



锻钢冷轧工作辊冶金质量剖析与电渣工艺改进

霍振全¹, 杨立锋²

(1 邢台德龙机械轧辊有限公司技术质量部, 邢台 054000; 2 邢台技师学院基础部, 邢台 054000)

摘要:对锻钢冷轧工作辊的冶金质量缺陷的夹杂物超标、碳化物偏析及表面随机缺陷(DRS)三个典型问题进行深入研究和剖析。通过采用改进电渣密封罩和电渣气氛保护,氧浓度在 0.001 0% 左右,夹杂物超标率降低 4%~5%;通过电渣水冷强化对水质和进水温度的改善,控制进水温度 15~35 °C,进回水水温差 4~5 °C,液析碳化物偏析合格率接近 100%;通过电渣锭细长化改变电渣锭的规格,表面随机缺陷 DRS 合格率由 85% 提升至 92%,冷轧工作辊冶金质量得到有效改善。

关键词:冷轧工作辊冶金质量;电渣气氛保护改进;电渣水冷强化改善;电渣锭细长化改变

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00068 **中图分类号:**TF142

Analysis of Metallurgical Quality of Forged Steel Cold Rolling Work Roll and Improvement of ESR Process

Huo Zhenquan¹, Yang Lifeng²

(1 Technical Quality Department, Xingtai Delong Machinery Roll Co., Ltd., Xingtai 054000, China;
2 Basic Department, Xingtai Technician College, Xingtai 054000, China)

Abstract: The three typical problems of metallurgical quality defects of forged steel cold rolling work rolls, including inclusion exceeding the standard, carbide segregation and surface random defects (DRS), were thoroughly studied and analyzed. By adopting the improved ESR sealing cover and atmosphere protection, the oxygen concentration was around 0.001 0%, and the inclusion exceeding rate was reduced by 4%-5%; Through the improvement of water quality and inlet water temperature by water cooling strengthening of electric slag, achieving a control range of inlet temperature of 15-35 °C, inlet and outlet water temperature difference of 4-5 °C, and a qualified rate of liquid carbide segregation was close to 100%; The specification of the ESR ingot was changed by the elongation of the ESR ingot, the DRS qualification rate for surface random defects has increased from 85% to 92%, and the metallurgical quality of the cold rolling roll is effectively improved.

Key Words: Metallurgical Quality of Cold Rolling Work Roll; Improvement of ESR Atmosphere Protection; Perfected of ESR Water Cooling Strengthening; Change of ESR Ingot Elongation

锻钢冷轧工作辊是冷轧机的主要消耗部件,其质量的好坏,尤其是冷轧工作辊冶金质量,对冷轧板材的质量、成本、产量起着非常重要的作用。随着国内经济的飞速发展和经济转型,汽车、家电等行业所需要的冷轧薄板用钢对质量要求越来越高,轧机所用的冷轧辊材料更新换代速度加快,因此对冷轧工作辊的冶金质量提出了更高的要求。

锻钢冷轧工作辊最初是基于 GCr15 型轴承钢(含 1.0%C 和 1.5%Cr,对应美国钢号 AISI52100)材质中演化而来^[1],文中冷轧辊化学成分依据《锻钢冷轧辊辊坯(GB/T 15547—2012)》标准^[2]选择 MC5(对应牌号 9Cr5Mo1V),化学成分见表 1。

成熟的制造流程为冶炼浇注→电渣重熔→锻造成型→锻后热处理→粗车加工→双频淬火热处

理→最终加工。其中冶炼浇注、电渣重熔和锻造成型是影响锻钢冷轧工作辊冶金质量的主要工序环节。

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 forged steel MC5 for cold rolling work rolls

%						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
0.70 ~ 0.90	0.25 ~ 0.65	0.50 ~ 0.80	4.50 ~ 5.50	0.30 ~ 0.50	0.20 ~ 0.40	0.05 ~ 0.15

主要针对锻钢冷轧工作辊冶金质量中非金属夹杂物、液析碳化物和表面随机缺陷三个方面进行剖析,深入地进行定性和定量分析,从电渣重熔气氛保护改进、凝固水冷强化改善和锭型细长化改

变,针对性地进行电渣工艺改进,改善提高冷轧辊冶金质量。

1 锻钢冷轧工作辊冶金质量的剖析

锻钢冷轧辊在生产制造中,需要进行非金属夹杂物和液析碳化物检测,并按照相关标准进行分级和评定^[2-4],即冷轧工作辊产品的主要技术指标。

冷轧工作辊在以上的基础上又增加了辊身表面不允许有表面缺陷^[5],为冷轧辊制造厂家及冷轧辊用户检测主要项目。表面随机分布的细小缺陷(A Small Defect on a Randomly Distributed Surface,简称DRS)通过表面波探伤检测评定。

