

Q235B 热轧板表面纵裂成因分析及工艺控制

张瑜¹ 漆鑫² 杨春雷¹ 张红斌¹

(1 武钢集团昆明钢铁股份有限公司技术中心,昆明 650302;2 昆明理工大学,昆明 650093)

摘要 Q235B 钢(0.11%~0.17% C)10~20 mm 热轧板的生产流程为铁水预处理-50 t 转炉-吹氩-(200~230)mm×(900~1600)mm 板坯连铸-热轧工艺。分析表明,Q235B 钢热轧板表面裂纹来源于铸坯纵裂。统计分析了成分、钢水过热度、拉速、连铸二冷水量、保护渣等对连铸坯纵裂的影响。通过控制 Mn/S \geq 40,钢水过热度 15~35 ℃,拉速 1.15 m/min,按季节调节二冷水量,采用熔点 \geq 1100 ℃,粘度 0.20~0.32 Pa·s,碱度 \geq 1.10 的保护渣等措施,使 Q235B 钢热轧板表面纵裂纹由 3.51%降至 \leq 0.96%。

关键词 Q235B 钢 热轧板 表面纵裂 Mn/S 200 mm 板坯 过热度 拉速 保护渣

Analysis on Forming Cause of Surface Longitudinal Crack of Steel Q235B Hot-Rolled Plate and Controlling Process

Zhang Yu¹, Qi Xin², Yang Chunlei¹ and Zhang Hongbin¹

(1 Technology Center, Kunming Iron and Steel Co Ltd, Wuhan Iron and Steel Group, Kunming 650302;
2 Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093)

Abstract The flowsheet for 10~20 mm hot-rolled plate of Q235B steel (0.11%~0.17% C) is hot metal pretreatment-50 t converter-argon blowing-(200~230)mm×(900~1600)mm slab casting-hot rolling process. The analysis results show that the surface crack of hot-rolled plate stems from casting slab longitudinal cracks of steel Q235B. The effect of composition, liquid overheat extent, casting speed, casting secondary water rate and mold powder on longitudinal crack of casting slab has been statistically analyzed. With the measures including controlling Mn/S \geq 40, liquid overheat extent 15~35 ℃, casting speed 1.15 m/min, adjusting secondary water rate according to season and using mold powder with melting point \geq 1100 ℃, viscosity 0.20~0.32 Pa·s and basicity \geq 1.10, the ratio of occurrence of steel Q235B hot-rolled plate surface longitudinal crack decreases to \leq 0.96% from original 3.51%.

Material Index Steel Q235B, Hot-Rolled Plate, Surface Longitudinal Crack, Mn/S, 200 mm Slab, Liquid Overheat Extent, Casting Speed, Mold Powder

热轧钢板表面裂纹缺陷是一种钢板表面不允许存在的缺陷,其种类多,形成机理复杂,影响因素众多,一直是困扰昆钢热轧钢板生产的一个难题^[1-2]。

2013年4月昆钢热轧钢板表面纵裂大量出现,钢板表面纵裂达到242 t,纵裂比例从0.96%升高至5.15%,纵裂产品只能判废,严重影响了昆钢板带产品的生产。

昆钢热轧钢板表面纵裂分布与铸坯裂纹分布存在对应关系,热轧钢板表面纵裂源于铸坯裂纹。昆钢 Q235B 钢成分处于裂纹敏感区,钢水过热度、拉速控制,冷却制度不匹配、保护渣使用存在不合理是导致昆钢连铸坯纵裂形成的主要原因。为此,通过结合昆钢实际提出改进控制生产工艺的方法,到2014年该厂的热轧钢板表面裂纹缺陷得到有效控制。

1 纵裂特征和分析

1.1 昆钢热轧钢板生产工艺流程

昆钢热轧钢板生产工艺流程为:70 t KR 法铁水预处理→50 t 转炉冶炼→氩站吹氩→直弧型板坯连铸机浇注→步进式加热炉→高压水除鳞→炉卷轧机往复轧制→层流冷却→地卷机收卷→钢卷横切→矫直→检验→成品钢板。

