生产实践

# 螺纹钢表面翘皮缺陷分析及控制

姚菲[1],郑冰[2,3,4],孔建铭[1],徐东[3,4]
(1.河北太行钢铁集团有限公司,河北省高校高端紧固件全流程应用技术研发中心,河北 邯郸 056305;2.介子科技(河北)有限公司,河北 邯郸 056000;3.河北工程大学,河北省高品质冷镦钢技术创新中心,河北 邯郸 056038;4.河北普阳钢铁集团,河北省高韧性风塔钢工程研究中心,河北 邯郸 056305)

**摘要:** 为解决螺纹钢表面翘皮的缺陷问题,利用SEM扫描电子显微镜和能谱分析仪对螺纹钢的宏观形貌和缺陷处微观成分进行了分析与检测。结果表明:螺纹钢纵肋和横肋处存在大小不一的单侧翘皮缺陷;在翘皮断面处检测到$Al_2O_3$-$SiO_2$、$Al_2O_3$及$SiO_2$类型不规则状夹杂物,其尺寸在40~120 μm。这些非金属夹杂物导致螺纹钢锭局部塑性变差,进而产生裂纹,随着轧制过程的进行,这些裂纹逐渐扩展并最终形成翘皮缺陷。采用降低转炉终点氧含量、加强浇注气密性等措施将中间包钢水的氧平均含量降至25ppm,热轧件表面翘皮缺陷的发生率从2.7%下降到1.5%,有效地减少了翘皮缺陷的发生。

**关键词:** 螺纹钢;表面质量;非金属夹杂物;翘皮缺陷;控制措施
**中图分类号:** TG335 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)03-0062-06
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613.2026.03.011

## Analysis and Control of the Surface Sliver Defect of Threated Steel

YAO Fei[1], ZHENG Bing[2,3,4], KONG Jianming[1], XU Dong[3,4]
(1. Whole Processes of High Quality Fastener Application Technology Research Center of Universities in Hebei Province, Hebei Taihang Iron and Steel Group Co., Ltd., Handan 056305, Hebei, China;
2. Meson Technology (Hebei) Co., Ltd., Handan 056000, Hebei, China;
3. Technology Innovation Center for High Quality Cold Heading Steel of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China;
4. Technology Innovation Center for Engineering Research Center for High Toughness Wind Tower Steel of Hebei Province, Hebei Puyang Iron and Steel Co., Ltd., Handan 056305, Hebei, China)

**Abstract:** To solve the surface sliver defect of threated steel, the macro morphology and micro composition of threated steel were detected by SEM scanning electron microscope and energy spectrum analyzer. The results showed that there were unilateral sliver defects of different sizes at the longitudinal and transverse ribs of the threated steel. The irregular inclusions of $Al_2O_3$, $SiO_2$ and $Al_2O_3$-$SiO_2$ were detected at the cross section of the sliver defects, with sizes ranging from 40~120 μm. These non-metallic inclusions caused a deterioration in the local plasticity of the threaded steel ingot, leading to the formation of cracks. As the rolling process progressed, these cracks gradually expanded

基金项目:国家自然科学基金联合基金资助项目(U20A20272),河北省军民科技协同创新专项资助项目(22351001D),河北省高等学校科学术研究项目(CXY2023004)

通讯作者:徐东,博士,教授,2014年毕业于东北大学钢铁冶金专业。E-mail: xudong_xyz@163.com

and ultimately resulted in sliver defects. By implementing measures such as reducing the oxygen content at the converter endpoint and enhancing the air-tightness during pouring, the average oxygen content of the molten steel in the tundish was reduced to 25ppm. Consequently, the incidence rate of surface sliver defects in hot - rolled products decreased from 2.7% to 1.5%, effectively preventing the occurrence of sliver defects.