解剖用冷轧辊的工艺制造流程:30 t EAF 初炼+45 t LF/VD 精炼→模铸(G=10 t)电极锭(直径 ϕ 750 mm)→10 t ESR(直径 ϕ 950 mm/1 000 mm 电渣锭)→45MN 锻造压机(冷轧辊直径 ϕ 470 mm,辊身长度1 780 mm)→粗加工检测非金属夹杂物和液析碳化物→最终加工辊身表面波检测DRS。

1.1 锻钢冷轧辊中非金属夹杂物

锻钢冷轧辊在轧制过程中主要承受弯曲载荷、扭转载荷,并受到冷轧坯料的冲击,受力情况复杂,基体的冶金质量至关重要,尤其是与非金属夹杂物

有关的钢的洁净化。从生产流程溯源主要发生在铸造电极锭和电渣重熔两个冶炼过程。

铸造电极锭(直径 ϕ 750 mm)沿径向方向解剖,进行夹杂物演变规律研究,发现电极锭的夹杂物颗粒较大,且呈尖角状居多,如图1(a)所示。电渣锭(直径 ϕ 950/1 000 mm)沿径向解剖,夹杂物数量和大小显著减少,颗粒明显减小弥散化,形貌呈圆角状居多,经过电渣重熔渣洗后的夹杂物形貌,如图1(b)所示。

对电渣重熔后的DS类单颗粒球形夹杂物(Selected Area 1)做扫描电子显微镜(SEM)能谱(EDX)元素定量定性分析,如图2所示,主要有O、Mg、Al、Ca等元素,构成钙铝酸盐($\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3$)和镁铝尖晶石($\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3$)非金属类化合物,为典型的氧化物夹杂。

经研究证明^[6-7],经过电渣重熔后夹杂物总体含量明显下降,大颗粒夹杂物数量和尺寸显著降低,重熔前后夹杂物类型没有变化,但含Al球形夹杂物占比增加。生产实践表明^[8],电渣重熔后钢中的[O]含量有所增加,与钢中的[Al]生成钙铝酸盐($\text{CaO}+\text{Al}_2\text{O}_3$),成为其他类别夹杂物的吸附核心,造

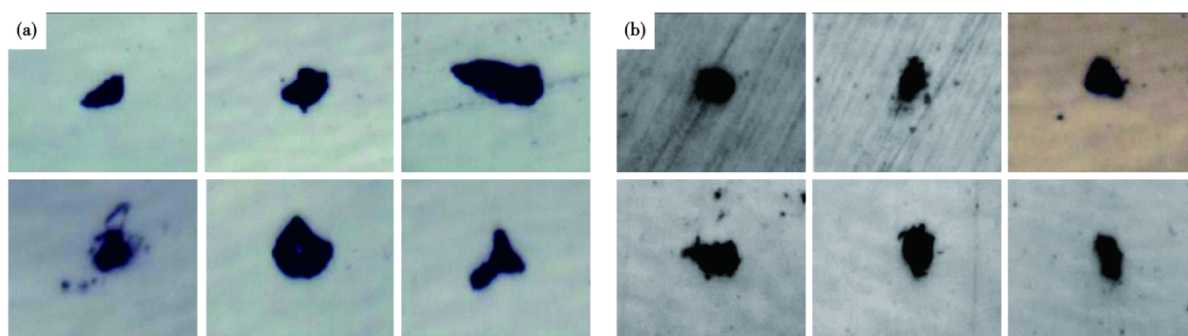


图1 DS夹杂物形貌和大小:(a)电极锭(500 \times), (b)电渣锭(500 \times)

Fig. 1 Morphology and size of DS inclusions : (a) electrode ingot (500 \times) , (b) electroslag ingot (500 \times)

