

降低工模具钢电渣重熔钢锭顶部缩孔缺陷的工艺实践

刘友荣

(上海梅山钢铁股份有限公司技术中心, 南京 210039)

摘要 通过控制结晶器进水温度 40 ℃, 出水 68 ℃; 计算机自动补缩模型控制; 自动补缩结束时, 90 s 内完成自耗电电极至石墨电极切换, 53 V, 3 000 A 通电熔炼 3 ~ 5 min, 再切换成自耗电电极, 50 V, 4 000 A, 通电 6 min 等工艺措施, 使电渣重熔钢锭顶部缩孔缺陷深度由 100 mm 降低至 30 mm。生产实践表明, 补缩工艺操作简单易行, 优化工艺生产的工具钢 9Cr2Mo, $\Phi 280$ mm \times 1 000 mm, 480 kg 电渣钢锭 210 支; 热作模具钢 H13, 420 mm \times 1 400 mm, 1 500 kg 电渣钢锭 60 支, 没有再出现因钢锭顶部缺陷而造成锻造坯料报废, 钢锭成材率显著提高。

关键词 电渣重熔 工模具钢 顶部缩孔缺陷 补缩工艺

Process Practice for Reducing Top Shrinkage Cavity Defect of Electroslag Remelting Ingot of Tool and Die Steel

Liu Yourong

(Technology Center, Shanghai Meishan Iron and Steel Co Ltd, Nanjing 210039)

Abstract With using the process measures including controlling mold inlet water temperature 40 ℃, outlet water temperature 68 ℃; controlling model of computer auto back feeding for shrinkage; at end auto back feeding, changing consumable electrode to graphite electrode within 90 s and power supply with 53 V, 3 000 A melting for 3 ~ 5 min, then again changing to consumable electrode and power supply with 50 V, 4 000 A for 6 min, the depth of top shrinkage cavity defect of electroslag remelting (ESR) ingot decreases to 30 mm from original 100 mm. Production practice shows that the process operation of back feeding for shrinkage is simple and easier to do. The forged billets of remelting 210 piece tool steel 9Cr2Mo $\Phi 280$ mm \times 1 000 mm, 480 kg ESR ingot and 60 piece hot die working steel H13 $\Phi 420$ mm \times 1 400 mm, 1 500 kg ESR ingot by optimized process have not been rejected due to ingot top shrinkage cavity defect, the ingot yield increases obviously.

Material Index ESR, Tool and Die Steel, Top Shrinkage Cavity Defect, Back Feeding Process for Shrinkage

电渣重熔精炼是一种在水冷结晶器内进行的冶金炉渣参与反应的净化性重熔重铸过程。电渣重熔炉是获得高纯净度、组织均匀和致密结晶的超高强韧性高级特殊合金钢、工具钢、模具用钢的重要冶炼设备^[1]。

电渣钢锭的顶部缩孔缺陷的随机性较大, 钢锭顶部的中心疏松和缩孔缺陷较严重^[2]。电渣钢锭顶部存在缺陷, 经无损探伤检测, 顶部缺陷深度达 100 mm, 有的甚至达 150 mm, 电渣钢锭再经锻造后, 钢坯顶部缺陷深度达 300 mm, 无法将缺陷切除, 从而造成整块坯料报废, 严重影响钢锭的收得率。应采取有针对性的技术措施, 彻底解决此类钢锭质量缺陷, 满足下游工序的要求。

1 电渣重熔炉设备主要技术参数

T 型变压器: 额定容量 700 kVA, 一次电压 6.3 kV; 二次电压 46 ~ 70 V; 最大工作电流 10 000 A; 有载电动调压 9 级。结晶器最大尺寸 ($\Phi 420$ ~ 440) mm \times 1 750 mm。最常用的结晶器规格为 ($\Phi 280$ ~

320) mm \times 1 400 mm。电极熔化速度: 慢速熔炼 5 ~ 30 mm/min, 快速 30 ~ 50 mm/min。电极交替时间 90 s。熔炼控制: 自动、手动两种方式, 可切换。自动记录电流、电压, 同时显示熔炼功率、水温、水压相关显示, 并可打印记录。微机有载调压、递减功率熔炼, 程序补缩, 动态监控与报警。

