

## 高品质锻钢冷轧辊电渣工艺技术创新研究和实践



霍振全

(邢台德龙机械轧辊有限公司铸锻厂, 邢台 054000)

**摘要:** 高品质锻钢冷轧辊对提高冷轧板材质量和提升生产效率起到至关重要的作用, 提升冷轧辊电渣工艺技术创新, 对于提升高品质锻钢冷轧辊的冶金质量具有重要意义。对电渣工艺技术深入的研究和剖析, 重点从电渣重熔的浅平金属熔池和凝固均质化两个维度进行分析, 确定了渣温补偿熔化速度、冷冻水补充快速冷却和填充比强化渣池搅拌三个方面进行电渣工艺技术创新研究。生产实践中, 熔化速度加入渣温补偿, 将渣温控制在  $1580 \sim 1680$  °C, 实现了微观层面浅平金属熔池的实时性; 采用文丘里管件补充冷冻水优化了快速冷却, 结晶器冷却水温达到了  $\pm 5$  °C 的线性变化, 保证了电渣锭底冒端冷却效果的一致性, 实现了宏观层面浅平金属熔池的稳定性; 电渣填充比参数调整至  $0.65 \pm 0.05$ , 强化了金属液滴透过渣池细小化和均质化的搅拌效果, 实现了电渣凝固均质化的冶金效果。采取“渣温补偿+冷冻水补充”工艺方法获得了浅平金属熔池, 填充比强化渣池搅拌改善了电渣凝固均质化, 经过最终的产品检测和使用, 冷轧辊的冶金质量得到了显著提升。

**关键词:** 高品质锻钢冷轧辊; 浅平金属熔池; 凝固均质化; 渣温补偿熔化速度; 冷冻水补充快速冷却; 填充比强化渣池搅拌

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00247 中图分类号: TF142

## Innovative Research and Practice on Electroslag Process Technology for High Quality Forged Steel for Cold Rolling Roller Application

Huo Zhenquan

(Casting and Forging Plant, Xingtai Delong Machinery Roller Co., Ltd., Xingtai 054000, China)

**Abstract:** High quality forged steel for cold rolling roller plays a crucial role in improving the quality of cold-rolled sheets and enhancing production efficiency. Improving the innovation of electric slag process technology for cold rolling roller is of great significance for enhancing the metallurgical quality of high-quality forged steel for cold rolling roller. In depth research and analysis of the electric slag process technology, with a focus on analyzing the shallow flat metal melt pool and solidification homogenization of electric slag remelting. Three aspects of electric slag process technology innovation research were determined: slag temperature compensation melting rate, rapid cooling with chilled water supplementation, and strengthening slag pool stirring with filling ratio. In the production practice, adding slag temperature compensation to the melting speed controls, and the slag temperature slag temperature was controlled within the range of  $1580 \sim 1680$  °C, which realized real-time performance of shallow flat metal melt pools at the micro level; The rapid cooling was optimized by supplementing the chilled water through Venturi fittings, and the cooling water temperature of the crystallizer reached a linear change of  $\pm 5$  °C, which ensured the consistency of the cooling effect at the bottom of the electric slag ingot and realized the stability of the shallow flat metal melt pool at the macroscopic level; The parameter of electric slag filling ratio was adjusted to  $0.65 \pm 0.05$ , which strengthened the stirring effect of metal droplets passing through the slag pool for refinement and homogenization, and achieved the metallurgical effect of electric slag solidification homogenization. The process of "slag temperature compensation+chilled water supplementation" was adopted to obtain a shallow flat metal melt pool. The filling ratio strengthened the slag pool stirring and improved the homogenization of electric slag solidification. After final product testing and use, the metallurgical quality of the cold rolling mill was significantly improved.

**Key Words:** High Quality Forged Steel for Cold Rolling Roller; Shallow Flat Metal Melt Pool; Solidification Homogenization; Slag Temperature Compensation Melting Rate; Refrigerated Water Replenishment for Rapid Cooling; Strengthening Slag Pool Mixing with Filling Ratio

随着我国经济转型以及新质生产力的不断赋能, 家电、汽车、建筑等行业对冷轧钢板的质量要求不断提升, 做为影响冷轧钢板质量和提升生产效率的关键部件锻钢冷轧辊, 其良好冶金质量和优异的

使用性能越来越得到重视。锻钢冷轧辊属于典型的高合金过共析钢, 材质以 Cr5 为基础, 从 Cr5 到 Cr6、半高速钢材质, 合金含量在不断提高, 冶金质量要求越来越高。使用性能越来越精细化, 形成了

