

Q345E 钢 $\Phi 800$ mm 铸坯表面网状裂纹的分析及控制措施

陈远清^{1,2} 仇圣桃¹ 李刚² 陈树军² 汪德伟²

(1 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081; 2 张家港联峰钢铁研究所有限公司, 张家港 215628)

摘要 采用金相显微镜和扫描电镜分析了 Q345E 钢 $\Phi 800$ mm 铸坯($\% : 0.15\text{C}, 0.27\text{Si}, 1.37\text{Mn}, 0.009\text{P}, 0.001\text{S}, 0.03\text{Nb}, 0.04\text{V}, 0.030\text{Al}, 0.008\text{ON}$)表面网状裂纹, 得出结晶器壁和凝固坯壳之间保护渣膜厚度不均匀, 使坯壳局部受挤压, 产生凹坑, 冷却速度降低, 产生热应力裂纹。通过将保护渣碱度($\text{CaO}/(\text{SiO}_2)$)从 1.03 提高到 1.15, 熔点从 1 235 $^{\circ}\text{C}$ 降至 1 210 $^{\circ}\text{C}$, 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 粘度从 0.87 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 提高到 1.10 $\text{Pa}\cdot\text{s}$, 使 $\Phi 800$ mm 连铸坯表面凹坑和网状裂纹的发生率从原 60.5% 降至 0.5% 以下。

关键词 Q345E 钢 $\Phi 800$ mm 铸坯 网状裂纹 凹坑 保护渣

Analysis on Surface Net Cracks of $\Phi 800$ mm Casting Bloom of Steel Q345E and Control Measures

Chen Yuanqing^{1,2}, Qiu Shengtao¹, Li Gang², Chen Shujun² and Wang Dewei²

(1 National Engineering Research Center for Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 Zhangjiagang Lianfeng Iron and Steel Research Institute Co Ltd, Zhangjiagang 215628)

Abstract The surface net cracks of $\Phi 800$ mm casting bloom of steel Q345E ($\% : 0.15\text{C}, 0.27\text{Si}, 1.37\text{Mn}, 0.009\text{P}, 0.001\text{S}, 0.03\text{Nb}, 0.04\text{V}, 0.030\text{Al}, 0.008\text{ON}$) have been analyzed by metallurgy and scanning electron microscope. It is obtained that the uneven thickness of flux film in between mold wall and solid shell leads to extruding local shell, forming depression, decreasing cooling rate and forming thermal stress cracks. With increasing basicity of mold powder ($\text{CaO}/(\text{SiO}_2)$) from 1.03 to 1.15, decreasing melting point from 1 235 $^{\circ}\text{C}$ to 1 210 $^{\circ}\text{C}$, and increasing viscosity at 1 300 $^{\circ}\text{C}$ from 0.87 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ to 1.10 $\text{Pa}\cdot\text{s}$, the occurring rate of surface depression and net cracks of $\Phi 800$ mm casting bloom decreases from original 60.5% to less than 0.5%.

Material Index Steel Q345E, $\Phi 800$ mm Casting Bloom, Net Cracks, Depression, Mold Powder

Q345E 连铸圆坯主要用于风电设备的连接法兰, 对表面质量和内部质量要求较严格。网状裂纹是连铸坯常见表面缺陷之一, 容易出现在含 Al、Nb、V 的高强钢上^[1,2]。归纳起来表面网状裂纹形成原因主要包括: 钢中残余 Cu 或外来 Cu 在晶界的析出或渗透^[3,4]; 冷却不均匀^[2,5,6], 钢种成分控制不合理, 碳氮化物在晶界析出^[5,7]。国内钢厂采用 R17 mm 大圆坯连铸机生产 $\Phi 800$ mm 规格 Q345E 钢连铸圆坯, 在圆坯表面出现大批量网状裂纹, 为明确裂纹产生原因并改善表面质量, 对裂纹缺陷的形貌、金相组织以及裂纹内的残留物进行观察, 并结合连铸过程的工艺及设备状态, 对裂纹的形成原因进行了分析, 并采取了相应的控制措施。

1 圆坯生产工艺参数及表面裂纹情况

1.1 Q345E 钢圆坯生产工艺

电弧炉炼钢厂使用“EAF-LF-VD-CC”工艺流程生产 Q345E 钢大圆坯, 其中电弧炉为 110 t EBT 式交流电弧炉, 出钢量约 105 t, 铁水比 70% 以上; LF

