

· 产品研发 ·

核电用钢 316H 电渣重熔氢含量分析与工艺优化



李德军^{1,2}, 葛春钰³, 赵亮^{1,2}, 李海强³, 马强³, 刘磊³

(1 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 鞍山 114009; 2 鞍钢集团钢铁研究院, 鞍山 114009;

3 鞍钢铸钢有限公司, 鞍山 114021)

摘要:为找出电渣重熔过程中电渣锭氢含量变化规律,并在此基础上,对各工序进行优化以实现电渣锭氢含量合格率提高,以核电用钢 316H 为研究对象,依托 15 t 电渣炉对熔炼速度、充填比、渣料成分、渣料加入量、电极初始氢、水蒸气分压相关工艺参数进行分析研究,结果表明,电渣重熔过程中各阶段增氢不同,电渣锭中的氢含量与空气中水蒸气分压的平方根成正比关系;渣料组元中 CaO 能够促进增氢, MgO 能够防止增氢;加大熔炼速度降低渣量,增加充填比,提高电极表面洁净度有利于防止电渣锭增氢;电极初始 $w[\text{H}] < 2 \times 10^{-6}$ 时,电渣重熔过程吸氢较严重,当电极初始 $w[\text{H}]$ 处于 $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$ 时,电渣重熔过程吸氢变弱,当电极初始 $w[\text{H}] > 4 \times 10^{-6}$ 时,电渣重熔过程则会出现脱氢。经过工艺优化后, H 合格率平均达到 97.5%, 较工艺优化前的 94.7% 提高 2.8%。

关键词:电渣重熔; 氢含量; 316H 钢; 增氢; 工艺优化

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00176 **中图分类号:**TF142

Analysis and Process Optimization on Hydrogen Content by Electroslag Remelting of Steel 316H for Nuclear Power

Li Dejun^{1,2}, Ge Chunyu³, Zhao Liang^{1,2}, Li Haiqiang³, Ma Qiang³, Liu Lei³

(1 State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, China;

2 Iron & Steel Research Institutes of Ansteel Group Corporation, Anshan 114009, China;

3 Ansteel Foundry Co., Ltd., Anshan 114021, China)

Abstract: In order to find out hydrogen content change law in ESR ingot during electroslag remelting, and on the basis of each process optimize to improve the electric slag ingot hydrogen content qualified rate, nuclear power steel 316H is taken as the research object to study processing parameters such as melting speed, filling ratio, slag ingredients, amount of slag added, initial hydrogen of electrode and partial pressure of water vapor by using a 15 ton electroslag furnace in this paper. The results show that hydrogen addition is different in each stage of electroslag remelting, the hydrogen content in ESR ingot is proportional to the square root of water vapor pressure in the air. The CaO can promote hydrogen increase and MgO can prevent hydrogen increase in the slag ingredients. Increasing the melting rate, reducing the amount of slag, increasing the filling ratio and improving the cleanliness of the electrode surface are beneficial to prevent hydrogen of electroslag ingot increase. When the initial hydrogen of the electrode is less than 2×10^{-6} , the hydrogen absorption of the remelting process of the electroslag is more serious. When the initial hydrogen of the electrode is in the range of $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$, the hydrogen absorption of the electroslag remelting process becomes weaker. When the initial hydrogen of the electrode is greater than 4×10^{-6} , the electroslag remelting process will appear dehydrogenation. After the process optimization, the average qualified rate of hydrogen reaches 97.5%, which is 2.8% higher than 94.7% before the optimization.