以抗事故型、抗辊印型要求的锻钢冷轧辊,性能的差异化越来越得到重视。高品质锻钢冷轧辊兼具了高合金材质稳定的冶金质量和优异的性能差异化。

做为锻钢冷轧辊制造的关键工序,电渣重熔对高品质锻钢冷轧辊生产制造的作用愈加突出。传统的电渣工艺已不能满足高品质锻钢冷轧辊的特殊要求,建立电渣重熔浅平熔池均质化新的理论体系<sup>[1]</sup>,为提升冶金质量提供了理论依据,电渣工艺技术创新成为当前重要改进方向。

### 1 电渣工艺技术创新

电渣工艺技术方面,高品质锻钢冷轧辊冶金质量的稳定体现在电渣金属浅平熔池的实时测量和稳定控制;而产品的使用性能差异化体现在材料的碳化物分配的均匀性及合金元素的均质化。

#### 1.1 渣温补偿和熔化速度对浅平熔池实时控制

资料显示<sup>[2]</sup>,电渣熔化速度是电渣生产工艺制度综合表征参数。在电渣生产实践中,电渣熔化速度( $v_{MR}$ )如式(1)。

$$v_{MR} = (0.70 \sim 0.80)D \quad (1)$$

式中,D为结晶器的直径,mm。

公式(1)在一定程度上,满足了电渣重熔特殊钢的技术要求。但随着特殊钢技术要求的不断提高,电渣特殊钢冶金质量亟待提高;同时在电渣理论方面,仅采用结晶器直径D参数控制熔化速度,对于合金含量不断提高的特殊钢,更显得无能为力,

亟需要对熔化速度工艺设计原则进行创新。

#### 1.1.1 渣温对熔化速度( $v_{MR}$ )的影响

电渣熔化速度主要是通过安装在电渣炉承重横臂上精密称重传感器实时测量电渣过程中电极锭重量的变化,从而获得精准的电渣重量熔化速度<sup>[3]</sup>。目前,电渣炉用称重系统精度 $\leq 0.2\%$ ,可以实现熔化速度误差精度 $\leq 5\%$ ,对于G=10 t规格的电极锭,重量精度最小2 kg,熔化速度范围 $\pm 0.5$  kg/min。

电极锭重量变化测量的准确性,与电极锭在渣池内的浸入深度有着密切关系,必须保证电极锭在渣池中的浸入深度精确控制在0~10 mm范围:过深则F渣池浮力值逐渐增大,过浅则冶炼过程中脱离渣面,破坏电渣的连续性。

目前检测电极锭的浸入深度比较困难,工程上则通过电压摆动或电流摆动进行控制<sup>[4]</sup>。从另一个角度来看,电极锭熔化渣池的温度和电极锭浸入深度也有一定的相关性,如图2所示,即正常渣温(在1 580~1 680 °C范围)浸入深度 $h_1$ 在0~10 mm;低渣温( $\leq 1 580$  °C),则浸入深度 $h_2 > 10$  mm,熔化速度就会测不准,破坏电渣的平衡性;高渣温( $\geq 1 680$  °C)过多的明弧,破坏电渣冶金过程。

#### 1.1.2 渣温补偿实时控制熔化速度

对传统上电渣熔化速度公式进行修整优化,在公式中增加渣温补偿因子,使得熔化速度 $v_{MR}$ 成为结晶器直径D、渣温 $T_{slag}$ 和熔点 $T_{Steel}$ 的函数,如公式(2)。