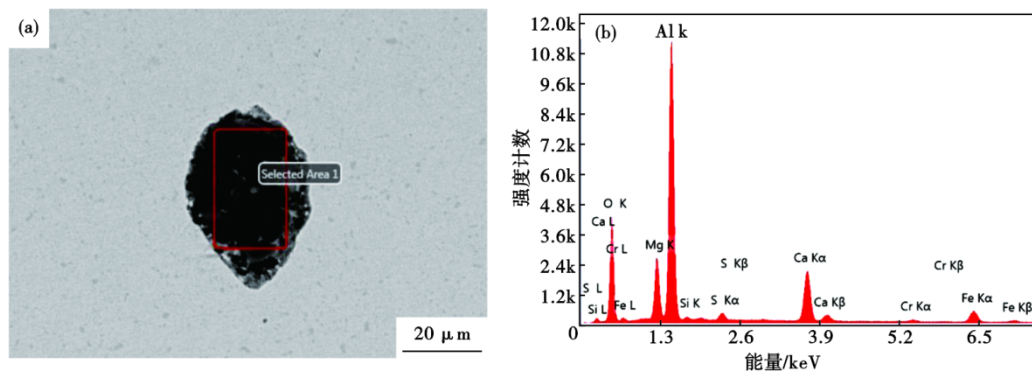


图2 电渣锭DS类夹杂物扫描电镜能谱分析:(a)SEM图,(b)Spot 1的EDS图

Fig. 2 SEM analysis of DS inclusions of ESR ingots : (a) SEM , (b) EDS of Spot 1

成夹杂物超标。电渣重熔过程中的气氛保护,可以降低和减少氧化性气氛和氧势,是防止电渣重熔后夹杂物再生和聚集长大的主要措施。

1.2 锻钢冷轧辊中液析碳化物

锻钢冷轧辊液析碳化物超标是一种典型的组织缺陷,造成冷轧辊组织异常,生产制造中,易产生淬火裂纹开裂事故;上机服役后,显著降低冷轧辊的耐磨性和疲劳极限。由于液析碳化物常见于辊身工作层与芯部的过渡层,随着工作层不断的消耗磨损,聚集的液析碳化物会逐渐出现。由于碳化物的硬度和耐磨性高于正常组织,轧制辊面以亮斑的形式呈现,影响冷轧钢板的表面质量,同时也是冷轧辊剥落的主要诱因,造成轧辊报废。液析碳化物超标成为冷轧辊制造和使用的主要缺陷,必须从冷轧辊冶金质量入手。

经过对超标的液析碳化物进行扫描电镜 SEM 分析,能谱(EDS)元素定量定性分析如图 3 所示,主要是合金元素 Cr 的成分偏析,形成伪共晶液析碳化物,造成液态凝固过程中元素偏析,为后期的锻造破碎和锻后热处理消除带来较大的困难,最终以液析碳化物的形式沉积到冷轧辊钢中。

研究表明^[9],电渣重熔工序作为改善和消除成分偏析的最后一道冶炼工序,降低重熔过程熔速,增强水冷条件,有利于改善成分偏析问题,也有利于改善液析碳化物。增强电渣的水冷条件,使得钢液更快的凝固,压缩了共晶碳化物析出的时间周期,减少其形成,同时也降低成品共晶碳化物评级和最大碳化物尺寸。

1.3 锻钢冷轧辊表面随机缺陷 DRS

冷轧工作辊在冷轧钢板过程中需要不断地消耗辊身工作层,在规定的工作层内任何细小缺陷都对冷轧钢板产生质量影响。辊面随机缺陷 DRS 主要有裂纹开口型缺陷和以气孔、夹渣等体积型闭口缺陷两大类,除了制造成品磨削和轧制下机磨削产生的开口型缺陷外,其余的均为冷轧辊制造的冶金质量有关。

φ470 mm×1 780 mm 冷轧辊辊身表面波检测的缺陷波形如图 4 所示。探伤确定为在距探头检测位置 137.11 mm 位置,辊身表层 2λ ≈ 3 mm 深度范围内有缺陷当量 DAC+4.8dB 反射波,磁粉辅助检测发现辊面存在裂纹磁痕显示。经现场对缺陷处检测,发现存在微观裂纹型开口缺陷。

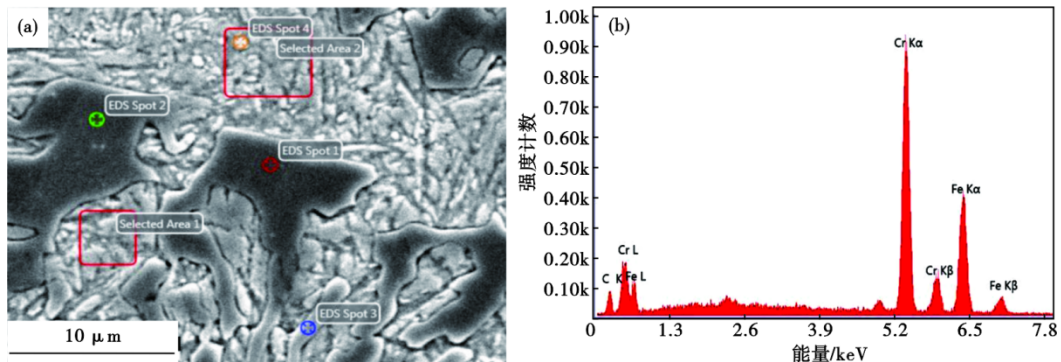


图 3 冷轧辊中的液析碳化物扫描电镜能谱分析:(a)SEM 图,(b)Spot 1 的 EDS 图

Fig. 3 SEM energy spectrum analysis of liquid precipitated carbides in cold rolling rolls : (a) SEM , (b) EDS of Spot 1