白渣保持时间 > 20 min, VD 高真空保持时间 ≥ 20 min。 $\Phi 800$ mm 规格 Q345E 钢大圆坯连铸工艺如下: 过热度 20 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$; 拉速 0.17 m/min; 足辊采用水冷, 其余二冷段采用气雾冷却, 比水量 0.07 L/kg; 使用结晶器和末端组合式电磁搅拌; 连铸坯全部入缓冷坑缓冷至 200 $^{\circ}\text{C}$ 以下出坑精整。

1.2 钢种化学成分

Q345E 钢圆坯的化学成分要求如表 1 所示。可以看出, Q345E 钢属于包晶钢, 并添加了 Nb、V 等微合金化元素, 且要求控制较高的 N 含量, 受 δ - γ 相变体积收缩和第二相析出的影响, 具有较强的裂纹敏感性。

1.3 裂纹宏观形貌及其分布规律

圆坯表面存在大量局部凹坑, 经过酸洗去除氧化铁皮后发现在凹坑内部存在大量裂纹, 其宏观特征如图 1 所示, 裂纹长度 1 ~ 15 mm 不等, 没有明显方向性, 接近于网状。

表面凹坑在圆坯圆周方向上无明显分布规律, 在各个方向随机出现; 在拉坯方向上间断出现。在

表 1 Q345E 钢化学成分要求 / %
Table 1 Requirement of chemical composition of steel Q345E / %

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Al
0.14 ~ 0.18	0.15 ~ 0.30	1.20 ~ 1.50	≤ 0.015	≤ 0.010	0.25 ~ 0.50	0.03 ~ 0.06	0.02 ~ 0.04

注: [N] 要求控制在 $60 \times 10^{-6} \sim 120 \times 10^{-6}$

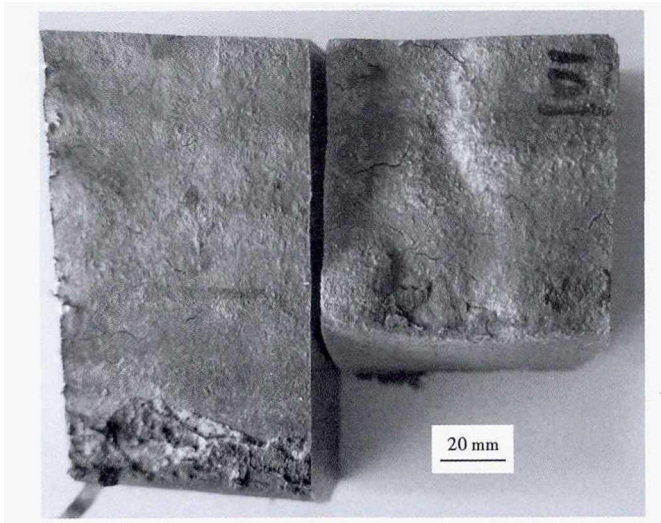


图 1 Q345E 钢 Φ800 mm 铸坯表面裂纹形貌

Fig. 1 Morphology of surface cracks of Φ800 mm casting bloom of steel Q345E

连续生产的 2 个浇次、共计 1 000 多吨圆坯中, 出现凹坑的支数占 60.5%; 而对凹坑部位取样 20 余块, 均发现了不同程度的网状裂纹, 因此网状裂纹的发生率也约为 60.5%。需要对圆坯的凹坑部位进行精整修磨来消除裂纹的影响, 精整工作量很大, 给生产带来了极大困扰。

2 产生裂纹的原因分析

2.1 裂纹试样的化学成分

裂纹试样所在炉次的熔炼化学成分如表 2 所

表 2 裂纹铸坯试样的分析成分 / %

Table 2 Analysis of crack casting bloom specimen / %

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Al	N
0.15	0.27	1.37	0.009	0.001	0.03	0.04	0.030	0.008 0

示, 从表 2 中可以看出, 钢种的化学成分满足表 1 要求。

2.2 裂纹试样的金相分析

沿铸坯表面的凹坑处剖开, 利用金相观察并将多视场图片拼接, 裂纹形貌如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 裂纹深度较大, 最深约为 10 mm, 均沿枝晶的晶界扩展。

凹坑内外铸坯表层附近的金相图片对比如图 3 所示。可以看出, 凹坑内的表层晶粒明显比凹坑外的粗大, 说明二者的冷却速度不同, 凹坑内冷却慢, 晶粒粗大; 裂纹附近的铸坯表层晶粒较粗大, 裂纹缝隙有脱碳现象, 说明凹坑和裂纹产生于高温区域, 且局部传热慢。

