

# 马钢小异形坯表面纵裂纹控制工艺研究

杨应东,胡春林,付振宇,吴 坚

(马鞍山钢铁股份有限公司 长材事业部,安徽 马鞍山 243011)

**摘要:**针对马钢小异形坯表面纵裂纹指数较高的问题,对小异形坯轧后裂纹与保护渣组成进行分析,且对结晶器内流场与温度场进行模拟。结果表明,保护渣变性以及小异形坯管式结晶器流场与传热不均是导致小异形坯表面纵裂纹的主要原因。针对小异形坯表面纵裂纹产生的特点,开发小异形坯保护浇注工艺以及优化结晶器均匀传热工艺,可使小异形坯表面纵裂纹指数由100 mm/m以上降至30 mm/m以下,轧后裂纹修磨率也由4%左右下降至1%以下。

**关键词:**异形坯;表面纵裂纹;保护渣;管式结晶器

**中图分类号:**TF 777.4      **文献标志码:**A      **doi:**10.3969/j.issn.1671-7872.2017.04.004

## A Study of Control Process of Surface Longitudinal Cracks of Small Beam Blank in Ma'anshan Iron and Steel Co. Ltd.

YANG Yingdong, HU Chunlin, FU Zhengyu, WU Jian

(Long Products Business Division, Ma'anshan Iron and Steel Co. Ltd., Ma'anshan 243011, China)

**Abstract:** In view of the problem of high surface longitudinal cracks index of small beam blank in Ma'anshan Iron and Steel Co. Ltd., the longitudinal cracks after rolling and the composition of mold powder were analyzed, and the flow and temperature distribution in the mold were simulated. The results indicate that, the main causes of longitudinal cracks of the small beam blank are mold powder properties altered during casting, and uneven flow and heat transfer of the beam blank tubular mold. According to the characteristics of longitudinal cracks of small beam blank, the protection and pouring process of small beam blank were developed, and the tubular mold were redesigned which made heat transfer homogeneously. The surface longitudinal crack index is reduced from above 100 mm/m to less than 30 mm/m. The grinding ratio after rolling is significantly reduced from about 4% to below 1% after process optimization.

**Key words:** beam blank; surface longitudinal cracks; mold powder; tubular mold

采用异形坯为原料生产H型钢能减少轧制道次,提高轧机的生产能力及成材率,且在降低成本、提高生产率等方面具有显著优势<sup>[1]</sup>。异形坯表面纵裂纹的影响因素与常规板坯、方圆坯断面相似,均为结晶器保护渣理化性能,浸入式水口插入深度、角度及结构,冷却强度,二冷段对弧偏差、二冷喷嘴状况,钢种C含量及有害元素含量,中包钢水过热度,钢的洁净度等<sup>[2-3]</sup>。但是异形坯集合了圆坯、方坯、板坯特点,断面形状复杂,且曲面半径不同<sup>[4]</sup>,各面交接处(棱)过渡类型复杂,任一冷却面到液芯的距离不等,其断面形状特点不利于表面均匀导热和均匀冷却,进而不利于表面冷却收缩<sup>[5-6]</sup>。对于传统连铸工艺,铸坯表面的冷却收缩应力在同一平面内,而异形坯冷却表面的受力不在同一平面内,导致其表面应力的复杂多维性明显,裂纹控制难度较大<sup>[7]</sup>。

收稿日期:2017-05-26

基金项目:安徽省科技重大专项(15CZZ02036)

作者简介:杨应东(1977—),男,安徽桐城人,工程师,主要研究方向为炼钢工艺。

目前,马钢有2条H型钢生产线,主要生产普通碳素结构钢、低合金结构钢、耐候钢等系列钢种,用于建筑、桥梁、海上石油平台、汽车大梁、铁路车辆等建设,产品规格范围覆盖150~800 mm,由异形坯连铸机与之配套提供坯料。由于异形坯特有的断面形状以及马钢小异形坯管式结晶器传热特点,异形坯表面纵裂纹的发生率较高,裂纹指数超过100 mm/m,导致轧后裂纹修磨率一直居高不下。为此,笔者对异形坯表面纵裂纹以及保护渣成分进行分析,结合数值模拟优化现有工艺路线,以期对小异形坯表面纵裂纹进行有效控制。