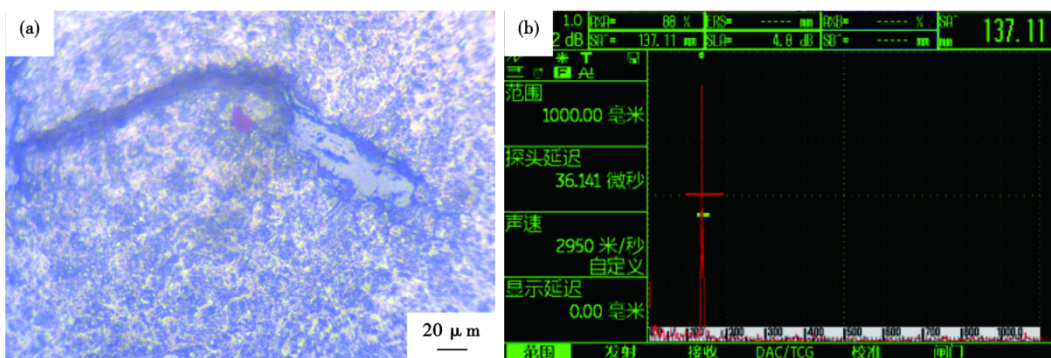


图 4 表面微观缺陷(a)和表面波检测波形图(b)

Fig. 4 Surface micro defects (a) and surface wave detection waveform (b)

根据锻钢冷轧工作辊锻造塑变形过程, 冷轧辊表面对应于电渣锭表层的柱状晶区域, 改善和优化电渣锭的柱状晶区域的凝固组织, 控制锻造形变量可以减少形变产生的微观裂纹型开口缺陷的几率, 是改善冷轧辊 DRS 缺陷冶金质量的不可忽视的因素。

针对上述分析以及电渣重熔生产特点, 有针对性确定了电渣过程气氛保护改进, 电渣锭凝固水冷强化改善和电渣锭型细长化改变三个维度, 通过优化改进电渣工艺参数, 达到提高锻钢冷轧辊冶金质量的目标。

2 电渣重熔工艺改进

电渣重熔兼具冶炼熔化和凝固结晶两个冶金过程, 对电渣工艺进行深入的研究, 可以有针对性地、行之有效地改善冷轧辊的冶金质量。

2.1 电渣气氛保护改进

电渣重熔冶炼周期比较长, 10 t 锭规格的 9Cr5Mo1V 钢电渣冶炼周期为 14 ~ 16 h, 如果不采取重熔空间保护措施, 会导致电渣重熔过程的冶金和工艺性质发生变化^[10]。尤其是外界环境中的自由氧过多地透过渣池, 进入金属熔池中, 造成 DS 类夹杂物继续集聚长大。生产研究表明^[10], 电渣气氛保护不仅可以去除钢中大型夹杂物, 还显著降低小尺寸夹杂物数量。

电渣生产实践证明^[11], 以 CaF_2 为基渣的电渣重熔过程中会挥发 HF 、 SiF_4 等污染环境气体, 电渣的气氛保护和环保除尘形成一对矛盾: 一方面充入保护气体形成微正压; 一方面吸收烟气形成负压, 过程控制及工艺参数的失调就会造成气氛保护的失效。

经过不断的摸索, 结合实际电渣生产情况, 设

计了一套集环保除尘和 Ar 密封气氛保护双重功能的密封罩^[12], 如图 5 所示。电渣气氛保护改进解决充气 and 吸气两个相反矛盾的过程, 为电渣气氛保护提供了支撑, 从而创造保护气氛, 降低氧对电渣重熔夹杂物再次形成的几率。

密封罩可以在重熔的渣池、结晶器和 Ar 气封之间形成密闭的环形空间, 再通过 45° 斜喷嘴喷吹 Ar 气, 形成微正压环境, 使电渣重熔过程始终得到 Ar 保护, 机理如图 6 所示。

电渣气氛保护的气体选用炼钢用的管道 Ar 气^[13], 在终端安装流量计, 采用热式质量 AF200 系列, 量程 0 ~ 50 m³/h (标准态), 按照式 (1) 和式 (2) 确定工艺参数。