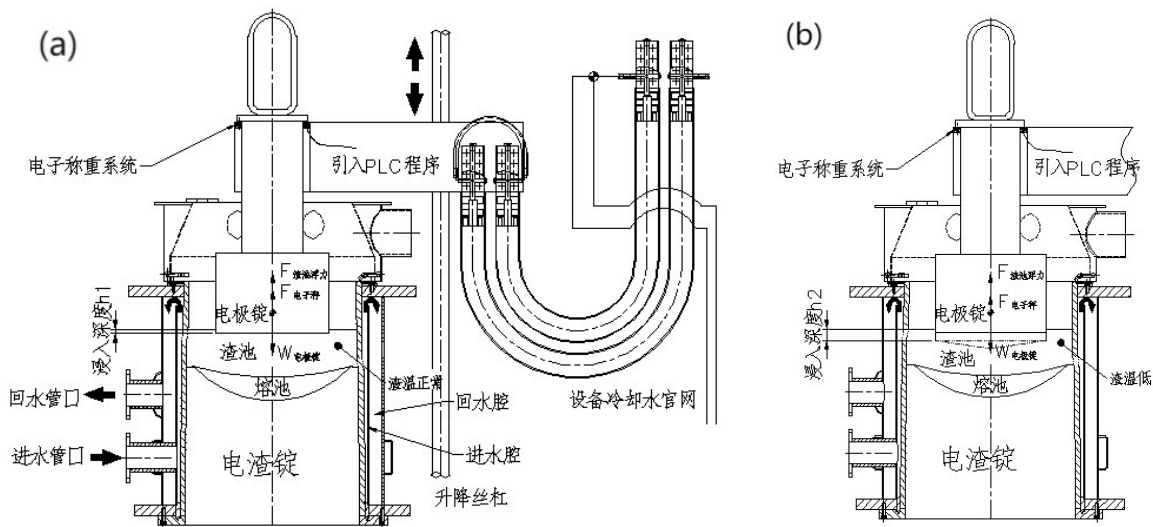


图1 渣温与电极锭浸入深度关系示意图:(a)正常渣温与浸入深度,(b)低渣温与浸入深度

Fig. 1 Schematic diagram of the relationship between slag temperature and electrode ingot immersion depth : (a) normal slag temperature and immersion depth, and (b) low slag temperature and immersion depth

$$v_{MR} = \left\{ (0.7 \sim 0.8) + \frac{T_{Steel} + (453 \sim 473)}{100 \times (T_{Slag} + 273)} \right\} D \quad (2)$$

式中,  $T_{Slag}$  为渣温, 参考数值 1 580~1 680 °C;  $D$  为结晶器直径, mm;  $T_{Steel}$  为熔点, °C;  $v_{MR}$  为熔化速度, kg/h。

引入渣温补偿公式(2)控制电渣熔化速度工艺参数后:

①初始阶段熔化速度目标值高, 通过增加电流、电压, 使得渣温快速达到参考数值;

②正常重熔后电渣锭潜热的释放, 引起渣温升高, 熔化速降低, 随之电流电压降低, 使得渣温维持在参考数值区间;

③针对不同合金含量特殊钢的电渣重熔熔速控制, 即合金含量越高,  $T_{Steel}$  越低, 电渣的熔化速度也越需要降低。

熔化速度做为金属熔池的主要热源, 随着熔化速度恒定, 电压电流不断地递减, 电渣冶金逐渐建立平衡, 使得金属熔池维持一定的形状, 达到实时浅平熔池的目标。

## 1.2 冷冻水补充形成快速冷却保持浅平熔池稳定

电渣炉冶炼过程中的冷却采用闭式循环系统<sup>[5]</sup>, 电渣冶炼过程中的热量一方面来自熔化金属电极形成的金属液滴, 另一方面则来自金属熔池的过热状态<sup>[6]</sup>。热量一部分被结晶器和底水箱的循环冷却水带走, 另一部分则被电渣锭以潜热的形式蓄积起来, 如图 2 中 4B 部分所示。

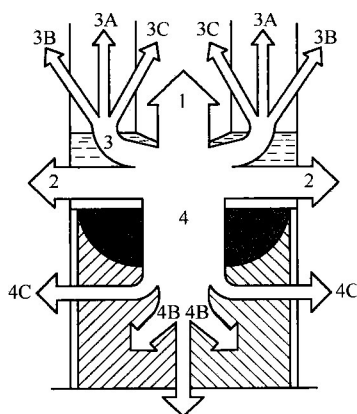


图 2 电渣重熔热消耗分配示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heat consumption distribution for ESR

随着锻钢冷轧辊钢用电渣锭细长型方向发展, 一般选用电渣锭高径比 $\geq 2.5$ <sup>[7]</sup>, 在冶炼周期超过 1/2 后, 已经凝固成型电渣锭释放出的潜热越来越成为不可忽视的因素。

从整个电渣冶炼宏观角度来看, 电渣锭潜热, 如图 2 中 4B 部分, 在冷却循环水无法有效带走的情形下, 就会反作用于金属熔池, 增加金属熔池中的热量, 金属熔池逐渐变深, 破坏浅平金属熔池形状。尤其是电渣锭在熔炼 1/2 以后, 浅平金属熔池在熔化速度产生的金属液滴和电渣锭释放的潜热的双重作用下逐渐变深, 破坏浅平熔池的持续稳定性, 造成整支电渣锭首尾的质量差异性, 从而造成到最终锻钢冷轧辊的使用性能无法满足两端一致性, 尤其是电渣锭尾部质量。