昆钢板坯连铸机为立弯式,直线段长度 2 m,弧型半径 8 m。设计铸坯断面尺寸为(200~230)mm×(900~1600)mm,设计年产能为 80 万 t。轧制采用 1 725 mm 双机架可逆式炉卷轧机轧制,轧机最大轧制力 3 600 t、工作辊直径 810 mm,辊身长度 1 925 mm,经过改进双机架可逆式炉卷轧机可生产厚度为 2.0~20.0 mm、宽度为 900~1 500 mm 的热轧 Q235B 钢带。目前 Q235B 钢板采用厚 200 mm、宽 1 520 mm、长 100 400 mm 连铸坯轧制热轧钢带,钢带经横切和矫直成为钢板。

1.2 钢板纵裂缺陷特征

昆钢热轧钢板表面纵裂集中出现在 Q235B 碳素结构钢钢板上,钢板纵裂沿轧制方向分布,裂纹细

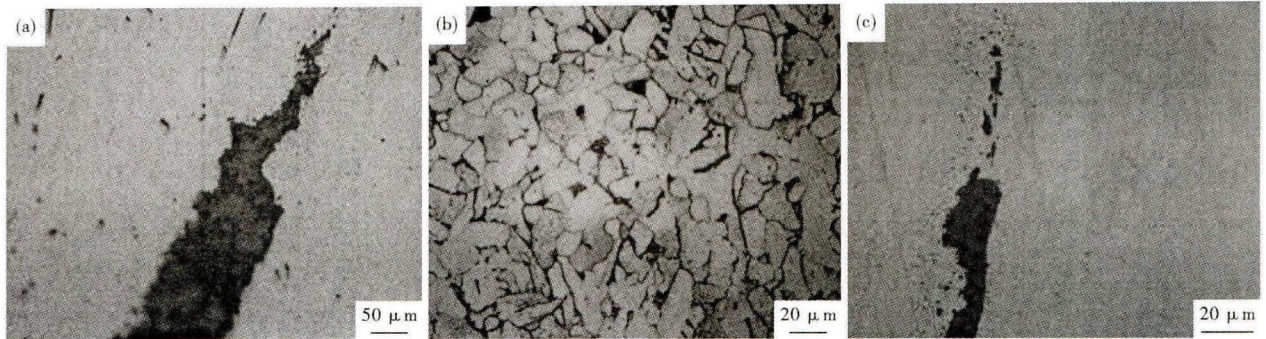


图1 10~20 mm Q235B 钢热轧板裂纹形貌(a),组织形貌(b)和裂纹周围氧化圆点(c)

Fig.1 Morphology of crack (a), structure (b) and oxidized dots around crack (c), 10~20 mm hot-rolled plate of steel Q235B

而长,无交叉、分叉。多数出现在钢板宽度的1/2和1/4处,极少量出现在钢板边部。接近80%纵裂缺陷出现在板宽1/2处,约20%的纵裂出现在板宽1/4处。厚度大于10 mm的钢板表面裂纹出现的几率大,裂纹缺陷较为严重。裂纹宽度0.5~3.0 mm,深度0.5~5.0 mm,长度一般为1~6 m,较长的可达10 m以上;厚度8 mm以下薄规格钢板表面裂纹较浅,通常只能看到裂纹的痕迹。

1.3 缺陷金相组织分析

图1(a)为Q235B钢板裂纹缺陷根部形貌,缺陷宽度为100 μm,深度达560 μm,金相观察其组织为铁素体+珠光体,铁素体晶粒度9.5级,组织正常,见图1(b)。在裂纹缺陷中观察到大量的氧化亚铁,周边分布着高温氧化圆点,氧化圆点延伸至基体中,高温氧化特征明显,见图1(c)。

1.4 缺陷成分分析与统计

对表面纵裂钢板取样进行成分、性能分析,分析结果见表1,从表1中可见,试样的化学成分、力学性能符合国家标准(GB/T700-2006)的要求。

2013年4月213炉表面检验合格无纵裂Q235B钢坯冶炼成分统计结果与26炉板坯存在纵裂的Q235B钢冶炼成分统计结果得出,总体上合格板坯与纵裂板坯成分符合国标Q235B要求,26炉存在纵裂的板坯其成分中C、Si、Mn含量与213批表面合格坯成分含量相近。