2.2 裂纹试样的扫描电镜分析

利用扫描电镜对裂纹进行观察, 未发现 Cu、Sn 等低熔点物质, 但发现裂纹缝隙内残留有异物, 如图 4 所示, 对残留物进行能谱分析, 其元素组成如图 5 所示。可以看出, 残留物主要为 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 的混合物, 并含有一定量的 Na、K 氧化物, 因 Na、K 元素一般存在于保护渣中, 因此可以推断裂纹是在结晶器内产生的, 液态渣膜沿裂纹开口渗入

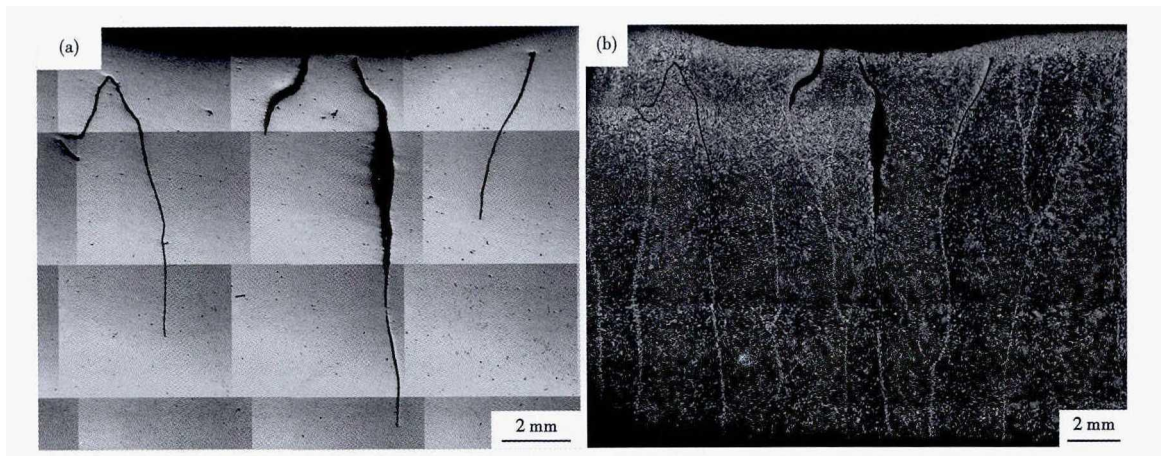


图 2 Q345E 钢 Φ800 mm 铸坯沿凹坑剖面的裂纹形貌: (a) 未腐蚀; (b) 硝酸酒精腐蚀

Fig. 2 Morphology of cracks at cross section along depression of Φ800 mm casting bloom of steel Q345E: (a) polished; (b) nital etched

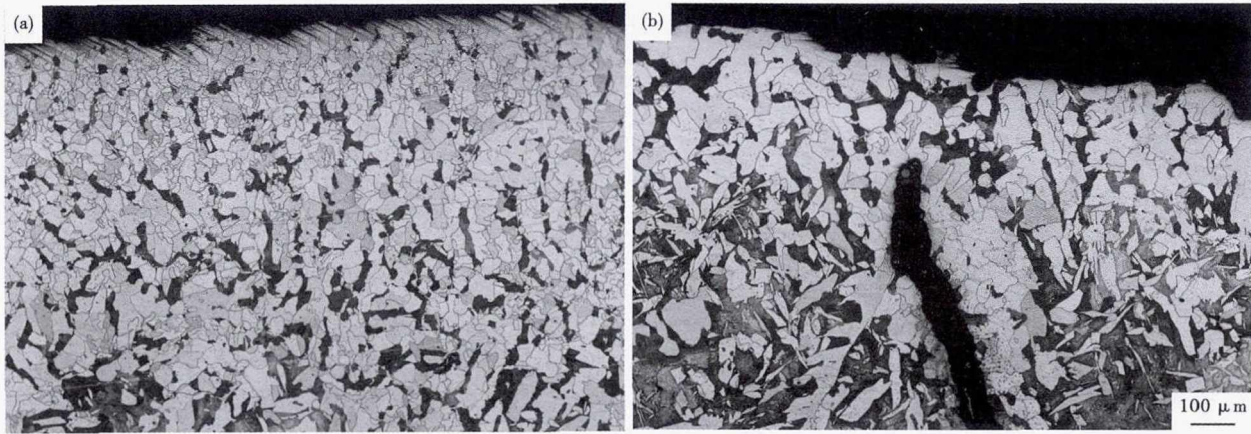


图3 Q345E 钢 Φ800 mm 铸坯表面远离凹坑处(a)和凹坑内裂纹处(b)的组织形貌

Fig.3 Morphology of structure at far distance from depression (a) and at near crack in depression (b), Φ800 mm casting bloom surface of steel Q345E

