

大型钢锭轧板开裂和穿孔缺陷分析及浇铸工艺优化

曹季林¹ 毛志刚¹ 赵向政²

(1 河南省工业学校, 郑州 450002; 2 舞阳钢铁公司第一炼钢厂, 舞钢 462500)

摘要 分析了 S355JR 和 S355J2 低碳钢($\% : 0.17 \sim 0.20\text{C}, 0.30 \sim 0.55\text{Si}, 1.40 \sim 1.60\text{Mn}, \leq 0.020\text{P}, \leq 0.015\text{S}, 0.020 \sim 0.040\text{Al}, 0.020 \sim 0.030\text{Nb}$) 28 ~ 40 t 钢锭轧成 230 ~ 400 mm 钢板出现的开裂和穿孔缺陷。通过提高浇铸工操作水平, 根据钢水过热度控制本体浇铸和帽口浇铸时间; 控制精炼终点 $[\text{O}] \leq 25 \times 10^{-6}$ 以及钢中铝含量 0.020% ~ 0.040% 等优化浇铸工艺措施使钢锭探伤合格率提高到 96.8%。

关键词 低碳钢 28 ~ 40 t 大型钢锭 厚板 轧板开裂 穿孔缺陷 工艺优化

Analysis on Cracking and Perforation Defects of Heavy Plate Rolled from Large-Scale Ingot and Optimization of Casting Process

Cao Jilin¹, Mao Zhigang¹ and Zhao Xiangzheng²

(1 Henan Province Industrial School, Zhengzhou 450002; 2 First Steelmaking Works, Wuyang Iron and Steel Co, Wugang 462500)

Abstract An analysis on cracking and perforation defects occurred in 230 ~ 400 mm plates rolled from 28 ~ 40 t ingot of low carbon steel S355JR and S355J2 ($\% : 0.17 \sim 0.20\text{C}, 0.30 \sim 0.55\text{Si}, 1.40 \sim 1.60\text{Mn}, \leq 0.020\text{P}, \leq 0.015\text{S}, 0.020 \sim 0.040\text{Al}, 0.020 \sim 0.030\text{Nb}$) is carried out. With the optimum process measures including increasing level of operation crews, controlling ingot body and hot top casting speed according to overheating extent of liquid, controlling refining end $[\text{O}] \leq 25 \times 10^{-6}$ and aluminium content in steel 0.020% ~ 0.040%, the ingot qualified ratio by nondestructive testing increases to 96.8%.

Material Index Low Carbon Steel, 28 ~ 40 t Large-Scale Ingot, Heavy Plate, Cracking of Rolled Plate, Perforation Defect, Process Optimization

舞阳钢铁公司是目前国内主要厚板生产厂家, 一炼钢厂现有 90 t UHP 超高功率电弧炉 2 台, 90 t LF 钢包精炼炉 3 台, VD 真空处理炉 2 台, 采用“电弧炉-LF-VD-模铸浇铸”的工艺流程, 对于低合金钢的生产在成分控制上已经基本成熟, 主要存在的问题就是探伤不合格。

轧板用钢锭单重从 11 t 到 50 t, 共 16 个规格。近几年来随着厚板规格的扩展, 模铸大单重厚板生产量越来越多, 特别是重大工程用钢的增加, 对钢板探伤要求也越来越高, 使得探伤不合格或合格率低造成的反复补产现象增多, 而钢锭轧板开裂、穿孔(轧钢时钢锭内部柱状晶与中心等轴晶交界处受外力开裂产生的空洞, 未外漏于钢板表面)造成的探伤不合格占总量的 30% 左右。给生产组织与成本带来巨大的压力。因此如何优化工艺, 提高大单重、厚板探伤合格率已经成为厚板生产中的重中之重。

1 钢板缺陷形态

2012 年 4 月 23 日-5 月 28 日, 钢锭轧板后开裂及缩孔 24 个炉次、37 块钢板, 一炼钢工艺调查钢板缺陷的分析如下:

按照钢板是否存在上下贯穿裂口、裂口周围分层缺陷是否大幅度扩展及开裂缺陷是否暴露等, 把钢板缺陷形态划分为 4 个类型:

(1) 裂口贯穿后分层缺陷小幅扩展(图 1a)。

图 1(a) 显示的炉号是 12202215N0, S355JR, 锭重 35.47 t, 钢锭头部宽度 2 140 mm, 厚 690 mm, 尾部宽度 2 090 mm, 厚 780 mm, 锭身高度 2 525 mm, 帽口高度 350 mm。轧后钢板厚度 360 mm, 毛长 5 150 mm, 毛宽 2 100 mm, 裂口贯穿钢板上下表面, 裂口宽度 150 mm、长 1 100 mm, 裂口周围分层缺陷宽度 600 mm, 长度 1 950 mm, 没有大范围扩展。该支钢锭入均热炉前已经发现有横裂纹。

(2) 裂口贯穿后分层缺陷剧烈扩展(图 1b)。

图 1(b) 显示的炉号是 12202030N0, S355JR, 钢锭参数与图 1(a) 相同。轧后钢板厚度 230 mm, 毛长 7 050 mm, 毛宽 2 700 mm, 裂口贯穿钢板上下表面, 裂口宽度 140 mm、长 1 200 mm, 裂口周围分层缺陷宽度 580 mm, 长度 2 460 mm, 在裂口南北两端向上扩展至钢锭帽口, 分层区域宽度 300 mm。该支钢锭入均热炉前已发现横裂纹。

(3)裂口暴露未贯穿分层缺陷剧烈扩展(图2a)。

图2(a)显示的炉号是12201664N0,S355J2,轧后钢板厚度250 mm,毛长4 050 mm,毛宽2 660 mm,裂口在上表面微露,裂口宽度30 mm、长80 mm,裂口周围分层呈“人”字形扩展,向上到帽口,分层缺陷宽度40~260 mm,长度1 280 mm,向下两翼分层宽度260~350 mm,长度1 300 mm。轧制前未发现钢锭有表面缺陷。

(4)裂口未暴露分层缺陷剧烈扩展(图2b)。

图2(b)显示的炉号是12202126N0,S355JR,轧后钢板厚度400 mm,毛长3 580 mm,毛宽2 650 mm,钢板表面无裂口,探伤分层缺陷呈“人”字形扩展,向上到帽口,分层缺陷宽度60~480 mm,长度1 760 mm,向下两翼分层宽度280~320 mm,长度1 440 mm。轧制前未发现钢锭缺陷。

S355JR和S355J2低碳钢板内控成分如表1所示,其余元素符合EN10025标准规定。精炼结束取炉渣进行成分分析,结果如表2。

两炉缺陷钢板锯开后内部形态均未看到明显的残余缩孔,均呈钢质基体撕裂状,有明显金属光泽(图3)。2012年4月23日~5月28日钢锭轧板后开裂及缩

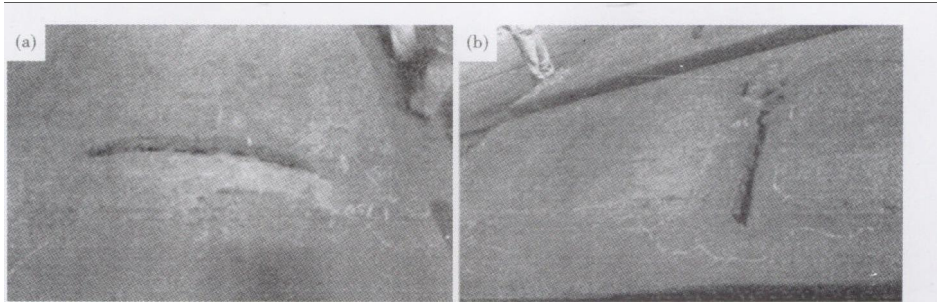


图1 钢板裂口贯穿后分层缺陷小幅扩展(a)和剧烈扩展(b)的形貌
Fig.1 Morphology of alight extending (a) and severe extending (b) of steel plate laminate defect with penetrating crack

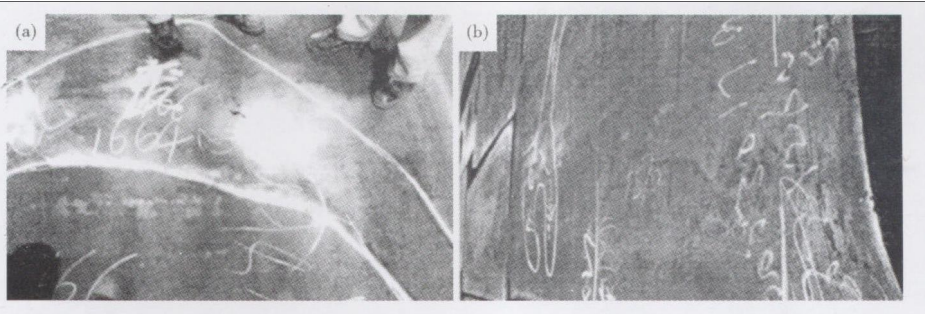


图2 钢板裂口暴露未贯穿分层(a)和裂口未暴露分层(b)缺陷剧烈扩展形貌
Fig.2 Morphology of severe extending of steel plate defect with crack exposing non-penetrating laminate (a) and crack non-exposing laminate (b)