2 分析与讨论

裂纹连铸板坯轧制跟踪表明,钢板表面纵裂缺陷的出现和分布与连铸板坯表面纵裂和分布存在对应关系。连铸板坯表面严重纵裂经轧制后裂纹变浅,形成钢板表面纵裂缺陷;连铸板坯表面存在的细小裂纹,经过轧制后裂纹逐渐变浅,最后

被碾平,在钢板表面留下裂纹痕迹。图2(a)为连铸板坯表面纵裂情况,轧制后钢板表面纵裂见图2(b)。生产中连铸板坯表面裂纹宽度大于2 mm,深度大于15 mm,长度大于800 m的判定为表面严重纵裂,连铸板坯只能报废。小于以上尺寸的连铸板坯表面纵裂火焰修磨后可以进行轧制。

2.1 厚规格钢板表面裂纹严重原因分析

昆钢双机架可逆式炉卷轧机采用厚200 mm、宽1520 mm、长100400 mm连铸坯轧制热轧钢卷,钢卷开平后得到钢板。轧制表明,宽度小于2 mm,长度不超过800 mm的表面纵裂缺陷连铸板坯,经炉卷轧机轧制至8 mm及以下薄规格时,纵裂部位得到焊合,钢板表面只能观察到裂纹痕迹;轧制10 mm及以上规格时,钢板表面往往出现纵裂。

连铸板坯加热制度相同,昆钢双机架可逆式炉卷轧机轧制考虑板形控制因素,同一副工作辊轧制规格采用由厚至薄的锥形轧制制度。轧制厚度≤8 mm的薄规格品种前需轧制4卷厚度10 mm规格进行烫辊,待工作辊辊型曲线稳定后才轧制薄规格,以确保板形质量。板坯加热、开轧温度相同,卷取温度相差20℃。

厚度10 mm以上规格表面纵裂缺陷的几率大,裂纹严重原因有两个方面,一是昆钢采用双机架可逆式炉卷轧机粗轧、精轧均在同一副工作辊上往复轧制完成,工作辊辊径为780~810 mm,由于工作辊

表1 Q235B纵裂钢板成分和力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of steel Q235B plate with longitudinal crack

编号	化学成分/%					规格/ mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %
	C	Si	Mn	P	S				
1	0.15	0.23	0.49	0.032	0.021	12	310	420	26
2	0.13	0.21	0.45	0.024	0.025	14	290	410	29
GB/T700-2006	≤0.20	≤0.35	≤1.40	≤0.045	≤0.045		≥235	370~500	≥26

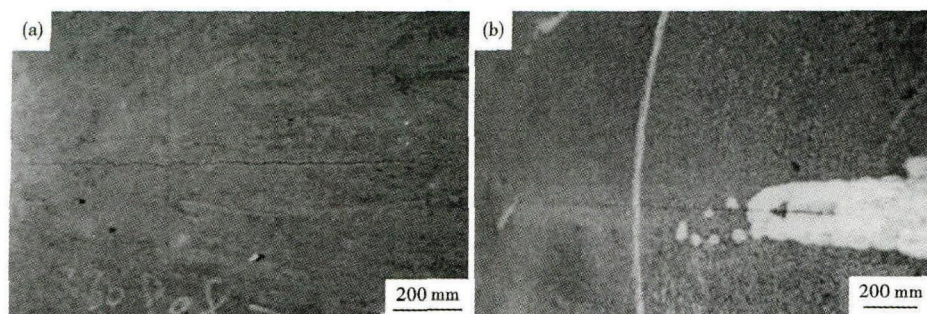


图2 Q235B 钢 200 mm 连铸板纵裂 (a), 10 ~ 20 mm 热轧板纵裂 (b)

Fig. 2 Longitudinal crack of steel Q235B 200 mm casting slab (a) and 10 ~ 20 mm hot-rolled plate (b)

辊径较大,精轧过程咬入角较小。在轧制 8 mm 以下薄规格时咬入角相对轧制 10 mm 规格更小,前滑值更大,轧制时金属沿轧制方向塑性流动的速度增量更大,表面裂纹焊合作用更明显。其次,轧制 10 mm 规格压缩比小于 8 mm 规格,焊合作用更小。