Key Words: Electroslag Remelting; Hydrogen Content; 316H Steel; Hydrogenation; Process Optimization

电渣重熔虽是生产高合金高附加值钢种的有效方法,但是在生产过程中也存在许多重要问题需要解决,其中之一就是“增氢”问题^[1-3]。由于氢原子半径非常小,很容易以原子状态进入到钢当中,达到一定条件后,氢原子可以转变成氢分子或氢化物破坏钢基体的连续性,给钢的各种性能造成损伤。根据损伤的形式不同,通常可将氢致损伤分为氢脆、氢腐蚀、氢化物、白点、发纹、氢鼓泡等几种形

式^[4-7]。为了分析电渣重熔过程中熔炼速度、充填比、渣料成分、渣料加入量、电极内氢的浓度、水蒸气分压等因素对电渣重熔钢锭氢含量的影响,对核电用钢 316H 进行统计分析。根据分析结果对 316H 钢电渣重熔工艺进行优化,将电渣锭中的氢控制在要求范围内的比例由原有平均 94.7% 提高至 98% 以上,使 316H 钢电渣锭质量得到了大幅提升。

基金项目: 企业揭榜挂帅项目(G2021ASC10501)

作者简介: 李德军(1976—),男,博士,高级工程师;

E-mail: 344305353@qq.com;

收稿日期: 2024-07-15

1 钢厂生产情况

核电用奥氏体不锈钢 316H 是钢厂电渣重熔生产的主要钢种之一,电渣重熔工艺为 15 t 电渣炉固定式结晶器板坯生产工艺,年产量在 2 600 t 以上。对近几年 316H 电渣锭的氢含量进行统计分析,其结果见表 1。

表 1 2020~2022 年 316H 钢的氢合格率指标情况

Table 1 316H steel hydrogen qualified rate indicator situation from year 2020 to 2022

年份	产量/t	氢超量/t	氢合格率/%	平均氢合格率/%
2020	2 655	169.9	93.6	
2021	2 610	109.6	95.8	94.7
2022	2 685	142.3	94.7	

由于氢合格率相对较低,判废或降级处理量增加,不仅给生产成本带来了很大压力,也削弱了产品市场竞争力。

2 工业试验条件

钢厂电渣炉为 15 t 固定同轴式,结晶器尺寸为 (350~400) mm×(1 100~1 500) mm×(3 000~3 500) mm。重熔过程电压为 40~50 V,电流为 3 000~6 000 A。试验渣料分别为:1[#]—100%CaF₂; 2[#]—70%CaF₂-30%Al₂O₃; 3[#]—65%CaF₂-30%Al₂O₃-5%MgO; 4[#]—65%CaF₂-30%Al₂O₃-5%CaO。电渣重熔熔炼速度为 380~420 kg/h,渣料加入量为 600~900 kg,充填比为 0.6~0.8,空气中水蒸气分压为 400~4 000 Pa。为了测定氢的含量,本研究中测氢采用的是气相色谱法,首先在电渣锭的不同部位进行取样,之后通过线切割的方式将其加工成测氢试样,最后完成不同部位试样氢含量测定。

3 增氢因素统计与分析

3.1 空气湿度影响

在电渣重熔过程中,空气的湿度对增氢影响很大,虽然许多学者对气氛中的湿度影响进行了大量研究^[8-10],但是对不同阶段氢含量变化的研究相对较少。空气湿度通常用水蒸气分压来表征。为了分析不同阶段电渣锭的氢含量,对尺寸为 350 mm×1 200 mm×3 000 mm 的电渣锭在不同水蒸气分压下的不同位置进行了取样,以表征电渣重熔不同阶段的氢含量变化情况,其结果如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,在不同空气湿度下,在电渣生产的初始阶段即在电渣锭距离底部的高度为