### 1.2.1 电渣锭潜热释放的影响因素

电渣锭潜热释放与电渣锭高温热传导系数及冷却温度梯度有关。高温热传导系数是衡量传导热量的能力, 与电渣锭的材质有关, 如半高速钢冷轧辊材质合金元素多, 导热能力就明显低于普通 MC5 电渣锭, 为后期快冷工艺流量  $Q_{\text{冷冻}}$  提供理论依据。

冷却温度梯度主要指结晶器冷却部分, 除了与冷却循环水的类型、结晶器与电渣锭凝固收缩缝隙宽度有关, 主要与循环水冷却温度梯度有关。

冷却温度梯度主要受到冷却水的进水温度、出水温度、冷却水流量及冷却水压力有关, 其中进水温度是影响温度梯度的重要因素。

电渣锭与结晶器壁因钢锭收缩产生缝隙, 会生成渣皮。渣皮越厚, 传递热量效果越差, 直接影响到浅平熔池的浅平效果。资料显示<sup>[8]</sup>, 当渣皮厚度从 0.5 mm 增加到 2.5 mm, 甚至增加到 10 mm 时, 最大总热量传输系数从 1 676 J/(km<sup>2</sup>·s) 降低到 873 J/(km<sup>2</sup>·s), 降低 48%。渣皮厚度是影响冷却效果不可忽视的因素。

### 1.2.2 冷冻水补充减少钢锭潜热实现快速冷却

循环水的进水温度在室外冷却塔中进行热交换, 受环境因素影响很大, 控制上限不超过 35 °C 已不能满足高品质锻钢冷轧辊要求, 需要进一步降低进水温度, 以获得良好的冷却效果。

引入冷冻水补充装置可以实现电渣的快速冷却, 如图 3 所示, 减少电渣锭潜热 4B。

1) 冷冻水制取单元选用单级制冷循环系统, 补充 -15~-5 °C 的冷冻水, 可获得持续稳定的进水温度。

2) 冷冻水补充单元采用文丘里管阀体元件, 实现冷冻水补充后进水温度的线性变化, 避免产生骤降温度梯度, 保证电渣循环冷却水不出现急冷急热现象。

3) 冷冻水箱单元进行超冷水的储存工艺流量

$Q_{\text{冷冻}}$ 调整。冷冻水箱、水泵、管道及管件采用高等级橡塑材料(由丁晴橡胶和聚乙烯经工艺发泡而成)做好绝热保温处理。

4)炉前闭式循环储水箱单元构成冷冻水补充的循环载体,通过调整实现冷冻水循环补充。

冷冻水补充装置可实现快速冷却,有效地实现电渣锭潜热的释放,实现电渣冶炼周期内冷却的可控变化,有利于电渣初始至结束阶段金属浅平熔池深度控制在一个较窄区间。

### 1.3 改善渣池热循环,实现凝固过程中均质化

电渣特殊钢目前合金化和微合金化越来越来越得到重视,尤其是锻钢冷轧辊的材质朝着高合金含化方向的发展<sup>[9]</sup>。随着合金含量的增加,尤其是Cr、Mo、V等元素极易形成成分偏析,产生一次共晶碳化物。钢液常态化铸造电极锭,不可避免地产生大量的成分偏析造成的碳化物超标,常规处理只能在后期的锻造热处理等工序中扩散均质化,减少碳化物对产品的质量影响。

电渣重熔做为消除或减少电极锭母材中的成分偏析关键工序,实现一次碳化物凝固均质化越来越得到重视,如何实现电极锭母材中的偏析再次均质化,成为确定和选择填充比的重要因素。

#### 1.3.1 不同填充比对渣池热循环的影响

理论证明,电极锭端面熔化的液滴穿过渣池过程中,液滴越细化,渣洗净化冶金效果越好。渣池热循环越强,细化的金属液滴越容易均质化。

熔化速度一定的条件下,电渣重熔不同充填比对渣池热循环的影响,如图4所示,充填比

大(L:0.75),中心高温区与边缘温度梯度小,渣池热循环弱,金属液滴均匀滴落,搅拌均质化作用弱;充填比小(R:0.65),中心高温区热量集中,温度梯度造成的渣池热循环强,金属液滴在渣池对流搅拌作用下有利于实现再次均质化。

