

Q235B 和 Q345B 热轧板结疤成因及控制措施分析

Analysis on the Causes and Control Measures of Scar Formation in Q235B and Q345B Hot Rolled Plates

供稿|李维华, 陈建东 / LI Weihua, CHEN Jiandong

内容导读

采用光学显微镜和扫描电镜对结疤试样进行了分析, 结果表明结疤缺口处均存在氧化现象, 裂纹两侧有脱碳层, 部分缺陷处有未与板面贯通的孔洞, 因此判定钢板结疤是由坯料带入下道工序。由于结疤成因与连铸工艺有直接的关系, 对钢水中碳含量、结晶器进水温度、保护渣性能、钢水过热度、拉速、扇形段辊缝误差及接弧误差等参数与钢板结疤之间的关系进行了分析, 指出改善初生坯壳厚度均匀性、提高设备精度是降低钢板结疤指数的关键, 并提出了避免结疤产生的相关工艺技术措施。

Q235B、Q345B 热轧钢板适用于焊接与冲压, 具有较好的铸造性、韧性、强度和伸长率, 主要用于桥梁工程和建筑行业质量要求较高的焊接结构件。由于在生产过程中, 板坯出结晶器足辊后, 铸坯窄面不再喷雾冷却, 因此边角部裂纹在产品缺陷中所占的比例不大, 而钢板表面特别是中间的结疤缺陷, 因无法修磨, 给产品质量带来很大的危害。关于结疤成因, 众多学者进行了研究, 杨治争等^[1]认为加热炉加热温度不均匀出现过热过烧导致, 还有学者认为是因为道次间冷却水异常产生的^[2-3], 彭凯等^[4]则认为是轧制过程中机械损伤造成的。一般认为结疤是由裂纹引起的, 连铸坯表面裂纹一是在结晶器内生成^[5], 二是在零段—矫直区形成^[6]。初生坯壳在结晶器弯月面生成后, 由于其表面温降与内

部温降不一致, 坯壳具有较大的向内收缩的倾向, 但钢水静压力和热应力能够抵抗向内收缩, 这样在坯壳的横截面上产生拉应力。如果应力超过坯壳的高温力学强度, 在其薄弱部位就产生细小裂纹, 带有细小裂纹的坯壳继续向下运动过程中, 由于某种原因(如保护渣润滑不良、对弧误差、二次冷却不当等)及裂纹的缺口效应, 使细小裂纹沿树枝晶间低塑性区扩展, 最终成为粗大裂纹。同样, 在矫直区当矫直力超过晶界 α 相所能承受的强度时, α 相中便会生成空洞, 空洞聚合后长大。Q235B、Q345B 在第Ⅲ脆性区的温度为 750~850 °C^[7], 如果矫直区的温度正好落在此区间, 会使细小裂纹、空洞扩展成粗大的裂纹, 带有裂纹的连铸坯轧制过程中, 因反复受力变形, 表面裂纹扩展成星际或网状裂纹, 即

作者单位: 福建三宝钢铁有限公司技术中心, 福建 漳州 363000

为结疤。本文通过对结疤试样的分析,提出了结疤产生的原因并提出了相应的解决和预防措施。

现状概况

生产工艺流程

用于生产热轧钢板的 Q235B、Q345B 钢化学成分如表 1 所示,其生产工艺流程为:100 t 转炉 (LD)→100 t 钢包精炼炉 (LF)→220 mm×1600 mm 连铸坯→热送加热炉→除鳞→粗轧→精轧→层流冷却→检验入库。

表 1 Q235B、Q345B 钢化学成分 (质量分数) %

钢种	C	Si	Mn	P	S	Al
Q235B	0.17	0.19	0.25	0.020	0.012	0.003
Q345B	0.18	0.24	1.42	0.021	0.012	0.003

结疤缺陷分析方法

结疤缺陷的形貌如图 1 所示,由图 1 可见,结疤就是通常所见的星际裂纹或网状裂纹。为了确定结疤产生的原因,用 PW4400/40 光学显微镜检测裂纹深度、脱碳层深度 (如有脱碳层)、上下板面金