**Key words:** threated steel; surface quality; non-metallic inclusions; sliver defect; control measures

螺纹钢(俗称“钢筋”)是建筑工程结构中最主要的材料之一,其产量占我国钢材总产量的20%左右[1-2]。在实际建筑过程中,螺纹钢通常会与混凝土粘结在一起,承载巨大的外界作用力[3-4]。因此,合格的螺纹钢要求具备优良的机械强度和表面质量。为保证螺纹钢的生产质量,其生产工艺必须严格遵循我国的相关标准。

表面质量是螺纹钢成品的重要考察指标,这是因为表面缺陷的存在会严重降低螺纹钢的成材率,导致螺纹钢降级、甚至判废。众所周知,钢中的大尺寸非金属夹杂物往往是钢材产生翘皮、裂纹等缺陷的主要原因[5-8]。但由于钢种成分的不同,翘皮缺陷的成因也存在着差异。刘兰霄等人[9]提出高碳工具钢锭在热轧过程中易发生脱碳反应,降低了带钢表面的局部塑性,从而导致翘皮缺陷的发生。潘以庆等人[10]认为结晶器卷渣是SAE1006热轧板发生翘皮缺陷的主要原因。徐国军等人[11]在DC06钢翘皮缺陷处检测到了$Al_2O_3$夹杂物。虽然翘皮缺陷已经被广泛研究,但针对螺纹钢的表面翘皮缺陷的研究相对较少,缺陷原因也不得而知。

国内某钢铁企业在生产螺纹钢过程中,翘皮缺陷一直是严重影响其表面质量的主要问题,产生缺陷的钢材比例高达2%,严重影响企业效益。为了解释螺纹钢表面翘皮缺陷的形成原因,本文利用扫描电子显微镜、能谱分析仪检测了螺纹钢翘皮缺陷的位置、形貌及螺纹钢中夹杂物的类型和形貌,并结合螺纹钢的生产流程及现场追踪,探讨了螺纹钢产生翘皮缺陷的原因。基于分析结果,提出了控制螺纹钢翘皮缺陷的措施,为螺纹钢的工业生产提供指导。

## 1 生产工艺及检测方法

### 1.1 生产流程

螺纹钢在使用时,其重点要求的力学性能和工艺性能取决于其化学成分。在典型的生产工艺流程中,只要严格依照国家标准所规定的成分范围把控钢中元素含量,产品质量通常都能够满足使用需求。螺纹钢的典型生产流程包括高炉炼铁—转炉炼钢—炉外精炼—方坯连铸—定尺切割—入库—轧钢加热炉—棒材轧制—控轧控冷—冷床—定尺剪切—打捆—称重—入库等环节。在炉外处理环节,运用LF精炼法提升钢水质量。在轧制过程中,采用低温轧制、控轧控冷等技术,进一步优化钢材的综合性能。

### 1.2 成分及工艺参数

试验采用由160 mm×160 mm规格小方坯连铸机生产的HRB400EG螺纹钢,HRB400EG螺纹钢的化学成分见表1。实际生产过程中的连铸工艺参数见表2。

表1 HRB400EG螺纹钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical Composition of HRB400EG Threated Steel (Mass Fraction) %

| C | Mn | Si | S | P | V | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.21~0.25 | 1.31~1.65 | 0.61~0.80 | ≤0.045 | ≤0.045 | 0.04~0.06 | 余量 |

### 1.3 检测方法

螺纹钢翘皮缺陷的出现频次与铸坯生产时序强相关,基本在同浇次连续铸坯出现,严重时同炉同浇次均出现。为了确定HRB400E螺纹钢筋表面“黑线”缺陷以及屈服强度大幅波动的原因,从问题相对突出的$\Phi$18 mm规格产品上截取试样。针对该试样进行镶样处理,历经打磨抛光流程后,借助配备能谱仪的场发射扫描电子显