## 1 小异形坯表面纵裂纹形态及其产生机制

马钢小H型钢产线于2008年投产,主要由1台小异形坯连铸机提供坯料,连铸机主要技术参数见表1。

### 1.1 裂纹形貌及夹杂物分析

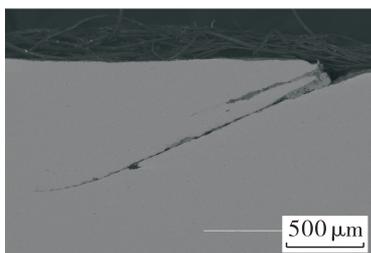
小异形坯表面纵裂纹主要发生在异形坯的R角及腹板偏R角1/3~1/4处,裂纹数量较多,裂纹长度在100~300 mm之间,严重时超500 mm。

图1为小异形坯典型钢种Q345B轧后表面纵裂纹微观形貌及裂纹周围夹杂物的能谱分析结果。从图1(a)可看出,裂纹周围有明显脱碳层,深度在1 mm左右,角度较为尖锐。由图1(b),(c)发现,裂纹内夹杂主要为Ca、Si、Al元素,含少量Na、Mn元素(图1(b)),以及部分FeO夹杂(图1(c))。裂纹内夹杂Na为保护渣夹入以及加热过程中裂纹内铁氧化所致,未见大量硅锰酸盐夹杂,故认为裂纹是在结晶器内产生,夹杂物富集并非造成异形坯表面纵裂纹的主要原因。

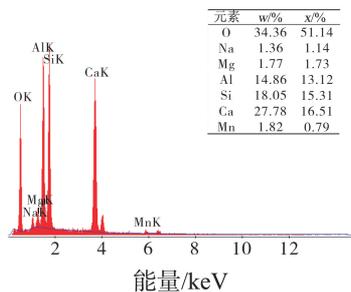
表1 小异形坯连铸机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of small beam blank continuous caster

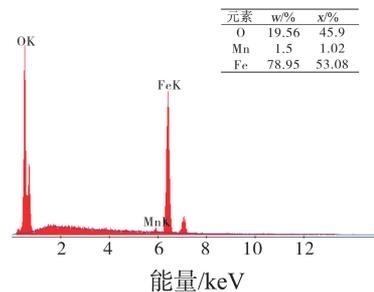
机 型	全弧形连铸机
平均出钢量	70 t
流数	4
铸坯规格	BB3: 430 mm×300 mm×90 mm BB4: 320 mm×220 mm×85 mm
工作拉速	BB3: 1.25~1.45 m/min BB4: 1.35~1.55 m/min
拉矫装置	4机架,3点矫直
引锭杆形式	柔性链式引锭杆
浇注方式	定径水口+保护渣,浸入式水口+保护渣
结晶器类型	管式
铜管长度	800 mm
铜管材料	银铜
结晶器锥度类型	抛物线
出口支撑形式	单排辊足辊装置



(a) 裂纹微观形貌



(b) 含保护渣成分夹杂能谱



(c) FeO夹杂能谱

图1 轧后表面纵裂纹微观形貌及夹杂物能谱分析

Fig. 1 Metallograph of crack and EDS of inclusions after rolling

### 1.2 保护渣对异形坯表面纵裂纹的影响

保护渣于结晶器和铸坯之间形成渣膜,使坯壳向结晶器铜壁传热的均匀性得到改善<sup>[8]</sup>。异形坯断面复杂,要求坯壳在结晶器内有良好的润滑性,而良好的润滑性能要求保护渣有较多的玻璃相,这又会导致渣膜厚度不均匀,局部传热过强<sup>[9]</sup>。因此,保护渣性能对异形坯表面裂纹的影响至关重要。

马钢小异形坯连铸采用定径水口半敞开式浇注的方式生产,钢水有一定程度的二次氧化,同时生产过程中经常发生水口粘钢,需进行烧氧处理,烧氧处理不可避免地将钢中Si、Mn、Fe等元素氧化带入保护渣中,造成保护渣变性。敞开浇注条件下Q345B钢保护渣原渣与结晶器内渣块成分见表2。由表2可看出,在敞开浇注条件下保护渣渣块中SiO<sub>2</sub>、MnO以及Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量明显上升,保护渣碱度由1.22降低至0.41,保护渣变性极其严重。保护渣碱度急剧下降,导致熔渣层黏度上升,其传热与润滑效果变差,无法发挥保护渣最佳冶金效

果,故结晶器内保护渣变性是导致表面纵裂纹产生的主要因素之一。

### 1.3 液面波动对异形坯表面纵裂纹的影响

结晶器液面波动与异形坯表面纵裂纹密切关系,液面波动过大会破坏保护渣的三层结构,导致其润滑和传热变差,增加表面缺陷和卷渣的产生风险,影响铸坯和最终产品的质量<sup>[10]</sup>。职建军<sup>[11]</sup>认为钢液面波动控制在 $\pm 3$  mm范围内,就能防止板坯纵裂纹的发生。马钢小异形坯连铸采用拉速自动控制,正常情况下,液面波动能够控制在 $\pm 3$  mm范围内,但是中间包连浇过程以及定径水口烧氧过程对液面有一定的扰动,对钢液在结晶器里的流场造成影响,液面波动严重时可能破坏保护渣的合理结构,增大纵裂纹的发生几率。

