

车轮热轧带钢分层原因 分析与控制措施

Cause Analysis and Control Measures of Layering of Hot Rolled Wheel Strip

供稿|金进文, 陈国强, 胡盛凯 / JIN Jinwen, CHEN Guoqiang, HU Shengkai

内 容 导 读

针对汽车车轮用热轧带钢在生产和使用过程中出现的分层缺陷问题, 结合金相检测和能谱分析, 系统探讨了缺陷成因。研究发现, 分层的主要原因在于钢中非金属夹杂物含量较高, 以及 S、C、Mn 等元素的偏析。硫化物和氧化物等非金属夹杂物的分布不均, 以及偏析区域局部性能的显著差异, 是导致分层的关键因素。针对该问题, 提出了一系列工艺优化措施, 包括降低钢中 S 含量、加强连铸机精度控制、优化钢水温度控制、改进精炼工艺以及严格执行连铸保护浇铸操作。实践验证显示, 通过实施这些改进措施, 车轮热轧带钢的改判率由 1.0% 显著下降至 0.1%, 有效提升了产品质量, 满足了客户需求。研究结果可为汽车车轮用钢的质量控制提供重要的技术支持, 并具有广泛的实践应用价值。

汽车车轮用热轧带钢需具备卓越的机械性能和加工性能, 以满足实际使用中的多重需求。热轧带钢需要具备高强度和良好的塑性, 以确保车轮能够承受汽车高速行驶中产生的巨大冲击力与载荷而不发生破裂或变形; 同时, 热轧带钢还需要具备优异的耐疲劳性能, 以满足车轮在长期承受重复载荷作用下的使用寿命要求^[1]。除了强度和耐疲劳性能, 热轧带钢的加工性能同样至关重要, 直接影响车轮生产的成品质量。因此, 热轧带钢尤其需要具备优异的焊接性能、冷成型性能和热加工性能^[2]。此外, 热轧带钢还应具备较高的耐腐蚀性, 以应对

雨水、盐分和道路污染物等恶劣环境条件对车轮的腐蚀作用^[3]。热轧带钢对表面质量也有严格要求, 需彻底消除夹杂、裂纹和氧化铁皮等缺陷, 以确保车轮在使用过程中的安全性和可靠性^[4-6]。综上所述, 热轧带钢的材料设计必须综合考虑机械性能、加工性能和环境适应性, 以确保汽车车轮的长期安全运行。

对于热轧带钢分层的问题, 学者们开展了大量的研究。Kampmeijer 等^[7]对热轧带钢生产中分层的现象进行了跟踪, 通过控制测量系统, 成功减少了粗轧机头部弯曲和成品轧机条带引导误差。盛芹世

作者单位: 宁波钢铁有限公司, 浙江 宁波 315807

等^[8]采用金相检验和化学分析方法,分析了热轧镇静带钢出现的分层原因,认为带钢分层主要由带状组织和夹杂物引起。刘跃华等^[9]对超低碳热轧带钢头部分层缺陷进行了检验分析,认为热轧带钢连铸加热后出现渗铜现象,导致连铸坯头部晶界弱化,在后续的轧制过程中造成轧件头部开裂分层,并通过减小粗轧道次变形量、优化中间坯切头量、降低加热温度等技术措施解决了缺陷问题。

针对汽车车轮用热轧带钢在生产过程中出现的分层缺陷问题,本研究结合金相检测和能谱分析,系统分析了分层的成因,并提出了一系列工艺优化措施,包括降低钢中S含量、提高连铸机精度、优化钢水温度、改进精炼工艺,以及严格执行连铸保护浇铸操作。这些措施有效改善了车轮热轧带钢分

层现象,为汽车车轮用钢的质量控制提供了重要的技术支持,并具有广泛的应用价值。

车轮热轧带钢分层缺陷表征

在某汽车车轮热轧带钢的加工过程中,发现部分产品在厚度方向存在分层缺陷,主要涉及规格为厚度13.5 mm的钢卷。宁波钢铁有限公司采用了以下标准化工艺流程生产该产品:

KR脱硫→转炉冶炼→Ar站→LF炉精炼→连续铸钢→板坯加热→炉后除磷→热连轧→层流冷却→卷取→热轧检验→打捆、称重、喷号→入库。

为深入研究分层缺陷的成因并提升产品质量,需全面分析上述工艺流程的关键环节。相关炼钢工艺设备及其参数,如表1所示。

表1 炼钢厂主要设备及相关参数

KR脱硫站		转炉				LF炉		连铸机			
脱硫剂	铁水罐容量/t	吹气方式	公称容量/t	氧枪参数	最大供氧量/(m ³ /h)	底吹气体	升温速度/(°C/min)	处理模式	铸机型式	矫直方式	主要技术
活性石灰粉	180	顶底复吹	180	五孔氧枪,马赫数1.99	44000	Ar和N ₂	4.5	非深脱硫处理、深脱硫处理	直弧型	连续弯曲和连续矫直	保护浇注、液面自控、中间包自动开浇、在线调宽、高效喷嘴及电磁搅拌等