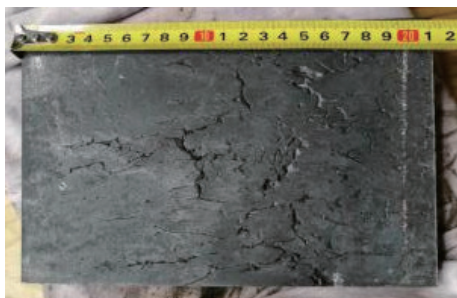


图 1 典型的结疤缺陷形貌

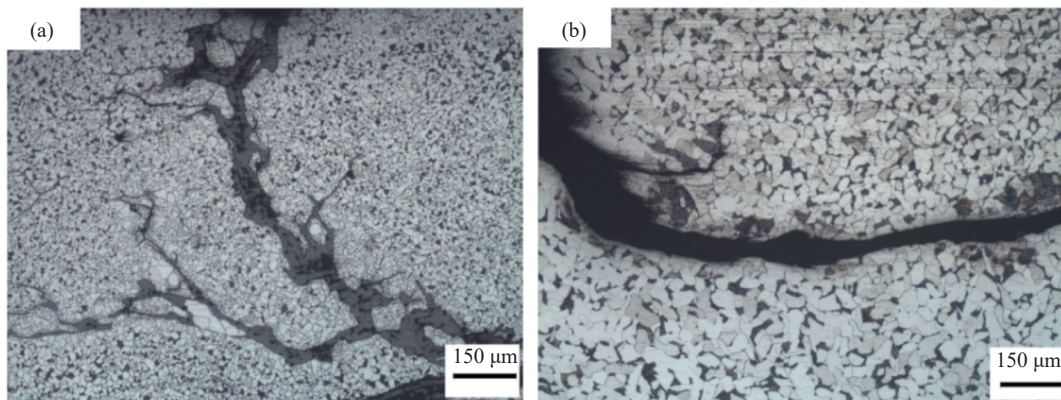


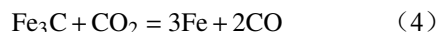
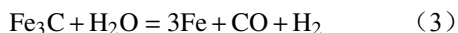
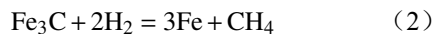
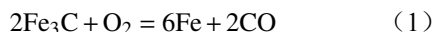
图 2 不同试样裂纹两侧脱碳情况: (a) 1#; (b) 2#

相组织、板面夹杂物;用扫描电镜检测结疤裂口处的化学元素含量。

试样分析检测

脱碳情况

在不同炉次上取 2 个试样,编号为 1#和 2#。将试样制成 40 mm×20 mm×5 mm 的金相试样。选择裂纹延伸到边的横截面,研磨后沿裂口观察裂纹深度、裂纹两侧脱碳层深度。如图 2 所示,1#试样裂纹深约 2.0 mm,沿裂纹脱碳,脱碳层深度约 1.8 mm;2#试样裂纹深约 3.0 mm,沿裂纹脱碳,裂口处脱碳层深度约 2.2 mm,这 2 个结疤都沿裂纹脱碳,说明结疤是由炼钢—连铸原因引起的,坯壳内的裂纹在随后的拉矫、加热炉升温过程中,发生了如下的反应^[8]。



脱碳是钢加热时表面碳含量降低的现象。从上面的脱碳反应方程式可知,脱碳是扩散作用的结果,一方面是氧向钢内扩散,另一方面是钢中的碳向外扩散。脱碳层只在脱碳速度大于氧化速度时才能形成。当氧化速度很大时,脱碳层产生后即被氧化而成氧化铁皮。所以只有在氧化作用相对较弱的气氛中,如连铸坯从结晶器向下运动过程中、步进式加热炉均热及加热过程中才能形成较深的脱碳

层。结疤表面的金相组织如图3所示，由图3可见，结疤面的组织中有魏氏组织，这是由于裂纹破坏了基体组织的连续性，同时连铸坯在加热炉中出现了轻度过热行为，通过对结疤试样进行冷

