高强钢纵裂控制*

刘志国,李 鑫

(内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板坯连铸连轧厂,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 结合包钢宽板铸机设备和工艺特点,通过对高强钢化学成分、结晶器水量、结晶器锥度、保护渣和生产组织的分析,找出了包钢宽厚板高强钢纵裂产生的原因,并制定了优化生产组织、适当加大结晶器锥度、减少结晶器水量和优化炉次间换包操作等控制措施,从而使高强钢纵裂情况有了明显改善。结果表明,严格的质量控制措施是克服高强钢纵向裂纹的关键因素。

关键词: 高强钢; 纵裂; 原因; 控制措施

中图分类号: TF777 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)02-0045-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.02.012

Control of Longitudinal Crack on High Strength Steel

Liu Zhi-guo, Li Xin

(*CSP Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The causes for longitudinal crack on high strength steel of wide and thick plate of Baotou Steel are found out through analyzing the chemical composition of high strength steel, water quantity and cone angle of crystallizer, casting powder and production organization combining with the casting machine and technological characteristics for wide plate of Baotou Steel. Moreover, such control measures as optimizing the production organization, properly increasing cone angle of crystallizer, decreasing water quantity of crystallizer and optimizing operation of changing ladle between heats are established so that the longitudinal crack on high strength steel is reduced obviously. The results showed that strict quality control measure was the key factor to eliminate longitudinal crack on high strength steel.

Key words: high strength steel; longitudinal crack; cause; control measures

纵向裂纹是连铸板坯常见的表面缺陷,据有关资料介绍,铸坯各类缺陷中有50%以上是裂纹缺陷[1]。包钢宽板铸机在浇铸Q690D、Q550D等高强系列钢种时,铸坯表面纵向裂纹缺陷严重,裂纹长度短则10~20 mm,长的达数米,可以贯穿板坯长度,深度在2~10 mm不等,位置分布无明显规律,板坯中心及两侧都有。统计2020年12月份到2021年1月份共浇铸的9个浇次69炉高强钢,产出板坯1 410块,其中发生纵裂186块,纵裂比例达13.2%,属于浇次第1炉共80块,占纵裂总数的43%,比例明显高于其它炉次,并且每炉次前5块产生裂纹的几率较大,为此,对高强钢进行研究,以降低纵裂的发生率。

* 收稿日期:2021-03-03

作者简介:刘志国(1976-)男,内蒙古包头市人,工程师,现从事宽板铸机技术工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 包钢宽板铸机高强钢纵裂原因调查

1.1 包钢宽板铸机介绍

包钢宽厚板连铸机是 Danied Davy Disting (DDDL) 设计的直弧形板坯连铸机，年产 150 万 t 合格连铸板坯，主要工艺特征为：垂直弧长 2 625 mm，主半径 9 500 mm，连铸机总长度 39.355 m，采取结晶器液压振动，二冷区电磁搅拌，连续弯曲矫直，连续测温等，其主要技术参数见表 1。

表 1 包钢宽板铸机主要技术参数

项目	工艺参数
机型	直结晶器多点弯曲多点矫直直弧型连铸机
半径/mm	9 500
浇铸板坯厚度/mm	200/250/300
浇铸板坯宽度/mm	1 200～2 300
正常拉速范围/($m \cdot min^{-1}$)	0.8～1.2

1.2 裂纹产生机理

在结晶器弯月面附近，伴随着初期固液相变，包晶反应引起的体积收缩及工艺参数引起的结晶器传热不均匀，导致初生坯壳厚度不均匀，在坯壳薄弱处产生应力集中，当应力超过坯壳的高温强度时就产生裂纹，微裂纹在二冷区强冷后扩展[2]。