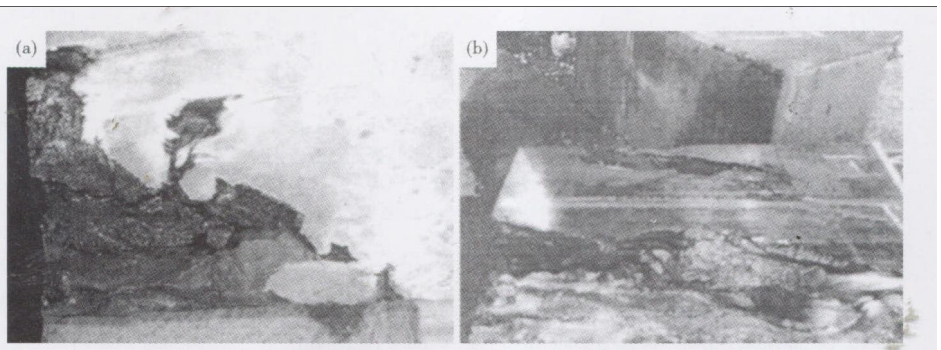


图3 钢板锯开后呈现的缺陷形貌:(a)12201744炉;(b)12201664炉
Fig.3 Morphology of defect after cutting of steel plate: (a) heat 12201744; (b) heat 12201664

表1 S355JR和S355J2钢的控制成分/%

Table 1 Controlling chemical composition of steel S355JR and S355J2 /%

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb
0.17~0.20	0.30~0.55	1.40~1.60	≤0.020	≤0.015	0.020~0.040	0.020~0.030

表2 精炼结束炉渣成分/%

Table 2 Ingredient of refining end slag /%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TCa	MgO	TFe	MnO	P ₂ O ₅	S
14.45	15.95	40.01	8.84	0.46	0.29	0.035	1.684

孔炉次工艺参数见表3。

表3中共26炉钢,37块钢板,其中12块未暴露内横裂缺陷(表3中斜体字炉号),在轧制过程反馈有异常的钢板20块钢板其中钢锭本体浇铸动流者有11块(在这11块当中,接近于钢锭浇高一半动流者占7块)。

2 产生缺陷的原因分析

2.1 钢锭横裂纹位置特征

根据对12202117、12201264炉裂纹位置测量,分别距钢锭帽口线1.0、0.9 m,距钢锭尾部1.525、

表 3 钢锭轧板后开裂和缩孔炉次工艺参数

Table 3 Process parameters of heats for ingot rolling plate with cracking and shrinkage cavity

炉号	钢种	钢锭		穿孔开 裂/ 支数	钢锭 装炉 状态	轧制过程 板型是否 异常	注流动流 变动情 况/min	浇铸时间/min	
		锭重/ t	支数					本体	帽口
12201619	S355J2	28	4	2	冷	异常	本体 6	17	6
12201664	S355J2	28	4	2	冷	异常	无	20	6
12201702	Q420C	30	3	3	冷	异常	终浇前 7	17	6
12201744	Q420C	30	3	3	冷	异常	本体 10	17	6
12201980	S355J2	28	2	1	冷	正常		15	5
12202215	S355JR	35	3	1	冷	正常	本体 6	17	5
12201577	Q345GJC	30	3	1	冷	异常		17	6
12201580	S50C	35	3	1	冷	异常		19	6
12201678	S355J2	28	3	1	冷	异常	本体 8	18	6
12201691	Q345GJC	30	3	1	冷	异常	本体 13	18	5
12201743	S355J2	28	4	2	冷	异常	终浇前 5	18	5
12201783	Q390GJC	31	1	1	冷	异常	本体 12	17	8
12201906	S355J2	30	2	3	冷	正常	终浇前 5	17	6
12201935	S355J2	30	2	1	冷	正常		18	7
12201651	S355J2	28	4	1	冷	正常	本体 9、 11、13	19	6
12201733	S355J2	28	4	1	温	正常		17	5
12201759	S50C	35	3	1	冷	正常	本体 11	19	5
12201980	S355J2	28	2	1	冷	正常	无	15	5
12202025	S355J2	30	1	1	冷	正常		15	5
12202025	S355J2	35	3	1	冷	正常	本体 14	17	5
12202210	S355J2	35	3	3	冷	正常	本体 10	17	6
12202215	S355J2	35	3	1	温	异常	本体 6	17	5
12202174	S355J2	35	3	1	冷	正常	本体 6	17	5
12202030	S355J2	35	3	1	冷	异常	本体 11	18	5
12202126	S355JR	40	2	1	冷	异常	无	16	5
12202082	S355J2	35	3	1	冷	正常	终浇前 4	16	5
12202026	S355J2	35	3	1	冷	正常	本体 17	20	5