并残留其中。

2.3 现场工况的排查

对连铸过程工艺和设备精度进行检查,未见明显异常。过热度控制在20~30℃,平均26℃;除开浇过程外,全程保持恒拉速浇注;液面波动控制在±4mm以内;下线结晶器足辊对中精度保持良好,铜管过钢量约2000t,铜管镀层无剥落现象;对结晶器振动进行了测试,振动机构运行平稳,振动偏摆量≤0.1mm。因此,基本可以排除浇注状态或设备状态异常的因素。

2.4 综合分析

通过金相显微镜分析可知,Q345E 钢圆坯表面裂纹是在结晶器内产生的热应力裂纹。在结晶器内,由于渣条严重或保护渣流入不均等因素,结晶器壁和凝固坯壳之间的保护渣渣膜厚度不均匀,使坯壳局部受到挤压并产生凹坑;在凹坑处由于渣膜厚导致传热慢,进而成为高温热点区域;在热点区域,由于温度高,奥氏体晶粒粗大,冷却后室温组织的晶粒也比正常区域粗大;且热点区域冷却慢、收缩量小,而热点周围区域冷却快、收缩量大,在热点区域产生拉应力;对于 Q345E 钢种 Nb、V 微合金化钢,由于包晶反应以及碳氮化物在晶界析出,裂纹敏感性较强,在热点区域容易被热应力撕裂并沿晶界扩展成为表面裂纹。

因此,保护渣性能与浇注参数不匹配,导致结晶器与坯壳间渣膜不均匀,是产生表面网状裂

纹的主要原因。

3 裂纹控制措施及其效果

裂纹的主要控制措施是进行保护渣的优化。根

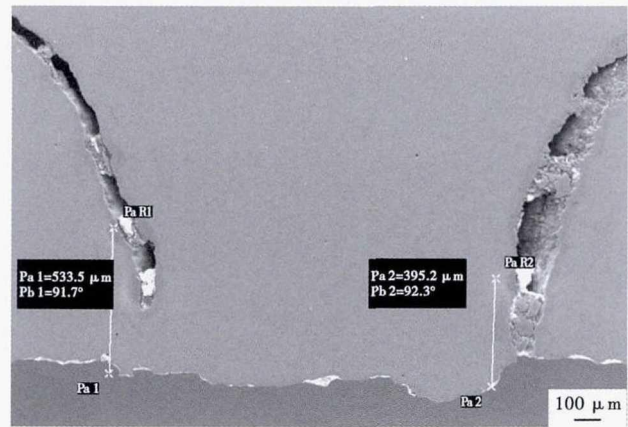
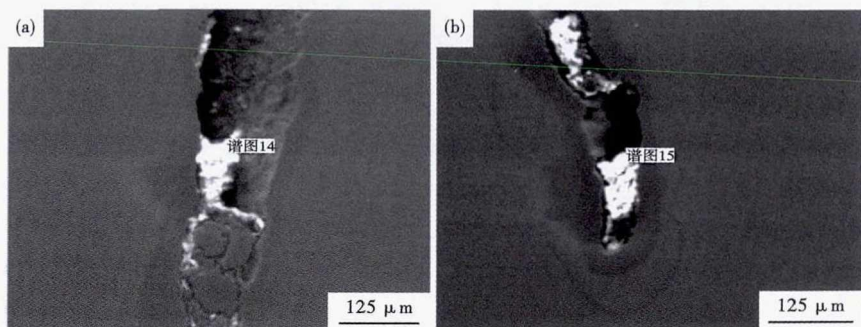


图4 Q345E 钢 Φ800 mm 铸坯表面裂纹内残留物形貌,SEM
Fig.4 Morphology of residues in surface cracks of Φ800 mm casting bloom of steel Q345E, SEM



位置	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	K	Mn	Fe
(a)谱图14	40.71	0.40	0.85	1.57	9.88	6.89	0.62	0.31	16.61
(b)谱图15	41.15	0.39	1.24	1.77	5.61	15.68	0.71	0.15	6.47