弯冲断，未发现端口存在晶界熔融即晶界融化而形成的自由结晶表面^[9-11]，说明介于裂纹间的板面冷却较快，出现了魏氏组织，而连铸坯未发生过烧行为。

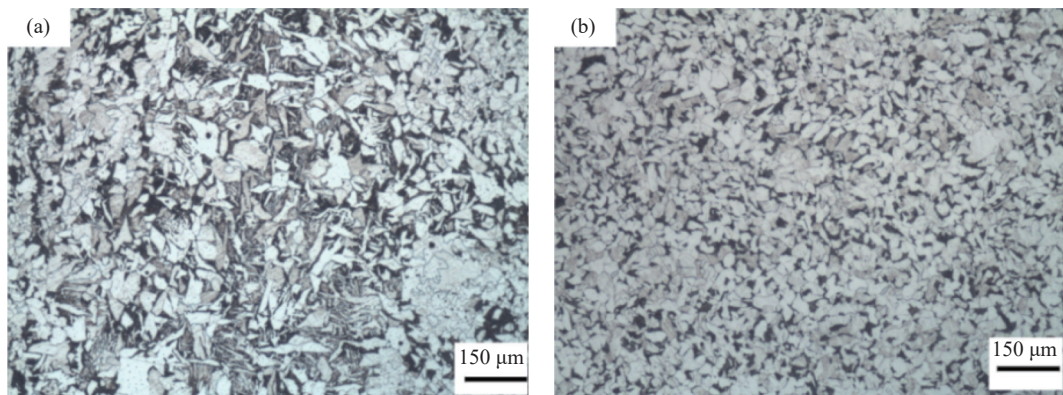


图3 结疤面及结疤下板面的金相组织: (a) 1#试样结疤板面; (b) 2#试样非结疤板面

裂口处的电镜扫描情况

使用EVO18+EISS扫描电镜、能谱仪观察，发现在裂纹内部和裂口处均出现了高温二次氧化现象，高温氧化圆点较多。1#试样含有Ca、Mg、K、Al、

Na、Si、Mn、O等保护渣成分，如图4所示；2#试样含有Fe、O，如图5所示。由于这两块不同炉次的试样都带有结疤缺陷，因此可以通过化学元素来判断结疤产生的共性，即都带有O，是高温氧化结果。