负压仓的气体流量 (Q) 由除尘器风机的流量确定, 应满足式 (1)。Ar 气流量 (Q_{Ar}) 大小通过球阀进行调整, 通过调整球阀开关, 满足式 (2) 电渣工艺关系。

$$Q < \sum mq \quad (1)$$

$$Q_{\text{Ar}} > \frac{1}{2} \sum nq_{\text{Ar}} \quad (2)$$

式中: m 为集烟孔数, 个; q 为集烟孔气体流量, m³/h; n 为 Ar 气喷嘴数, 个; q_{Ar} 为每个喷嘴 Ar 气流量, m³/h。

采用改进的电渣重熔 Ar 密封罩, 并按式 (1) 和式 (2) 对气氛保护用的 Ar 气压力和流量工艺改进, 不仅解决了除尘烟气的排放, 而且电渣气氛保护效果显著改善, 采用氧化锆分析仪检测保护空间氧浓度在 0.001 0% 左右。生产数据统计结果显示, 采用改进型 Ar 密封罩, 锻造后 DS 夹杂物检测超标率比未采用的降低了 4% ~ 5%, DS 夹杂物的级别也明显降低。

2.2 电渣水冷强化改善

电渣冷却强度提高和改善, 可以提高电渣锭低

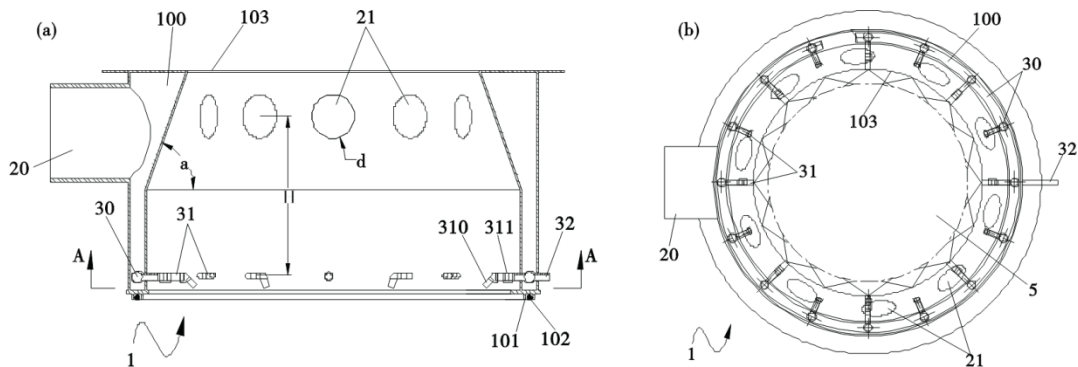


图 5 电渣重熔改进型 Ar 密封罩 (单位: mm): (a) 密封罩内部构造, (b) A-A 剖视图 (喷嘴布置)

Fig. 5 Improved Ar sealing cover for ESR remelting: (a) Internal structure of the seal hood, (b) A-A sectional view (nozzle arrangement)

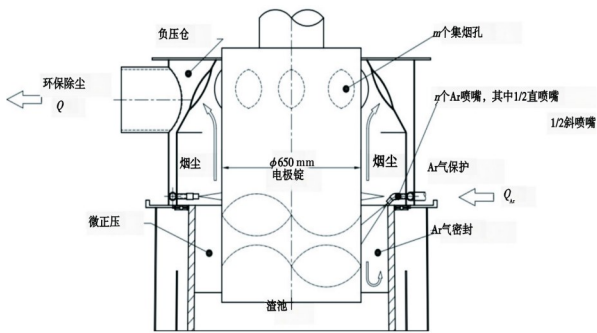


图 6 电渣重熔改进型 Ar 密封罩原理

Fig. 6 Principle of improved Ar sealing cover for ESR

倍组织致密性,减少裂纹缺陷、成分偏析等缺陷^[14]。电渣炉冷却水系统的冷却形式、水质、水温等因素直接影响设备使用寿命和电渣锭质量^[15],冷轧辊用钢电渣重熔质量主要与结晶器内的水流稳态、水质净化和进水温度有关。

通过对电渣重熔过程中进水温度与液析碳化物级别占比统计发现,如图 7 所示,进水温度稳定在 25 °C 左右有助于提高液析 0 级占比,改善冷轧辊的液析碳化物级别。

经过电渣生产实践不断的摸索,在冷却塔封闭式循环水系统的基础上改造完善,形成了一套完整的内外循环式+水温调控的电渣冷却循环系统^[16],如图 8 所示,核心内容增加了软化净水装置,补充了外部循环水水温调节用变频风机调控系统,实现了冷却循环水的水质和进水温度控制。