注:表中钢锭的重量(t)和浇铸的支数按四舍五入取整数;轧制过程是否异常中的“异常”:即钢锭轧制过程板厚达到 600 mm 时,图 1(a)所示的缺陷部位开裂,并有蓝色火焰燃烧。

1. 600 m。按照《最新炼钢新工艺与核心技术操作要点及现场作业全程控制制度实施手册》提供的钢锭浇铸过程中心流股实际喷射高度推算:

$$H_{\text{实}} = 0.7 v^2 / (2g)$$

式中: v - 钢水从上升孔流出速度; g - 常数 9.18。

取 $v = 6$ m/s, 则计算中心流股实际喷射高度 1.37 m 左右。

根据连续性方程原理,在钢锭模内任一断面上,卷入中心流股的钢水量,应等于边缘流股的回流量。在中心流股能够到达的最大高度处,边缘流股截面积最小,流速最大,致使凝固壳减薄,成为产生横裂纹的敏感区域。浇铸液面上升快慢不均易导致激冷层厚薄不均,形成应力横裂纹。

上述计算结果确定的横裂易发区与实测值基本

吻合。

2.2 钢锭裂口贯穿后分层缺陷剧烈扩展

除注流流股引起的钢液流动外,在钢液凝固过程,还存在着注流流股凝固壳收缩引起的强制对流,同时由于两相区残余母液的温度低、溶质含量高,而在钢锭中心部位钢液的温度高、溶质含量低而形成了金属熔体密度差,引起钢液自然对流,还有在凝固前沿因气体析出造成的钢液对流。当流股速度达到 0.25 m/s 以上,掠过凝固前沿时,可将枝晶打碎,促使等轴晶发展,过热钢液围绕枝晶前沿流动,还会使枝晶根部熔化,成为游离的树枝晶片,成为等轴晶晶核,促使等轴晶区域扩展。

等轴晶的结构致密,彼此之间相互嵌入,结合牢固,热加工性能好。柱状晶的枝干较纯,枝晶间偏析比较严重,经热加工变形后枝晶偏析延伸,横向性能和韧性降低。尤其是柱状晶交界面上,非金属夹杂物富集,成为裂纹容易扩展的地方,加工时发生脆裂的可能性增加,是应力释放的主要区域。当钢锭帽口线下或本体疏松区域轧制出现内裂时,会向此区域扩展,并成为快速扩张区域。轧制过程出现穿孔的主要原因是钢锭内部存在组织应力,冷钢锭入炉加热过程中内外横裂发展恶化。如何减少钢锭内部应力是关键。

同时,当 [C] 为 0.20% 左右时,钢的塑性最低,而碳含量比 0.20% 小一些或大一些的钢其强度变化不大,塑性却大为提高。而钢中的 AlN 在 1 240 °C 左右固溶析出,也将降低晶界强度。表 3 中的 26 个炉号中,成品 [Al] $\geq 0.055\%$ 有 7 个炉号,占 29.1%。

2.3 钢锭延迟裂纹(炸裂)

钢锭在冷却或加热时,在其表面或内部产生的不规则开裂称为炸裂。钢锭冷却速度越大,导热性越差,组织转变越快,断面温差越大,越容易炸裂。但有时钢锭放置较长时间后才产生炸裂,这是因为组织应力有个逐渐集聚过程。钢锭浇铸快慢不均,易形成钢锭锭身上下组织不均匀,钢锭内部组织应力大,后步冷却、清理、堆放、加热等过程操作不当易产生内部横裂或表面横裂。

根据 2012 年 5 月份一轧原料车间反馈的清理

信息,出现表面裂纹5块,清理后全部轧合,其中3支锭为后期钢锭模。本轮5块裂纹钢锭中12201963炉也为此类缺陷,轧后表面横裂很浅,经清理后可合格。其余4块在清理过程也没有记录裂纹,而是在轧钢清理库存时发现,表明裂纹有延迟性。

