

大型铸锻件文集

1987年第3期

上海重型机器厂情报室编

大型铸锻件文集

1987年第3集

目 录

- 1、提高大型锻造钢锭的内部均匀性的新方法..... (1)
- 2、生产大型锻造钢锭的特殊方法..... (13)
- 3、反应堆压力容器用的20MnMoNi55超大直径锻钢件的制造及其特性..... (25)
- 4、锻造时影响孔隙压实的因素..... (36)
- 5、无焊缝整体锻造封头的制造..... (45)
- 6、用水冷法降低电极的消耗..... (54)
- 7、KEYSTONE钢丝厂铸铁水冷炉盖和炉墙的发展情况..... (62)
- 8、大型锻造钢锭的凝固和偏析..... (73)
- 9、在加热炉和热处理炉中应用陶瓷纤维来节约能源..... (82)
- 10、核反应堆供气系统部件整体式钢锻件的最近锻造技术..... (90)
- 11、大型整体低压转子锻件的制造及其质量..... (106)
- 12、制造大型锻件的钢种及其处理方法..... (113)
- 13、钢中氢问题的几个方面..... (119)
- 14、快速增殖反应堆蒸发器厚壁2.25Cr-1MoNiNb钢锻件的开发..... (138)
- 15、新产品：二次炼钢中需做些什么..... (162)
- 16、由一只435吨重的钢锭制成一根200吨重的发电机转子轴及其特性..... (175)
- 17、通过拔长锻造压实中心区的变形条件..... (183)

提高大型锻造钢锭的内部均匀性的新方法

捷克Lubomir Smrha等

提 要

为解决大型锻造用的钢锭内部均匀性问题,引出了一种新工艺方法,这种新工艺是由采用电弧加热钢锭的冒口、对钢进行两级真空处理,以及在锭身凝固过程中,通过浇注漏斗将精炼的钢水注入钢锭的心部所组成。通过在一个50吨重的钢锭上所获得的结果表明,轴心区域的钢充分混合。这种被称为VRP的方法,保证得到优质的化学成份均匀的钢,并且适用于任意尺寸规格的钢锭。

I、近几年来,核电设备,转子、轧机的支承辊等制造厂提出的超大型锻件的需求量急剧上升。与此同时,对大型锻造用的钢锭的均匀性和纯洁度的要求也提高了,钢厂面临着许多严格的冶金、技术和组织管理问题。对冶金工作来说,对大型锻造钢锭特别关心,这是因为大钢锭的凝固时间长并造成严重的区域偏析,这种偏析形成了明显的A型和V型的偏析情况。此外,这种钢锭的化学成分在其截面上变化很大,尤其是在垂直截面上和在偏析区。对这种变化规律的认识,特别是碳、硫、磷和类似铝的各种合金元素的含量问题,对于决定热处理方法以及对评定一个钢锭是否可用于所要求的产品,都是十分重要的。

II、区域偏析以及A型和V型偏析的形成是由于凝固过程的结果、也是含有多种成分的钢水选择结晶的结果。低倍偏析实际上是显微偏析的结果,而人们对显微偏析已有较多的认识。只能通过增加在双相结晶区的温度梯度以及加速凝固过程,才能阻止显微偏析。这种关系由Burton、Prime、和Slichter用下列公式表达:

$$K = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0)e^{\times p(-V\delta/D)}} \quad (1)$$

$$\delta = 0.0322D^{0.666}V^{-0.444}H^{-0.2}V^{0.8} \quad (2)$$

式中 K_0 是平衡分配系数 C_s/C_L

V ——结晶速度

δ ——扩散层厚度,由式②算出

D ——扩散系数

C_L ——液相内夹杂物的浓度

C_s ——固相内夹杂物的浓度

V ——动力学粘度

V ——熔化状态下材料的流速

H ——表面下的深度

结晶速度越快,在一次树枝状晶轴内、特别在二次树枝状晶轴内,产生越细、越密的树枝状组织。

这样就易于为扩散而拉平浓度梯度,并且阻碍因添加剂使枝晶间富集了的钢水的流动。

二次枝晶轴间的间隙由下式表示:

$$d = K(\text{grad}T)\eta \quad (3)$$

式中: d 是二次枝晶轴之间距离

K , η 是具体对每一钢种的用实验方法测得的参数

实际上,在大钢锭的心部增加温度梯度的活动范围很小。对于用作空心锻件的钢锭,已开发出一些特殊的技术:这类钢锭浇注时用一个冷的心子,一方面增加液态金属的圆环面积内的温度梯度,另一方面限制住在凝固了的硬壳内的不均匀性。主要的改进,仅仅是因为采用了水冷结晶器的电渣重熔和真空重熔技术,用这种方法,一层较薄的金属层可以凝固到预先已凝固的金属层上去,熔化的渣子既可防止正在冷却中的材料的氧化,还能有助于精炼重熔了的金属液滴。用上述方法生产的钢锭其低倍组织比常规的钢锭好得多。但是,钢锭越重,采用电渣重熔的技术上与经济上的困难就越大。尽管对某些要求特别高的合金钢来说,上述方法可能是可靠和有利的,但对于160吨以上的钢锭(不久可能要增加到200吨),电渣重熔就不是一种解决大钢锭生产的普遍适用的办法。

常规的电渣重熔技术需要强大的变压器,以及其它贵重设备,并且重熔周期很长,重熔过程需要很高的操作费用。因此就引出研究某种较快的生产方法,这些方法一方面较为便宜,另一方面还将尽可能保持电渣重熔的主要优点。上述方法之一就是Pesho法,是基辅的Paton研究所发明的,这种方法是将几炉钢水倒入一个盛有预先熔化的合成渣的水冷模子中。几炉钢(或者几炉钢的部份钢水)依次浇的时候,就象在电渣重熔时一样,对钢水进行了精炼。在顺序浇注的每一次浇注之后,调整浇注速度,以防止在液态渣与金属的界面上发生凝固,这样就把凝固过程的进展限制在垂直面上。每次增加浇入的钢水,必须在已浇入的钢水在渣液下面只剩下很少量还保持液态的时候进行。至今已发表的用此法得出的结果数据,仅限于重量在15吨以下的结构钢钢锭,但认为这种技术可适用于重达200或300吨的钢锭。