表2 实际生产过程中的连铸工艺参数

Table 2 Continuous Casting Process Parameters in Actual Production Processes

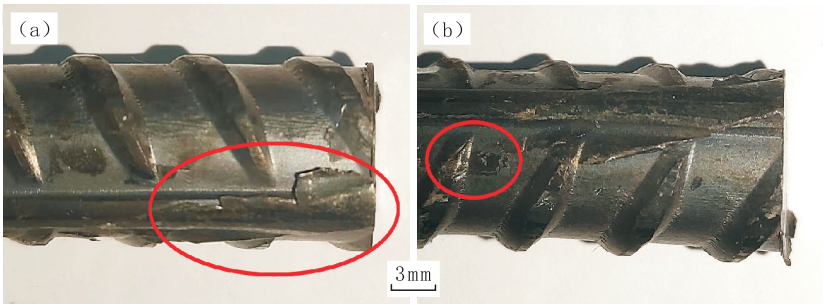
| 实际拉速/（$m \cdot min^{-1}$） | 结晶器水量/（$m^3 \cdot h^{-1}$） | 过热度/℃ | 铸坯断面/（mm×mm） |
|---|---|---|---|
| 1.81 | 180 | 19~31 | 160×160 |

微镜（SEM-EDS，FEI Apreos，Hillsboro，USA）观测其微观形态以及翘皮区域内的元素构成，再结合生产工艺实施排查，进而明确成因并规划改进措施。研究过程中随机选取了多个缺陷钢棒产品进行了形貌分析与缺陷成分检测，鉴于其检测结果基本一致，本文只选取了最具代表性的缺陷钢棒的检测结果。

## 2 缺陷形貌及检测

### 2.1 宏观形貌

螺纹钢表面翘皮缺陷的宏观形貌如图1所示。




(a) 纵肋处缺陷；(b) 横肋处缺陷

**图1 螺纹钢表面翘皮缺陷的宏观形貌**

Fig. 1 Macroscopic Morphology of Surface Sliver Defect in Threated Steel

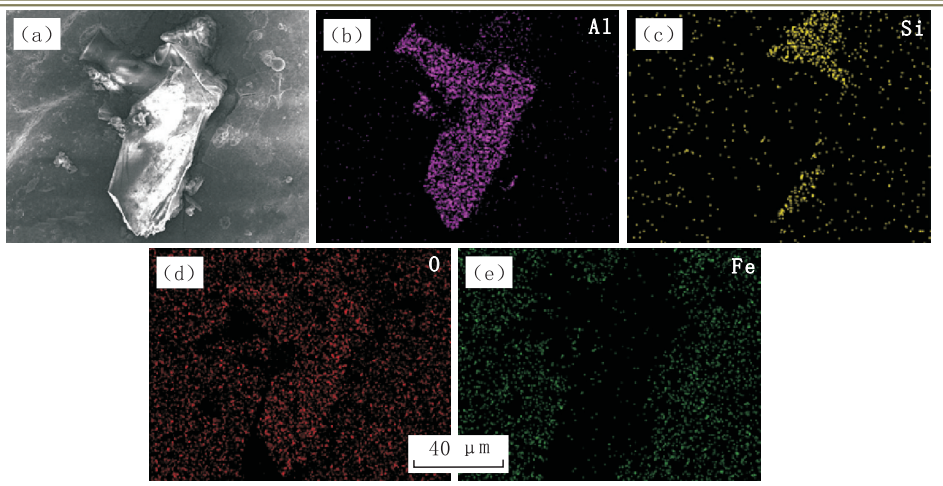
由图1可知，在螺纹钢表面，能够清晰地观测到局部区域存有不规则的凸起或“牛舌状”翘皮。这些翘皮缺陷与钢体表面之间形成了显著的界限，主要分布在螺纹钢的纵肋处与横肋处。翘皮的面积大小各异，既可能是较小的局部裂口，也可能是大面积的连续分布。翘起的程度有所差别，有的只是轻微隆起，有的则高高翘起，甚至和钢体表面构成较大的夹角。经测量，翘皮的厚度约为0.1~2.0 mm，翘皮的长度在5~20 mm。从颜色方面来看，翘皮部分的色泽与正常钢体表面有所不同，较为灰暗、粗糙，呈现出氧化后的特殊色泽。总体而言，螺纹钢表面的翘皮缺陷会损害钢材表面的平整度与连续性，对其外观质量和使用性能产生影响。

