

## 棒线材轧制过程缺陷成因与控制研究

许君诚 任燕雄 何文浩 黄新峰  
新余钢铁集团有限公司, 江西 新余 338000

[摘要]棒线材(棒材、线材)属于国家基础设施建设的根本原材料之一,它的产品质量好坏直接影响到了后续工业生产的安全程度以及生产效率高低。棒线材轧制工序则是棒线材成型的主要工序,在其中工艺控制程度的好坏就直接影响到了最终产品的质量优劣。文中对棒线材轧制时出现的一些表面及内部缺陷种类进行了总结,例如:折叠、裂缝、刮痕、超差等,并对产生这些缺陷的原因进行了详细的研究分析。在此基础上提出了一套包括工艺改进、设备保养维护、过程检测以及原材料处理在内的全面的质量保证体系。

[关键词]棒线材轧制;缺陷成因;工艺优化;质量控制;在线检测

DOI: 10.33142/ec.v9i4.19467

中图分类号: TF1

文献标识码: A

### Research on the Causes and Control of Defects in the Rolling Process of Rod and Wire Rod

XU Juncheng, REN Yanxiong, HE Wenhao, HUANG Xinfeng  
Xinyu Steel Group Co., Ltd., Xinyu, Jiangxi, 338000, China

**Abstract:** Rod and wire (rod, wire) are one of the fundamental raw materials for national infrastructure construction, and their product quality directly affects the safety level and production efficiency of subsequent industrial production. The rolling process of rod and wire is the main process of forming rod and wire, and the degree of process control directly affects the quality of the final product. The article summarizes the types of surface and internal defects that occur during the rolling of rod and wire, such as folding, cracks, scratches, and deviations, and provides a detailed study and analysis of the causes of these defects. On this basis, a comprehensive quality assurance system was proposed, including process improvement, equipment maintenance, process inspection, and raw material handling.

**Keywords:** rod and wire rolling; defect causes; process optimization; quality control; online detection

#### 引言

棒线材产品在钢铁产品中占比较大,并主要用于建筑业、机械制造业、汽车行业以及能源交通运输行业的一些重要位置。目前在经济发展过程中对于钢材的质量标准、尺寸精度以及表面质量的要求也越来越高,因此棒线材产品质量把控已经成为钢铁公司提高自身竞争优势的重要方面之一。对棒线材产品的生产而言,其轧制工序是最为重要的一个步骤,在此工序中对轧制工艺的选取、设备状况的好坏、工作人员技术水平的高低都会影响到产品的质量好坏。而在实际生产中,由于轧制过程复杂、多变量之间相互关联以及高速连续等特点,经常会存在着很多缺陷如:折叠、裂纹、尺寸超差、表面擦痕等,不仅会带来很大的资源损失,还可能会引起一系列的安全隐患问题。所以加强对棒线材轧制过程中产生的各种缺陷产生原理的研究及提出相应的解决措施是非常必要的,对提高产品的

质量,减少生产的投资费用,提升企业的竞争力都有极大的帮助作用,具有很大的理论意义以及实际价值。

#### 1 棒线材轧制主要缺陷类型

棒线材轧制时出现的产品缺陷有多种多样,根据缺陷的表现形式及产生原因可以分为表面缺陷、内部缺陷和尺寸形状缺陷三大类。

表面缺陷是最明显的质量问题,在轧件上可以清晰看到,主要有折叠,裂纹,划痕和耳子等。折叠是在前一个孔型的轧件轧过后被压入到了自身表面,然后经后续孔的拉伸而未焊接起来的线状缺陷,在钢板上沿轧制方向呈直线或者断续分布,裂纹就是轧件存在不连续的缝隙,它的产生可能是由于钢坯内部存在的皮下气泡以及氧化物等杂质在轧制时暴露出来,或者是由于轧制温度不合适,冷却不均匀造成的应力裂纹。划伤是钢板与导卫装置,轧槽以及运输辊道之间互相剧烈摩擦而留下的痕迹。耳子是轧

件表面沿轧制方向凸起的多余金属,往往是由于轧机调整不当,在孔型内轧件过多而引起的。

内部缺陷主要是指存在于轧件内部的夹杂物、偏析、气泡、缩孔残余和中心裂纹等等。虽然它们并不会直接显现出来,但是会对材料的机械性质造成严重的破坏作用,尤其容易使材料丧失疲劳强度与韧性。在冶炼、耐材侵蚀以及浇注时带入的钢渣,经过轧制变形之后形成条带或者点线式分布<sup>[1]</sup>,而内部疏松、疏松是连铸坯内部存在的问题的延续,如果未经合理压缩比例焊接的话就会残留在成品当中。