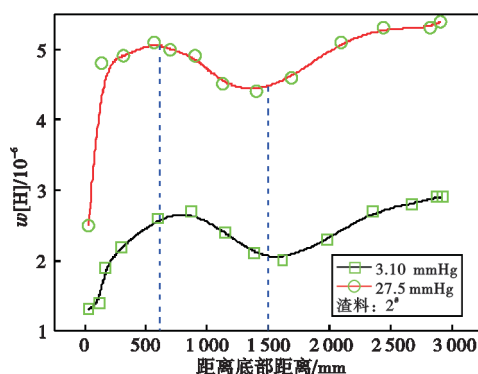


图 1 不同阶段氢含量变化情况

Fig. 1 Changes in hydrogen content at different stages

600 mm 时,电渣锭中的氢含量呈升高趋势,随后在距离底部 600~1 500 mm 范围内出现缓慢降低,在距离底部 1 500 mm 之上的区域又呈缓慢升高并趋于稳定。这种变化趋势主要是由于在初始阶段结晶器的底部及侧壁温度较低,空气中的水分会有一部分凝结在其表面,在电渣重熔生产时,这部分水在高温下会分解出氢而被钢液吸收,随着电渣锭高度的增高,氢含量呈现出升高趋势,当高度达到 600 mm 时,氢含量达到最大。此时,在结晶器底部由于高温电渣锭已经形成,结晶器的侧壁及气相中的水分会被高温的初始电渣锭蒸发排出,此阶段电渣锭中的氢含量呈现出降低趋势,但是当其高度升高至 1 500 mm 时,外部空气容易向结晶器内部扩散并逐渐趋于平衡态,空气中的水蒸气被逐渐吸收导致氢含量增加并趋于稳定。对结果进一步分析可以看出,在其他条件相同,空气中的水蒸气分压在 426、3 663 Pa,即空气中水蒸气分压比为 1:9 下,对应的电渣锭中氢含量比约为 1:3,这表明电渣锭中的氢含量与空气中水蒸气分压的平方根成正比关系。

李正邦在不同气氛下,对表 2 的 5 种渣料进行了 1Cr18Ni9Ti 电渣锭氢含量影响分析,其结果如图 2 所示^[11]。

表 2 试验用渣料成分(质量分数)

Table 2 Test slag ingredients								%
渣系编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	CaF ₂	
1	33~36	11~15	<1.5	4~7	5~7	21~26	13~19	
2	<5	-	-	-	-	-	>92	
3	<2	-	-	-	-	-	>98	
4	<2	30~40	-	-	-	-	60~70	
5	<2	-	-	18~30	-	-	60~75	

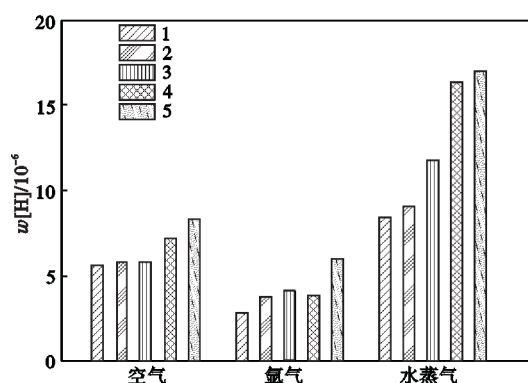


图 2 5 种渣系各种气氛下 1Cr18Ni9Ti ESR 钢锭中的氢含量
Fig. 2 Hydrogen content in 1Cr18Ni9Ti ESR ingot under varied atmosphere

从图 2 中可以看出,在电渣重熔过程中,气氛的不同对电渣锭增氢有很大影响,同时也表明气氛中的水蒸气分压对电渣锭的增氢有很大影响。

3.2 渣料成分影响

为了分析渣料在电渣重熔过程中对增氢的影响,在空气水蒸气分压为 400~466 Pa 的条件下,对 1[#]~4[#]四种试验渣料进行试验分析,之后在距离底部 300 mm 的高度位置为起点,每隔 100 mm 进行取样检测氢含量,其结果如图 3 所示。

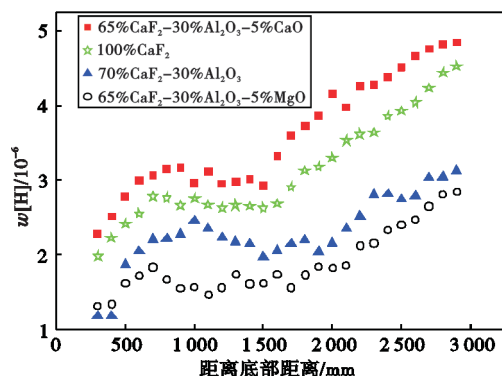
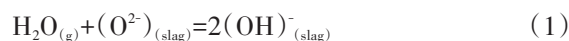


