

棒材 X45S 钢皮下裂纹缺陷原因分析和工艺改进

王科峰 饶立华 任一峰 王雷
(江阴兴澄特种钢铁有限公司 江苏 江阴 214400)

摘要: 汽车钢 X45S 经轧制成棒材后, 探伤发现存在皮下裂纹。对炼钢工艺过程和坯材检验结果的分析表明, 皮下裂纹的主要原因是钢水纯净度不良以及未轧合的铸坯边裂导致。当提高钢水纯净度、改善冷却参数条件后, 轧材皮下裂纹的情况明显减少。
关键词: 皮下裂纹; 纯净度; 边裂

0 引言

棒材皮下裂纹缺陷主要与冶炼和轧制工艺有关。若在浇注过程出现铸坯皮下气泡、内部裂纹等, 那么在轧制过程中, 此类缺陷就会随轧制断面的缩小而延伸到表面, 形成表面裂纹。尤其是棒材轧钢工艺或操作不当, 会进一步恶化连铸坯表面原有的缺陷, 在后续处理过程中具有进一步扩大的趋势。

国内某钢厂自主研发生产的汽车钢 X45S 是一种中碳高强度合金钢。在某次的生产过程中, 经探伤发现部分棒材存在皮下裂纹缺陷。本文结合该厂 X45S 钢的生产实践, 对中碳钢连铸坯皮下裂纹产生的原因进行了分析, 并提出了相应的控制措施。

1 生产情况

国内某钢厂生产的汽车钢 X45S 钢种的主要化学成分如表 1 所示。其生产工艺路线为: 高炉—转炉—LF 精炼炉—RH 真空脱气炉—连铸—连轧—缓冷—精整—探伤—检验—包装—入库—交货。

2 试样分析

取轧钢精整探伤后的废品轧材。对设备自动喷漆标识缺陷部位, 用角磨机磨去表面氧化铁皮层后无法观察到裂纹缺陷。经表面酸洗后仍无法肉眼发现缺陷。

表 1 X45S 钢主要化学成分 (质量分数 %)

C	Si	Mn	P	S	Al	Ni
0.41 ~ 0.48	0.12 ~ 0.36	0.70 ~ 0.95	≤ 0.030	0.015 ~ 0.040	0.015 ~ 0.050	≤ 0.30

2.1 微观分析

为分析 X45S 钢皮下裂纹发生的原因, 首先对探伤不良的轧材用手提探伤仪进行缺陷定位。发现缺陷沿轧制方向的断续的长度普遍达 10cm, 最长的达到 35cm。对缺陷位置的横截面经切割后做低倍, 经热酸电解 15min 后得到缺陷处的低倍, 形貌如图 1 所示。可以看出, 位于棒材截面上右上角距离表面约 3mm 处的缺陷周围组织存在着明显的色差, 有泛白的组织, 形貌为细小的圆弧形色斑, 长度约 1.5mm, 与低倍边缘近似平行。从偏析框的位置看, 缺陷对应结晶器角部位置。

为进一步观察缺陷, 使用 JSM-IT300 型号扫描电镜下对缺陷样品放大观察, 得到裂纹微观形貌如图 2(a) 所示。

图中裂纹细长、断续、不连贯, 端部呈尖角状。同时, 在电镜下检测到裂纹位置的多个地方存在非金属夹杂物, 夹杂物的成分能谱图如图 2(b) 所示, 判断是 Al-Mg-Ca 的复合夹杂物。