### 1.4 结晶器内流场与温度场分布对异形坯表面纵裂纹的影响

异形坯连铸过程是高温条件下的复杂过程,钢水和钢坯的凝固和冷却对异形坯质量起着决定性作用<sup>[12]</sup>。利用有限元分析软件 ANSYS 对马钢小异形坯管式结晶器内流场、温度场分布进行模拟计算,分析结晶器内流场及温度场分布规律,及其对表面纵裂纹产生的影响。以马钢小异形坯 BB3 断面管式结晶器、双浸入式水口浇注为基础建立模型,模拟工艺参数为:拉速 1.3 m/min、水口插入深度 80 mm、水缝宽度 4 mm、软水流量 210 m<sup>3</sup>/h、进出水温差 6 ℃、铜管长 800 mm,液面区距铜管上口 100 mm。模拟计算结果如图 2,3。

由图 2 可看出:钢液从直筒型浸入式水口流出,然后冲击进入结晶器,部分钢液在结晶器上部区域形成由中心向下回旋区;部分钢液形成由凝固一侧向上流动的上回旋区,从而在异形坯结晶器内形成多个较大的漩涡,其中,位于两个水口之间近腹板处的漩涡范围较大,靠近窄面的漩涡强度较弱,范围较小;大部分钢液直接向下流动直至流出结晶器。

由图 3 可看出:整个断面翼缘与窄面及腹板处温度较低,R角处温度较高,因此腹板与R角之间温差较大,初生坯壳厚度不均匀,加上热应力在此处集中,容易产生裂纹;结晶器水口位置正下方温度相对整个截面最高,这是由于高温钢液通过浸入式水口直接冲击进入结晶器,大部分钢液直接向下流动直至流出结晶器,此部分钢液在结晶器内停留时间较短,且远离结晶器壁,热量散失较少,温度较高,同时R角距水口钢液位置较近,受传热影响,此部位温度较高,为漩涡较大,极易产生裂纹。

上述结果表明:受制于异形坯管式结晶器断面形状特点,铸坯在结晶器内表面传热很难完全均匀冷却,在靠近R角位置温度较高以及受钢水冲刷严重;R角偏腹板中心 1/3~1/4 位置,因腹板与R角温差较大,此处热应力集中导致极易产生裂纹,这与生产实际中裂纹发生的情况较为吻合。由此表明,结晶器内流场与传热不均匀也是造成异形坯表面纵裂的主要原因。

## 2 小异形坯表面纵裂纹控制工艺

### 2.1 小异形坯全保护浇注工艺

针对半敞开式浇注造成的保护渣变性以及液面波动变大问题,开发小断面异形坯全保护浇注工艺,浇注过程采用双浸入式水口全保护浇注工艺可减少钢水二次氧化,并在生产过程中可避免烧氧清理碗口废钢。

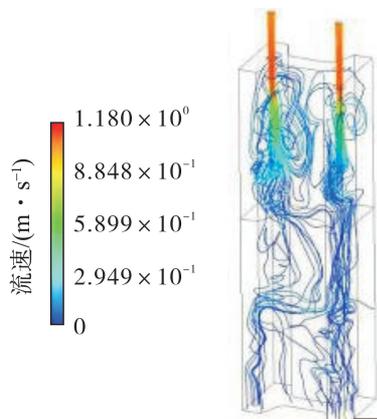


图 2 过水口的流线分布

Fig. 2 Streamlines distribution of molten steel through nozzle

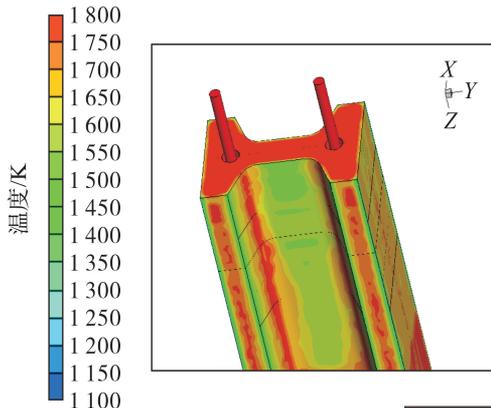


图 3 结晶器内铸坯温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of billet in mold