1.3 原因分析

1.3.1 开浇第 1 炉

浇次第 1 炉是连铸过程中最不稳定阶段。浇铸初期，水温和拉速偏低，结晶器传热和润滑均不稳定，钢水过热度高，这些均对铸坯表面造成影响。

(1) 包钢宽厚板铸机开浇拉速曲线为：铸机设备正常启动后拉速从 0 直接提升到 0.4 m/min，稳定 1 min 后再以 0.1 m/min^2 的加速度均匀提速，每提升 0.1 m/min 稳定 2 min，提升至正常拉速 0.8 m/min需要 12 min。低拉速持续时间太长，坯壳凝固速度加快，收缩应力加大，促使坯壳的不均匀生长，当收缩应力集中到坯壳最薄弱部位，大于坯壳的抗拉强度时，坯壳被拉裂形成沿浇铸方向的纵向裂纹。

(2) 在浇次间隔，结晶器进水温度和二冷水温度下降，结晶器正常控制进水温度应为(36±2) ℃，但停浇后能降到 25 ℃以下，甚至在冬季浇次间隔长时能降到 10 ℃以下。二冷水温正常应控制在 25 ℃左右，但浇次间隔也能降到 15 ℃以下。水温低冷却变强，导致坯壳不均匀生成而产生裂纹。

(3) 开浇第 1 炉过热度偏高，当过热度大于 35 ℃时，钢水凝固推迟，坯壳厚度减薄且坯壳平均温度升高，即使应力不变，由于钢的整体温度向脆性区移动，产生纵裂倾向加重。

1.3.2 夹杂物的影响

统计 2020 年 12 月到 2021 年 1 月的 9 个浇次共 69 炉高强钢，出现的 186 块纵裂在每炉当中的分布见图 1。

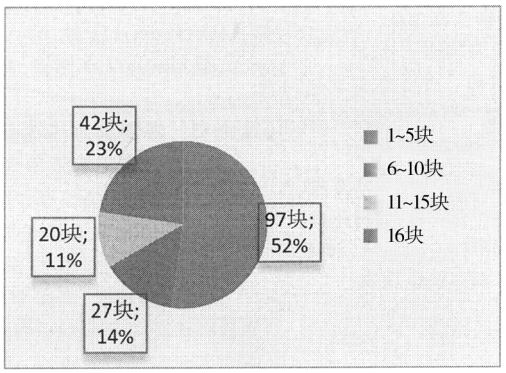


图 1 裂纹在炉次中分布情况

由上图可以看出，在每炉 20 块左右铸坯当中，裂纹发生在每炉次前 5 块的数量占裂纹总数的 52%，此时在浇铸过程中正处在换包操作时段，说明在炉次间换包操作时有夹杂物进入钢水。夹杂物是潜在的裂纹源，特别是存在一些脆性氧化物和脆性硅酸盐等夹杂物时，如钢件受到应力作用时更易开裂。

在连浇过程中，换包操作不可避免，换包时必然伴随着中包液位的降低，在低于临界液位时引流砂、中包耐材等夹杂物趁机进入钢水，形成裂纹源。

1.3.3 碳含量的影响

高强钢 w[C] 在 0.09%～0.14% 范围内，裂纹敏感性最大，w[C] ≥0.18% 时，板坯表面裂纹的发生率是随碳含量的增加而增加的。由铁碳相图可知，当 w[C] 在 0.10%～0.14% 时，凝固过程发生包晶反应并伴随 δ－γ 相变，产生较大的体积收缩，铸坯与结晶器壁之间产生空隙，导出热量较小，坯壳最薄，在表面产生凹陷，凹陷部位冷却和凝固速度比其他部位慢，组织粗化，在热应力、摩擦力和钢水静压力等作用下，在凝固坯壳薄弱处产生裂纹，并在二冷作用下裂纹加深和扩大[3]。

1.3.4 结晶器水量

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

结晶器冷却水量增大，结晶器壁热流量也增加。冷却越强，越容易助长初生坯壳的不均匀程度。尤其对于开浇炉次，开浇条件恶劣，铸机设备处于冷的状态，拉速较低，冷却强度较稳态过程强，纵裂发生机会增加。而随着连浇炉数的不断增加，铸机设备温度提高，对连铸坯有一定缓冷作用，纵裂比例下降。通过降低结晶器水流量，可增加缓冷效果，降低纵裂发生比例。