2 电渣钢锭顶部质量缺陷产生的原因分析及对策

2.1 电渣钢锭顶部质量缺陷分析

有缺陷的电渣钢锭, 从外观钢顶部有凹陷的深坑。在深坑底部用电锯切开, 其断面如图 1 所示。再沿切截面面向下用细钢丝可以探入的深度达 150 mm, 更深的可达 200 mm。属钢锭凝固质量缺陷(图 1)。

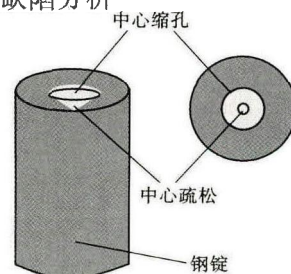


图 1 电渣钢锭顶部质量缺陷示意图

Fig. 1 Schematics of top defect of ESR ingot

2.2 降低电渣钢锭顶部质量缺陷的可行性分析

电渣重熔精炼后期,钢锭的顶部如控制不好会形成顶部质量缺陷,造成钢锭可利用率降低。经验丰富的操作人员可以将电渣锭顶部控制的非常好,几乎没有缩孔,实践证明可以通过适当的控制减少或消除电渣钢锭顶部缺陷^[3]。

2.3 降低电渣钢锭顶部质量缺陷的技术途径

用于冷轧辊原料的高速工具钢,电渣钢锭经退火下料后,因钢锭顶部的缩孔缺陷和中心疏松缺陷经锻造后,经切除的冷轧辊坯料短尺是造成报废的主要原因。减少电渣钢锭的顶部缩孔缺陷深度和消除顶部的中心疏松是提高电渣钢锭锻造成材率的最有效途径^[4]。

3 解决顶部缩孔问题的具体措施

3.1 解决电渣重熔钢锭顶部缩孔的技术措施

为了提高钢锭成材率,冶炼后期必须进行充填补缩操作,这样才能降低电渣钢锭顶部的缩孔缺陷深度,提高钢锭的可利用率。充填补缩操作要达到的效果:钢锭头部补缩充分、平齐丰满,顶部缩孔缺陷深度要求最小(深度 ≤ 5 cm)或消除缩孔缺陷。传统的补缩操作工艺有两种^[5]:(1)手动,采用间断送电的方法进行;(2)连续降低输入功率的方法进行补缩操作。这两种方法虽然可以解决顶部缩孔缺陷的问题,但是对操作人员的要求较高,不同的操作人员冶炼出的钢锭顶部外观差别也较大。为了将成功的补缩操作经验便于传承和固化,为解决因操作人员的操作水平不同而带来的钢锭顶部的质量缺陷,最有效的技术途径是由计算机自动控制操作替代人工操作^[6]。

3.2 电渣重熔后期补缩自动控制模型的建立

为了实现电渣钢锭后期冶炼的计算机自动控制操作,建立相应的计算机控制模型和相应的计算数据库,才能实现电渣重熔补缩计算机自动控制。为了实现这一目标,须对电渣重熔工艺控制进行数据分析,建立相应的计算模型,实现自动控制冶炼补缩工艺操作。

自动补缩控制模型的建立。针对顶部缩孔问题解决的措施是通过补缩冶炼工艺操作,控制熔炼速度和时间,在一定的时间内,所熔炼的钢水体积等于钢水凝固成钢锭时顶部所产生孔穴的体积,减小缩孔缺陷,提高钢锭的可利用率。具体的措施是将人工经验操作变成计算机自动控制操作,针对不同的钢种和规格建立相应的补缩模型。

由电渣重熔冶炼可知,正常冶炼时,自耗电电极的熔化速度与熔渣池内的输入功率成一确定的对应关系。设计时通常采用计算公式为^[7]:

$$V_{\text{熔}} = (0.7 \sim 0.8) D_{\text{结}}$$

式中: $V_{\text{熔}}$ -自耗电电极熔化速度/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$); $D_{\text{结}}$ -结晶器公称直径/mm。