2.2 连铸板坯纵裂形成的一般机理及分布规律

连铸坯在结晶器内结晶形成初生坯壳,初生坯壳在结晶器内受到钢水静压力、铸坯收缩所造成的应力、坯壳内部温度梯度造成的热应力,坯壳向下运动与上下振动的结晶器壁间造成摩擦而产生的应力和坯壳自身重量形成的复杂应力作用下,在坯壳薄弱处将产生应力集中,当应力超过坯壳表面的高温强度时,就在表面萌生裂纹,形成细小纵裂纹^[3]。

连铸板坯结晶器为上下边较长的矩形断面,由于初生坯壳四角处冷却较快,其刚度较大,宽面两个端被窄面所牵制,结晶过程冷缩变形只能发生在刚度较小的上下边的中部,在上下边中部坯壳薄弱处出现应力集中,产生最大弯曲变形,宽度越宽,弯曲变形越大。当应力超过薄弱坯壳表面的高温强度时,就产生断裂,萌生细小裂纹。细小裂纹进入二冷后进一步扩展和延伸,形成粗大裂纹。因此,连铸板坯表面纵裂集中出现在连铸板坯宽度的 1/2 处。由于钢板表面纵裂缺陷分布与连铸板坯表面纵裂分布存在对应关系,钢板表面纵裂也多出现在宽度的 1/2 处。

2.3 造成昆钢连铸板坯纵裂因素分析

2.3.1 成分对昆钢连铸板坯纵裂的影响

昆钢 Q235B 热轧钢板所使用连铸板坯碳含量为 0.11% ~ 0.17%, 平均碳含量 0.145%, 处于包晶反应中心区域。浇铸时将产生 4.7% 的相变收缩, 收缩使坯壳内部产生较大的热应力, 容易产生裂纹。当 C 为 0.15%, 700 ~ 900 °C, 导热能力明显下降, 比

热容明显上升, 热应力产生, 纵裂纹倾向严重, 温度为 790 °C 时, 断面收缩率最小, 纵裂倾向最严重^[4]。因此, 结晶器中萌生的裂纹在二冷、矫直过程中扩展, 形成较大的裂纹。

昆钢 Q235B 热轧钢板所使用连铸板坯硫含量为 0.015% ~ 0.034%, 平均硫含量 0.022%; 在碳含量不变的情况下, 硫含量增加则

板坯纵裂倾向增加。锰含量为 0.43% ~ 0.55%, 平均锰含量 0.485%; 其 Mn/S 最大为 28.2, 最小为 17.6, 平均 23, 晶界脆化现象严重, 达不到 Mn/S 大于 40 的一般裂纹控制要求。

2.3.2 板坯浇铸过热度、拉速的影响

浇铸过热度大, 钢水凝固推迟, 坯壳变薄, 容易拉裂、拉漏。过热度大, 拉速被迫降低, 钢水在结晶器内停留时间长, 冷却强度大, 弯月面处钢液处于低温状态, 保护渣也因温度低而化渣不好, 流入不均匀, 易产生纵裂纹^[5]。钢水浇铸过热度低, 保护渣熔化不好, 保护渣渣膜过薄且流入不均匀, 加重了坯壳的不均匀程度, 易造成坯壳薄弱处发生表面纵裂。低过热度采用高拉速, 凝固初期结晶器钢水凝固的推迟, 坯壳表面平均温度升高, 改变了结晶器内钢水的流场和渣膜厚度, 容易导致纵裂产生。过热度过高过低、过热度与拉速不匹配时, 常伴随液面和拉速的大幅波动。液面、拉速波动大, 裂纹指数增加^[5]。

考虑热平衡及顺利连浇, 开浇第 1 炉浇铸温度适当提高, 不允许低过热度开浇。昆钢 Q235B 钢理论计算的液相线温度为 1518 °C, Q235B 冶炼温度、拉速控制要求见表 2, 表 3 为 239 炉钢浇铸过热度、拉速、与裂纹发生率调查统计结果。图 3 为 239 炉钢浇铸过热度、拉速、与裂纹发生几率分布图。