图 3 渣料成分对氢含量变化影响
Fig. 3 Effect of slag ingredients on hydrogen content

通过对不同渣料对氢含量变化的统计情况来看,4[#]渣料 65%CaF₂-30%Al₂O₃-5%CaO 在不同阶段的增氢都非常明显,3[#]渣料 65%CaF₂-30%Al₂O₃-5%MgO 的不同阶段增氢相对其他渣料最低,1[#]渣料 100%CaF₂与 2[#]渣料 70%CaF₂-30%Al₂O₃处于 3[#]渣料与 4[#]渣料之间,在相同阶段 4[#]渣料的增氢约是 3[#]渣料的 2 倍。对不同渣料成分对增氢的影响分析如下,通过比较发现 3[#]渣料与 4[#]渣料成分都含有相同

组元 CaF₂和 Al₂O₃且其含量相同,唯一区别就是 3[#]添加的是 MgO,4[#]添加的是 CaO,表明渣料中的 CaO 极易引起钢锭增氢。由于渣料在与空气接触后,空气中的水分会被渣料中的 CaO 吸收,在渣中会发生式 (1) 的反应。



在高温下渣中的 (OH)⁻与钢液接触后会发生式 (2) 的反应。



通过式 (1) 与式 (2) 的反应,可将空气中的水分输送到钢液当中造成增氢。为了分析渣中加入 MgO 后能够抑制钢锭增氢,姜周华^[12]对其进行了研究,发现在渣中添加一定量的 MgO 后,能够在渣池的表面生成致密的半凝固膜,可以有效防止空气中氧、氮、氢向渣中扩散。但是渣中添加 MgO 容易导致熔渣粘度升高,不利于夹杂物的去除,建议渣中添加量不能超过 15%。

3.3 熔炼速度影响

熔炼速度是电渣重熔工艺中重要的指标参数,直接关系到生产效率。为了研究熔炼速度对电渣锭增氢的影响。在其他条件基本相同下,对 2[#]渣料在 385、415 kg/h 两种不同熔炼速度下的氢含量变化情况进行统计分析,其结果如图 4 所示。

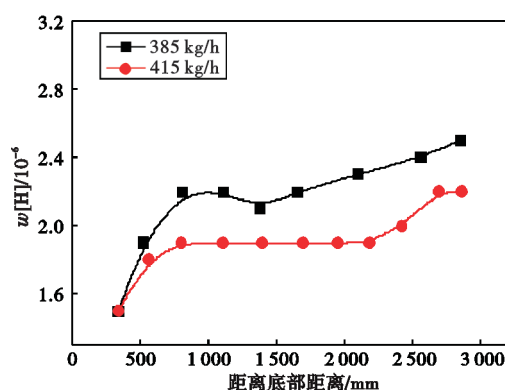


图 4 熔速对氢含量影响
Fig. 4 Effect of melting speed on hydrogen content

从生产的统计结果来看,熔炼速度越大越有利于抑制钢锭增氢,从理论上来说,当熔炼速度无限增大时,则电渣锭的氢含量就会接近自耗电极初始的氢含量。但是在实际生产中,熔炼速度过快,不利于夹杂物去除同时对凝固组织也有一定影响。为了能够使氢含量控制在要求范围内,在保证夹杂物要求下,可将熔炼速度控制在 400 kg/h。

在电渣重熔过程中,渣料加入量是重要的参数,渣料加入量多渣池的厚度和热损失都会相应增加,导致渣池有效重熔功率变小,熔速也会随之降低。相反渣料加入量少,渣池厚度减薄,夹杂物容易去除和上浮,但如果渣料加入量过少,则会导致自耗电产生明弧,金属容易氧化烧损,表面质量也会大幅降低。为了分析渣料加入量对钢锭增氢的影响,在条件基本相同下,对3#渣不同渣料加入量的增氢情况进行统计分析,其结果如图5所示。