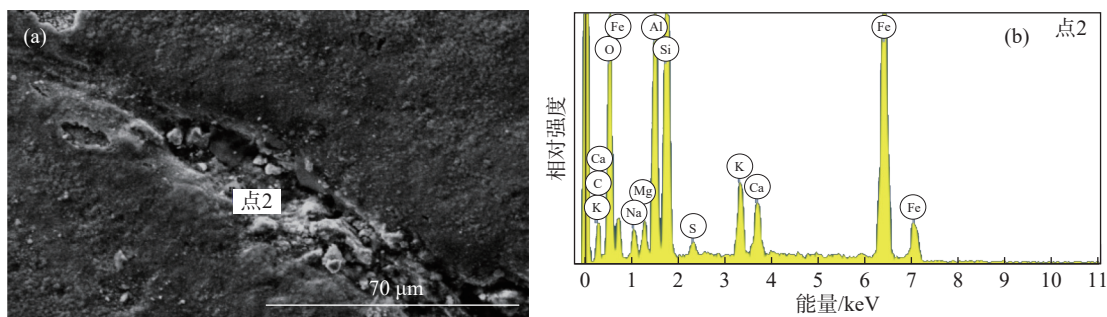


图4 1#试样结疤横截面开口处成分分析: (a) 电镜图; (b) 能谱图

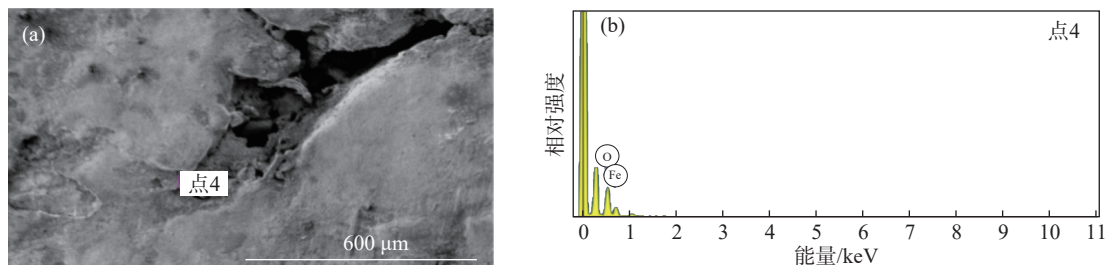


图5 2#试样结疤横截面开口处成分分析: (a) 电镜图; (b) 能谱图

内裂纹情况

金相检测表明，图4的试样未发现横截面上有内裂纹，但图5试样裂口处发现结疤横截面上存在

内裂纹，如图6所示。该裂纹未与表面相连通，周边的几条也未连在一起，可以明显看到裂纹从内向外破裂的特征，裂口内部未见脱碳层，裂口两侧组

织相同, 隐约可见晶界滑移带, 是钢板近表层的针孔气泡在轧制过程中暴露而产生的。

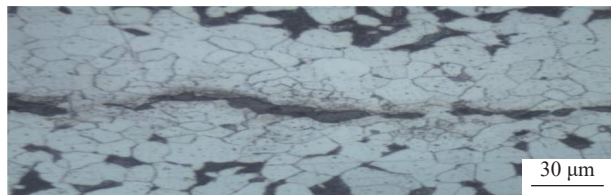


图6 内裂纹

结疤缺陷成因分析与预防措施

有脱碳层, 必先有裂纹, 且说明这些结疤不是由于轧钢撕裂或轧钢工艺不合理造成, 要从前道工序(炼钢—连铸)上寻找引起裂纹的原因。

C 含量对结疤的影响

由铁碳平衡相图可知, $w(C)=0.17\%$ 为包晶平衡点, $w(C)$ 在 $0.09\% \sim 0.16\%$ 为亚包晶钢, 处于此区间的钢水凝固时会发生包晶反应, 即产生 $\delta\text{-Fe}$ 向 $\gamma\text{-Fe}$ 的转变, 伴随较大的体积收缩 (0.38%)^[12], 坯壳与结晶器壁脱离形成的气隙较大, 导出的热流较小, 初生坯壳较薄, 铸坯表面凹陷严重, 凹陷部位的冷却和凝固速度慢, 组织粗大, 易造成应力集中, 当薄弱部位所受应力超过坯壳的高温力学强度时, 就产生裂纹。针对此特点, Q235B、Q345B 成分设计时尽量避免 $0.09\% \sim 0.16\%$ 区间, 成品碳控制在 $0.17\% \sim 0.18\%$, 通过提高钢水纯净度及降低成品 Mn 来降低碳当量, 提高焊接性。

结晶器进水温度的变化对结疤的影响

结晶器进水温度的变化直接影响结晶器传热的大小与变化, 为减少初生坯壳厚度的不均匀程度, 结晶器需缓冷。夏季结晶器宽面水流量 3750 L/min (外弧)、窄面水流量 480 L/min, 水压 0.90~0.95 MPa, 进水温度 $36 \sim 37^\circ\text{C}$ 、出水温度 $42 \sim 43^\circ\text{C}$, 7、8、9 三个月, 平均结疤率 0.31%; 同年的 1、2、3 三个月, 结晶器宽面水流量 3600 L/min、窄面水流

量 460 L/min, 水压 0.90~0.95 MPa, 进水温度 $29 \sim 31^\circ\text{C}$ 、出水温度 $36 \sim 38^\circ\text{C}$, 平均结疤率 0.53%。