在 239 炉钢中, 连铸板坯表面出现裂纹 26 炉, 裂纹率 10.88%。过热度、拉速符合规定工艺要求浇铸 206 炉, 13 炉出现裂纹, 裂纹率 6.31%。其中, 过热度拉速适中 (过热度 15 ~ 30 °C、拉速 1.10 ~ 1.20 m/min) 浇铸 155 炉, 3 炉出现裂纹, 裂纹率 1.92%; 高过热度低拉速 (过热度大于 30 °C、拉速 1.10 ~ 1.00 m/min) 浇铸 27 炉, 6 炉出现裂纹, 裂纹率 22.2%; 低过热度高拉速 (过热度小于 15 °C、拉速 1.20 ~ 1.30 m/min) 浇铸 24 炉, 4 炉出现裂纹,

裂纹率 16.67%。过热度 and 拉速控制适当、匹配,纵裂相对较少出现,见表 3。

过热度、拉速不匹配、不符合控制要求浇铸 33 炉,13 炉出现裂纹,裂纹率 39.39%。其中,过热度 15 ~ 30 °C 适中、1.10 ~ 1.00 m/min 偏低拉速浇铸 6 炉,2 炉出现裂纹,裂纹率 33.33%;过热度小于 15 °C 低过热度、拉速 0.9 ~ 1.20 m/min 低拉速浇铸 13 炉,5 炉出现裂纹,裂纹率 38.46%;过热度大于 30 °C 的高过热度、1.10 ~ 1.20 m/min 中等拉速浇铸 14 炉,6 炉出现裂纹,裂纹率 42.86%。过热度大于 35 °C 浇铸 41 炉钢中,31 炉钢为开浇第 1、2 炉,其液面波动达到 ± 5 mm,短时间内拉速波动超过 0.1 ~ 0.2 m/min,表面纵裂 17 炉,裂纹率 54.84%。浇铸过热度、拉速不匹配,纵裂相对较多,见表 3。

2.3.3 连铸及冷却

昆钢板坯连铸机为半径 8 m 直弧型板坯连铸机,Q235B 浇铸断面(mm)200 × 1 520 × 10 400。板坯连铸二冷配水模型为温度随拉速变化的动态模式,进口水温按 20 °C 控制,进出水温差按 7 °C 控制的缓冷模式,结晶器宽面水流密度 2 133 L/(m² · min),窄面水流密度 2 100 L/(m² · min),热流比 0.98。

水的冷却能力对温度非常敏感,水温从 18 °C 升高到 36 °C,最大冷却速度从 240 °C/s 降低到 190

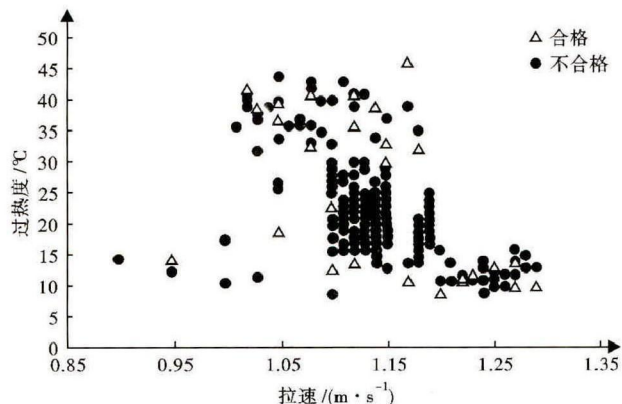


图 3 合格和纵裂不合格 Q235B 板坯与过热度、拉速分布
Fig.3 Distribution of qualified and unqualified steel Q235B slab due occurrence of longitudinal crack with liquid overheat extent and casting speed

表 2 Q235B 钢冶炼温度、拉速控制要求

Table 2 Control requirement for steelmaking temperature and casting speed of steel Q235B

项目	出钢温度/°C	平台温度/°C	中间包温度/°C			液面波动/mm	拉速波动
开浇炉	≥1 640	1 590 ~ 1 600	<1 533	1 533 ~ 1 548	>1 548	+3 ~ -3	
连浇炉	≥1 620	1 565 ~ 1 580					
拉速/(m · min ⁻¹)			1.10 ~ 1.20	1.10	1.10 ~ 1.00		≤0.10