该款汽车车轮热轧带钢的化学成分如表2所示,分层缺陷样对应生产相关数据如表3所示。针对分层缺陷部位进行了金相检测,结果表明,缺陷区域存在显著的疏松和偏析现象,见图1。这一结果明确揭示了钢材在厚度方向上存在质量问题的直接原因,并为后续优化工艺流程提供了关键依据。

表2 某款汽车车轮热轧带钢熔炼成分(质量分数) %

C	Mn	P	S	Als	Si	N
0.085	1.20	0.015	0.012	0.030	0.10	0.005

表3 分层缺陷样对应生产数据

连铸拉速/(m/min)	过热度/°C	二冷水量*/L	距离上次辊缝调整时间/d
1.10	25	0.7	27

注: *表示每千克连铸坯消耗二冷水量。

通过扫描电镜对样品中的分层缺陷进行放大观察,可见分层内表面存在明显的氧化现象,其具体形貌如图2所示。此外,经能谱分析检测,分层内

表面附着物中含有Al、O、Si及Ca等夹杂元素,如图3所示和表4。对比原始熔炼成分数据,进一步发现分层区域内C、S、Mn等元素存在显著偏聚,其具体分析结果见表4。综合金相检测和能谱分析的结果可知,钢中非金属夹杂物含量较高以及元素偏析现象,是导致本次分层缺陷的主要原因。



图1 金相检测

车轮热轧带钢分层原因分析

检测和分析结果表明,本次热轧钢卷分层的主

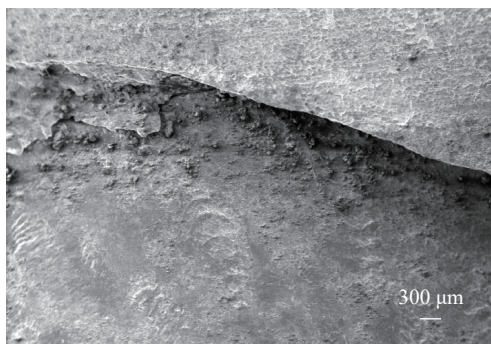


图2 缺陷形貌

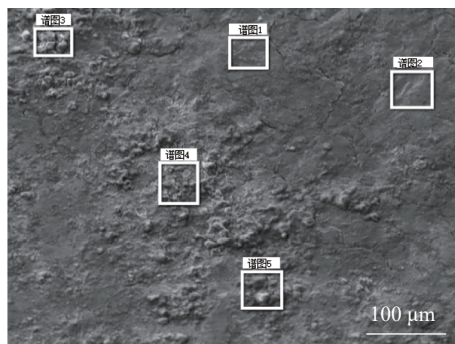


图3 能谱分析位置

表4 能谱分析结果(质量分数)

图3中位置	C	O	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe
谱图1	10.13	14.69	0	0	0.34	0	2.25	72.59
谱图2	10.22	11.00	0	0.13	0.43	0	2.19	76.03
谱图3	10.38	27.30	0	0.15	0.52	0.31	1.37	59.97
谱图4	7.67	26.06	0.12	0.14	0.23	0.24	1.56	63.98
谱图5	7.98	27.64	0	0.15	0.29	0.25	1.46	62.23

要原因可归结为钢中非金属夹杂物含量较高和关键元素偏析的共同作用^[10-13]。

夹杂物导致的分层

炼钢工艺过程中的操作不当可能导致钢水中残留氧化物、硫化物和硅酸盐等非金属夹杂物。这些夹杂物在钢材中的分布不均,会引发局部组织结构和性能的显著差异,从而导致分层现象^[14]。

夹杂物的形成与钢铁生产的多个环节密切相关:

(1) 原材料来源:废钢和铁水中可能含有 S、P 等杂质元素,在熔炼过程中易形成夹杂物。

(2) 工艺控制:若熔炼温度、时间或脱氧工艺控制不当,非金属夹杂物的生成将显著增加。

(3) 连铸工序:在连铸过程中,若钢水裸露于空气中,容易吸收氧气和氮气,进一步增加钢中夹杂物的数量。

元素偏析导致的分层

比较表 2 和表 4 中对应成分数据可知,缺陷样中 S、C、Mn 含量显著增加,表明这些元素在钢水凝固过程中发生了偏析。这种偏析导致局部区域的组织和性能出现差异,从而引发分层现象。