表2为保护浇注流次与敞开浇注流次保护渣渣块成分。由表2可知:与原渣相比,采用保护浇注工艺渣块中 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MnO}$ 含量明显低于敞开浇注工艺;保护渣原渣碱度为1.22,保护浇注工艺渣块碱度为0.80、敞开浇注工艺渣块碱度为0.41,说明采用保护浇注工艺保护渣变性情况得到极大缓解。

表2 不同浇注工艺保护渣渣块成分

Tab. 2 Composition of mold flux with different casting processes

保护渣	w(CaO)/%	w(SiO <sub>2</sub> )/%	w(MnO)/%	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	w(C <sub>固</sub> )/%	w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	w(F)/%	w(H <sub>2</sub> O)/%	R
原渣	28.82	23.56	2.31	11.83	15.19	1.16	2.06	0.73	1.22
敞开浇注	18.53	44.72	13.07	7.93	-	1.87	1.54	0.20	0.41
保护浇注	24.42	30.41	4.68	7.31	-	1.49	1.76	0.20	0.80

同时,保护浇注工艺无需烧氧清理碗口,避免了人工操作对结晶器液面的扰动,提高了液面稳定性,可降低裂纹发生率。表3为采用保护浇注工艺后小异形坯纵裂纹指数。由表3可看出,运用保护浇注,小异形坯表面纵裂纹指数显著降低,纵裂纹指数有效控制在50 mm/m以内,极大改善了铸坯质量。

## 2.2 结晶器传热的优化

根据结晶器内温度场、流场的模拟结果,针对异形坯管式结晶器的特点,以提高结晶器传热均匀性为目标,对结晶器铜管外形尺寸以及水套结构进行优化设计,在不改变铜管其他部位冷却的条件下,加强R角位置冷却。优化前后结晶器内腹板与R角温度分布模拟结果见图4。由图4可见,结晶器优化后,在相同位置,R角温度与腹板中心温度之间的温差由97.7 K降至48.0 K,温度均匀性明显提高。

根据模拟结果,改进结晶器进行试验,跟踪各流小异形坯表面纵裂纹指数,结果见表4。其中3个流使用未改进结晶器,1个流采用改进结晶器。从表4可见,改进结晶器铜管流表面纵裂纹指数明显低于未改进铜管流,表面纵裂纹指数在30 mm/m以下,小异形坯表面纵裂纹情况得到进一步改善。

## 3 结论

1) 马钢小异形坯表面纵裂纹产生的主要原因为敞开式浇注导致的保护渣变性以及异形坯管式结晶器内传热不均匀造成的应力集中。

2) 开发小异形坯双浸入式水口保护浇注工艺,可有效解决保护渣变性问题,并提高结晶器液面的稳定性;针对异形坯管式结晶器特点,对结晶器铜管进行优化设计,可极大地降低R角与腹板的温差,提高传热均匀性。

3) 采用保护浇注工艺及优化结晶器铜管结构后,马钢小异形坯纵裂纹状况得到改善,纵裂纹指数由原来的100 mm/m以上降至30 mm/m以下。

表3 应用保护浇注工艺后小异形坯表面纵裂纹指数

Tab. 3 Longitudinal crack index of small beam blank after applying all-shield casting process

钢种	跟踪炉数	平均裂纹指数/(mm/m)
Q345B	40	23.9
A992	20	41.9
S355J0	20	47.6
SM490A	40	25.3
Q460C	10	39.7

注:裂纹指数=裂纹总长度(mm)/铸坯长度(m)

表4 使用不同结晶器小异形坯表面纵裂纹指数

Tab. 4 Longitudinal crack index of small beam blank with different mold

钢种	跟踪炉数	平均裂纹指数/(mm/m)	
		未改进铜管流	改进铜管流
Q345B	30	26.9	21.9
A992	30	39.4	25.9
S355J0	20	50.3	27.6
SM490A	10	25.7	19.3
Q460C	8	41.6	28.7

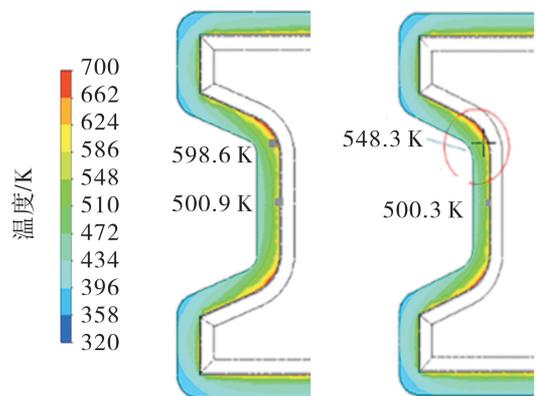


图4 优化前后铜管温度云图

Fig. 4 Temperature nephogram of tube before and after optimization