#### 1.3.2 填充比优化,改善渣池热循环

电渣重熔的填充比对渣池热循环影响需要在熔化速度、水冷效果稳定的前提下,对填充比参数进行优化选择。

资料[10]显示,电渣填充比和熔炼电耗、熔化速度存在优化组合。高品质锻钢冷轧辊的电渣冶炼除了要兼顾电极锭重量、直径长度尺寸以及电渣炉设备机械行程等因素,应该在填充比参数上进行精心选择。

高品质锻钢冷轧辊生产实践中,选择填充比0.75和0.65进行实践对比,填充比0.65对应产品,液析碳化物合格指标和表面波合格率指标均好于前者,同时电耗经济指标也低于前者。

## 2 电渣工艺技术创新的实践

锻钢冷轧辊电渣生产环节,熔化速度和循环水冷却是核心,最终产品的冶金质量与熔化速度和水冷有关,引入渣温补偿和冷冻水快速补充技术创新,可使得金属浅平熔池达到实时和稳定控制。高品质锻钢冷轧辊电渣环节还需要综合对填充比进行技术优化和选择。

### 2.1 浅平金属熔池的实时性和稳定性控制

生产工艺实践中,将渣温补偿和冷冻水补充进

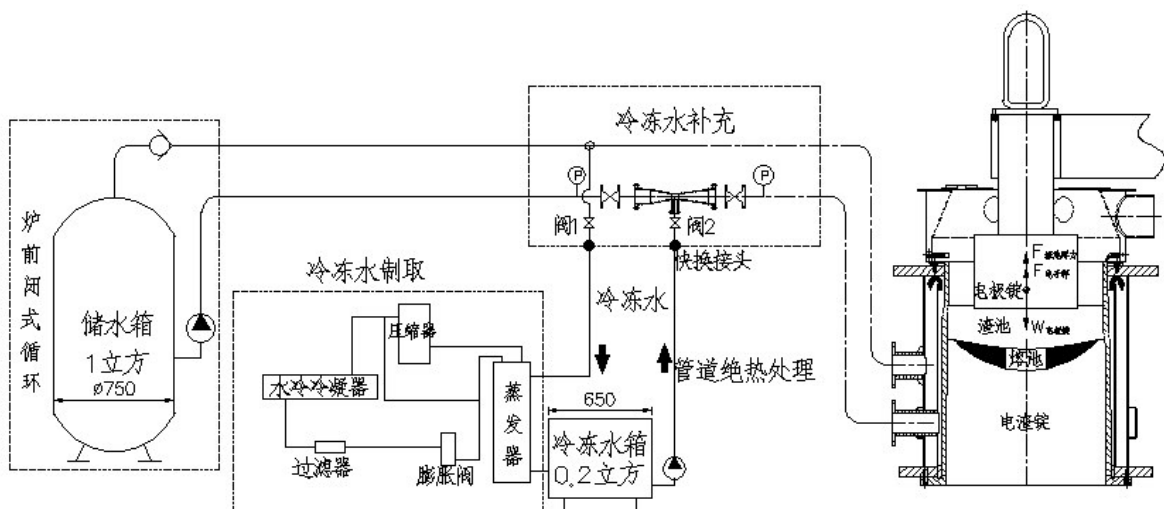


图3 冷冻水补充实现快速冷却示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fast cooling achieved by adding chilled water

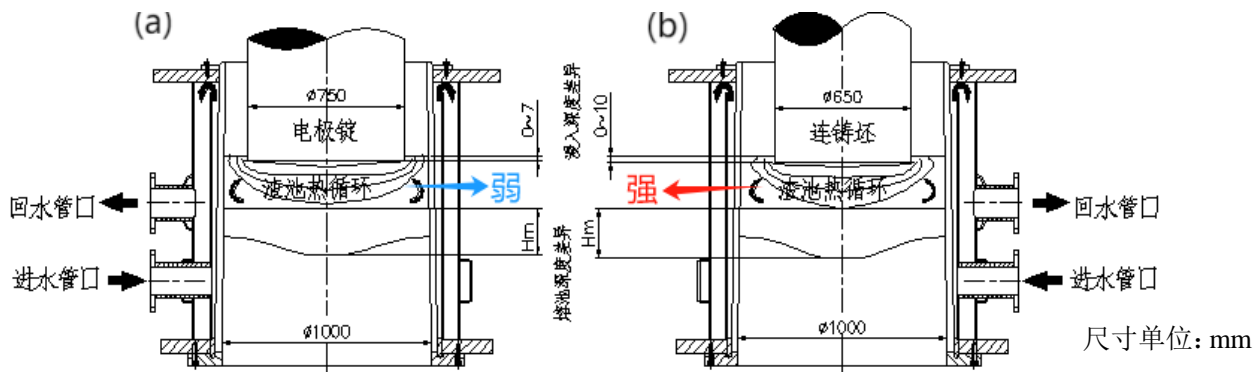


图4 电渣重熔不同填充比对渣池热循环影响:(a)0.75,(b)0.65

Fig. 4 The effect of different filling ratios on the thermal cycle of slag pool in ESR : (a) 0.75, (b) 0.65