### 2.2 成分检测

为进一步明确螺纹钢翘皮缺陷的产生机理，采用配置能谱分析仪（EDS）的ZEISS电子显微镜（SEM）对螺纹钢表面翘皮的断面进行形貌观察及成分定性分析。检测前用酒精清洗钢样，得到螺纹钢典型夹杂物SEM-EDS图，从整体上看，螺纹钢中的夹杂物大多为不规则形状，具有较多棱角和突起。螺纹钢中$Al_2O_3$-$SiO_2$类型夹杂物SEM-EDS图见图2，由图2可知，$Al_2O_3$-$SiO_2$类型夹杂物的最大直径为120 μm左右，且夹杂物附近有少量氧化铁皮。经EDS检测，该夹杂物主要由Al、Si、O等元素组成。螺纹钢中$Al_2O_3$类型夹杂物SEM-EDS图见图3，由图3可知，黄色虚线标注的是$Al_2O_3$类夹杂物，该夹杂物的最大直径为40 μm左右。经EDS检测，该夹杂物主要由Al、O元素组成。除此之外，还发现了最大直径为80 μm的$SiO_2$夹杂物（蓝色虚线标注）以及$Al_2O_3$-$SiO_2$类夹杂物（红色虚线标注）。螺纹钢中$SiO_2$类型夹杂物SEM-EDS图见图4，由图4可知，$SiO_2$类型夹杂物的最大直径为100 μm左右，且夹杂物附近有少量氧化铁皮杂质。经EDS检测，该夹杂物主要由Si、O元素组成。

### 2.3 缺陷形成原因分析

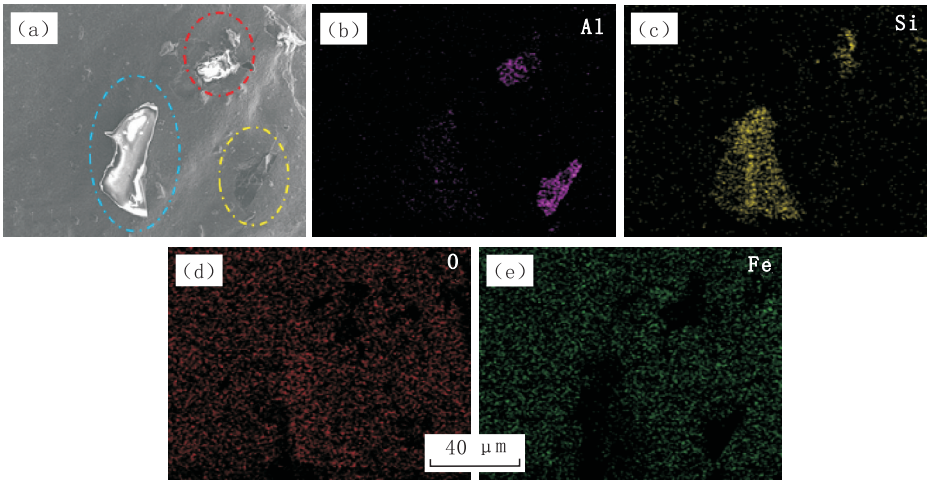
通过对螺纹钢缺陷试样的断面进行能谱分析，发现存在$Al_2O_3$-$SiO_2$、$Al_2O_3$、$SiO_2$类型的夹杂物，这些夹杂物尺寸较大，塑性不佳，属于脆性夹杂物。$Al_2O_3$夹杂是一种高硬度、高熔点的脆性夹杂物，其硬度远高于钢基体。在轧制过程中，$Al_2O_3$夹杂物不易变形，而钢基体则发生塑性变




