

棒材连轧生产线轧制缺陷成因及工艺改进对策

盛子琦

中冶华天工程技术有限公司 安徽 马鞍山 243000

摘 要: 棒材连轧生产中各类轧制缺陷会严重影响产品质量、生产效率与企业市场竞争力。本文系统梳理棒材连轧核心工艺流程,分类总结表面、尺寸、内部三大类典型轧制缺陷特征,从原材料、工艺参数、设备工装、现场管控四维度剖析缺陷核心成因。针对性提出原料预处理、工艺参数优化、设备升级、全流程管控等改进对策,构建完整质量保障体系,有效降低缺陷率、提升成材率与产品稳定性。

关键词: 棒材连轧生产线;轧制缺陷成因;工艺改进对策

引言:棒材是建筑工程的核心钢材原料,连轧工艺凭借高效、量产优势被广泛应用,产品质量直接关乎工程结构安全与企业经济效益。实际生产中,受原料品质、工艺调控、设备状态及人为操作等多重因素影响,轧制缺陷频发,易造成产品报废、产能受限及客户流失等问题。为解决生产痛点,本文全面分析轧制缺陷成因,制定科学可行的工艺改进方案,为棒材连轧产线提质增效提供实操参考。

1 棒材连轧生产线工艺及典型轧制缺陷分析

1.1 棒材连轧生产线核心工艺流程

(1)前期准备工序:钢坯验收需核对炉号、牌号及尺寸,表面不得有裂纹、结疤等缺陷。加热炉采用步进梁式,加热温度按钢种控制在 $1050^{\circ}\text{C}\sim 1150^{\circ}\text{C}$,均热段温差 $\leq \pm 20^{\circ}\text{C}$,防止过热过烧。高压水除鳞水压 $\geq 18\text{MPa}$,确保表面氧化铁皮清除率达95%以上。(2)核心轧制工序:粗轧机组(6架)将断面从 $150\text{mm}\times 150\text{mm}$ 压缩至约 $\Phi 60\text{mm}$,延伸系数 $1.25\sim 1.40$;中轧机组(6架)进一步变形至中间坯;精轧机组(6架)成品速度达 $16\sim 20\text{m/s}$,终轧温度控制在 $1000^{\circ}\text{C}\sim 1080^{\circ}\text{C}$ 。切分轧制采用孔型法将坯料纵切成 $2\sim 4$ 条,切分前后料形尺寸偏差 $\leq \pm 0.3\text{mm}^{[1]}$ 。(3)后期精整工序:轧后采用穿水冷却控制组织转变,矫直机弯曲度矫正至 $\leq 2\text{mm/m}$ 。定尺剪切长度偏差 $0\sim +60\text{mm}$,端面切斜 $\leq 3\text{mm}$ 。质量检测涵盖尺寸、表面及力学性能,逐支进行探伤抽检。

1.2 棒材连轧典型轧制缺陷分类及特征

(1)表面缺陷:表面裂纹呈断续直线状,多源于钢坯原始裂纹或轧制温度过低;折叠呈舌状或翘皮,沿轧制方向延伸,由前道次耳子压入所致;刮伤为表面机械划痕;麻点为密集凹坑,多因氧化皮压入后脱落形成;氧化皮附着超标表现为表面灰黑疏松层,厚度 $> 0.1\text{mm}$ 即判定不合格。(2)尺寸精度缺陷:直径超差指实测超出

标准公差范围;椭圆度超标表现为同一截面长短轴之差超过允许值;弯曲变形表现为棒材轴向直线度超标;切分不均导致各线成品尺寸差异 $> 0.5\text{mm}$,影响后续使用。

(3)内部质量缺陷:内部裂纹需低倍酸蚀或超声波探伤检出;疏松表现为中心区域不致密;偏析呈树枝状或环状,影响组织均匀性;晶粒粗大导致力学性能下降,金相检验晶粒度应达到 $5\sim 8$ 级。

1.3 轧制缺陷危害统计分析

(1)质量危害:存在上述缺陷的棒材抗拉强度、屈服强度及伸长率等关键指标不满足GB/T1499.2标准要求,用于建筑工程存在结构安全风险。(2)生产危害:缺陷产品返工及报废率升高,增加物料消耗与人工成本。以典型产线统计,表面缺陷导致成材率降低约 $1.5\%\sim 2\%$,尺寸超差废品增加 $0.5\%\sim 1\%$,严重制约产能释放。(3)市场危害:质量波动直接影响客户信任度,不合格批次退货增加企业售后成本。长期供货不稳将削弱品牌市场竞争力,影响重点工程投标资格,造成订单流失。