行组合控制实现浅平金属熔池,如图5所示,通过渣温补偿控制电渣熔化速度,可实时地获得浅平金属熔池;冷冻水补充快速冷却,使得电渣宏观上获得浅平金属熔池的稳定性。

### 2.1.1 渣温补偿+冷冻水补充操作程序

电渣熔炼开始后,按照渣温补偿+冷冻水补充模式进行电渣重熔,操作程序如图6所示。

①熔炼开始,以渣温 $\geq 1580^{\circ}\text{C}$ 判断,是否进行熔化速度调整,可通过增加电渣U、I的方式,提高熔速,使其渣温能够快速进入 $1580\sim 1680^{\circ}\text{C}$ 区间;

②冶炼周期进行至1/2后,做2个判定:1)如果前后出水温度差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ ,则继续正常冶炼,否则提前开启冷冻水;2)渣温是否在 $1620\sim 1680^{\circ}\text{C}$ 区间,正

常时继续正常冶炼,否则进行熔速调整。

③冶炼周期 $> 2/3$ 时,如果未开启开启冷冻水补充装置,则开启冷冻水补充装置进行快速冷却。

④期间渣温测量继续每隔0.5h测定一次,渣温高于 $1680^{\circ}\text{C}$ ,则进行渣温补偿,减小熔化速度,降低U、I,使得渣温始终维持在合理区间。

⑤电渣熔炼结束后,继续开启冷冻水补充,待结晶器模冷0.5h后,关闭冷冻水补充操作。

### 2.1.2 工艺创新后的工艺实践效果

生产实践中,选择《锻钢冷轧辊辊坯(GB/T 15547-2012)》标准中MC5(对应牌号9Cr5Mo1V)作为电极锭的化学成分见表1。

杂质元素Pb、Sn、As、Sb、Bi $\leq 0.015\%$

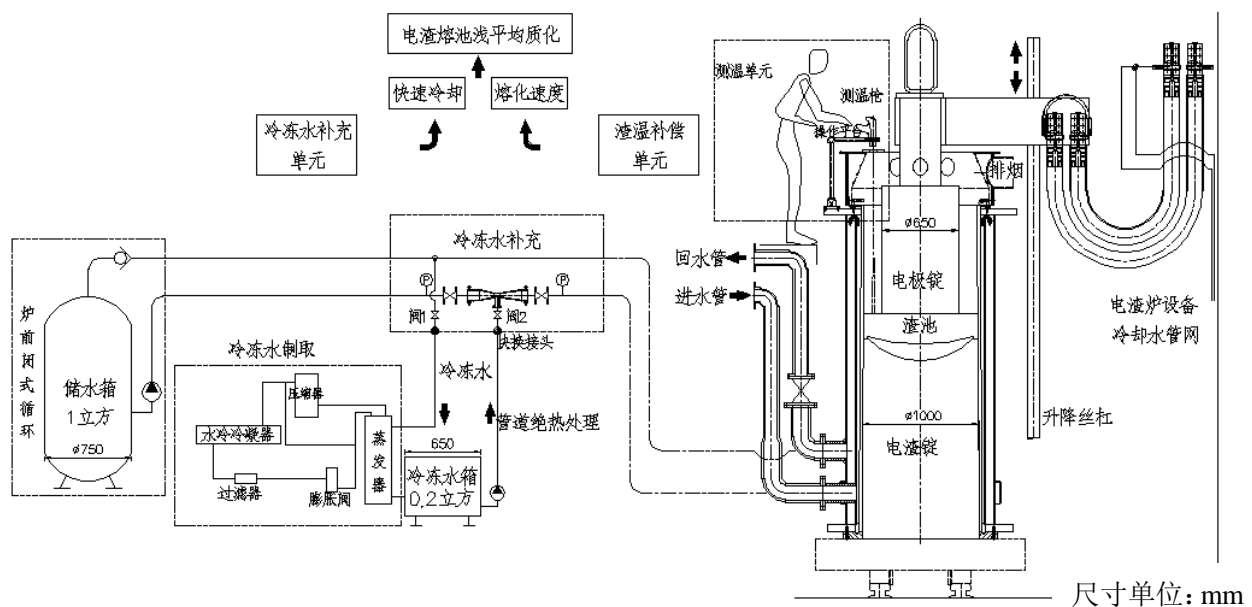


图5 渣温补偿+冷冻水快速补充实现浅平金属熔池

Fig. 5 Compensation of slag temperature+rapid replenishment of chilled water to achieve shallow leveling of metal melt pool

