作上必须要有能

灵敏地检查出电极间隔, 并能为了使电极间隔经常保持恒定而自动下降电极的自动控制^[17]。

在非自耗电电弧熔炼中看出, 如果施加磁场, 电弧电压就升高, 而且电弧被保持在熔池的中心部分。但是在本试验中, 由于施加的磁场比较弱, 最高为 60 高斯, 而且在真空自耗电电弧熔炼中将电极间隔保持恒定有着困难, 因此本试验还未能证实电弧电压的变化。另外, 真空度对电弧的稳定性, 影响很大, 在所进行的试验中没有发现磁场的影响。

五、结 论

关于真空自耗电电弧熔炼的条件对熔池、铸锭的影响和电弧的稳定性问题, 用非自耗电小型电弧炉和试验用真空自耗电电弧炉在各种条件下进行了熔炼试验, 所得的结果归纳如下。

(1) 在非自耗电小型电弧炉中观察磁场对熔池的影响, 证实了由于磁场使熔池旋转。

(2) 从试验用真空自耗电电弧炉中看出, 炉内真空度愈高, 在同一电流下熔池的深度愈浅。以同一功率进行熔炼时, 炉内真空度不同时熔池深度无多大变化, 但在 780 毫米汞柱氩气中熔炼比真空熔炼较深。另外, 当施加 60 高斯磁场的时候也较深。

(3) 在同一电流下, 如果提高炉内真空度, 熔化就不良, 表面状况比氩气中熔炼的差。在反极性的