尺寸、形状缺陷是指产品实际尺寸超出规定范围的情况,例如:圆钢的弯曲过大,螺纹钢的横肋太低或纵肋太高等。这些都会对后期的产品使用造成一定影响,表 1 总结了常见的棒线材轧制缺陷种类和基本形态。

表 1 棒线材轧制主要缺陷类型及特征

缺陷类别	缺陷名称	主要特征	典型表现形式
表面缺陷	折叠	沿轧向的线状缺陷,与基体部分熔合	直线状、锯齿状、断续分布
	裂纹	表面缝隙,方向各异	网状、龟裂、横向或纵向裂纹
	划伤	沟槽状伤痕,有金属光泽或氧化色	连续或断续的沟痕
	耳子	表面凸起的多余金属条	单侧或双侧沿轧向凸起
内部缺陷	夹杂物	非金属物质嵌入金属基体	点状、条状、带状分布
	中心疏松	组织不致密,显微孔隙	中心区域可见孔隙
尺寸形状缺陷	尺寸超差	截面尺寸超出标准公差范围	圆钢椭圆度大、螺纹钢负差不足

## 2 缺陷成因分析

### 2.1 工艺参数因素

工艺参数是影响轧制过程的关键因素,工艺参数确定与否、是否合理直接影响到金属流动的规律以及所受到的应力应变情况,不合理的工艺参数往往是导致各种缺陷产生的主要原因。开轧温度、终轧温度的选择直接影响到产品的塑性、变形抗力等方面,在终轧温度较低的情况下,产品的变形抗力会突然增大,塑性差,造成产品在表面或者中心出现裂纹等质量缺陷问题;而在终轧温度较高情况下会造成晶粒长大,造成机械性能指标不合格的同时产生大量的氧化铁皮,这些氧化铁皮压入基体后会产生表面缺陷等。除此之外,不均衡的加热或者轧制过程中热量的损失都会使轧件在长度以及宽度上有温差的存在从而导致了不均匀的变形而造成内部应力以及外观变形比如镰

刀弯或者扭转现象。压缩率不够大不能够很好的熔合住连铸坯内部原有的缩孔和疏松等从而遗传给成品。每一道次的压下的量分配不合理,尤其是首几道次压下的量比较小不能够破坏掉铸态组织结构以及细化晶粒,而末几道次压下的量过大会超过材料的承受范围而导致金属内部出现一些微裂或者表面出现一些折叠。

### 2.2 设备与模具因素

设备及模具的质量水平以及状况好坏是保证轧制过程平稳运行、产品质量良好的前提条件,任何偏离或损坏都会引起缺陷的出现;轧辊的材料、强度以及表面粗糙度等都会影响到产品的表面质量情况,在生产过程中轧辊表面磨损厉害的话那么其外形发生变形导致孔型尺寸不合格从而使得轧件尺寸也不合格;孔型设计不合理,孔型侧壁斜度太小或者孔型圆角半径太小都会使金属在孔型内流动受到阻碍产生应力集中而在轧件表层上会出现折叠以及裂纹的情况;导卫装置安装偏移、磨损严重或者是设计不符合要求等原因容易引发轧件表面刮伤、扭曲乃至堆钢现象。轧机刚性不够,在轧制力的作用下,辊缝产生较大的弹性跳动,从而造成实际轧出的产品尺寸的变化,特别是对那些尺寸精度要求高的棒线材产品而言更加明显。传动系统速度波动或是不同步,都会引起连轧时张力波动,从而导致尺寸误差及内应力等缺陷产生。

### 2.3 材料因素

原料(连铸坯)的质量是影响轧件质量的基础因素,在钢中连铸坯的化学成分、纯净度、内部结构以及尺寸偏差都对轧钢过程及最终产品质量有非常大的影响作用,其中化学成分的变化会对钢铁在轧制过程中发生相变点、塑性和变形抗力都有很大影响。比如,钢材中的硫、磷含量过多会导致热脆,造成高温下出现裂纹的现象;还有就是连铸坯中的微合金元素(如: Nb, V, Ti)析出行为,虽然可以通过细化晶粒来增强强度,但是如果控制不好的话就会造成这些析出物成为裂纹的起源。连铸坯的内部缺陷也是造成轧材内缺陷的主要原因<sup>[2]</sup>。中心偏析,中心偏析,缩孔,皮下气泡,非金属夹杂物等,在热轧过程如果不能充分焊接或者碎断,则会造成最终产品的中心裂纹、皮下气泡以及条状夹杂等问题;尤其是大的非金属夹杂不仅会缩短服役时间而且会在热轧过程周围造成应力集中从而产生微裂纹。连铸坯的形状,比如方坯的脱方度(菱形度),圆坯的不圆度,以及坯体表面清理情况,比如是否存在结疤,深的压痕,都会影响到轧件咬入与变形均匀度的问题。严重的脱方方坯进入到孔型容易造成第一次变形不均,增