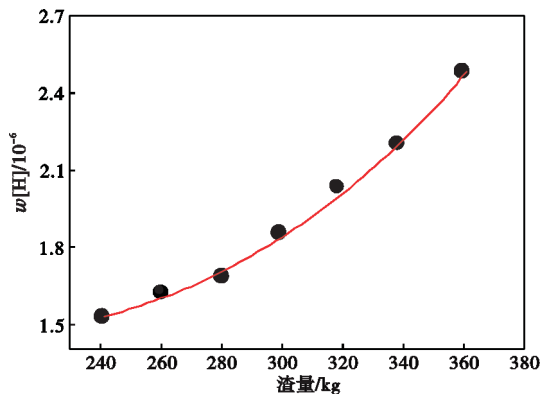


图5 渣料加入量对增氢的影响

Fig. 5 Effect of slag amount on hydrogen increase

从统计的结果看,随着在电渣重熔过程中渣料加入量的增加,钢锭的氢含量也随之增加,通过对数据的回归可得出,钢锭的氢含量与加入的渣量有如式(3)的对应函数关系。

$$[H] = 5.5 - 4.2 / [1 + e^{(W - 421)/64}] \quad (3)$$

式中, $[H]$ 为钢锭的增氢量, 10^{-6} ; W 为渣量, kg。

渣量增加容易造成渣池吸收空气中的水分,从而导致钢锭增氢严重,但是如果渣量过少,正如前所述势必会造成钢中易氧化元素烧损增加,从而造成成本增加。因此,在渣量控制上还要兼顾各方面的影响,使之都能满足产品质量要求,为了找到这种兼顾关系,对生产中氢含量、表面质量及烧损率都合格的不同断面(300~800)mm×(900~2 000)mm电渣锭所对应的渣量进行统计,其结果如图6所示。

通过渣量与结晶器横截面积的统计可以看出,合适的渣量与结晶器横截面积成很好的线性关系,拟合后可得出渣量与结晶器横截面积的函数关系式如式(4)所示。

$$W = 794S - 72 \quad (4)$$

式中, W 为渣量, kg; S 为结晶器横截面积(可用范围为0.25~1.6), m^2 。

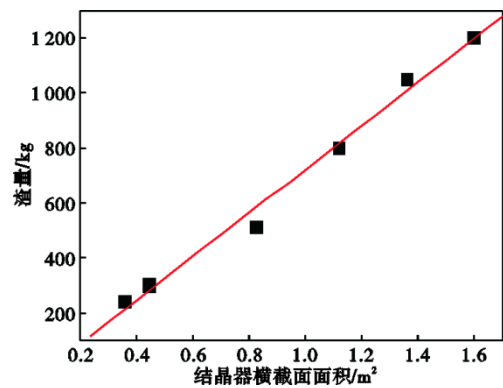


图6 结晶器横截面积与渣量关系

Fig. 6 Relation between the cross sectional area of the mold and slag amount

结合式(3)与式(4),可以看出结晶器截面积大即大尺寸电渣锭越容易造成电渣锭增氢,所以在生产大型电渣锭时,一定要更加严格控制各道工序,防止增氢超标导致电渣锭质量不合。

3.5 充填比影响

充填比很多文献^[13-16]上采用电极直径与结晶器直径的比值,李正邦^[17]认为这是不确切的,因为对于一些非圆形截面的电渣锭,这个比值就无法进行,只能将其折算成当量直径进行计算,这势必会出现偏差,他认为充填比采用电极的横截面积与结晶器的横截面积的比值更准确一些。为此本研究中所述的充填比采用的是电极横截面积与结晶器横截面积的比值。在以3#渣为渣料的条件下,分析了充填比对钢锭增氢影响,其结果如图7所示。