2.2 宏观分析

对未轧制的连铸坯取横向低倍样, 发现存在边裂

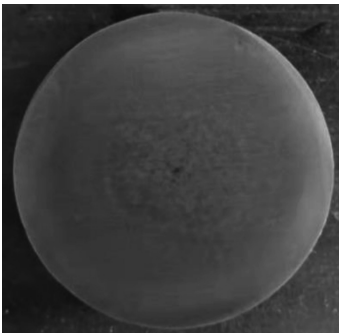


图 1 X45S 钢缺陷低倍样

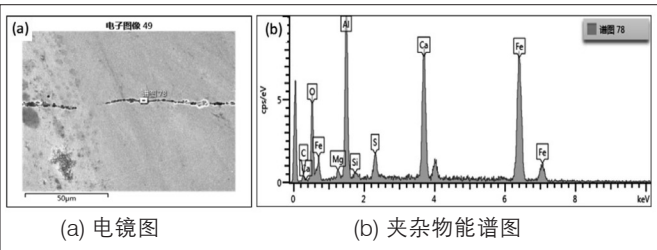


图 2 裂纹处分析

缺陷, 如图 3 所示 (白色半圆处)。与轧材上对应的裂纹位置基本吻合。该缺陷在轧制过程中较难轧合, 未轧合的部分

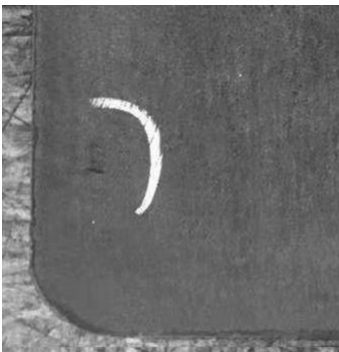


图 3 连铸坯局部低倍图片

即形成皮下裂纹。

3 结果讨论

钢中非金属夹杂物会严重地影响其物理和化学性能 (例如疲劳寿命、加工性能及耐蚀性能等)。X45S 钢属于含 S 含 Al 钢, 钢种特性决定了易产生 CaS 和 Al₂O₃ 类夹杂物。若钢水中的夹杂物不能及时上浮排除, 在结晶器内被初生坯壳捕获, 在连铸坯皮下残留, 最终表现在轧材上检测到夹杂物。

另外, 连铸坯边裂的形成是一个复杂的过程, 是传热、传质以及应力相互作用的结果。带液芯的高温铸坯在连铸机生产运行的过程中, 各种力作用于高温坯壳上产生的变形力

超过了钢的允许强度是产生裂纹的外因。而钢种自身对裂纹的敏感性是产生裂纹的内因。对比生产过程数据,结合生产过程具体连铸生产参数,初步判断:结晶器区域不良的冷却工艺参数,引起铸坯发生边裂。产生的边裂,无法在轧制过程中焊合。

综上所述可知:钢水纯净度不良,再加上不良的冷却工艺参数导致铸坯产生边裂,上述两个因素是造成棒材因皮下裂纹而导致探伤不合格的主要原因。

4 改进措施

针对分析中发现的问题,对 X45S 汽车钢的生产连铸工艺进行相应调整,具体措施如下:

4.1 提高钢水纯净度

日本山阳特钢研究表明,除了脱氧反应及渣的卷入,脱硫反应产生的 Al_2O_3 夹杂以及渣钢反应形成的 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 类夹杂是夹杂物的重要来源。国内部分学者研究认为,连铸过程的二次氧化、耐材侵蚀及非稳态浇注是产生夹杂的主要原因。研究认为,由于钢水纯净度不足,在铸坯侧面凝固前沿处聚集起了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaO}$ 复合夹杂物,是产生皮下裂纹的主要原因。大量的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaO}$ 复合夹杂物,增加了钢对裂纹的敏感性,在应力的作用下,夹杂物成为应力集中源,当夹杂物周围的基体承受应力超过了钢的允许强度和应变时便产生裂纹。因此,提高钢水的纯净度是有效解决皮下裂纹的办法。

4.1.1 转炉终点及下渣控制

转炉出钢的脱氧和合金化过程会产生大量的氧化性夹杂物,若不能在后续过程中排除,则会严重影响钢材的性能。为从源头上减少夹杂物的产生,控制好转炉终点是关键。排查发现,生产 X45S 过程中,为了获得较高的出钢温度给 LF 炉创造条件,转炉把终点碳控制的较低,钢水过氧化严重,不得不加入大量的铝铁,生成了大量的 Al_2O_3 类夹杂。因此,增加了后道 LF 炉去除夹杂物的负担。

转炉下渣量的控制也是关键环节。转炉终点渣中 TFe 含量高,出钢过程若大量下渣,转炉渣不仅会成为氧源,同时渣中 SiO_2 含量较高,会严重降低精炼渣的碱度,影响精炼渣的脱氧效果。对保存的炉渣样进行检测,发现碱度较之前有所下降,因此有理由怀疑下渣且下渣后未及时扒渣。保证精炼渣组分的可控性和稳定性,必须有效控制转炉下渣量,下渣后必须扒渣。

4.1.2 精炼炉过程控制

LF 精炼阶段是冶炼过程提升钢液洁净度的重要阶段,充分有效的精炼时间才能保证夹杂物的上浮去除。但精炼时间不能过长,否则会导致电极消耗增加、钢包耐材侵蚀加剧、酸溶铝损失增大等问题,需综合考虑脱氧、去夹杂效果和生