上式适用于 $d_{\text{电}}/D_{\text{结}} = 0.6 \pm 0.05$ 的条件, $d_{\text{电}}$ 为自耗电电极直径/mm,正常冶炼时 $V_{\text{熔}}$ 为一常数,而在补缩期,要求在规定的时间内,自耗电电极熔化进行微积分后, $f(V_{\text{熔}})$ 熔化的钢水正好可以填满液态钢水凝固成钢锭时因体积状态不同产生的体积变化而形成的孔穴。在补缩过程中,这是一个逐步完成的过程。与钢锭的规格尺寸、熔池的温度、熔池内电能的输入功率和冷却强度等因素有关。通过分析可知,在其他条件确定的情况下, $V_{\text{熔}}$ 与熔池内电能输入的功率存在某种对应关系,这种对应关系式可以用式(1)来表示。

$$f(V_{\text{熔}}) \propto U^2 T / R = I^2 R T \quad (1)$$

式中: $f(V_{\text{熔}})$ -补缩期所熔炼的钢水/kg; \propto - $f(V_{\text{熔}})$ 与熔池内输入功的对应关系; U -输入电压/V; R -熔渣池的电阻/ Ω ,熔池渣量与渣的成分确定后其为一常数; T -补缩熔炼时间/min; I -输入电流/A。

在计算机自动控制时,一般采用控制固定电压(U),调节电流(I)的方式来实现(因调节电压技术上较困难,而调节电流相对较容易),所以采用 $f(V_{\text{熔}}) \propto I^2 R T$ 式来控制。分析式(1)可知, $f(V_{\text{熔}})$ 是与 I^2 和 T 的乘积关系,而且与电流 I 是平方关系。在控制中较难实现。但是可以对关系式(1)进行变换,通过指数变换可以将乘积关系转化为加法关系,即线性关系。

$$\ln f(V_{\text{熔}}) \propto \ln I^2 R T \rightarrow \ln f(V_{\text{熔}}) \propto 2 \ln I + \ln R + \ln T \quad (2)$$

而且电流与时间 T 可以简化成直线关系

$$I = KT + B \quad (3)$$

式中: K -直线系数; B -常数。

由式(2)和(3)可知,最终可得电渣重熔精炼后期补缩自动控制曲线模型^[8],其控制曲线见图2,纵轴为电流(A),横轴为时间(min)。采用图2的方式将复杂的问题简单化,便于现场操作控制,有利于工艺固化传承,减少人员操作因素而造成的钢锭顶部缺陷的发生。

3.3 电渣重熔自动补缩控制模型的应用效果

$f(V_{\text{熔}})$ 是电流对时间积分的函数关系式^[8]。将其其他次要因素略去,只考虑几个主要的控制参数,输入电压 U 设定后,通过电流与补缩时间控制曲线模型可实现自动补缩冶炼操作。在实际生产中,补缩工艺与所冶炼的钢种、锭型规格尺寸等因素密切相关。对于 9Cr2Mo 钢种,完全解决缩孔缺陷问题;对于 H13 钢种也可以将缩孔缺陷控制在 30 cm 以内。控制设定参数可以在生产中实测得到或采用其他方式得到,但这些参数因钢种、规格不同而进行调整。

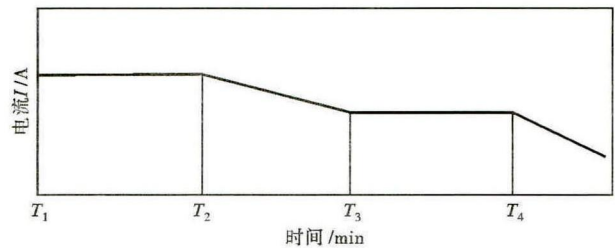


图 2 电渣炉计算机自动控制补缩电流曲线
Fig. 2 Current curve of computer auto control back feeding for shrinkage at electroslag furnace

表 1 9Cr2Mo 和 H13 钢化学成分要求 / %

Table 1 Requirement of chemical composition of steel 9Cr2Mo and H13

钢种	C	Si	Mn	Cr	W	V	Mo	P	S
9Cr2Mo	0.085 ~ 0.095	0.25 ~ 0.45	0.20 ~ 0.35	1.70 ~ 2.10	-	-	0.20 ~ 0.40	≤0.025	≤0.006
H13	0.45 ~ 0.52	0.80 ~ 1.20	0.40 ~ 0.60	4.50 ~ 5.20	0.80 ~ 1.20	1.0 ~ 1.15	1.25 ~ 1.75	≤0.025	≤0.006

试验钢种成分见表 1;电渣重熔后期计算机自动补缩控制模型的参数设定值见表 2。

工具钢 9Cr2Mo, 锭型 $\Phi 280 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$; 锭重 480 kg; 生产钢锭数量 210 支; 因工具钢 9Cr2Mo 的钢水流动性好, 浇铸钢锭顶部无缩孔。