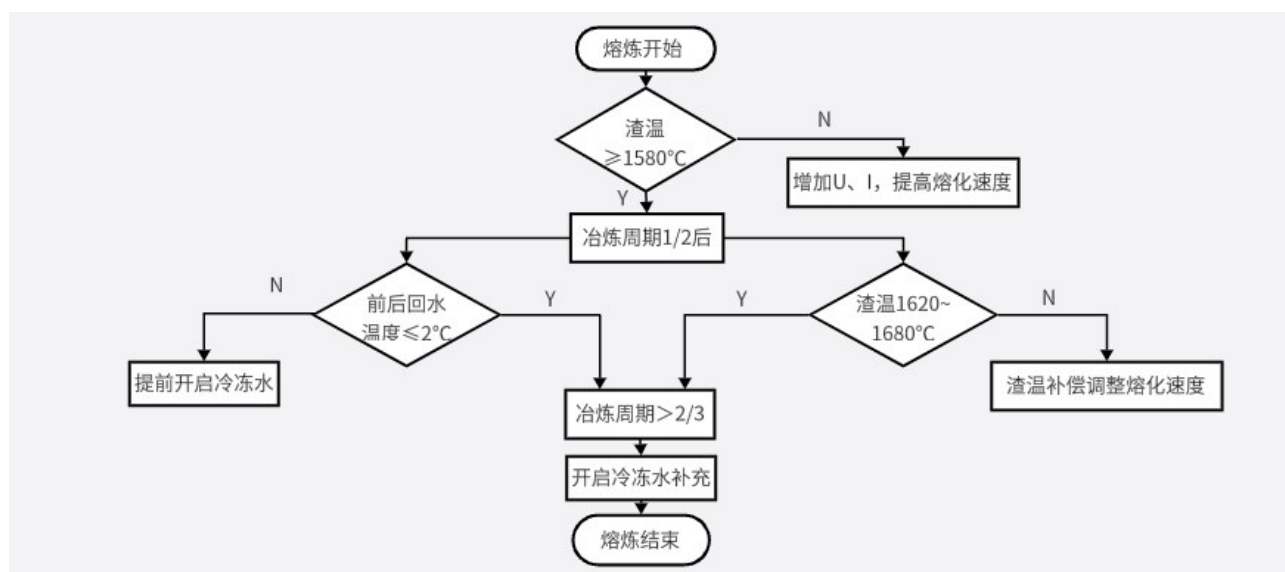


图6 渣温补偿+冷冻水补充程序

Fig. 6 Slag temperature compensation+rapid replenishment program for chilled water

表1 MC5 锻钢冷轧工作辊用钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of MC5 forged steel for cold rolling work roller

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al
标准	0.70~ 0.90	0.25~ 0.65	0.20~ 0.80	≤ 0.015	≤ 0.010	4.50~ 5.50	0.30~ 0.50	0.20~ 0.40	0.05~ 0.15	≤ 0.10	0.020~ 0.035
实际值	0.81	0.46	0.49	0.011	0.003	4.98	0.35	0.28	0.12	0.05	0.025

电渣工艺参数电压U选用40~60V,电流I选用14~16kA,结晶器选用 $\phi 950$ mm/1000mm,锭重10t规格,进行工艺实践,验证电渣渣温和结晶器冷却水变化区间,来验证浅平熔池控制效果。

采用“渣温补偿+冷冻水补充”工艺,经过大量的实践效果如下:

1)电渣渣温控制在1580~1680℃之间,渣池的流动性始终保持活跃状态,熔化速度稳定在 $\pm 25$ kg/h之间。同改进前现场记录数据相比,渣池流动性保持活跃性显著改善,温控制区间通过提前调控熔化速度,没有出现超出范围测量值。

2)冷冻水补充后,结晶器冷却进水温度熔炼开始到熔炼结束温度变化为 $\pm 5$ ℃的线性变化,提前对水温进行调控,电渣锭底冒端的渣皮厚度差比改进前显著减小,实现底冒端冷却效果的一致性。