已被实践证明过的另外两种以电渣技术为基础的方法是MHKW法和用电渣焊做成的组合钢锭。MHKW法是在一个打过孔的常规钢锭的轴心孔内,用自耗电极的电渣重熔法进行充满。上述的第二种方法,是将几个锻坯焊成一体,以达到要求的尺寸,这种方法目前仅限于直径不超过2500毫米。但是,上面两种方法要在“以电渣技术为基础”的加工方法之前,对所用的钢锭或钢锭做成的坯,进行较复杂的和较费钱的准备工作。

电渣重熔的优点开拓成另两种现代技术,分别叫做BEST和TRET两种方法。BEST法已用于奥地利的VEW(他们对传统的电渣重熔法有许多有价值的经验),已有十多年的历史,目前常规生产的钢锭重量已达55吨。这种方法,在生产钢锭时是用常规的方法把钢水浇到一个铜制的水冷的冒口内,然后浇入液态渣,把自耗电极就位,并把经过精炼的金属浇入锭身,以便在凝固过程中补缩。已发表的数据说明,这种方法保证整个钢锭有明显的化学成分和组织结构的均匀性以及高纯净度。另一种独立开放的TREST法,其特点主要是使用一种碱性内射的冒口,通过一个放在中心的电极和一个缸体式的圆周电极来逐步地补缩。很明显,以上两种方法的共同缺点是,其重熔速率必须精确地与所处理的钢锭的收缩率相一致。

在给定的时间间隔内,金属凝固量受抛物线关系控制:

$$V/S = K\sqrt{\tau} \quad (4)$$

式中 S 是锭模内表面积

K 是体积凝固系数

$$V = \pi H \xi (2R - \xi) \quad (5)$$

H是模内钢液面高度

R是钢锭横截面半径

ξ 是在 τ 时间内凝固层的厚度

在此情况下的体积膨胀率由下式得出

$$dv/d\tau = K/g\sqrt{\tau} \quad (6)$$

图1表示自浇钢开始凝固速率随着时间流逝的变化情况。从该曲线的峰值往前,其特性符合公式⑥的关系。

补缩所需钢水量取决于从开浇到结束的时间,用 $(dv/d\tau) \cdot \alpha_v$ 表示,其中 α_v 是体积收缩系数,在这里,可假设为常数0.04。

与上述的新方法不同,最近由日本发明的AP法(浇后法)与MP法(多炉浇注法)技术,不以电渣方法为基础。他们已证实,能经济地生产出冒口端与底部端之间化学分析偏差极小的,尤其是碳含量偏差极小的,500吨钢锭。经过对用400吨钢锭锻出的190吨转子彻底全面检查后,说明这种方法可满足最严格的质量要求。

在VITKOVICE,对改善大钢锭均匀性方法的早期研究工作,已得出一种全新的概念,即将几种不同的方法结合起来,以便把影响钢锭纯度的一切因素都包括进去。与两级真空处理结合在一起的脱氧以后,接着用电弧穿过覆盖在钢上的渣层加热钢水表面。从开浇后经过一定的时间,锭中心的钢水通过浇入经过真空处理的钢液进行精炼,这种经过真空处理的钢水具有一种选定的化学成分,使整个锭身的化学成分均匀化。这种技术叫做VRP(VITKOVICE精炼法),是在DUVAVIT的两级真空处理法基础上形成的,该两级真空处理法,VITKOVLIC自1972年开始已用于对标准锭模的常规浇注。这种DUVAVLT技术,用于生产单重40吨至135吨的钢锭,主要包括用DH设备在钢包中进行真空处理,然后直接浇入一个真空罩。利用DH装置进行后合金化和脱氧工作,其目的是保证钢的最高纯度并且降低氢含量。在真空中浇注进一步降低气体含量,并阻止钢流的再氧化。这种技术已证明是一种成功的方法,特别是用于浇注大型船用曲轴的中碳钢。已经发现了许多关于可供选择的脱氧与DH真空处理法以及他们对锻件的质量的影响,并且由此而建立的最佳的加工条件已被用于VITKOVICE生产的所需的一切大型锻造用的钢锭。

在此方法中,氢含量在第一阶段(DH阶段)减少40—60%,在第二阶段(真空浇注阶段)减少10—20%。即使炉内初始氢含量是在5PPm左右,此方法亦可可靠地将最终氢水平降到少于2PPm。所有检查过的锻件,其总氧含量在20到25PPm之间,如图2所示。金相检查显示Jernkontoret夹杂物数目在1.1和1.4之间。但是,用显微化学分析测得,平炉与电炉钢所用的不同的脱氧方法都对氧化夹杂物的数量和成分有影响,正如表I所示。超声波检查确认这种锻件的质量是好的,实际上没有缺陷信号显示出来,与只经过一次真空处理或根本不进行真空处理的类似材料不同。在机械性能检查方面,经过两次真空处理的钢,其缺口韧性,平均比只经过DH处理或只经过浇注时处理的同类材料,高15%,而其抗拉强度试验结果都是大致相等的。

DUVAVIT技术与真空脱氧相结合已得到显著的效果。在此方法中,在DH处理前不向钢液中加入有效的脱氧剂,并且严格控制硅的一切可能来源,以确保硅含量较低。这样,钢水的脱氧仅借助于碳的反应,在DH装置的低压下进行,在随后的真空浇注中使氧含量进一步降低。对用50吨钢锭锻出的锻件进行调查的结果,得出Jernkontoret—Scale纯度数在0.6和10.9之间,在定量电子显微镜视野中所看到的氧化物平均数波动于0.22到1.23。