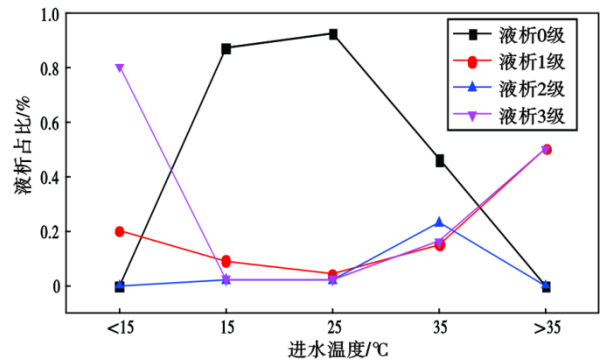


图 7 液析碳化物与电渣进水温度的关系

Fig. 7 The relationship between liquid precipitated carbides & the inlet water temperature of ESR

改善后电渣水冷强化系统,实现了结晶器进水温度 15 ~ 35 °C 的控制,进回水水温差稳定在 4 ~ 5 °C 的目标参数控制。改造前后水系统水温对比如图 9 所示。

改善电渣水冷强度后,可以实现定期对内循环部分的水质进行检测和更新,电渣炉的水冷效果得到强化。经过生产数据统计,采用改善电渣水冷强度后,冷轧辊的液析碳化物偏析合格率接近 100%。

2.3 电渣锭细长化工艺改进

电渣锭型细长化是提升电渣钢冶金质量的有效途径^[17]。对 G=10 t 锭规格的电渣锭和电极锭尺寸进行改变(见表 2),相关的电渣工艺进行了匹配调整,渣量减少 10% ~ 15%,用于生产 φ470 mm × 1 780 mm 冷轧工作辊(材质为 MC5)。

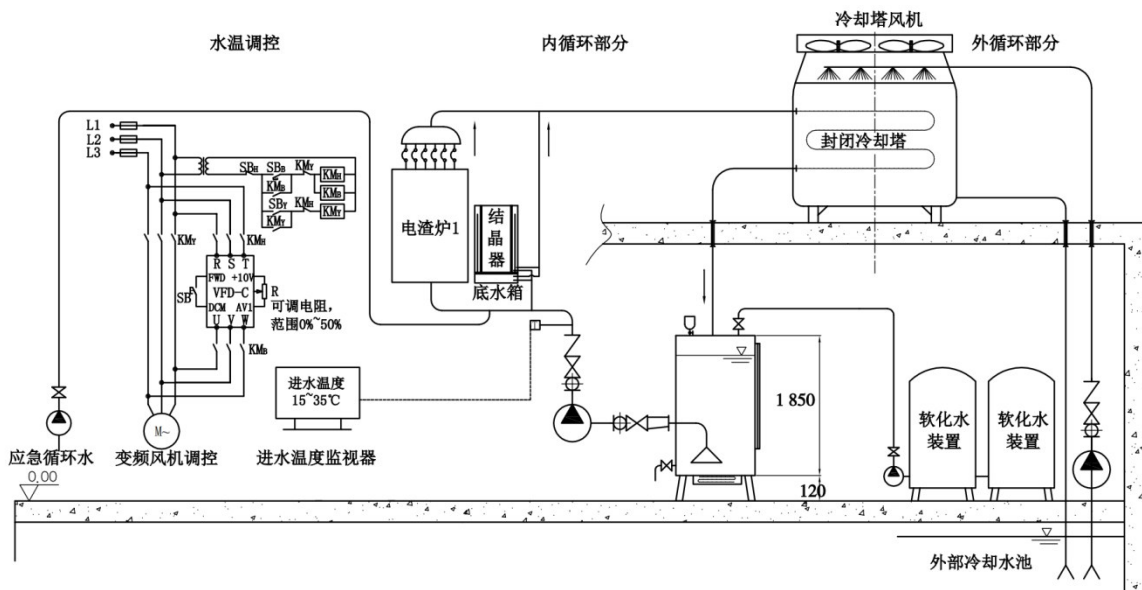


图 8 内外循环式+水温调控的电渣冷却循环系统

Fig. 8 ESR cooling cycle system with internal and external circulation & water temperature regulation