热作模具钢 H13, 锭型 $\Phi 420 \text{ mm} \times 1400 \text{ mm}$; 锭重 1500 kg; 生产钢锭数量 60 支, 电渣重熔钢锭顶部缩孔缺陷深度由 100 mm 降低至 30 mm。实际生产应用效果非常好。

表 2 重熔后期计算机自动补缩控制模型中各参数设定值

Table 2 Setting value of each operating parameters in computer auto back feeding for shrinkage control model at later period of remelting

钢锭直径/mm	钢种	电压/V	I_0/A	I_1/A	I_2/A	T_1/min	T_2/min	T_3/min	T_4/min	K_1	K_2	K_3
280	9Cr2Mo	53	6 000	4 000	4 000	4	4	3	8	500	0	400
420	H13	62	7 800	6 300	4 800	2.5	3	3	15	600	500	300

4 解决电渣钢锭顶部中心疏松的具体措施

4.1 电渣钢锭顶部中心疏松缺陷的成因

顶部缺陷主要是缩孔和中心疏松。缩孔缺陷是在钢液凝固过程中,由液态变成固态发生体积变化而造成的结构缺陷(图 3)。

正常冶炼情况下,电渣炉的熔池结构示意图见图 3(a)。到了冶炼后期,由于输入电渣炉内的电流功率发生了变化,熔池内的热量也随之发生变化,引起熔池结构也发生了变化,电渣熔池中液态钢水部分逐渐凝固成固态钢锭外壳(图 3b),中心部位自然形成空穴,必须有液态钢水进行补充才可以填满钢

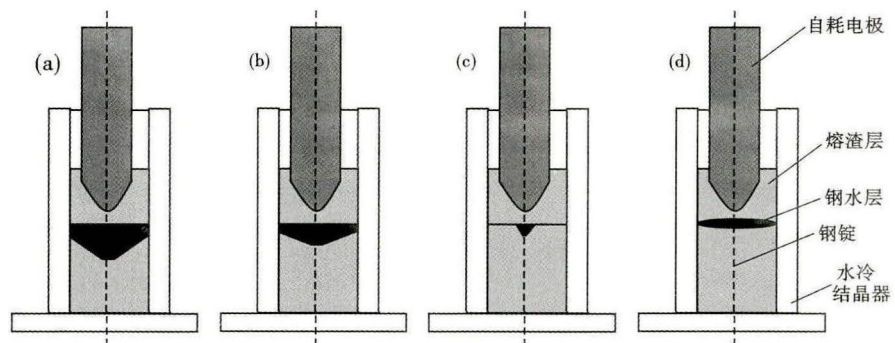


图 3 电渣重熔钢锭顶部缺陷产生原因及解决措施示意图:(a)正常电渣熔池的结构;(b)重熔后期熔池结构;(c)重熔后形成的中心疏松;(d)经补缩控制后熔池结构
Fig. 3 Schematics of forming reason of top defect of ESR ingot and solving measures: (a) structure of normal electroslag remelting bath; (b) structure of bath in remelting later period; (c) center porosity formed after remelting; (d) structure of bath with auto control back feeding for shrinkage

液凝固形成中心孔穴,所以必须进行补缩工艺操作。因结晶器的强冷作用,电渣炉冶炼到后期,随着钢锭高度不断增加,水冷底箱对钢锭的冷却效果减弱,而径向凝固变强,造成电渣钢锭的凝固顺序与下部不同,在电渣炉的中心部位会形成封顶,阻断上部钢水进入中心孔穴,顶部钢液熔池较浅钢水的静压小,钢水不能有效将孔穴填满而形成中心疏松缺陷(图 3c)。而且顶部疏松缺陷部位的各种应力较集中,

在后续的凝固时会将疏松缺陷向电渣锭下部的液熔池延伸,实际的探伤缺陷深度大于肉眼观察可见深度。

4.2 计算机自动补缩控制模型的不足

通过计算机自动补缩控制模型虽然从外观上解决了顶部缩孔问题,但经锻造后的钢坯,探伤检测发现顶部缺陷的深度仍在70~80 mm,有时甚至达140 mm。主要原因是由钢锭的中心疏松引起的。产生中心疏松的原因是钢水凝固后期顶部缩孔底部的热应力较大,中心疏松形成在中心内部裂纹向下延伸,探伤深度延长。通过适当工艺措施可以弥补或减轻此类缺陷的产生。