在VRP方法中,锭身是用上述方法浇的,然后立即用电弧加热锭模内的钢液表面。电弧加热原来用作提高钢锭利用率的手段,近10年来,已被视为在合金宏观偏析理论中的进展,在二元系中,已发现了关于枝晶间的熔化材料的流动、温度场与所造成的质量传递之间的定量关系。同时也证明了区域偏析与锭中心区内的重力结晶过程有关。另外,枝晶间流动的逆转说明了柄状偏析的形成。对上浮的晶粒的沉积方面的研究,已确立一种在钢锭底部的粗大夹杂物的形成与钢液表面没有充分地绝热之间的关系,所有的理论与实践的发现都指出,必须避免在钢锭头部与本体之间产生负的温度梯度。

因此,VRP法规定在浇注完毕以后,尽快地对钢水表面进行加热。由单相变压器产生的加热电流,被送到非自耗电极。如若碱性耐火炉衬将用于较大的钢锭,选定渣的成分使它能保证不侵蚀耐火粘土制成的耐火材料。渣的成分是变化的,它提供一种控制渣的精炼效果的有限方法,虽然这种效果对本方法来说并不十分重要。整个加热过程,金属表面用一种低压惰性气体保护,以防止吸收氢或氧。在隔了一段时间之后,这段时间的长短取决于钢锭的重量,钢锭心部通过漏斗浇入真空处理过的钢水加以精炼,用这种方法浇入的钢水,一方面有助于被加入的材料快速渗透,同时还有助于与前期浇入的钢水充分的混合。如果钢锭的重量符合这种方法,则在这样浇入以后一直到锭身凝固为止,要不断地进行电弧加热。由于与同样大小的用传统方法浇注的钢锭相比,总的凝固时间没有重大的差别,所以VRP方法并不限制工厂的生产能力。用40吨和50吨的钢锭的试验,充分肯定了这种技术所期望得到的好处。

在一个化学成分特意修改过的50吨钢锭上,在其心部区域,显示了各种化学分析偏差,大致是一个旋转抛物面,最好地说明了这种方法的结果。为了达到这个目的,注入心部的材料含有较多的镍(镍的分布系数 $K=0.8$,用作显示元素),而碳含量(碳的 $K=0.2$)减少 $1/2$ 。用一台压机把钢锭沿水平面一切为二,其上半部示于图3的是垂直地分成两半的情况。中心部分一段的硫印照片示于图4,在硫印照片上可以清楚地看到该区的边界。这种钢的最终成分分析是碳0.37%、锰0.68%、硅0.29%、磷0.014%、硫0.018%、镍0.09%、铬0.12%。化学分析试样的取样位置示于图3。

钢锭的下部锻成一个直径700mm、长6780mm的筒体,沿其高度方向的几个位置上取了化学分析和测定非金属夹杂物含量的试样。图5、6和7表示碳、硫、镍沿垂直面上的区域偏析,而图8、9、10表示上述元素沿横截面的分布,各横截面的位置示于图3。这些图可以在浇注完毕以后4小时25分钟,把添浇的钢水浇入心部的时候,精确估计出凝固层的厚度,该厚度与计算出的凝固速率非常吻合。化学成份在锭身与冒口交界线以外的350mm左右处还是令人满意的。图10表示钢锭心部的情况,钢锭心部是由主体钢水和添加的钢水两部分所组成。

主体钢水镍含量0.09%,添加的钢水镍含量提高到0.25%。计算表明混合的心部应平均含镍0.177%,分析结果平均含量为0.18%。这就证明了两种钢水在心部已充分混合。图11表示在补浇钢水之前该区的情况,以及补浇了三次补缩所需的金属量,这个比值在某种程度上可由浇注完毕与补浇之间的时间间隔来调节。VRP技术的优点是变压器的额定功率不必与钢锭的收缩率匹配,所以变压器可以比常规电渣重熔法所需的变压器小些。

结 论

对提高大钢锭的均匀性及纯度的新方法的研究说明,大部分是用某种形式的电渣重熔的

方法来精炼钢锭的心部的虽然这些。方法中的几种方法，现在已在实际应用并且得到满意的效果，但是当前对更大的钢锭的需求，给使用电渣重熔的方法带来了更多的技术上和经济上的困难。所以人们正在找寻生产最大的锻造用的钢锭的新途径。

本文描述了最近创造的VRP法（VITKOVICE REFINING PROCESS），并概括了用此法生产的一个50吨钢锭的结果。VRP法把两级真空处理与电弧加热钢锭冒口和在钢锭凝固时期向锭中心浇入精炼钢水结合在一起。这种方法保证钢的质量优良化学成分均匀，限制或消灭了区域偏析、柄形或缺口形偏析，但并不延长凝固时间，所以不影响车间的产量。这种方法可用于任何尺寸和重量的钢锭，引进各种技术只要化较少的投资，并且可以提高钢锭的利用率。

表 I 一锻件中氧化夹杂物的含量及成分

炼钢方法	夹杂物 总 量	夹 杂 物 分 析 (%)					
		SiO ₂	MnO	FeO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
平 炉	0.0031%	24.1	0	2.7	67.9	0.6	0.8
电 炉	0.0045%	55.2	0	7.0	36.9	0.8	0