从图7可以看出,虽然氢含量随着充填比的增加而降低,但也表现出在不同充填比区间降低的趋势略有不同的变化规律。在本工艺条件下,充填比<0.65范围内,随着充填比增大,抑制增氢较明显;当充填比为0.65~0.75时,抑制增氢的效果减弱;当充填比>0.75时,从趋势上看,反而随着充填比的增大,增氢量呈现出略微上涨趋势。这主要是因为充填比低于0.65,不仅液渣池表面与空气接触面积增大,同时渣池表面也容易活跃,导致了空气中的水蒸气大幅传输进入渣中引起增氢。当充填比为0.65~0.75时,渣池表面积缩小,降低了与空气接触面积,空气中水蒸气传输通道受阻,起到了抑制增氢效果。随着充填比进一步增大,增氢量略微上涨,这主要是因为充填比增大后,电极表面也有所增加,表面容易残留铁锈和污物,导致增氢。

3.6 电极影响

电极表面洁净度和初始氢含量对电渣锭的增

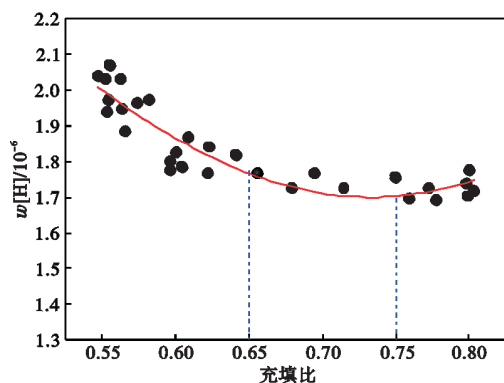


图 7 填充比对增氢影响

Fig. 7 Effect of filling ratio on hydrogen increase

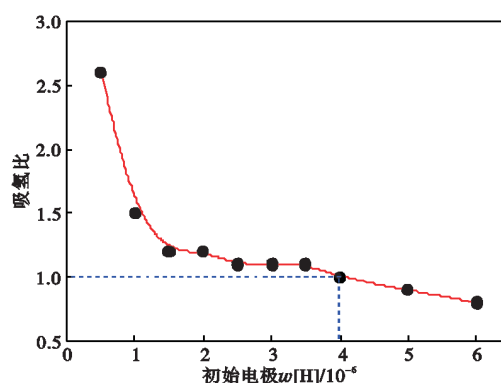


图 9 电极初始氢对吸氢影响

Fig. 9 Effect of initial electrode hydrogen on hydrogen absorption

氢也是比较明显的,对同一批次的初始电极进行了砂轮打磨和抛丸两种方式清理,其电渣锭中的增氢如图 8 所示。为了表述电极中初始氢含量对电渣锭增氢的影响,将电渣锭中氢与电极中初始氢的比值定义为吸氢比。由于电渣锭上、中、下各部分氢含量有所不同,为了便于比较分析,将电渣锭中上、中、下三部分氢含量平均值作为电渣锭的氢含量。电极初始氢含量对电渣重熔过程中的吸氢比的变化曲线氢如图 9 所示。

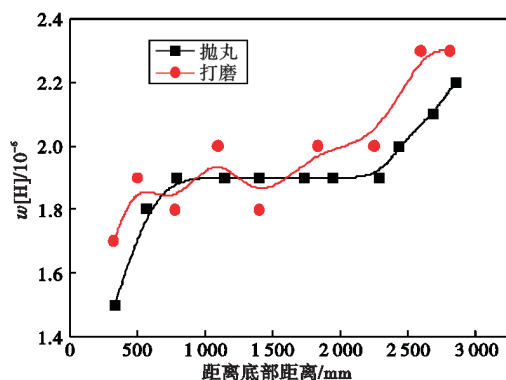


图 8 电极表面清洁方式对增氢影响

Fig. 8 Effect of electrode surface cleaning method on hydrogen increase

两种不同电极表面清理方式对电渣锭增氢也是有一定的影响,从图 8 可以看出,打磨处理要比抛丸处理容易引起增氢,电极表面通过打磨处理后,在整个电渣重熔阶段增氢量波动相对比较频繁,而经过抛丸处理的电极其增氢波动较少曲线相对较平滑。这主要是电极表面打磨过程中,由于试验中所用电极是由连铸坯加工而成,而连铸坯在表面及角部存在深浅不一的振痕沟部分还有结疤,采用砂轮打磨很难将其深度较大的振痕沟内部杂质彻底