图5 Q345E 钢 Φ800 mm 铸坯表面裂纹内残留物形貌(a)(b)和能谱分析

Fig.5 Morphology (a)(b) and energy spectrum analysis of residues in surface cracks of Φ800 mm casting bloom of steel Q345E

表 3 结晶器保护渣优化前后的理化参数
 Table 3 Physical and chemical parameters of mold powder before and after optimization

保护渣	保护渣的组成/%								(CaO)/ (SiO ₂)	熔点/ ℃	1 300 ℃粘度/ (Pa·s)
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	F ⁻	Na ₂ O	FC			
优化前	23.67 ± 3.0	24.48 ± 3.0	14.32 ± 2.0	1.02 ± 2.0	5.36 ± 1.0	2.01 ± 0.5	4.49 ± 1.0	10.75 ± 2.0	1.03 ± 0.06	1 235 ± 30	0.87 ± 0.10
优化后	27.00 ± 3.0	30.50 ± 3.0	10.00 ± 2.0	≤ 2.0	4.50 ± 1.0	≤ 3.0	5.50 ± 1.0	11.00 ± 2.0	1.15 ± 0.06	1 210 ± 30	1.10 ± 0.10

据裂纹产生的原因分析,保护渣优化应从以下 3 方面考虑:

(1) 适当提高保护渣的碱度,减少削弱析晶率的化学成分,进而提高结晶温度和增加结晶比例来实现对凝固坯壳的弱冷;

(2) 适当提高保护渣粘度,有利于渣膜均匀流入到坯壳和结晶器之间,确保渣膜的均匀性;

(3) 适当提高预熔料比例,改善保护渣熔化的均匀性。

基于以上思路对保护渣理化性能进行优化,如表 3 所示。

使用优化后的保护渣进行了 6 个浇次,共计约 5 000 t Φ800 mm 规格 Q345E 钢圆坯的生产,连铸坯表面质量显著改善,发生凹坑和裂纹的铸坯支数占总支数的 0.47%。

4 结论

(1) Q345E 钢连铸大圆坯表面网状裂纹主要分布在表面凹坑内部,是在结晶器内产生的热应力裂纹。

(2) 保护渣性能参数与浇注参数不匹配是导致表面凹坑和网状裂纹的主要原因。

(3) 通过结晶器保护渣的优化,圆坯表面质量

得到显著改善,使表面凹坑和网状裂纹的发生率 < 0.5%。

参考文献

[1] Maehara Y, Nakai K and Yasumoto K, et al. Hot Cracking of Low-Alloy Steels in Simulated Continuous Casting Direct Rolling Process [J]. Tetsu-to-Hagane, 1988, 28(12): 1021-1027.
 [2] Billany T J H, Normanton A S and Mills K C, et al. Griesevon. Surface Cracking in Continuously Cast Products [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1991, 18(6): 403-411.
 [3] Kajitani T, Wakoh M and Tokumitsu N, et al. Influence of Temperature and Strain on Surface Crack due to Residual Copper in Carbon Steel [J]. Memoirs of the Faculty of Engineering Fukui University, 1996, 45: 311-317.
 [4] Fredriksson H, Hansson K and Olsson A. On the Mechanism of Liquid Copper Penetration into Iron Grain Boundaries [J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2001, 30(1): 41-50.
 [5] 孙彦辉, 赵长亮, 蔡开科, 等. 连铸板坯表层网状裂纹的成因研究 [J]. 中国冶金, 2008, 18(4): 15-20.
 [6] 安航航, 钱亮, 周国强, 等. 减少中频炉-连铸工艺生产板坯表面裂纹的生产实践 [J]. 钢铁研究, 2013, 41(2): 56-59.
 [7] 李建民, 陈远清, 刘东风, 等. 液化天然气罐用 9% Ni 钢板坯连铸工艺优化 [J]. 特殊钢, 2012, 33(5): 29-31.

陈远清 (1981-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 2004 年重庆大学 (本科) 毕业, 炼钢及连铸工艺技术研究和特殊钢产品开发。E-mail: yuanqing_chen@163.com

收稿日期: 2018-01-03

欢迎订阅 2018 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅 (可破订)

邮发代号: 38-183

定价: 16.00 元/期 96.00 元/年

邮编: 435001

地址: 湖北省黄石市黄石大道 316 号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社