理论研究与实际生产表明, 提高结晶器进水温度, 符合弱冷的原则, 使弯月面处于缓冷状态, 初生坯壳传热慢、收缩小、冷却均匀, 坯壳厚度均匀。因此, 冬季结晶器的水温还有上升的空间, 只要确保进、出水温差控制在 $5 \sim 8^\circ\text{C}$ 之间, 可以降低钢板结疤指数。

保护渣对结疤的影响

保护渣对结晶器热流密度的影响实际上主要取决于其导热性及渣膜厚度, 其中渣的碱度会影响导热性^[13], 当渣碱度大于 1 时, 凝固后晶体渣膜占固渣膜的比例多, 晶体渣膜内有孔隙, 热流密度减小, 降低了结晶器的传热, 有利于初生坯壳厚度的均匀, 降低裂纹指数。

熔渣层厚度不足时, 钢渣界面沿结晶器铜壁一周, 熔渣受冷却形成渣圈, 将熔渣通道堵死。熔渣通道不被堵死的液态渣层临界厚度可用下式计算^[14-16]:

$$Y_P = S \sin\left(\frac{\pi N}{2}\right) - \frac{500Nv_C}{5} + a \quad (5)$$

式中: Y_P 为液态渣层厚度下限; S 为结晶器振幅; N 为负滑移率, $N = 1 - \frac{2}{\pi \sin^{-1}[1000v_C/(\pi S f)]}$; v_C 为拉速; f 为结晶器振动频率; a 为注流引起钢液面浮动的幅值。

把各参数代入式 (5), 计算得到最小液渣层厚度为 7.6 mm。保护渣在使用过程中, 为了掌握其性能是否稳定, 每炉钢至少需测量一次液渣层厚度, 正常拉速下, 结晶器内处于活跃部位的液渣层厚度必须大于 12 mm、处于窄面与宽面交界三角区最不活跃部位的液渣层厚度必须大于 8 mm。合适的液渣层厚度是结晶器均匀传热的前提, 也是初生坯壳厚度均匀的保证。表 2 为 Q235B、Q345B 保护渣改进前后的理化指标。在外界情况相同的情况下, 比对使用 A 类渣, 结疤发生率 1.52%; B 类渣, 结疤发生率 0.29%, 因此基本可以断定 B 类稍高碱度保护

表2 Q235B、Q345B 钢保护渣成分及性能

保护渣	质量分数/%								碱度, R	黏度/(Pa·s)
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	Na ₂ O	K ₂ O		
A类	30.7	26.5	0.58	4.20	0.93	3.50	6.24	0.19	1.16	0.80
B类	33.6	26.6	1.40	2.30	0.60	3.90	9.10	0.20	1.26	0.97

渣更适合浇铸 Q235B、Q345B 钢。

钢水过热度对结疤的影响

Q235B 和 Q345B 含 Mn 量不一样，液相线相差 2.5℃ 左右，实际生产过程中，由于拉速不高，液相线取中、上限值，过热度定为 15~30℃，中间包温度 1530~1550℃，图 7 为过热度与钢板结疤的统计情况。

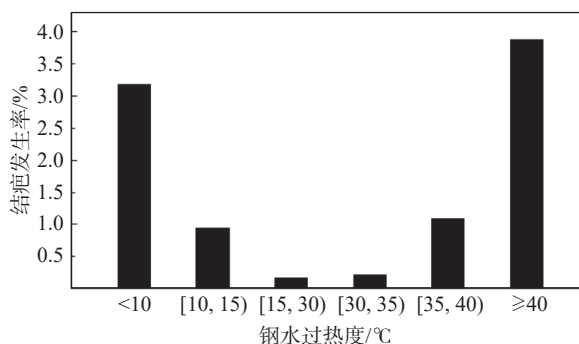


图 7 过热度与钢板结疤的统计情况

根据图 7 可知，过热度在 15~35℃，结疤率最低，过热度超过 35℃ 或低于 15℃ 时，结疤发生率明显上升。过热度超过 35℃ 时，凝固推迟，弯月面处的坯壳厚度减薄且坯壳平均温度升高，钢的整体温度向第 I 脆性区移动，在热应力和钢水静压力不变的情况下，结疤指数升高。而当过热度小于 15℃ 时，结疤发生率又有所上升，这主要是钢水过热度低，结晶器内钢水温度低，供给热量不足，保护渣熔化不好，液态保护渣保持量不足，保护渣渣膜薄且流入不均匀，使得渣膜导热不均匀，坯壳厚度不均匀，因而结疤指数上升。