表 3 过热度和拉速、匹配和不匹配对连铸板坯裂纹发生率的影响
Table 3 Effect of liquid overheat extent-casting speed matching and not matching on occurrence ratio of crack of casting slab

项目	过热度/°C	拉速/(m · min ⁻¹)	总浇铸炉批	不合格批数	单项不合格率/%	合计不合格率/%
过热度与拉速匹配	<15	1.20 ~ 1.30	24	4	16.67	6.31
	15 ~ 30	1.10 ~ 1.20	155	3	1.94	
	>30	1.10 ~ 1.00	27	6	22.22	
过热度与拉速不匹配	<15	0.90 ~ 1.20	13	5	38.46	39.39
	15 ~ 30	1.10 ~ 1.00	6	2	33.33	
	>30	1.10 ~ 1.20	14	6	42.86	

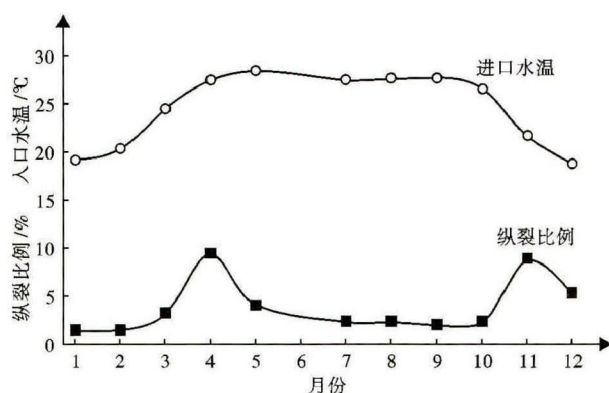


图 4 2013 年 1 ~ 12 月 Q235B 钢连铸板坯纵裂发生率
Fig.4 Occurrence ratio of longitudinal crack of steel Q235B casting slab in January to December, 2013

°C/s。2013 年昆钢连铸板坯裂纹率与不同季节月份结晶器进出口水温变化见图 4。图 4 中 4 月份气温上升,导致连铸冷却水温从 24 °C 升高至 27 °C,在流量不变的条件下,钢坯表面冷却强度下降。11 月份由于气温降低,导致水温从 26 °C 骤降至 21 °C,在流量不变的条件下,钢坯表面冷却强度增加,温度变化最大月份与裂纹率峰值对应。2013 年结晶器宽面水流密度和窄面水流密度均在连铸板坯大量出现纵裂后才作调整,流量调整后板坯裂纹率显著降低。

2.4 保护渣的影响

铸坯润滑不好,摩擦力增大,易导致纵裂的产生;结晶器传热过快,坯壳生长不均匀,同样易产生纵裂纹。昆钢板坯连铸使用的 3 种保护渣成分及性

表4 板坯连铸使用的3种保护渣成分和性能以及对板坯合格影响

Table 4 Ingredient and performance of three kinds of mold powder for slab casting and effect on qualified ratio of slab

保护渣	化学成分/%									碱度 (R)	熔点/ ℃	粘度 (1300℃)/ Pa·s	熔速 (1350℃)/ s	试验 炉数	纵裂 炉数	合格 炉数	合格 率/%
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	F ⁻	C _固								
A	25.64	33.17	2.59	0.89	0.44	7.32	0.64	11.8	4.38	1.21	1096	0.08	5.05	288	34	354	88.34
B	29.70	28.64	3.07	2.60	1.25	9.89	0.48	6.37	7.50	0.96	1116	0.31	4.99	523	40	483	92.50
C	26.04	31.29	2.72	2.84	1.09	8.46	0.56	5.88	3.19	1.19	1104	0.18	4.82	894	42	852	95.30

能见表4。从表4中可见,A保护渣为低粘度、高熔速、高熔点保护渣。B保护渣为高粘度、高熔速、高熔点保护渣。C保护渣为中等粘度、熔速、熔点保护渣。从3种保护渣成分可以确认B、C保护渣不会因碳高出现渣条