(a) $Al_2O_3$–$SiO_2$类型夹杂物；(b) Al元素分布；(c) Si元素分布；(d) O元素分布；(e) Fe元素分布

**图2 螺纹钢中$Al_2O_3$–$SiO_2$类型夹杂物的SEM-EDS图**

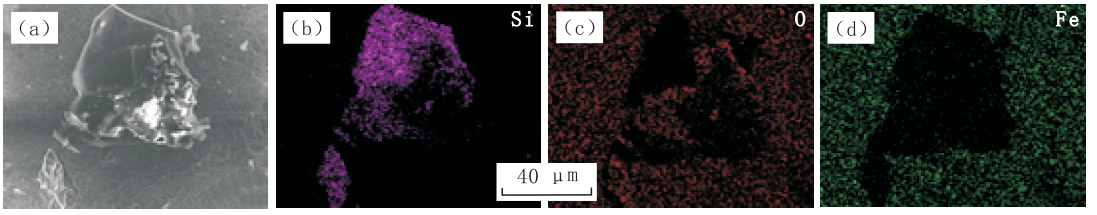
Fig. 2 SEM-EDS Images of $Al_2O_3$–$SiO_2$ Type Inclusions in Threated Steel




(a) $Al_2O_3$类型夹杂物；(b) Al元素分布；(c) Si元素分布；(d) O元素分布；(e) Fe元素分布

**图3 螺纹钢中$Al_2O_3$类型夹杂物的SEM-EDS图**

Fig. 3 SEM-EDS Images of $Al_2O_3$ Type Inclusions in Threated Steel




(a) $SiO_2$ 类型夹杂物；(b) Si元素分布；(c) O元素分布；(d) Fe元素分布

**图4 螺纹钢中$SiO_2$类型夹杂物的SEM-EDS图**

Fig. 4 SEM-EDS Images of $SiO_2$ Type Inclusions in Threated Steel

形。这种变形的不协调会导致夹杂物与基体之间产生应力集中。此外，$Al_2O_3$夹杂物的尺寸和分布对翘皮缺陷的形成有重要影响，应力集中更容易发生在较大的夹杂物或聚集的夹杂物周围。随着轧制道次的增多，钢棒受到较大的应力和剪切力，由$Al_2O_3$夹杂物导致的应力集中强度可能会超过钢基体的屈服强度，带钢不同部位由于塑性不同极易产生裂纹或者出现开裂情况。在轧制过程中，如果出现过大的轧制温度变化，将会导致连铸坯的高温塑性显著降低，$Al_2O_3$夹杂物与钢基体的

界面结合力会减弱，在轧制力的作用下，夹杂物更容易与基体分离，同时钢材变形能力大幅增高，甚至出现超出热容差的塑性变形，萌生微裂纹。微裂纹一旦形成，在后续的轧制过程中可能会进一步扩展。特别是当裂纹尖端遇到其他夹杂物或缺陷时，裂纹的扩展速度会加快。$Al_2O_3$、$SiO_2$等夹杂物还会导致这些裂纹在后续的轧制中无法焊接。当钢材受到较大的轧制应力时，这些裂纹不断扩张，使得部分金属无法与基体完全焊合，在宏观上表现为一端与基体相连，另一端与基体脱离并翘起的形貌，进而形成沿着轧制方向断断续续分布的翘皮缺陷。

因此，基于HRB400EG螺纹钢的成分、生产工艺，判定翘皮缺陷为炼钢过程中产生的$Al_2O_3$夹杂所致。在浇注脱氧，钢液中形成的$Al_2O_3$夹杂物在铸锭坯壳内部形成晶间夹杂物，经轧制后，钢材表面夹杂物聚集处塑性变差，从而产生分层翘起。HRB400E钢在冶炼过程中通常使用Al作为脱氧剂，Al与O反应生成$Al_2O_3$夹杂物。若Al含量加入量过多，会导致$Al_2O_3$夹杂物数量增加。除了Al元素，钢中Si元素也会改变夹杂物的形态和分布，使夹杂物更易聚集。当夹杂物聚集到一定程度时，在轧制过程中更容易与基体分离，形成翘皮缺陷。其次，在生产工艺方面，连铸过程中若结晶器保护渣性能不佳，如黏度不合适、润滑效果不好，会导致氧化铝夹杂物不易上浮去除，而残留在钢坯中。另外，连铸拉速过快也会使夹杂物上浮时间不足，增加钢中夹杂物的含量。这些残留在钢坯中的$Al_2O_3$夹杂物在后续轧制过程中，也会成为翘皮缺陷的源头。轧制过程中压下量过大会使钢坯内部的应力增大，当应力超过夹杂物与基体的结合强度时，就会在夹杂物处产生裂纹，进而导致翘皮缺陷的出现。