拉速对结疤的影响

拉速与钢水过热度、钢水的供应情况有关，在钢水过热度全部符合工艺要求时，对因钢水供应紧张而降拉速的 100 炉次钢板结疤情况进行统计，每炉次连铸坯为 65 块（2.65 t/块），结果见图 8，结疤数为每炉次出现结疤情况的铸坯数量。

由图 8 可知，低拉速对结疤是非常有利的。特别是当拉速低于 0.55 m/min 时，结疤数明显上升，这是因为低拉速时，从浸入式水口两侧口流出的钢水向上分流的作用减弱，结晶器弯月面处钢水供热不足，结晶器内的钢液面处于低温状态，保护渣熔化不好，液渣层变薄，初生坯壳厚度不均匀，钢板结疤指

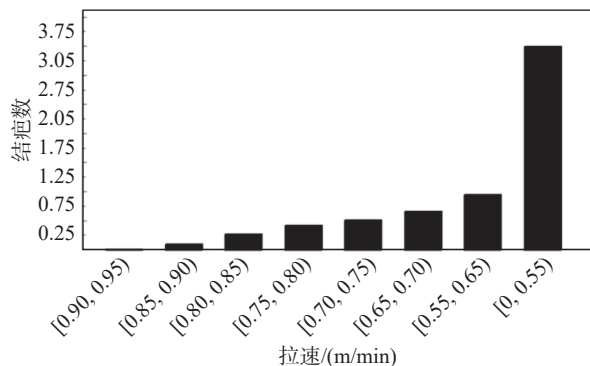


图 8 结疤数与拉速关系的统计情况

数上升。100 t 转炉配二机二流板坯连铸机，在最高拉速限定 0.90 m/min 的情况下，转炉生产能力略显不足，需要将转炉扩容至 180 t，前道工序要催着后道工序走，拉速才能得到发挥。同时，为避免低拉速给钢板带来的结疤危害，每次快换中间包、浸入式水口，要求 5 min 内将拉速恢复到 0.80~0.90 m/min。

设备因素对结疤的影响

(1) 设备精度

我公司辊缝调整情况如表 3 所示，每次检修时，按照表 3 给定的参数进行辊缝值的调整。但是，随着检修后过钢量的增加，扇形段的对弧精度（接弧误差）、辊缝值都会发生改变。分析原因：一是热态时工况恶劣，多种应力交替作用，冷态时调整好的缝隙值会发生改变；二是采用的是密排两节辊，处于中间的轴承座，由于密封垫损坏漏水，滚珠、轴瓦卡死后碎裂，导致驱动辊变形。计划停机的实测值均大于标准值，特别是两节辊的中间轴承座附近辊缝值较外侧明显偏大，有的甚至偏大 2.0 mm，并且没有规律性。较大的辊缝开口度势必造成铸坯鼓肚量的增加，在进入随后的扇形段压下时诱发中间结疤指数升高。

(2) 二冷段冷却效果

水质是影响二次冷却效果的直接原因，地下水水垢严重，经常造成喷嘴堵塞或喷偏、水雾化不良，尤其是外弧喷嘴清理不方便，冬季压缩空气管道内含水结冰导致气体压力低。上述现象使铸坯横向温度不一致，坯壳温度不均匀，坯壳表面反复升温、降温、回温，易产生较大的应力，进而增加结疤指数。为降低设备因素对结疤的影响，一是对备件上线前试压，安装后要确保辊缝误差 ≤0.30 mm，