清理干净,而这部分杂质含有铁锈是引起增氢的主要原因。通过抛丸方式可以将振痕沟内的杂质清理干净,有效地防止了钢锭增氢。试验中发现在电渣锭的中上部氢含量相对比较稳定,在底部和上部氢含量随着电渣锭高度的增加而出现氢升高趋势,这主要是因为电渣重熔初始时刻,结晶器铜板表面会有一部分潮气导致增氢,随着电渣重熔过程的进行,铜板的部分潮气会进入到电渣当中导致增氢现象。当金属液池上升到一定高度后,进入到液池顶部气氛中的水汽也逐渐达到稳定,随着金属液池的继续提升,外部的的气氛与金属液池顶部接触能力增强,又出现了氢增高趋势。

在本研究条件下,电渣重熔过程中,吸氢比随着电极初始氢含量的增高而降低。从统计的结果来看,在电极初始 $w[\text{H}]$ 在低于 2×10^{-6} 时,吸氢比增大趋势明显,表明电极中初始氢含量越低增氢能力越强;在电极初始 $w[\text{H}]$ 为 $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$ 时,随着电极初始氢的增加吸氢比逐渐减小但依然 > 1 ,表明在此范围内整个电渣重熔过程还有增氢趋势,只是增氢能力逐渐减弱;当电极初始 $w[\text{H}] > 4 \times 10^{-6}$ 时,吸氢比 < 1 即电渣锭中氢含量低于电极初始氢含量,在电渣重熔过程中出现了脱氢。需要注意的是电渣重熔过程中是增氢还是脱氢,与诸多因素有关,本试验只能表明当电极初始氢含量达到一定程度时,电渣过程会出现脱氢现象。

4 工艺措施优化及效果

4.1 工艺优化

为了进一步提高 316H 钢氢合格率,根据各因素的影响分析结果,对工艺进行了优化。在生产对 $w[\text{H}]$ 不能高于 3×10^{-6} 的钢种时,要保证空气中的水

蒸气分压不能高于 413 Pa,使用的渣料进行烘烤处理,杜绝在阴雨天气组织生产;将原有二元渣料 70%CaF₂-30%Al₂O₃ 调整为三元渣料 65%CaF₂-30%Al₂O₃-5%MgO,将渣量由原有的 320 kg 控制到 280~300 kg;通过优化电参数,将电极熔炼速度由原有的(380±5)kg/h 控制在(410±5)kg/h;将充填比由原 0.65~0.7 调整到 0.75~0.8,初始电极氢含量要控制在成品要求的下限,电极表面要进行抛丸洁净处理,杜绝振痕沟内有氧化铁皮等杂质。

4.2 效果

通过对上述工艺措施的优化,对 2023 年各工艺环节优化后各月份 316H 电渣钢锭氢合格率进行统计,结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出,通过各项工艺措施的优化,氢合格率平均达到 97.5%,较工艺优化前的 94.7% 提高了 2.8%。

5 结论

(1)对于固定式电渣重熔电渣钢锭,在其电渣重熔过程中各阶段的增氢是不同的,在距离底部 600 mm 的初始阶段增氢明显,在 600~1 500 mm 阶段增氢呈现出降低趋势,在 >1 500 mm 后,又呈现出升高趋势并趋于平稳,同时得到电渣锭中的氢含量与空气中水蒸气分压的平方根成正比关系。