3 采取的纠正及预防措施

为提高大型钢锭轧板的探伤合格率,采取了7项纠正和预防工艺措施:

(1)提高浇钢工操作水准,控制钢锭本体浇铸过程动流次数,力争不在钢锭容易产生横裂纹的敏感区域调整注流。

除浇铸开流、跟流操作外,增流操作应在浇铸开始后的前4 min内完成,帽口线下减流操作不易过早,应以保护渣接触绝热板为准,避免在钢锭本体高度的1~1.8 m间动流,产生液面剧烈波动,冲刷凝固壳,造成应力叠加集中。

(2)钢锭浇铸过程要兼顾注速和注流,以钢水浇铸圆流为首要条件,避免刻意追求本体浇铸时间控制在某一狭窄区域,造成钢水散流而不进行及时调整。

浇铸前的生产准备阶段,要清理浇钢小车的钢包支架积灰,同时进行正包操作,确保水口垂直对中。要对液压销、拉杆进行核查,保证液压系统动作到位,滑板控制到位。开浇放流操作要冲净引流砂,确认达到圆流状态。在圆流状态下,再微调浇铸时间。

(3)在操作规程规定范围内,遵循低温快铸,高温慢铸原则。

根据吊包时钢包周转状况、钢水量、吊包时过热度、镇静时间,在规程要求的范围内实现低温快铸,高温慢铸。即正常浇铸钢水过热度控制在30~40℃,钢锭本体浇铸时间16~20 min,帽口浇铸时间4~8 min,当钢水过热度在30~33℃时,钢锭本体浇铸时间在18~20 min;当钢水过热度在37~40℃时,钢锭本体浇铸时间在16~18 min;对于吊包温度偏下限炉次,在浇铸过程圆流的情况下,浇铸时间要向下限靠拢。浇铸工艺对比如表4。

(4)细查上线铸模内部状况,避免钢锭因结疤、粘模,造成机械拉裂。

铸锭工序要进一步完善锭模修复、上线使用标

表4 原浇铸工艺和优化浇铸工艺对比

Table 4 Comparison between original and optimum casting process

锭重/ t	工艺规定浇铸 时间/min		本体浇铸 时间/min		帽口浇铸 时间/min	
	本体	帽口	原工艺	优化工艺	原工艺	优化工艺
28	13~18	4~8	16~18	13~16	5~7	4~5
30	13~18	4~8	16~18	13~16	5~7	4~5
31	13~18	4~8	16~18	14~16	5~7	4~5
35	15~20	4~8	16~19	14~16	5~8	4~6
40	16~21	5~9	16~19	15~17	5~8	4~6

准,减少机械拉裂造成的表面横裂纹。

(5)做好钢锭帽口保温,提升钢锭中上部疏松区的补缩效果。

绝热板安装不到位、帽口与钢锭模结合部位密封不严、绝热板绝热效果差,是导致钢锭喉部先凝固,钢水无法有效补充本体的关键。铸锭工序要对绝热板装配确保有效浇高、浇铸结束后帽口补加碳化稻壳等落实检查。

(6)提高精炼控制水准,减少成品[Al]≥0.05%炉次。

炼钢工序要从LF过程脱氧、造渣着手,稳定吊包前钢水氧含量 $\leq 25 \times 10^{-6}$,提高真空结束内控成分[Al]的命中精度,降低AlN对钢锭热加工的不利影响,力争成品[Al]内控达标率在95%以上。

(7)强化锭模管理,按时间节点进行热送,为钢锭热装(或温装)奠定坚实基础。

到目前为止,热装钢锭没有出现开裂、缩孔缺陷,出现问题的冷装钢锭占此次问题钢锭的94.6%。因此,钢锭热装、温装入炉是可控因素中最明显、最需要解决的环节。铸锭工序要进一步完善上线前钢锭模的可使用性确认,加大铸模的焊补、修磨力度。

4 工艺优化效果

经过一系列的技术改进,2012年7~9月份,钢锭探伤合格率96.8%(按块计算),较4~6月份提高了1.30%,缩孔、穿孔缺陷占探伤不合格缺陷的8.6%,有效提高了轧板的质量。

曹季林(1972-),男,讲师,1996年昆明理工大学毕业,钢铁冶炼研究。E-mail:caojilin2000@163.com

收稿日期:2013-02-16