表3 扇形1~8段辊缝值

扇形编号	进口/mm	出口/mm	扇形编号	进口/mm	出口/mm
1	225.4	225.0	5	223.1	221.9
2	225.0	224.5	6	221.9	221.1
3	224.5	223.9	7	221.1	220.6
4	223.9	223.1	8	220.6	220.3

接弧误差 ≤ 0.20 mm;二是每周安排6 h停机检修,对水过滤器反复清洗,确保良好的水质;三是拆下扇形段后,必须对水道冲水处理,待未见污水后再上新的扇形段;四是实行喷嘴专人负责制,对喷嘴的喷雾效果、出水状况、检修时的拆洗等情况进行动态跟踪与验收;五是增加压缩空气主管道放水阀的放水次数,确保冬季管道内没有结冰现象。

结论

(1) Q235B、Q345B 钢板结疤产生原因:①多种原因导致弯月面处的初生坯壳厚度不均匀;②扇形段的密排两节辊中间轴承座工况恶劣,易损坏;③随着过钢量的增加,辊缝误差、接弧误差大于工艺要求,铸坯产生应力集中现象。

(2) 改善 Q235B、Q345B 钢板结疤的措施:①Q235B、Q345B 成分设计时,控制 $w(C) > 0.16\%$,避免凝固时产生体积收缩;②提高结晶器进水温度,进、出水温差保持在 $5\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用弱冷制度;③选择碱度稍高的保护渣,增加固渣膜中晶体成分,降低结晶器的传热;同时确保液渣层厚度 ≥ 8 mm;④钢水过热度控制在 $15\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,拉速稳定在 $0.80\sim 0.90\text{ m/min}$,不宜采用低速拉矫;⑤每周安排一次计划停机小修,提高设备精度。

参考文献

- [1] 杨治争,李光强,刘占增,等. SS400热轧板结疤缺陷的成因分析. 武汉科技大学学报, 2008, 31(6): 609
- [2] 李建华,陈士华. 钢板表面搓板状裂纹分析. 物理测试, 2006(6): 47
- [3] 周学俊,胡伟东,王军,等. 热轧带钢“唇印结疤”缺陷形成机理分析. 武钢技术, 2008(1): 29
- [4] 彭凯,刘雅政,谢彬,等. 热轧板结疤缺陷成因分析. 钢铁, 2007(3): 44
- [5] 朱志远,王万军,王新华,等. 耐候钢板坯表面纵裂分析. 连铸, 2001(4): 29
- [6] 李玉盘,侯庆玉,杨东敏. 连铸厚板坯角部横裂纹的成因与预防对策. 河北冶金, 2008(3): 23
- [7] 蔡开科. 连铸坯质量控制. 北京: 冶金工业出版社, 2010
- [8] 余耀国. 中厚板裂纹研究. 武汉: 武汉科技大学, 2007
- [9] 吴菊环. 热轧板边裂原因分析及改进措施. 四川冶金, 2002(3): 10
- [10] 陈伟,苏鹤洲. 热轧板卷边裂成因浅析及控制. 钢铁钒钛, 2008(2): 67
- [11] 王宏霞. 低碳钢过热过烧温度的确定. 中国重型装备, 2008(1): 34
- [12] 张芳,杨吉春. 连续铸钢. 北京: 化学工业出版社, 2013
- [13] 朱传运,刘承军,王德永,等. 结晶器保护渣结晶温度的影响因素. 东北大学学报, 2004(10): 988
- [14] 曹广畴. 现代板坯连铸. 北京: 冶金工业出版社, 1994
- [15] 陈贵和. 板坯Q235B低成本炼钢新工艺. 金属世界, 2022(1): 84
- [16] 刘岩松,王旭生,张楠,等. Q235B热轧钢卷横折印缺陷分析. 金属世界, 2021(1): 51

作者简介: 李维华(1983—),男,湖北天门人,工程师,硕士,2011年毕业于内蒙古科技大学钢铁冶金专业,就职于福建三宝钢铁有限公司技术中心,主要研究方向:炼钢技术. 通信地址:漳州市芗城区浦南镇三宝工业园, E-mail: 15287301827@163.com