(2)三元渣料 65%CaF₂-30%Al₂O₃-5%MgO 较二元渣料 70%CaF₂-30%Al₂O₃ 具有更好的抑制增氢能

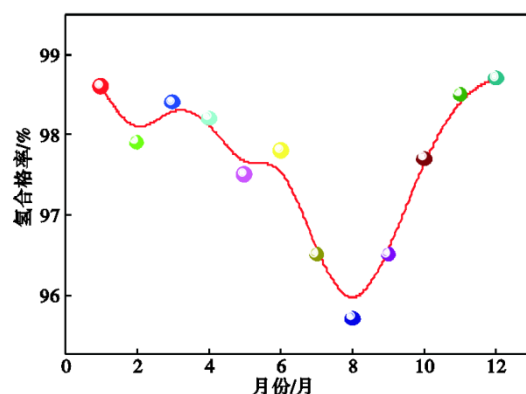


图 10 工艺优化后 316H 氢合格率

Fig. 10 316H hydrogen qualified rate after process optimization

力,渣料组元中 CaO 能够促进增氢, MgO 能够抑制增氢。

(3)在满足表面质量要求的前提下,将熔炼速度由(380±5)kg/h 调整到(410±5)kg/h,渣量由原有的 320 kg 降至 280~300 kg,充填比增至 0.75 以上,电极表面采用抛丸清理,能够有利于抑制电渣锭增氢。

(4)电极初始氢含量对电渣重熔过程中吸氢比有重要影响,当电极初始 $w[\text{H}] < 2 \times 10^{-6}$ 时,电渣重熔过程吸氢较严重,当电极初始 $w[\text{H}]$ 处于 $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$ 时,电渣重熔过程吸氢变弱,当电极初始 $w[\text{H}] > 4 \times 10^{-6}$ 时,电渣重熔过程则会出现脱氢。

参考文献

- [1] 黄兴涛,童英豪. 干燥空气保护法在电渣重熔炉上应用与实践[J]. 特钢技术, 2018, 24(2): 44-47.
- [2] 郭中华,郭波,王松伟,等. 保护气氛电渣重熔对 DZ2 高速车轴钢成分及夹杂物的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(1): 19-24.
- [3] 常立忠,项森苗,徐涛,等. 15-7PH 不锈钢电渣重熔过程夹杂物的行为[J]. 过程工程学报, 2023, 23(2): 244-253.
- [4] 徐秀清,王玮,陈之腾,等. 加氢换热器用 321 不锈钢、镍基合金 825 氢脆敏感性研究[J]. 材料导报, 2022, 36(14): 166-171.
- [5] 王学敏,邓叙燕,冯莹. $\phi 168.3 \text{ mm} \times 7.92 \text{ mm}$ X70QS 抗硫无缝钢管的生产实践[J]. 特殊钢, 2018, 39(4): 43-47.
- [6] 侯敬超,赵国昌,吴艳阳,等. 高品质 980 mm \times 1 960 mm 电渣扁锭轧制 164 mm \times 1 700/1 806 mm 12Cr2Mo1VR 钢板研发[J]. 特殊钢, 2022, 43(3): 47-51.
- [7] 刘晨洋,任英,任强,等. 电流密度对 DH980 高强钢氢扩散及氢脆行为的影响[J]. 钢铁研究学报, 2023, 35(11): 1394-1401.
- [8] 常立忠,李正邦. 电渣重熔过程中氢行为的分析及控制[J]. 钢铁研究, 2007, 35(3): 24-26.
- [9] 向大林,朱孝渭,王可武. 200 吨电渣炉的低氢控制及氢的行为[J]. 钢铁, 1991, 26(7): 22-23.
- [10] 耿鑫,姜周华,刘福斌,等. 电渣重熔过程中夹杂物的控制[J]. 钢铁, 2009, 44(12): 42-45.
- [11] 李正邦. 电渣熔铸[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 66.
- [12] 姜周华. 电渣冶金学[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 135.
- [13] 闫俊,向顺华. 充填比对电渣熔合工艺制造复合特厚板坯的影响[J]. 宝钢技术, 2014(3): 23-29.
- [14] 贺铸,刘艳贺,刘双,等. 电极充填比对电渣重熔过程影响的数值模拟[J]. 特殊钢, 2014, 35(4): 16-19.
- [15] 王晓花,厉英. 电渣重熔过程渣池流场数值模拟[J]. 材料与冶金学报, 2014, 13(2): 133-137.
- [16] 董艳伍,陈浩禹,李想,等. 电渣重熔过程中熔滴滴落的影响因素[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(11): 1564-1568.
- [17] 李正邦. 电渣冶金的理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 169.