## 2.2 小充填比凝固过程中的均质化工艺实践

### 2.2.1 充填比参数的工艺优化

电渣充填比优化主要是对电极锭、结晶器直径进行系统化设计。结晶器直径根据电渣锭高径比H/D确定(锻钢冷轧辊用电渣锭H/D取2.0~2.5)。充填比工艺参数进行优化,由改进前充填比0.75优化

设计为改进后填充比0.65,对电极锭直径和高度重新设计。详细参数见表2。

表2 10.0t电渣锭改进前后的填充比

Table 2 Filling ratio of 10.0 t ESR ingot before and after improvement

工艺	电渣锭尺寸/mm		电极锭尺寸/mm		直径填充比	面积填充比
	直径	高度	直径	高度		
改进前	950/1000	2100	750	3450	0.75	0.56
改进后	950/1000	2100	650	4350	0.65	0.42

### 2.2.2 工艺实践改进后效果

填充比工艺参数的优化主要是针对以MC5为典型代表的高合金钢的电渣冶炼。为了检验填充比工艺参数优化后对均质化效果,通过涡流和表面波无损检测,并结合辊颈取片金相检测碳化物级别进行判定。电渣锭经过锻造后,对冷轧辊进行辊颈取片检测液析碳化物级别,辊身精磨后进行涡流软点值、裂纹值检测,以及表面波检测,并按照判定标准进行合格率统计。

改进后(填充比0.65)连续生产冷轧辊105支,并与改进前(填充比0.75)的合格率进行对比,以此

判断电渣冶炼的均质化效果,实践数据如下:

①金相检测抽检 24 支,液析碳化物合格率 88%,比改进前提高 2%;

②表面波检测 105 支,检测合格率 92%,比改进前提升 4%;

③涡流软点值检测 105 支,合格率 80%,比改进前提升 2%;

④涡流裂纹值检测 105 支,合格率 93%,比改进前提升 3%。

液析碳化物、涡流软点和裂纹值及表面波合格改进前后显著得到了提升,从而验证了电渣填充比工艺参数优化后,电渣均质化效果得到改善。

### 3 结论与展望

通过对对锻钢冷轧辊钢电渣重熔工艺进行深入研究,并结合生产工艺实践,高品质锻钢冷轧辊

制造提出了以下三方面技术创新改进。

(1)从电渣重熔的微观及局部角度,电渣重熔的熔化速度加入渣温补偿,将渣温控制在 1 580~1 680 °C,实现了微观层面浅平金属熔池的实时性。

(2)从电渣重熔的宏观及整体角度,通过电渣循环水补充冷冻水冷却,实现了电渣重熔不同冶炼周期的冷却效果;采用文丘里管件补充冷冻水优化了快速冷却,结晶器冷却进水温度熔炼开始到熔炼结束温度变化为 $\pm 5$  °C的线性变化,保证了电渣锭底冒端冷却效果的一致性,实现了宏观层面浅平金属熔池的稳定性。

(3)电渣填充比参数调整至 $0.65\pm 0.05$ ,强化了金属液滴透过渣池过程中细小化和均质化的搅拌效果,改善了电渣凝固均质化的冶金效果。

#### 参考文献

- [1] 姜周华,董艳伍,耿鑫,等. 高品质特殊钢电渣重熔技术的开发和应用[J]. 钢铁, 2023, 58(9): 15-25.
- [2] 李正邦. 电渣冶金的理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [3] 李宝宽,黄雪驰,刘中秋,等. 现代电渣重熔先进技术特征与演进[J]. 钢铁, 2022, 57(6): 1-11.
- [4] 霍振全,常立忠,梁素霞. 10 t电渣炉冶炼工艺与二次电流摆动控制的应用[J]. 特殊钢, 2006, 27(6): 54-56.
- [5] 苏龙丹,王昭,董君伟. 电渣炉冷却水系统的发展[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(z1): 157-160.
- [6] 殷秀文. 电渣重熔热平衡计算及电渣降耗[J]. 特钢技术, 2001, 9(4): 72-75.
- [7] 霍振全,杨立锋. 锻钢冷轧工作辊冶金质量剖析与电渣工艺改进[J]. 特殊钢, 2023, 44(6): 12-18.
- [8] 董艳伍,姜周华,肖志新,等. 电渣重熔工艺参数对钢锭凝固质量的影响[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2009, 30(11): 1598-1601.
- [9] 章大健. 锻造半高速钢中间辊的研究[J]. 江苏冶金, 2002, 30(3): 17-19.
- [10] 李正邦. 电渣冶金设备及技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.