HRB400EG螺纹钢的生产工艺对钢液中脱氧产物的形成有着重要影响，结合现场生产经验分析，夹杂物的产生有以下几点原因：

（1）脱氧过程中生成的脱氧产物混杂在钢液里，所产生的脱氧产物倘若未能及时上浮并排出，便会留存于钢中成为夹杂物。即便熔渣能够吸收夹杂物，可仍有部分残留夹杂物未被完全清除。

（2）从精炼钢水脱氧至连铸浇注完成之前，钢包中顶渣的氧化性偏高，渣中的[O]容易向钢水中扩散，进而致使$Al_2O_3$、$SiO_2$等夹杂物的生成。

（3）在保护浇注的过程中，由于长水口、覆盖剂、中间包密封不严密，致使钢水被空气二次氧化，从而产生新的夹杂物。

（4）钢包下渣时，中间包内的钢水首先被钢包渣中的FeO、MnO氧化，其次被空气中的氧气氧化。

## 3 改进措施

### 3.1 降低转炉终点氧含量

转炉终点氧含量对钢液的清洁度有着决定性影响。转炉终点氧含量越高，钢水中就越容易形成夹杂物。因此应当从降低转炉终点氧含量、增强底吹氩强度、优化钢液清洁度等方面入手，以减少螺纹钢的翘皮缺陷。首先，要精准把控氧枪的枪位以及供氧强度，在不同的吹炼阶段运用恰当的枪位与供氧量，推动脱碳反应的进行，同时降低过氧化的情况。其次，科学合理地调节底吹搅拌强度，增强熔池的搅拌成效，使钢液的成分和温度更为均匀，有利于脱碳和脱氧反应的开展。再者，运用先进的检测技术，例如副枪检测、炉气分析等，对吹炼过程中的钢液成分和温度变化进行实时监测，为终点控制提供精确的数据支撑。最后，强化操作人员的培训，并注重经验的积累，提升终点判断的精准性，防止出现终点过氧化的现象。

### 3.2 降低钢包顶渣氧化性

在转炉炼钢的过程中，有少量炉渣会随着钢水一同流入钢包。因为钢渣的氧化能力较强，进入钢包后，钢水中会出现回氧现象，导致钢水中的夹杂物增多。为此，提出了改进转炉出钢挡渣工艺的措施，以降低转炉炉渣的掺入量，减少初始顶渣的氧化性。其次，利用石灰对钢渣进行改性，降低FeO含量，并将TFe含量控制在4%以内，从而达成降低钢包顶渣氧化性的目的。还可以在钢包中加入改质剂，比如铝粒、碳化硅等，它们能够与顶渣中的氧化铁发生反应，从而降低渣的氧化性。此外，出钢后进行适度的氩气搅拌，能够促进钢渣之间的反应，降低顶渣的氧化性。

### 3.3 提高精炼效率

脱氧夹杂物的去除成效取决于精炼工艺。通过提升钢液的脱碳效率以及缩短精炼时长，能够降低钢液中的[O]向钢包顶渣的扩散，减少钢液

TFe含量，抑制浇注过程中夹杂物的生成。在钢液完成脱氧后，适度延长真空周期，有利于清除夹杂物，改良钢液的清洁程度。合理调控氩气流量以及吹氩方式，来达成最优的搅拌效果，推动钢液与精炼剂充分反应，促使夹杂物上浮去除。设计适宜的精炼渣成分，比如选取恰当的碱度、氧化性和流动性，用以增强脱硫、脱磷以及吸附夹杂物的能力。优化渣料的加入时机与方式，保证精炼渣迅速形成并发挥作用。减少精炼的等待时间，达成精炼工序与前后工序的紧密对接，提升生产效率。