(1) S 偏析。S 在钢中的溶解度较低,凝固过程中易富集于晶界和枝晶间隙,形成硫化物夹杂

物^[15-16]。这种分布的不均性会降低钢材的抗拉强度和延伸率,诱发分层缺陷。在热轧过程中,硫化物夹杂物可能被压扁和拉长,进一步加剧分层现象。

(2) C 偏析^[17]。在钢水凝固过程中,C 容易富集于晶界和枝晶间隙,形成含碳量较高的区域。这些区域因局部强度和硬度的差异,易于引发分层问题。

(3) Mn 偏析^[18]。Mn 作为钢中常见的主要合金元素之一,容易在凝固过程中发生偏析,从而导致钢材的局部组织和性能不均。在热轧过程中,由于偏析区域与周围区域的组织和性能差异,分层现象可能进一步恶化。

现场改进措施及验证

针对汽车钢分层缺陷问题,采取降低钢种中 S 含量、提高连铸机精度、优化钢水温度、改进精炼工艺,以及严格执行连铸保护浇铸等一系列优化措施。

降低钢中 S 含量

缺陷样中存在元素 S、C、Mn 偏析。因元素 C、Mn 的成分含量与钢种设计要求直接相关,故拟将钢种的 S 质量分数从 0.012% 降低至 0.005%,有效减少了 S 元素带来的有害影响。S 含量的降低抑制了钢中 S 的宏观偏析,减少了硫化物及相关夹杂物的生成。这一调整显著减少了有害相的形成,提

高了钢材的韧性和延展性，优化了其力学性能，满足了高质量产品的要求。

加强连铸机精度控制

连铸机精度偏差可能引起凝固过程中温度场和流场的不均，导致元素偏析。宁波钢铁有限公司现要求每月对连铸机扇形段辊缝精度进行测量、检查和校准。问题炉次生产时，距离上次辊缝调整已有 27 d。虽然满足在辊缝调整后 1 个月内生产，但辊缝在周期末期存在偏差风险。对于车轮钢生产，应安排在辊缝调整后 2 周内完成，并严格控制扇形段入口处和出口处辊缝在标准值 ± 0.5 mm 范围内，发现精度超标时及时进行修正，以减少动态误差引发的凝固界面不稳定现象，从而缓解元素偏析问题^[19]。

优化钢水温度控制

钢水温度是影响元素偏析的重要因素：

(1) 溶解与扩散：温度直接影响元素在钢中的溶解度和扩散速率。在较低的过热度下浇铸，可以达到细化晶粒的效果，从而使晶粒组织中的溶质分布更加均匀。因此，将中间包钢水的过热度控制范围由原先的 25℃ 降至 20℃ 以内。

(2) 温度场均匀性：每周检查二冷喷嘴的喷射水量和喷射角度，确保二冷均匀；同时避免拉速波动，防止由此导致的温度场不均，从而减轻偏析问题。

同时，需要做好稳态浇铸。异常的钢水温度变化会显著影响连铸机的拉速及结晶器液面状态。温度过高或过低均可能引发连铸坯表面温度不均，甚至诱发卷渣问题，从而影响铸坯质量。连铸过程需确保钢水温度稳定，拉速与过热度相匹配，避免非稳态浇铸，以确保化学成分的均匀性及凝固质量。

优化 LF 炉精炼过程

在 LF 炉精炼中，使用碳化硅等发泡剂造白渣，通过以下措施提高钢水纯净度：

- (1) 增大渣-钢界面接触面积，促进化学反应；
- (2) 形成稳定渣膜，阻隔空气与钢液接触，减少氧化；
- (3) 提升保温效果及热效率；
- (4) 调节渣的粘度和流动性，改善脱渣性能；

- (5) 通过气泡生成促进氧化物上浮和脱除。

加强连铸保护浇铸措施

严格按照标准规范执行保护浇铸操作^[20]：

- (1) 确保中间包覆盖剂的添加符合要求，杜绝钢水裸露；
- (2) 控制结晶器液面波动，避免氩气量过大或液面翻动；
- (3) 均匀、适量地添加结晶器保护渣，以稳定液面并防止钢水裸露。

综上所述，钢卷分层问题的根源在于非金属夹杂物及元素偏析。通过钢种成分优化、连铸机精度控制、钢水温度管理、精炼工艺优化及连铸保护浇铸等多方面改进，显著提升了钢材组织结构的均匀性与性能稳定性，有效避免了分层缺陷的发生，车轮热轧带钢的改判率从 1.0% 显著降低至 0.1%。