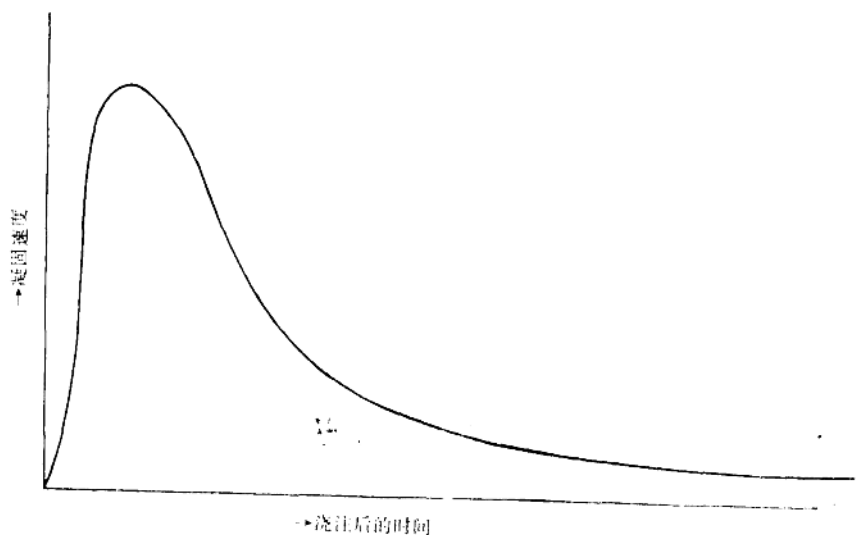


图 I 凝固速度与浇注后的时间关系

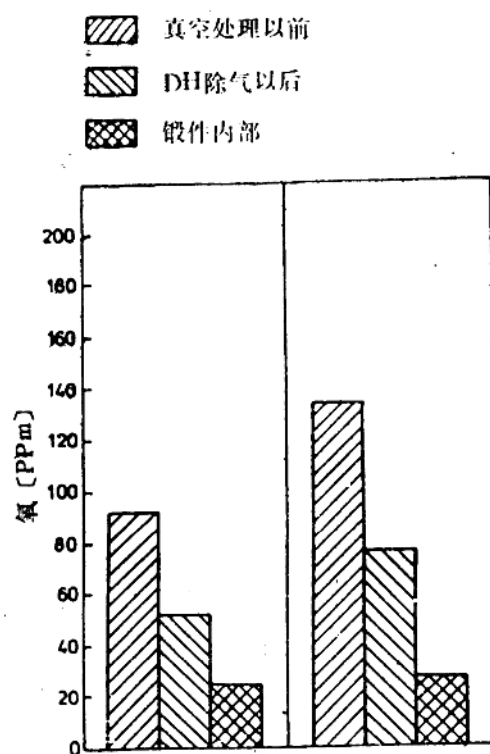


图2 两级真空处理对钢中氧含量的影响

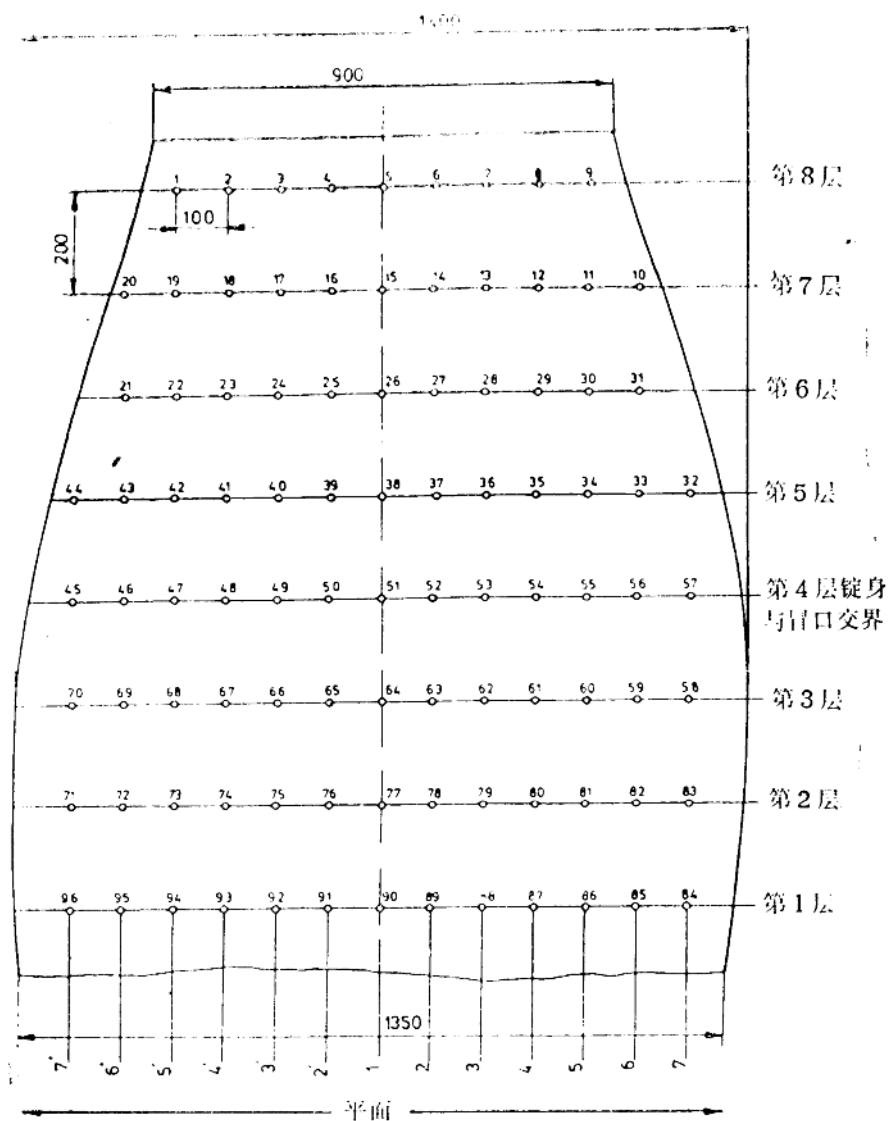


图3 50吨试验钢锭上半部的试样位置

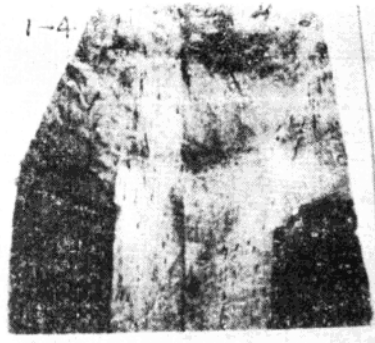


图4 50吨试验钢锭的纵轴剖面的碳印

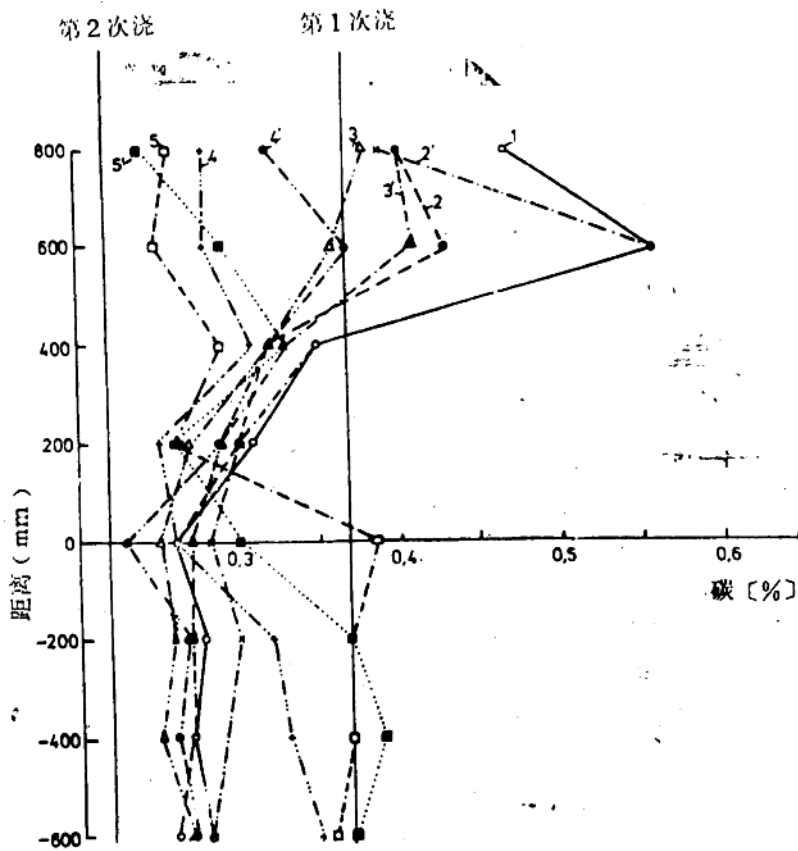


图5 50吨钢锭在不同纵切面(见图3)上的碳含量

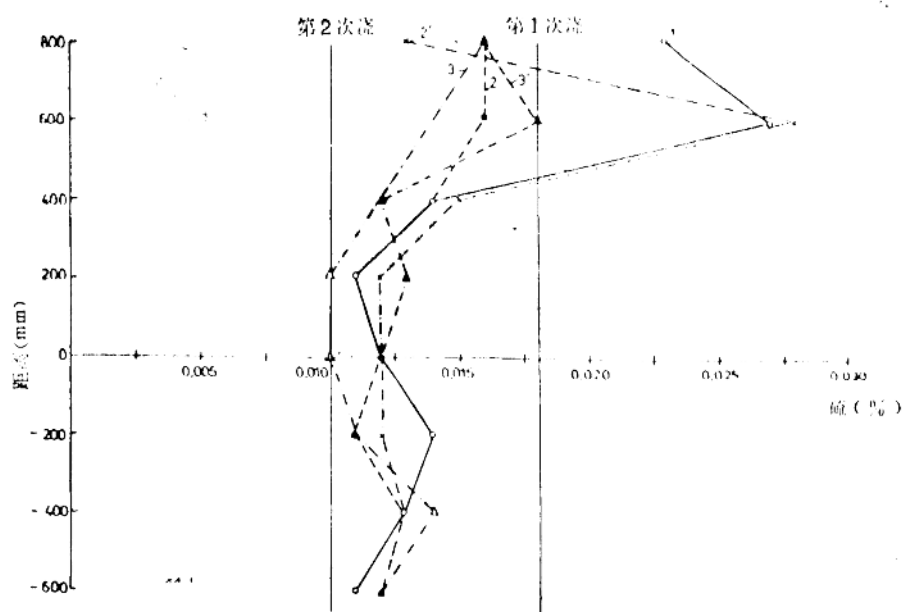


图6 50吨钢锭在不同纵切面(见图3)上的碳含量

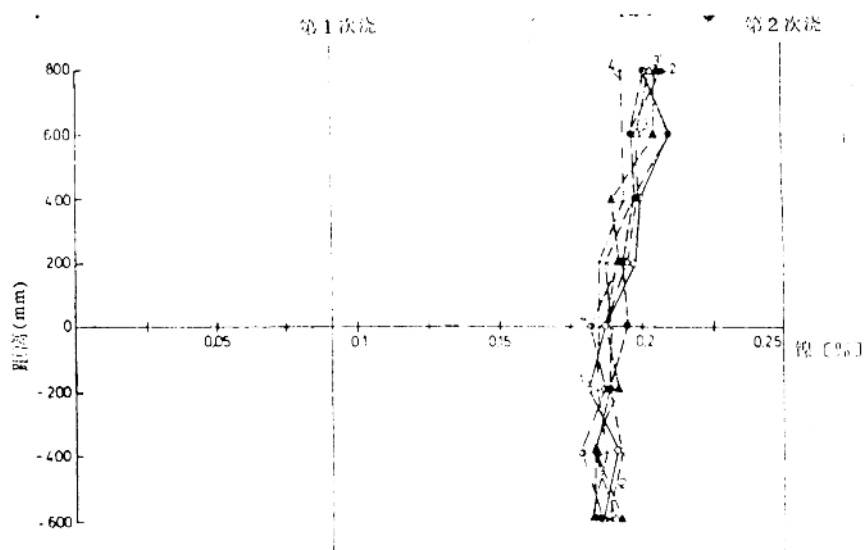


图7 50吨钢锭在不同纵切面(见图3)上的硅含量

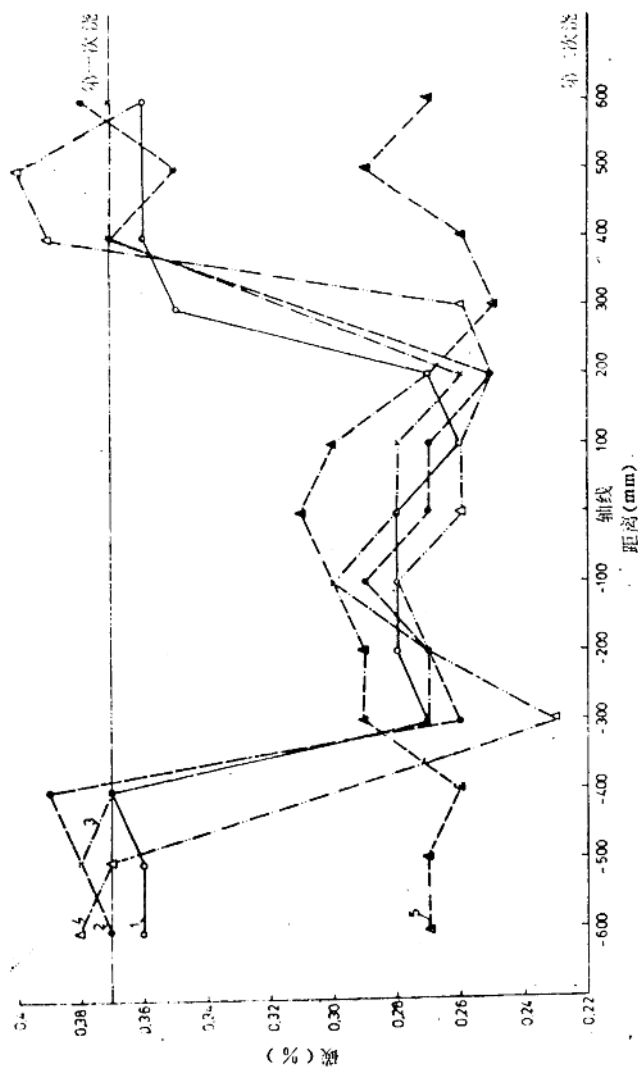