加以后各道次出现重叠，倒钢的机会。如图 1 所示，连铸坯原始瑕疵在轧制过程中转化成为最终的产品缺陷是产品缺陷发生的决定性步骤。

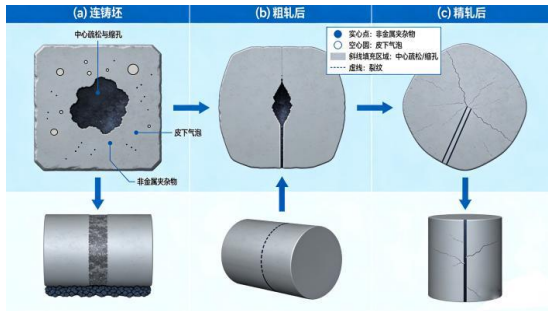


图 1 连铸坯缺陷在轧制过程中的演变示意图

### 3 缺陷控制策略

#### 3.1 轧制工艺优化

工艺改进是最彻底，也是最实惠的方法来降低缺陷出现，首先对加热制度进行改进，采取“高温快速加热”加热方式，保证钢件加热均匀，减小温差，同时调节炉内气氛，防止产生严重的氧化与脱碳现象的发生；针对不同的钢材类型制定适宜恰当的开轧温度、终轧温度，比如对于含 Nb、V 之类的微合金钢，一定要将终轧温度控制到奥氏体未发生再结晶区域，才能使细晶强化的效果得到显现，否则会由于温度过低而产生裂纹的情况；合理设置孔型体系，保证金属在不同道次中能够均匀塑性流动，防止出现过充满或者欠充满的现象。利用计算机辅助孔型设计（CAD）、有限元仿真技术，能够准确地对出入口断面形状、金属流动、温度场、应力场等状况做出预测，从而预见可能产生的质量问题。如通过有限元模拟来改善孔型圆角半径以及侧壁斜度可大大减少角部产生折叠的可能性。合理分配各道次压下量，达到一定的总压下量来解决焊合内部缺陷问题。利用先进的自动张力控制系统，在活套调整或者微张力控制算法的作用下使各个机架之间维持恒定的小张力或者是微堆钢的状态，避免因张力波动带来的尺寸误差问题以及内部的损伤问题。连轧过程秒流量相等原则是实现张力控制的基础，其公式为：

$$F_i v_i = \text{常数}$$

其中， $F_i$  为第  $i$  架轧机出口截面积， $v_i$  为第  $i$  架轧机出口速度。实际生产过程中通过对电机的速度进行准确控制来使这个公式能够成立，再引入一个小的张力就可以达到均匀轧制的效果了。

#### 3.2 设备精度维护

“工欲善其事，必先利其器”，设备精度控制是保证产品质量的基础条件之一。需要制定完善的轧辊、孔型管

理措施。定期检测测量轧辊直径及孔型大小，制定磨削报废标准。选用强度较高的耐磨轧辊材质，例如采用高速钢轧辊来提高轧辊强度、使用寿命和降低孔型磨损造成的影响；对于孔型加工要采用高精数控机床，保证孔型规格、尺寸的精确性；实行导卫装置离线预装、在线校验的方法。保证导卫定位准确、固定压力适当，滚压导卫轴承转动顺畅。定期地对轧机做刚性检验，了解轧机所承受的不同轧制力度下产生的位移数值，在设定轧制间隙时予以修正。借助在线监测手段，对轧机运行时发生的振动情况以及轴承温度、电动机电流等一系列的状态参数进行监视，提前预警可能出现的问题，并对其进行修复，防止由于机器发生故障而导致成批的产品出现问题。

#### 3.3 过程监测与调整

过程监测是工艺设定到产品质量之间的纽带，在整个轧制过程中不断观测影响产品质量的关键变量并及时做出相应的调节是最本质的质量闭环控制。在精轧机组之后加装激光测径仪或者 X 射线测厚仪等设备即可实现在线、无损测量轧件横截面尺寸大小如直径、椭圆度以及翼缘厚度等，一旦发现不合格尺寸立刻报警并通过反馈控制系统给轧机的轧辊间隙、张力等微调，使尺寸迅速恢复到允许误差范围之内。在轧钢生产线重要环节如粗轧机出口、精轧机入口、卷取机前等处布置红外热像仪或测温仪随时观察轧件表面的温度状态。