### 3.4 加强浇注气密性

针对钢液中夹杂物产生的原因和产生机制，在开浇前，先使用氩气进行吹扫，待覆盖剂添加完毕且钢液量达到100%后，再关闭氩气，以此降低开浇时钢液的二次氧化。为避免液面波动导致钢液与空气直接接触，将中间罐的液面控制在规定的吨数范围以内。为延长钢液在中间包的滞留时间，采用墙-坝-稳流器组合的方式。平稳控制拉制速度，使结晶器内的液面保持稳定。

## 4 改进效果

采取上述措施后，钢水中的氧含量显著降低。中间包钢水的氧平均含量为25ppm。结果显示，该工艺使钢液中的夹杂物含量由32ppm降低至25ppm，提升钢液的清洁度。通过对生产过程的跟踪与反馈，实施了工艺优化和技术改造，铸锭中心纵裂纹从6.20%降低至4.52%，热轧件表面翘皮缺陷的发生率从2.7%下降到1.5%。经优化后的产品，品质稳定，各项指标良好，深受用户的称赞。

## 5 结论

（1）翘皮缺陷主要分布在螺纹钢纵肋、横肋处，呈现不规则凸起或“牛舌状”。翘皮缺陷内部存在$Al_2O_3$-$SiO_2$、$Al_2O_3$、$SiO_2$类型的不规则状夹杂物，这些夹杂物的最大直径在40~120 μm，为翘皮缺陷产生的主要原因。

（2）通过降低转炉终点氧含量、加强浇注气密性等措施，开展工业试验，随后进行生产优化，结果表明中间包钢水的氧平均含量降至25ppm，热轧件表面翘皮缺陷的发生率从2.7%下降到1.5%，有效地减少了翘皮缺陷的发生。

## 参考文献

[1] 杨才福. 高强度建筑钢筋的最新技术进展[J]. 钢铁，2010，45(11)：1-11.
[2] 何武，张东. 微增氮技术在钢筋HRB400E生产中的应用实践[J]. 鞍钢技术，2025(1)：62-66.
[3] 李健. 试论螺纹钢的生产工艺流程[J]. 冶金管理，2021(1)：1-2.
[4] 刘思洋，丁宁，卜俊男，等. Φ25 mm预应力混凝土用螺纹钢筋生产实践[J]. 鞍钢技术，2019(1)：63-66.
[5] 吴静，田俊，王德永，等. 镁处理对含Ti螺纹钢中夹杂物的影响[J]. 炼钢，2022，38(4)：78-83.
[6] 王凤鸣，张庆军，曹胜利，等. 钢板表面翘皮缺陷常见原因分析[J]. 铸造技术，2017，38(2)：345-349.
[7] 崔进忠，高天佐. 冷轧板翘皮缺陷成因分析及改进措施[J]. 热加工工艺，2016，45(13)：172-174.
[8] 陈书浩，王新华，黄福祥，等. 热轧钢板表面翘皮缺陷的特征和形成机理[J]. 特殊钢，2011，32(5)：47-50.
[9] 刘兰霄，周娜，刘娟，等. 高碳工具钢表面翘皮缺陷分析及控制措施[J]. 中国冶金，2021，31(11)：59-61，66.
[10] 潘以庆，殷胜，田青超，等. 热轧板翘皮缺陷处混晶及织构分析[J]. 中国冶金，2022，32(1)：52-57.
[11] 徐国军，胡华东，田川，等. $Al_2O_3$夹杂在DC06钢中的分布及对深冲性能的影响[J]. 中国冶金，2021，31(5)：111-117.

（编辑 白璐）
修回日期：2025-09-29