图 8 50吨钢锭在不同截面上的碳含量

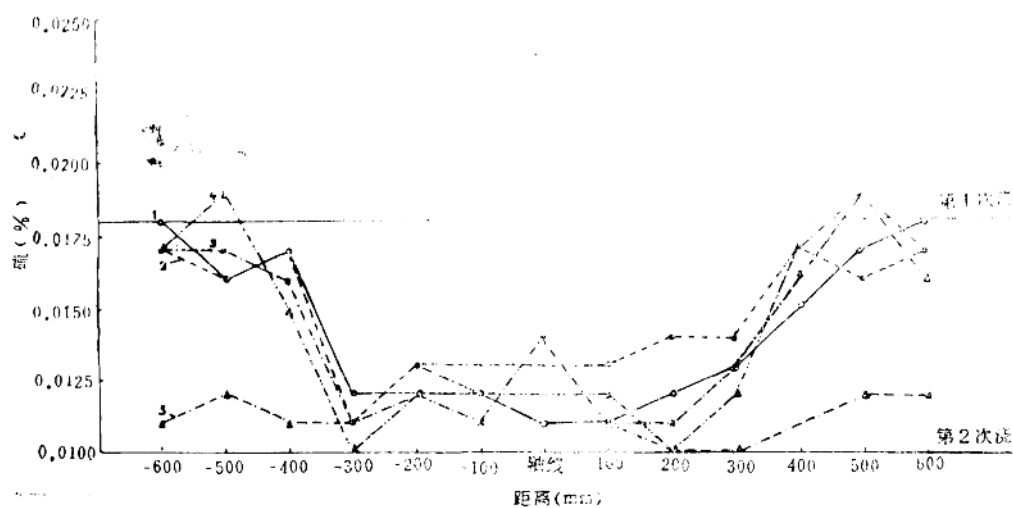


图9 50吨锭在不同横截面上的硫含量

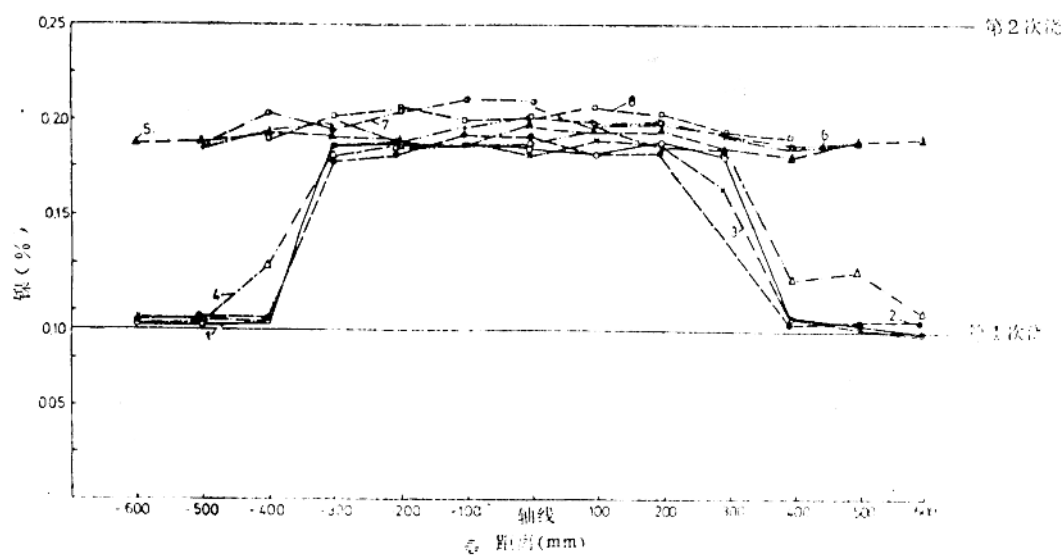


图10 50吨锭在不同横截面上的锰含量

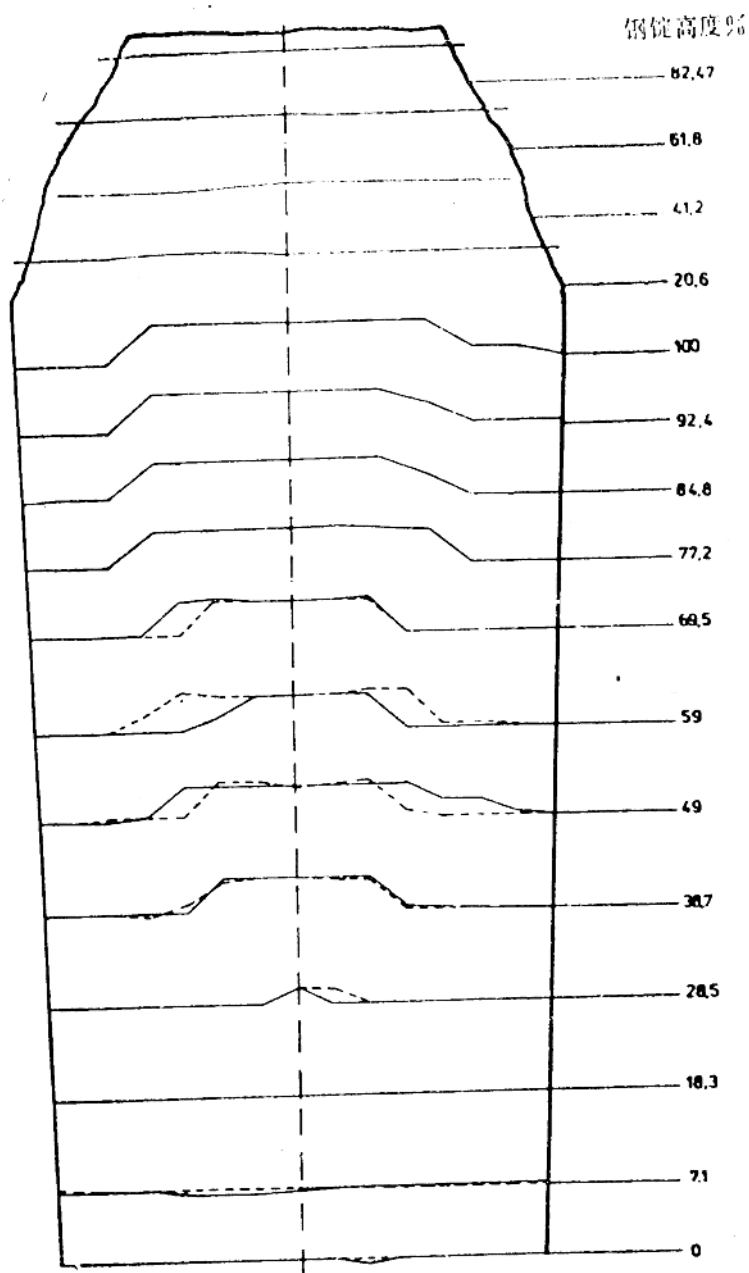


图11 50吨钢锭的心部简图

参考资料: (1)~(27) <略>

译自《Clean Steel Proc Engl and Int Conf, 1-3 June 1981》

生产大型锻造钢锭的特殊方法

G. Kuhnelt等

提 要

近年来,随着生产技术的飞速发展,对大型锻锭,如发电机和汽轮机转子轴的需要量也急速增加。电站愈来愈大,锻锭也愈来愈大,对其规范要求愈来愈严格,对质量的要求也愈来愈高。为了达到此目的,欧洲和美国研制了新的生产方法,它们包括:(1)电渣重熔(ESR), (2)钢锭的电渣补缩(BEST和TREST), (3)中心熔炼(MKHW), 和(4)用电渣焊连接较小的锻锭。