碳化,Al₂O₃ 过高引起的黏度过大继而出现大块渣条造成铸坯纵向裂纹。对裂纹敏感钢种使用较高粘度、较高熔点、高碱度的保护渣有利于减少纵裂^[7]。3种保护渣使用板坯出现纵裂情况见表4。

3 控制措施及效果

3.1 控制措施

(1) 昆钢 Q235B 连铸板坯纵裂倾向严重,成分上碳含量应避免裂纹最敏感区域,碳含量按 0.08%~0.12% 控制。降低硫、磷含量对控制裂纹有利,Mn/S 大于 40,对防止纵裂的产生有益。考虑到成本因素及 Mn/S 对纵裂的影响,Mn 含量控制在 0.42%~0.55%,硫、磷含量按 ≤0.020% 控制。

(2) 要求开浇炉过热度按 25~45℃ 控制,其他炉过热度按 15~35℃ 控制,典型拉速 1.15 m/min。在过热度波动时应及时调整拉速,实现浇铸温度与拉速的良好匹配,避免液面、拉速大幅波动。

(3) 加强连铸机维护,避免喷嘴阻塞,确保冷却均匀。结晶器冷却制度未考虑水温变化,不能及时调整流量也是造成板坯裂纹的原因之一,要求不同季节结晶器水流量配置要求见表5。

(4) 加强保护渣的检查和管理工作,采用熔点高于 1100℃,1300℃ 粘度 0.20~0.32 Pa·s,碱度 1.10 以上的保护渣。

(5) 加强对连铸板坯表面质量的检查,对表面裂纹宽度小于 2 mm,深度小于 15 mm、长度小于 800 mm 的连铸板坯,只能用于轧制 8~5 mm 薄规格品种。

3.2 控制效果

通过采取以上措施,2014 年昆钢 Q235B 热轧钢

表5 不同季节结晶器水流量配置要求

Table 5 Requirement of distribution of mold cooling water in different seasons

月份	宽面			窄面		
	流量/ (L·min ⁻¹)	流速/ (m·s ⁻¹)	水流密度/ [L·(m ² ·min) ⁻¹]	流量/ (L·min ⁻¹)	流速/ (m·s ⁻¹)	水流密度/ [L·(m ² ·min) ⁻¹]
4~9	3600	6.78	2410	430	6.82	2389
10~3	3186	6	2133	378	6	2100

板表面纵裂率从 2013 年的 3.51% 下降到 0.96% 以下,热轧钢板纵裂得到有效控制。

4 结论

(1) Q235B 热轧钢板表面纵裂分布与铸坯裂纹分布存在对应关系,热轧钢板表面纵裂源于铸坯裂纹。

(2) 过热度与拉速的良好匹配、使用高熔点、高粘度、高碱度的保护渣,可最大限度减少板坯纵裂的产生。

(3) 水的冷却能力对温度非常敏感,根据不同季节结晶器入口冷却水温度变化,及时调整结晶器及二冷水流量,可显著减少连铸板坯表面纵裂的产生。

参考文献

- [1] 尹合壁,姚曼,罗庆梅,等.连铸坯表面裂纹预测研究的现状[J].钢铁研究学报,2004,16(1):1-2.
- [2] Mintz B, Yue Y. Hot Ductility of Steels and Its Relationship to the Problem of Transverse Cracking during Continuous Casting[J]. International Materials Reviews,1991,36(5):187-188.
- [3] 周有预,罗德信.连铸板坯表面纵向裂纹的形成原因[J].钢铁研究学报,2004,16(5):75-78.
- [4] 袁伟霞.连铸板坯纵裂综述[J].炼钢,1997(5):47-50.
- [5] 莫德敏,张雅丽.结晶器保护渣的临界温度以及与连铸的关系[J].宽厚板,2002,8(4):40-43.
- [6] 蔡开科.碳钢凝固的包晶转变与连铸坯裂纹[J].连铸,1994(3):19-21.
- [7] 卢盛意.连铸坯质量[M].北京:冶金工业出版社,1994.

张瑜(1965-),男,高级工程师,1987年昆明工学院(本科)毕业,板材产品开发和工艺技术控制。

收稿日期:2015-08-05