中心疏松缺陷产生的主要原因是:电渣钢锭熔炼后期,凝固时没有足够的钢水及时补充到缩孔中,通过电渣重熔补缩操作工艺的措施,补加一定量的钢水,控制熔池温度场分布,方能控制电渣炉后期炉内的熔池结构形状,使钢锭的顶部变得平滑(图3d),消除部分应力集中,预防中心疏松在后续锻造工序进一步扩大的目的。仅依靠补缩自动控制模型还不能达到如图3(d)的效果,还必须与其他控制手段相结合,才能最终达到提高电渣钢锭锻造成材率的目的。

4.3 降低电渣重熔钢锭顶部质量缺陷的主要措施和效果

在补缩后期,控制钢液熔池深度,使熔池的结构达到如图3(d)的效果,具体操作措施有:

(1)冷却水控制要求。结晶器进水温度40℃、出水温度68℃,进水管管径30.48 mm,循环水压力0.38 MPa。冷却强度降低有利于熔池形成平滑的缩孔,减少中心疏松的产生。

(2)计算机自动补缩操作的模型中的电流控制曲线模型。随着输入电流下降,渣温降低,使高温区收缩,渣皮向结晶器中心延伸,钢锭凝固层变厚,钢锭四周出现宽平台。

(3)电极切换。在电渣锭补缩结束前准备好Φ180 mm石墨电极。自动补缩操作结束后,将金属自耗电极换成石墨电极,要求在90 s内完成电极切换。设定恒定电压53 V,电流3 000 A,继续通电熔炼3~5 min,然后断电。保证液态钢水深度和熔池上表面积,为后续补充钢水准备条件。

(4)再将石墨电极切换成自耗金属电极,电压50 V,电流4 000 A,通电6 min,采用将自耗电极埋

入渣池内,控制电极升降,随着电极熔化,电极埋入渣池的深度也会越来越小,产生的电流变化也是逐渐减少,当电流降至500 A时,电流会直接归0。对熔池补充适量的钢水,补充钢水量太多,会形成渣沟,而太少,则达不到消除缩孔和中心疏松的目的。

(5)断电后,不要将电极立即抬升,而是将高温的电极覆盖在渣面上,10 min后再提升自耗电极。

经过工艺改进措施生产9Cr2Mo、H13工模具钢的试验可知,电渣钢锭顶部的缺陷深度降到10~30 min。

通过计算机自动补缩控制模型和切换电极再重新熔炼的技术措施,生产工具钢9Cr2Mo,Φ280 mm×1 000 mm尺寸电渣钢锭210支;热作模具钢H13,Φ420 mm×1 400 mm尺寸电渣钢锭60支。没有再出现因钢锭顶部缺陷而造成锻造坯料报废。生产实践证明,计算机自动补缩控制模型科学合理,补缩工艺操作简单易行。

5 结论

电渣重熔后期采用计算机自动补缩控制模型和补缩工艺操作相结合的方式可显著降低电渣重熔钢锭的顶部缺陷。工艺实践证明,计算机自动补缩控制模型有效,补缩工艺简单易行。电渣重熔钢锭顶部缩孔缺陷深度由100 mm降低至30 mm,钢锭成材率显著提高。

参考文献

- [1] 陈家祥. 钢铁冶金学(炼钢部分)[M]. 北京:冶金工业出版社, 1990:254.
- [2] 李正邦. 电渣冶金与电渣熔铸在中国的发展[J]. 铸造, 2004(5):53-57.
- [3] 徐文峰. 电渣重熔钢锭内部中心孔洞的形成原理研究[J]. 工业加热, 2002(2):46-48.
- [4] 王齐铭. 特种冶炼[G]. 西安:西安冶金建筑学院/钢铁冶金(本科)教材汇编, 1989:36.
- [5] 邵立青. 直径300 mm电渣重熔钢锭的补缩工艺[J]. 特殊钢, 1999, 20(2):48-49.
- [6] 陈元元, 刘喜海, 李宝宽. 电渣重熔钢锭凝固过程数学模拟软件[J]. 钢铁研究学报, 2005, 17(6):30-33.
- [7] 刘友荣, 姚无病. 一种电渣重熔精炼补缩自动控制方法:中国, CN200510024668.0[P]. 2005-05-23.

刘友荣(1969-),男,硕士(安徽工业大学),主任研究员,高级工程师,1995年西安建筑科技大学(本科)毕业,碳钢产品开发及炼钢工艺开发。E-mail:liuyyrr@163.com

收稿日期:2015-02-20