电渣重熔方法冶炼的钢,质量最佳,而电渣补缩也是生产优质钢和250t以下大钢锭的极好方法。为了获得均质的锻锭,日本还采用专门的冶炼技术和精炼技术生产大型和重型锻造钢锭。预期随着生产技术的发展,采用电渣重熔和电渣补缩方法将可生产出250t以上的钢锭。

引 言

在过去十年中,重型锻锭的生产,特别是用于汽轮机和发电机转子轴的重型锻件的生产得到了很大发展。原因有:

- 电站发电量增加以及所需的锻件的大小也随之增大,和
- 对材质要求愈来愈严格,以防止断裂—1974年美国加拉汀电站的转子轴发生断裂引起了更多注意(图1)。

毫无疑问,要改善锻件的材质的关键是首先得生产出高质量的锻锭。要生产愈来愈重的钢锭的目标难以实现的障碍是,一般说来,钢锭愈重,质量越差,但是人们总想得到较好的质量。

CrMoV和NiCrMoV钢的汽轮机的整体转子轴的最大重量至今也只有75+左右,它由200t的钢锭锻成。用NiCrMoV钢生产的最大重量的锻锭目前大约为300t,它是由570t的钢锭制造的。

重型锻锭的缺陷

铸态钢锭的缺陷对锻件的韧性有破坏作用(图2)。

- (1)中心区有缩孔。
- (2)偏析,例如,上部有正偏析,而底部有负偏析,以及A和V偏析,和
- (3)非金属夹杂偏析,尤其在钢锭底部的负偏析区(图3)。

制钢工艺的多方面的进展使材质得到改善,即使如此,要完全消除缺陷,至今还不可能,因为其成因在很大程度上取决于大钢锭的凝固过程。所以许多制钢厂倾向于用专门的方法来影响凝固。在这方面迈出的重要一步是采用电渣重熔法。

电渣重熔生产重型锻锭

西德留希林—布巴赫的VoIKlingen工厂的目前最大的电渣重熔装置是于1970年投入使用的。经过多年潜心研究,到1980年工厂完全能够生产160t的电渣重熔钢锭。

在熔炼2300mm直径钢锭时,在整个熔炼过程中,四根电极都同时浸没在渣池内(图4)采用可调底板可生产出高达5000mm的钢锭。与生产重型钢锭有关的冶金问题,工艺问题和设备问题似乎大部分已解决。在钢锭纵向和横截面上都达到了均匀的致密度,偏析得到了明显的限制,偏析带几乎完全消失,非金属夹杂(氧化物和硫化物)分布均匀,夹杂粒子较小,夹杂量较少。