1.3.5　结晶器锥度影响

板坯浇铸时，一般通过合理调整结晶器锥度和优化保护渣性能来减少气隙热阻[4]。锥度设置应与工艺拉速、断面和钢种的收缩特性相适应，包晶钢结晶器锥度调节一般控制在 1.0% ~1.2% 之间，用锥度测量仪进行测量校准。由于包钢宽厚板产品品种多，一个浇次包括多个钢种，经常将包晶钢和中碳钢安排在同一个浇次内，但生产包晶钢和中碳钢结晶器锥度相差较大，在实际调整时往往取加权平均值，这样对包晶钢来说锥度偏小，结晶器下部受热不均并产生应力，从而导致纵裂产生。

1.3.6　保护渣的影响

性能良好的保护渣，对改善结晶器传热和润滑是至关重要的。随着初生坯壳的生成，结晶器壁和坯壳间形成气隙，需要保护渣及时填充以保证结晶器的稳态冷却，渣耗偏低或偏高均易产生裂纹，渣耗量在 0.40 ~0.55 kg/t 之间为最佳。包钢宽厚板铸机浇铸高强钢使用保护渣以斯多伯格 YK2P - 3 和 HB - 1 为主，这 2 种保护渣的技术指标见表 2。

表 2　斯多伯格 YK2P - 3 和 HB - 1 保护渣指标

名称	碱度	粘度 /(Pa·s^{-1})	密度 /(g·mL^{-1})	熔点 /℃
YK2P - 3	1.50	0.77	0.65	1 141
HB - 1	1.43	0.86	0.70	1 147

其中 YK2P - 3 渣耗量在 0.50 kg/t 左右，HB - 1 渣耗量在 0.45 kg/t 左右，液渣层在 12 mm 左右，这 2 种保护渣满足高强钢生产要求，说明纵裂的产生与保护渣关系不大。

2　控制措施

2.1　浇次第 1 炉控制

将开浇拉速曲线进行了优化，优化后的曲线见图 2。

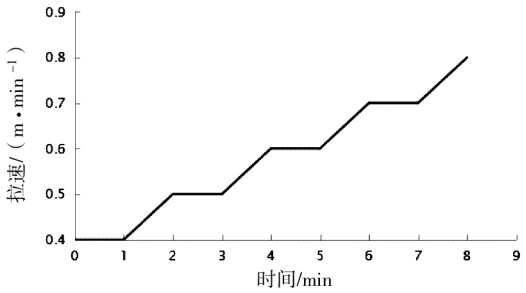


图 2　开浇拉速曲线

从图 2 可以看出，设备启动后拉速直接到达 0.4 m/min，稳定 1 min 后再以 0.1 m/min^2 的加速度均匀提速，拉速每提升 0.1 m/min 由稳定 2 min 减为稳定 1 min，直至正常拉速，达到正常拉速的时间由以前的 12 min 缩短为 8 min。减少了低拉速对铸坯表面质量的不利影响。对开浇拉速曲线进行优化后，用高强钢直接开浇的第 1 炉纵裂由原来的平均每炉 10 块左右降低到 4 块左右，第 1 炉纵裂情况有了明显改善，但仍然偏多，原因是开浇第 1 炉结晶器水温和二冷水温因工艺特点无法达到要求值，并且为保证开浇需要较高的钢水过热度，这些因素对控制纵裂不利。为避免第 1 炉水温、钢水过热度等不利条件对高强钢的影响，采用其他级别较低的非裂纹敏感性钢种开浇，后面炉次跟高强钢的方法。

2.2　优化炉次间换包操作

由于炉次间换包时，中间包液位不可避免的降低，这时是典型的非稳态浇铸过程，钢水洁净度往往难以保证，大包下渣和中间包内的其他夹杂物由于低液位造成钢水的二次污染，裂纹源大大增加，为此，采取满包操作的方法，具体操作曲线见图 3。