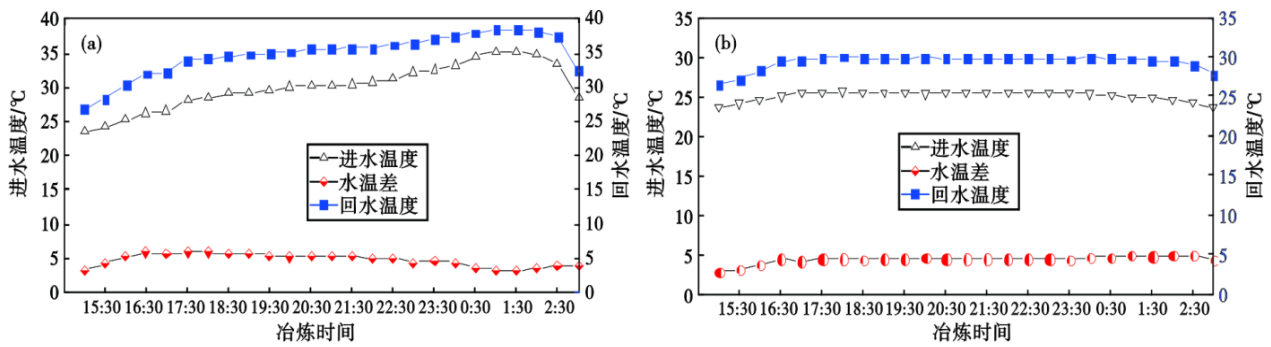


图 9 水系统改造前后水温曲线比对:(a)改造前,(b)改造后

Fig. 9 Comparison of water temperature curves before and after renovation: (a) before renovation, (b) after renovation

表 2 电渣锭锭型细长化改进

Table 2 Improvement of elongation of ESR ingot shape

工艺	电渣锭/mm		电极锭/mm		面积填充比
	直径	高度	直径	高度	
改进前	950/1 000	2 000	750	3 450	0.592
改进后	820/880	2 500	650	4 350	0.571

生产实践统计,采用细长化锭型连续生产了 110 支产品,经过冷轧辊表面波探伤检测,并与改进前结果对比,表面波探伤合格率由 85% 提升至 92%。

对细长化电渣锭与改善表面波的相关性进行研究,存在以下几方面的优势,可以有效地改善锻钢冷轧工作辊冶金质量,有利于改善和消除冷轧辊表面的缺陷。

(1)电渣锭锭型细长化后,结晶器直径的减小使渣量减少,渣池热量逐渐集中,改善化渣条件,提高化渣质量,减少渣中的气体和不稳定氧化物;同时减小了电极锭的填充比,随着填充比的减小,渣池截面平均湍流动能逐渐下降,对金属熔池的扰动

减弱^[18],从而降低在电渣锭边部柱状晶区产生夹杂、气体等体积型缺陷的几率。

(2)锭型细长化后,电渣锭截面变小,相对结晶冷却强度增加,有利于电渣锭获得浅平熔池,使得柱状晶区域更加发达致密,结晶凝固质量良好,改善电渣锭表层及柱状晶区的冶金质量,为后续的锻造变形及热处理创造条件,减少产生裂纹开口型缺陷几率。

(3)细长电渣锭锻造比得到了进一步的优化,可以实现控制锻造的形变量。冷轧辊锻造要求辊身粗锻比 ≥ 2 。通过粗锻比 2.5 和 2.0 效果比较,发现前者除了能完全消除轴心缺陷区外,还能改善电渣锭柱状晶区的塑形变形量,减轻产生微观裂纹缺陷产生几率,如图 10 所示。

细长型电渣锭有利于改善冷轧辊表面质量,减少冷轧工作辊辊身的表面随机缺陷 DRS。同时实践证明,细长化电渣锭无论从电渣锭毛坯探伤,还是锻造过程及经济价值方面均体现出较大优势。