产节奏。

LF 过程的 Al 控制极为重要。钢水中的 Al 在二次氧化、电极的作用下会不断消耗,若在过程中用金属铝粒或铝线反复调整 Al 含量,往往会造成较多的 B 类夹杂物,严重污染钢水。因此,需要在 LF 炉初期,充分考虑后期 Al 损的情况下,

尽早将 Al 调整到位。需要注意的是,本次生产中,由于钢水过氧化,精炼炉渣较稀,精炼炉的铝损失较大,为了保证铝含量符合标准要求,精炼炉不得不反复多次补加铝粒,从而在整个冶炼过程中不断地带来较多的夹杂物。

此外,炉内气氛也对钢水纯净度有重要的影响。若采用较高的风机排风功率,炉内负压高,易吸收周围较多的空气,反而会引起炉内更多的氧化。

4.1.3 过热度改善

对比发现,低过热度炉号的夹杂物问题更突出。主要是因为较低的钢水过热度降低了结晶器中钢液的流动性,不利于夹杂物的上浮,导致 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaO}$ 复合夹杂物残留在钢液中,从而影响钢水纯净度。因此,调整钢水的过热度,确保钢水过热度为 $20\sim 40^\circ\text{C}$,使夹杂物充分上浮排出。

4.1.4 保护浇注

保护浇注对控制钢中的非金属夹杂物有着很重要的作用,若保护浇注不好,钢中会生成尺寸在 $250\mu\text{m}$ 以上的簇群状 Al_2O_3 的 B 类夹杂,而大型 B 类夹杂物对产品的质量影响特别大,一旦有大型 B 类夹杂在汽车钢的表面或近表面,易成为汽车钢受变形挤压后的重要裂纹源,为此要充分保证钢水的纯净度,避免出现大型 B 类夹杂物。

4.2 改善连铸坯低倍边裂

G.Dasl 调查了连铸方坯距离内弧表面 10mm 的皮下裂纹成因,认为枝晶间存在低熔点的 $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{S}$ 富集相,限制了钢的定向凝固,使铸坯产生不均等收缩,成为应力集中源,产生裂纹。基于上述理论分析及现场实际情况,连铸坯皮下裂纹产生的过程为:连铸坯在结晶器内及二冷段的直线区域内形成了粗大奥氏体晶粒,并在冷却降温至第 III 脆性区的过程中析出了 AlN 等第二相粒子导致了晶界脆化,最后在进入弯曲段的弯曲区域受到拉应力而发生裂纹。因此,控制内弧表面裂纹的策略是以调整结晶器和二冷段的工艺、设备参数为重点,并辅以强化保护浇注减少过程增氮措施来降低碳氮化合物的析出量,确保内弧表面的抗应变能力大于弯曲应变上限并且减少钢液在凝固的过程中由 AlN 等物质析出产生的晶界裂纹。

4.2.1 结晶器冷却控制

为了避免连铸坯形成粗大奥氏体晶粒,调整了结晶器的冷却强度,在确保出结晶器的铸坯坯壳达到安全厚度的情况下,实行“弱冷+均匀”的冷却模式,提高连铸坯坯壳凝固的均匀性和凝固坯壳出结晶器下口的稳定。在这里引入“拔热量”概念,即实际生产中,一般将结晶器内水平方向的热力密度称之为“拔热量”,用符号“Q”表示。

依据结晶器拔热量 Q 公式:

$$Q=m \times C \times \Delta T \quad (1)$$

式中 Q 表示拔热量, J/min ; m 表示结晶器水量, L/min ; C 表示水比热; ΔT 表示结晶器进出水温差。

计算出了在该厂原有的结晶器水量条件下的结晶器拔热量。通过与其他同行优特钢企业结晶器拔热量对比,发现该厂结晶器拔热量偏大。通过比较研究将结晶器水量由下调

表 2 X45S 钢结晶器冷却强度改进前后对比

对比项	结晶器水流量 /(L/min)	拔热量 /(×10 ³ J/min)
同行水平	2166	48215
改进前	2333	54872
改进后	2000	42000

至 2000L/min。通过优化后，连铸低倍的边裂情况效果显著。

但是，也有一些企业，目前并不能实时提供当前结晶器内的热流密度数据，这就需要根据结晶器内冷却水进出水的温差，计算得到相应拉速条件下结晶器内拔热量，公式如下：

$$q_{\text{mold}}=W\times C\times \Delta T/(F\times 1000) \quad (2)$$

式中， q_{mold} 为瞬时热流密度， Mw/m^2 ； W 为结晶器冷却水流量， kg/s ； C 为水的比热， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； ΔT 为结晶器冷却水进出水温差， $^{\circ}\text{C}$ ； F 为结晶器有效传热面积， m^2 。