就生产大钢锭而言,电渣重熔法的缺点是成本非常高。对是否能生产出160t以上重的钢锭也还不清楚。

随着大锻锭的电渣重熔的发展而产生的一些工艺技术问题已使许多制钢厂转向有关的较简便的技术。此外,他们还有用开发精炼和浇铸阶段的新技术来改善传统方法生产的锻锭质量的强烈愿望。

用电渣重熔一类的方法生产重型锻锭

大约1970年以来,电渣补缩(ESHT)生产锻锭的方法在工业上得到了应用。

用BEST(鲍勒电渣补缩)法,已生产了2700根重达55t的锻锭(图5)。用这种方法,普通铸锭在凝固过程中通过自耗电极和钢锭头部的渣池供以能量。凝固过程中供给能源对钢锭的凝固有强烈影响。

TREST法(特尼耐熔电渣补缩)代表了另一种方法,用这种方法工作渣在耐熔顶里。用此法已生产出了5根62t量的试验性的钢锭。

最近,从日本传来有关ESHT—J补缩的报导,说他们用此法对重达63t的钢锭进行了热补缩。此法也使用了耐熔顶,但他们采用3根石墨电极来代替一根自耗电极。

用热补缩控制钢锭凝固产生的钢锭中心部比用常规方法产生的中心部要致密得多,以及减少偏析和偏析带,并显著地提高纯度,当然它达不到电渣重熔钢锭的质量标准,但是这种方法比电渣重熔简便得多,成本也低得多。

虽然由数千根钢锭看来,BEST法对其质量具有积极的影响,但是对较大的钢锭还没有试过补缩法。

另一种ESR类的方法为CZR(中心区精炼),属MHKW(Midvale Heppenstal/Klockner—Werke)法(图6)。普通锻锭的中心区,受缺陷的严重影响,我们用锻造压机把它冲出,然后用电渣重熔的方法把有关材料冲填进去。

至今,德意志联邦的奥斯那布吕克工厂已生产出了30根最大重量为210t的CZR钢锭。有些情况下,原有钢锭和ESR中心区之间的过渡区存在缺陷。要在不久的将来用这种方法来生产受高应力的转子是不太可能的。

进一步发展普通的钢锭浇铸方法

在开发专门的生产方法的同时,近年来发现人们用普通的方法,通过注意金属生产的冶金工艺大大地改善了大锻锭的质量。

在日本,采用“多炉浇铸法”使大锻锭中心偏析减少(图7)。几只炉子的钢水一炉接

一炉地浇成一个大钢锭，碳成分随着一次次浇铸而不断减少。用这种方法生产了一根重达570吨的大钢锭（图8），其 upper 和底部的碳成份差别很少。

人们试图采用适合的钢包冶金方法和真空处理，来生产氧化物加硫化物夹杂极少和偏析很低的钢锭。要作这样的努力首先要了解到偏析程度不仅受钢锭大小的影响，而且还受一些微量元素和合金元素，如硅、磷、硫、铝、钒等元素含量的影响。要有效地减少偏析，并同时提高韧性，首先得使硅、磷和硫的成份降到最少。

要生产几百吨重的锻锭，P含量应保持在0.008%以下（在极端情况下甚至不到0.003%）。S含量可通过多次钢包炉处理降低到0.003%以下（在极端情况下在0.001%以下）。

真空碳脱氧法（VCD）用于经过低压（ $\leq 0.05\text{mbar}$ ）真空处理，硅的最大含量为0.05%的炉次上。这样通过CO反应法除氧后，当真空浇铸或通过保护气浇铸时，尽管钢中还还原元素含量低，还是可能获得实际上的镇静钢凝固。对于NiCrMoV钢锻锭，真空碳脱氧法对提高其缺口韧性和降低对回火脆性的敏感性特别有效（图9）。对于CrMoV钢多数锻锭生产厂和用户没有觉察到采用VCD法有什么特殊优越性。

最近，有许多钢厂报导说采用钙合金喷射，重型锻锭的纯度得到了改善。用此法可使S含量最高到0.003%，O含量在30PPm以下，钢锭里的残余氧化物和硫化物基本上呈圆型夹杂，所以韧性很好。这种特殊的钢包冶金的基本要求是先对钢水进行良好的一次脱氧，因此现有的技术不能与VCD法配合使用。

改进精炼技术必须伴有较好的浇铸技术才能产生较好的钢锭形状。已使用过几种数学模型模拟凝固方法，表明钢锭的高径（H/D）比低，锥度大，补缩冒口大的隔热罩大，其致密最佳。

重型锻锭的质量

发现有三种最重要的方法已广泛用于生产汽轮机和发电机转子轴锻锭，他们是：

- （1）普通钢锭浇铸（重达570t的钢锭）。
- （2）电渣重熔（重达160t钢锭）。
- （3）电渣热补缩（约重达60吨钢锭）。

每种方法的主要目的是使生产的钢锭具有最佳均质性，即在整个钢锭内都具有良好的致密度，以及具有最低的偏析和没有有害的非金属夹杂凝聚物。使用受过高应力的锻件制成的部件还要求其合金元素（C、Cr、Mo、Ni、V）具有最优配比，有害气体和微量元素（P、S、Cu、Sn、As、Sb、O、H）的含量尽可能地少。

在ESR产品中钢锭中心部的密度最好，30吨以下重的电渣补缩钢锭同样没有疏松（图10）但是如果钢锭重量超过30t，电渣补缩法生产的钢锭比普通钢锭有所改进，但是达不到电渣重熔锭的标准。然而应用计算机模型来改进工艺确实为电渣补缩法进一步提高质量提出了希望。

电渣重熔锭偏析程度显著降低。用重约110吨的CrMoV钢锭作比较（图11），表明电渣重熔锭的最高C差为0.03%，而在普通钢锭中，S的含量极低或和用VCD处理，C差为0.12%。同样电渣补缩锭表明其C偏析比普通钢锭（图12）要少得多，因为头部的正偏析和底部的负偏析都不明显。

普通钢锭里的偏析带能通过降低P和S的含量或用VCD处理来减少，但不能消除（图13）。应用电渣补缩可使这种现象的程度进一步减少（图14）。大锻锭要完全消除偏析带只能（假