2.3　适当调大结晶器锥度

浇铸高强钢时，如果同一浇次安排其它包晶钢，避免与中碳钢在一个浇次，这样同浇次其它钢种锥度也不受影响，并且将锥度在原来的基础上适当增大，比如 2 000 mm × 250 mm 断面锥度理论给出 10.8，实际调整为 11.3，使结晶器下部与坯壳充分接触，减少了气隙的产生，坯壳传热更加均匀。

包钢宽板铸机中间包工作液位是 38 t，溢流液位 42 t，在换包时，尽量保证满包操作，保证下一包拉开时中包液位不低于 30 t，如遇异钢种混浇需要控制到 30 t 以下(一般是降低到 12 t)，在下一包拉开后全流控制到 30 t，30 t 以后缓慢控流至工作液位，做到最大限度地减少夹杂物进入钢水，从而减少

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

裂纹源。

经过优化炉次间的换包操作，统计了2021年2月份共产出高强钢499块，发生在同一炉次前5块的裂纹仅1块，取得了明显的效果。

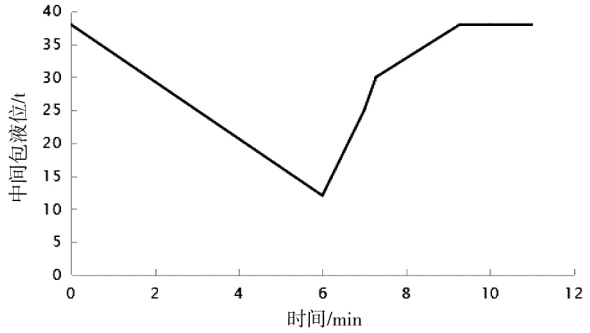


图3 换包时中间包液位曲线

2.4 减少结晶器水量

结晶器弱冷、宽窄面铜板热通量保持一定的比例有助于减少表面纵向裂纹。实现结晶器弱冷最有效的方式就是减小结晶器水量，通过将水流量从4 600 L/min调整为4 500 L/min，降低结晶器冷却强度，达到弱冷减轻表面纵裂的目的。

3 优化效果

通过对炉次、换包操作、拉速、结晶器锥度及结晶器水量的优化控制，高强钢纵裂比例明显下降，统计了2021年2月份共4个浇次26炉高强钢纵裂情况，共计产出板坯499块，发生纵裂4块，纵裂比例由最初的13.2%降低到0.8%。

4 结论

(1) 包钢宽板铸机生产高强钢纵裂的产生主要受开浇第1炉、换包操作时夹杂物进入钢水、结晶器冷却太强、结晶器锥度偏小、成分等因素的影响。

(2) 优化高强钢开浇曲线可以显著降低第1炉裂纹产生的几率，但受水温和钢水过热度等工艺条件的限制，第1炉产生裂纹的几率依旧偏高。采用其它级别较低的非裂纹敏感性钢种开浇，后面炉次跟高强钢的方法可以避免第1炉水温、钢水过热度等不利条件对高强钢产生纵裂的影响。

(3) 优化换包操作，换包时将中包液位控制在30 t以上并在钢包拉开后缓慢控流到工作液位可以减少换包时夹杂物进入钢水，从而减少裂纹源。

参 考 文 献

[1] 毛新平，陈麒琳，朱达炎. 薄板坯连铸连铸微合金化技术发展现状[J]. 钢铁，2008，43(4)：1－9.

[2] 史寰兴. 实用连铸冶金技术[M]. 北京：冶金工业出版社，1985.

[3] 陆匠心. 700 MPa级高强度微合金钢生产技术研究[D]. 沈阳：东北大学，2005.

[4] 董金武，刘洪波，高龙勇，等. 降低连铸板坯表面纵裂纹的生产实践[J]. 山东冶金，2006，28(6)：13－15.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net