4.2.2 结晶器保护渣优化

已有文献资料表明，降低其在结晶器中的传热从而使初生坯壳薄而均匀。保护渣的特性决定当碱度在 0.8~1.1 范围内时，热流密度呈增加的趋势，当碱度大于 1.2 时，渣膜表面粗糙度加大，降低了界面的热阻，从而使热密度下降，降低了渣膜的传热作用。综上可知，为降低铸坯裂纹的发生率，宜采用较高粘度及碱度的保护渣。

生产中使用的保护渣碱度偏低，粘度偏低。因此，保护渣的物理性质也是影响该连铸坯裂纹的原因之一。为此，生产单位要求保护渣厂家进行工艺优化，提高保护渣碱度。同时，为了保证一定的强度和熔融速率，对保护渣生产厂家提出颗粒度的要求。表 2 为调整前后保护渣的物理性能对比情况。使用调整后的保护渣生产的铸坯表面积渣较原先明显减少，氧化铁皮均匀，总体的外观质量较之前有明显改善。

4.2.3 二冷水控制优化

通常情况，铸坯出结晶器后，若足辊和扇形段过强冷却，铸坯皮下裂纹发生率会呈增加的趋势。因此，选择合适的二冷水强度使铸坯矫直温度避开低温韧性区温度尤为重要。

试验时，在同一浇次同拉速下的不同流号分别选择了 2#（原工艺）和 3# 二冷水作为对比项，其他生产参数条件不变。对比后道精整的皮下裂纹废品率，得到如表 3 所示结果。结果显示，废品率明显降低。

5 实施效果

改进实施前后，X45S 钢的检测指标如表 4 所示，改进效果明显。下游客户同时反馈零件不良率有所降低。

表 3 X45S 钢改进前后效果对比

二冷水类型	各段水量分配比	矫直温度	废品率 /%
2# 水	3:3:2	910 ~ 925	7.83
3# 水	3:3:2	875 ~ 890	1.23

表 4 X45S 钢改进前后效果对比

对比项	夹杂物检测不良率 /%	边裂等级	轧材探伤不良率 /%
改进前	2.05	1.5	8.22
改进后	0.67	0.5	0.78

同样的，将该方法推广到其他近似钢种上，也取得了良好的效果。

6 结语

本文通过对 X45S 汽车钢轧材皮下裂纹缺陷的分析，找出了皮下裂纹产生的原因，并提出了相应改进措施。研究结果表明：

- (1) X45S 钢皮下裂纹的形成原因主要是连铸坯存在边裂，在轧制时未轧合。
- (2) X45S 钢皮下裂纹中夹杂物的来源主要是钢水中的夹杂物。

通过生产时通过优化过程控制、改善凝固条件等，显著提高了钢水纯净度、改善了连铸坯低倍边裂，有效减少了 X45S 钢轧材皮下裂纹缺陷引起的报废。

参考文献：

[1] 陈洪 .Cf53 棒材皮下裂纹及脆性夹杂物质量分析 [J]. 特钢技术 ,2017,23(90):48-53.

[2] 高菊 ,丁志军 ,李辉 .60Si2MnA 钢材裂纹成因分析及控制 [J]. 钢铁钒钛 ,2016,37(5):157-161.

[3] 蔡兆镇 ,安家志 ,刘志远 ,等 .微合金钢连铸坯角部裂纹控制技术研发及应用 [J]. 钢铁研究学报 ,2019,31(2):117-124.

[4] 于平 ,陈伟庆 ,冯军 ,等 .高碱度渣精炼对轴承钢夹杂物的影响 [J]. 特殊钢 ,2004(25):41-44.

[5] 张富强 .二冷区的凝固传热 [J]. 鞍钢技术 ,1998,(11):60-61.

[6] 张广杰 ,张飞 .无钙处理条件下轴承钢钢水可浇性技术的研究与应用 [J]. 中国冶金 ,2014, 24(5):40.

[7] 蒋鲤平 ,徐建飞 ,于飞 ,等 .120tLF 精炼过程搅拌强度对 Q195 低碳钢中大尺寸夹杂物数量的影响 [J]. 特殊钢 ,2021,42(4):47-50.

作者简介: 王科峰 (1988-), 男, 江苏江阴人, 工程师, 硕士, 研究方向: 特殊钢研制开发。