结束语

(1) 分层缺陷的产生主要归因于钢中夹杂物及元素偏析的共同作用。非金属夹杂物分布不均和偏析区域的局部性能差异是引发分层的关键原因。

(2) 针对车轮热轧带钢分层缺陷问题，实施了降低 S 含量、提高连铸机精度、优化钢水温度、改进精炼工艺以及严格执行连铸保护浇铸操作等系统性措施。通过上述优化措施的实施，车轮热轧带钢的改判率从 1.0% 显著降低至 0.1%，表明生产效率和产品质量均得到了大幅提升。

(3) 下游客户反馈显示，优化后的车轮热轧带钢在实际使用中表现出色，未再出现分层缺陷，充分验证了所采取改进措施的有效性和可行性。

参考文献

- [1] Zhou M Y, Yan J R, Wu H, et al. Lubrication effects on the surface quality control of hot rolled steels: A review. *Tribol Int*, 2024, 199: Art No. 109985
- [2] Wu H, Sun J, Peng W, et al. Residual stress control of hot-rolled strips during run-out table cooling. *Int J Adv Manuf Technol*, 2023, 125(7/8): 3205
- [3] Man C, Dong C F, Xue H B, et al. Influence of oxide scales on the corrosion behaviors of B510L hot-rolled steel strips. *Int J Miner Metall Mater*, 2016, 23(7): 769
- [4] 李海东, 李岩, 钟莉莉, 等. 热轧带钢表面氧化铁皮及其酸洗

- 行为分析. 轧钢, 2024, 41(6): 25
- [5] 郭立合, 王超, 于千, 等. 热轧带钢为什么会翘曲?——成因分析与控制方法实践. 金属世界, 2025(05): 52
- [6] 兰明清, 张向东, 陈业雄, 等. Q235B 热轧带钢锯齿边缺陷: 成因分析与控制策略. 金属世界, 2025(04): 49
- [7] Kampmeijer L, Hol C, De Roo J, et al. Strip tracking measurement and control in hot strip rolling. *Metall Ital*, 2014, 106(3): 29
- [8] 盛芹世, 孙建国, 仝丽珍. 热轧镇静带钢分层原因分析. 理化检验(物理分册), 2005(7): 367
- [9] 刘跃华, 郭晓波, 钟莉莉, 等. 超低碳热轧带钢头部分层原因分析. 鞍钢技术, 2009(6): 58
- [10] 龚桂仙, 孙宜强, 张彦文, 等. J55 热轧钢卷分层原因分析. 武钢技术, 2007(1): 5
- [11] 杨成鑫. 汽车大梁钢成型开裂的原因分析. 中国金属通报, 2020(4): 209
- [12] 孙宏亮, 王耐, 武冠华. 汽车大梁钢成型开裂的原因分析. 天津冶金, 2019(2): 24
- [13] 董继亮, 汪云辉, 侯明山, 等. 中板坯连铸大梁钢 610L 的质量控制研究. 山西冶金, 2017, 40(2): 14
- [14] 申鹏, 颜海涛, 李杰, 等. 0Cr18Ni9 不锈钢热轧卷分层原因分析. 理化检验: 物理分册, 2010, 46(9): 608
- [15] 胡盛凯. 连铸过程电流脉冲对车轮钢凝固组织影响[学位论文]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2018
- [16] 罗森, 朱苗勇, 祭程, 等. 钢连铸过程的溶质微观偏析模型. 钢铁, 2010, 45(6): 31
- [17] Wan Y, Gao S, Li M H, et al. Enrichment characteristic of carbon atoms in solid-liquid zone of high carbon steel under different directional solidification rates. *China Foundry*, 2021, 18(5): 488
- [18] Wei X H, Gong T L, Cao X, et al. Effects of lath boundary segregation and reversed austenite on toughness of a high-strength low-carbon steel. *Metal Mater Trans A*, 2024, 55(5): 1484
- [19] 李强, 王皓, 鄢俊懋. 宽厚板 Q420q 桥梁钢铸坯内部质量的研究. 连铸, 2014(6): 40
- [20] 干勇. 现代连续铸钢实用手册. 北京: 冶金工业出版社, 2010

作者简介: 金进文(1971—), 男, 浙江省东阳人, 宁波钢铁有限公司副总经理。1995年毕业于华东冶金学院钢铁冶金专业, 主要研究方向: 钢铁冶金。“模型化生产在钢铁企业的创新与实践”获 2025 年宁波市企业管理现代化创新成果二等奖。通信地址: 浙江省宁波市北仑区霞浦临港二路 168 号。

通信作者: 胡盛凯(1993—), 男, 浙江省宁波人, 宁波钢铁有限公司炼钢厂连铸作业区副作业长。2018年毕业于安徽工业大学冶金工程专业, 主要研究方向: 钢铁冶金。通信地址: 浙江省宁波市北仑区霞浦临港二路 168 号; E-mail: hushengkai@ningbosteel.com。