#### 3.4 材料预处理控制

严把来料关，是防止产生缺陷的第一关，要制定一套严密的连铸坯验收制度，每炉连铸坯都要做低倍组织检测，查看连铸坯的中心疏松、缩孔、偏析以及裂纹等情况。对于表面质量较差、有明显裂纹、结疤等连铸坯要进行清理处理干净，避免其在轧制过程中进一步扩大，如图 2 所示，通过对连铸生产工艺条件进行优化，比如减小过热度、加装电磁搅拌设备、减少压下量等可以从根本上提高连铸坯的质量，在一定程度上减轻了内部中心偏析和疏松情况的发生率，从而为后续轧钢提供了可靠的原材料保证。

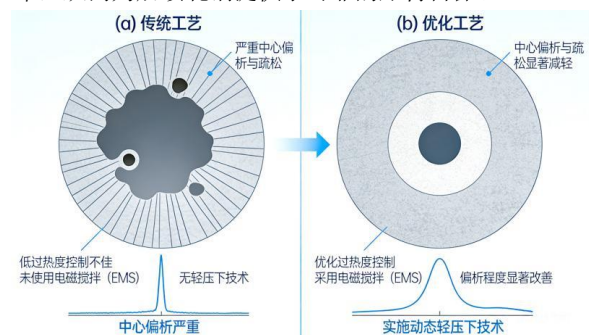


图 2 连铸工艺优化对改善内部质量的示意图

## 4 质量控制体系构建

### 4.1 标准化作业流程

标准化是保证质量稳定的根基。公司要建立健全原材料检验、熔炼、轧制、冷却、精整、检验等一系列环节的标准化作业流程（SOP）。SOP 应当明确规定各岗位的操作方法要求及重要指标控制界限、突发状况应急措施方案、设备日常维护保养要求等内容，通过执行 SOP 降低人为因素带来的影响，保障生产工艺过程的一致及可重复性<sup>[3]</sup>。另外还要设立岗位责任制和产品质量可溯性管理体系，把质量职责分解到每一个步骤，每一名人员身上。

### 4.2 在线检测技术应用

搭建全方位生产线上的在线监测系统。如本文所说，结合激光测径仪、红外测温 and 机器视觉表面检测等多种方式，在线监测产品的直径大小、温度以及表面情况等指标并且实时传递给中央控制系统形成质量数据库。在线监测技术的应用是把产品质检由原来的事后抽查变成实时观测，极大的提升了缺陷发现的速度与精确度。

### 4.3 数据化质量追溯

利用制造执行系统（MES），对整个订单到产品的成库过程进行全过程数字化管控。MES 系统需要存储每个钢材坯料的化学成分含量、冶炼炉别、连铸参数等以及整个轧制过程中重要的温度、速度、张力等还有最后的产品检测情况<sup>[4]</sup>。通过这些信息可以做到产品的全生命周期跟踪查询，在有不合格产品出现的时候可以通过这些查询迅速的找到出现问题的批次、生产时间及工序，进而查明造成产品不合格的根本原因，从而达到快速查找并解决问题

的目的，也有利于追究相关责任人。

## 5 结束语

棒线材轧制质量管控是一个复杂的系统工程。本文对棒线材轧制中产生折叠、裂纹、尺寸偏差等问题的主要原因进行了详细的研究并认为工艺参数的选择、设备及模具的状态及原材料本身的性能是决定产品的最终质量好坏的关键因素，在此基础上提出了工艺控制、设备维护、过程监控、原料处理等多项措施相结合的质量控制方案。在此方案基础上建立了一套基于标准流程的操作、实时监控的方式、大数据回溯的方法、动态完善的机制的质量管理体系。未来，在人工智能、大数据、数字孪生等一系列新技术发展下，棒线材轧制质量管控也将向着更加智能化、精细化、高效化方向前进，做到由经验到数据的转变，为棒线材产品高品质、高稳定性生产带来更为有力的技术支持。

### [参考文献]

- [1]许雅楠.精密极薄带材轧制过程张力控制策略研究[D].太原:太原理工大学,2024.
- [2]崔海伟,黄东城.棒线材轧机热轧钢筋类产品生产概述[J].南方金属,2024(5):1-5.
- [3]王维一,徐平,王蓓,等.铍材轧制过程温度对其塑性及显微组织的影响[J].稀有金属与硬质合金,2022,50(3):78-81.
- [4]于宏朋,杨锡红,王正刚.棒线材连铸直轧关键技术和实践应用[J].轧钢,2023,40(6):142-147.

作者简介：许君诚（1998.12—），毕业于东北大学材料成型及控制工程专业，助理工程师，现就职于新余钢铁集团有限公司。