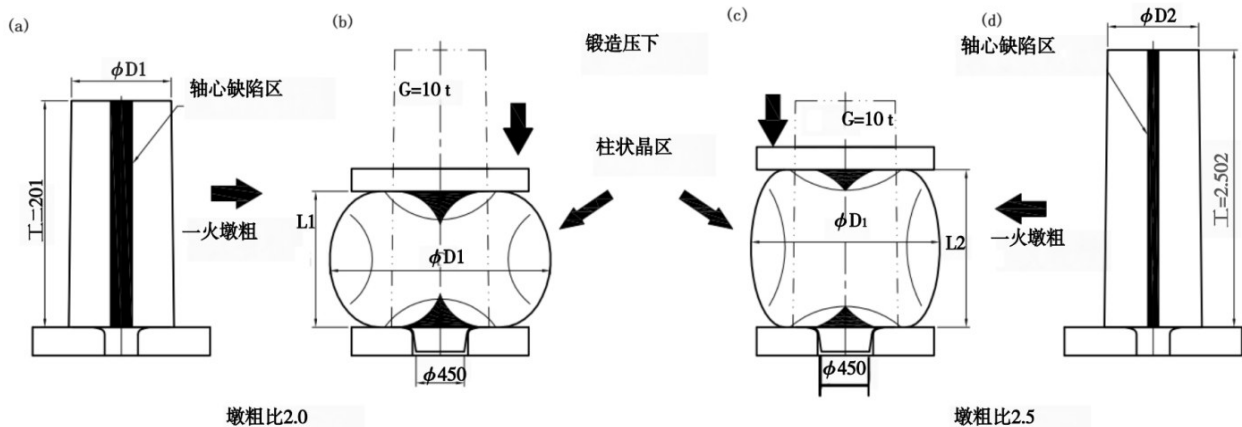


图 10 不同墩粗比效果对比(单位:mm):(a)(b)墩粗比 2.0,(c)(d)墩粗比 2.5

Fig. 10 Comparison of the effects of different upsetting ratios: (a) (b) upsetting ratio 2.0, (c) (d) upsetting ratio 2.5

3 结论

锻钢冷轧工作辊冶金质量的提升是一个系统性的工程,通过对非金属夹杂物、液析碳化物和表面随机缺陷 DRS 三个方面进行剖析,从电渣重熔角度进行改进。

(1)电渣气氛保护工艺改进,有助于减少电渣重熔过程中造成的再生 DS 类夹杂物。采用改进电渣密封罩和电渣气氛保护改进,氧浓度在 0.001 0% 左右,夹杂物超标率降低 4%~5%。

(2)电渣水冷强化工艺改善,有助于改善电渣锭的结晶条件,减轻元素的偏析,从根源上改善碳化物的聚集。电渣水冷强化对水质和进水温度改善,实现进水温度 15~35 °C,进回水水温差 4~5 °C 控制范围,液析碳化物偏析合格率接近 100%。

(3)电渣锭细长化工艺改变,可以改善电渣锭柱状晶区凝固质量,减少冷轧工作辊辊身的表面随机缺陷 DRS,电渣锭细长化改变后,表面随机缺陷 DRS 合格率由 85% 提升至 92%。

参考文献

- [1] 康大韬,叶国斌. 大型锻件材料及热处理[M]. 北京:龙门书局, 1998.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. 锻钢冷轧辊辊坯: GB/T 15547—2012[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.
- [3] 中国国家标准化管理委员会. 钢中非金属夹杂物含量的测定—标准评级图显微检验法: GB/T 10561—2005[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 高碳铬轴承钢: GB/T 18254—2016[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
- [5] 全国钢标准化技术委员会. 锻钢冷轧工作辊,通用技术条件: GB/T 13314—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [6] 徐涛,王鹏,周鹏程,等. 17-7PH 沉淀硬化不锈钢电渣重熔过程洁净度的变化[J]. 特殊钢, 2022, 43(5): 68-73.
- [7] 张锦文,王文先,郭中华,等. 氩气保护 ESR 对 EAF-LF-VD-CC 冶炼的高速车轴钢 DZ2 轧坯质量的改善[J]. 特殊钢, 2021, 42(4): 25-29.
- [8] 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): 15-24.
- [9] 徐亮,李涛,马永强,等. 改善不锈钢轴承钢 9Cr18 共晶碳化物的工艺研究[J]. 特殊钢, 2022, 43(6): 46-49.
- [10] 李正邦. 电渣冶金理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010.
- [11] 姜周华,董艳伍,耿鑫. 电渣冶金学[M]. 北京:科学出版社, 2015.
- [12] 霍振全. 电渣炉密封,专利号:ZL 1367263. 8[P]. 2021-2.
- [13] 陈希春,冯涤,傅杰,等. 电渣冶金的最新进展[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(2): 62-67.
- [14] 张军,李造宇,杨娥,等. 不锈钢 022Cr25Ni22Mo2N 电渣锭锻造裂纹原因分析和工艺改进[J]. 特殊钢, 2018, 39(6): 40-42.
- [15] 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(S1): 166-169.
- [16] 霍振全,宋延平,曾庆阳,等. 电渣炉循环冷却系统, ZL 2438258. 8[P]. 2021-10.
- [17] 隋铁流. 国外电渣重熔概况及我国电渣重熔的发展方向[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(S1): 21-28.
- [18] 贺铸,刘艳贺,刘双. 电极填充比对电渣重熔过程影响的数值模拟[J]. 特殊钢, 2014, 35(4): 16-19.