2 棒材连轧生产线轧制缺陷核心成因分析

2.1 原材料及坯料因素成因

(1)钢坯材质缺陷:连铸坯内部存在非金属夹杂物、中心缩孔、气泡及成分偏析等原始缺陷,在后续多道次热轧变形过程中,缺陷沿轧制方向被拉伸延展,演变为成品棒材的内部裂纹、分层或表面起皮。尤其是 Al_2O_3 等硬质夹杂物,易在界面处引发应力集中,成为疲劳裂纹源。(2)坯料预处理不达标:加热炉各段温度控制失衡,导致钢坯断面温差过大,轧制时金属流动不均。除鳞水压不足或喷嘴堵塞,使表面氧化铁皮清除不净,残留氧化皮在轧制中被压入基体,经反复变形后形成麻点、凹坑或氧化皮附着超标缺陷。(3)坯料规格偏差:钢坯边长超差、对角线偏差过大或端面平整度不

足,导致咬入时轧件受力不对称,在孔型中发生扭转或偏斜,引起宽度和厚度方向变形不均,进而产生弯曲、扭转及尺寸精度超差等缺陷。

2.2 轧制工艺参数因素成因

(1) 温度参数不合理:加热温度超过规定上限时,晶粒急剧长大甚至发生过烧,晶界氧化或局部熔化,轧制时即出现表面龟裂;温度过低则钢的塑性显著下降,变形抗力增大,在较大变形量下易产生横裂或角裂。终轧温度过高还会导致晶粒粗化,损害成品韧性。(2) 变形参数匹配失衡:粗中轧阶段道次压下量过大,导致轧件宽展失控、充满孔型形成耳子,下一道次将耳子压入基体即产生折叠;延伸系数分配不当会造成各机架间堆钢或拉钢,轧件张力波动,直接引发尺寸超差和截面椭圆度超标^[2]。(3) 轧制速度参数偏差:精轧机组轧速过快,金属变形时间不足、再结晶不充分,同时轧件在高速状态下易发生抖动,造成表面振痕;轧速过慢则延长轧件在高温区停留时间,加剧表面氧化,氧化皮增厚且难以在后续除鳞中清除,降低表面光洁度。

2.3 设备及工装因素成因

(1) 轧辊设备问题:轧辊使用周期过长导致辊面磨损不均匀,孔型尺寸改变,直接影响成品断面几何精度;轧辊同轴度超差或轴承游隙过大,造成轧辊径向跳动,使轧件产生周期性尺寸波动。孔型设计不当,如圆角半径过小或侧壁斜度不足,会加速磨损并诱发折叠。(2) 导卫装置故障:进口导卫中心线与轧制线偏移,使轧件以倾斜姿态进入孔型,导致两侧变形不均或刮伤表面;出口导卫夹持力不足或导板磨损,轧件甩尾碰撞引发端部开裂。切分导卫分料刃磨损后,各线料形分配失衡,造成成品切分尺寸差异显著。(3) 辅助设备异常:穿水冷却系统水压波动或喷嘴堵塞,冷却不均将产生内应力,诱发弯曲或冷却裂纹;矫直机辊系磨损、辊距调整不当,不仅无法有效矫正弯曲,还可能对棒材表面造成二次压伤。

2.4 操作及管控因素成因

(1) 人工操作不规范:换辊后轧制线标高未精确校准,调线操作凭经验缺乏数据支撑,导致首卷废品增多;道次间张力调整不及时,堆钢与拉钢交替出现,加剧尺寸波动。操作人员对异常声音、振动等信号反应滞后,延误故障排除时机。(2) 过程监测不完善:产线缺乏在线热态尺寸检测和表面缺陷实时识别手段,参数波动依靠人工巡检发现,响应周期长;温度、速度、扭矩等关键数据未建立闭环控制系统,偏差累积后酿成批量缺陷。(3) 生产管控流程漏洞:批次间工艺切换时,新

工艺参数未充分验证即投入批量生产;钢坯炉号批次更换时成分波动未及时传递至轧制工序,工艺参数未对应调整,造成非稳态轧制条件下缺陷集中爆发。

3 棒材连轧生产线工艺改进对策及保障措施

3.1 原材料预处理工艺优化

(1) 建立钢坯进厂质检体系:制定严格的钢坯入厂检验标准,每批次钢坯均进行低倍酸蚀检验,排查中心缩孔、裂纹、夹杂等内部缺陷;表面采用人工目视与涡流探伤相结合的方式全检,对存在超标缺陷的坯料予以拒收或降级处理,杜绝不合格坯料进入轧制工序。建立钢坯供应商质量档案,定期评估供货质量稳定性。(2) 优化加热及除鳞工艺:针对不同钢种制定差异化分段加热曲线,预热段温度 $\leq 850^{\circ}\text{C}$,加热段控制在 $1050^{\circ}\text{C} \sim 1150^{\circ}\text{C}$,均热段保温时间 $\geq 30\text{min}$,确保钢坯断面温度均匀性 $\leq \pm 15^{\circ}\text{C}$ ^[3]。高压水除鳞系统压力提升至 20MPa 以上,喷嘴布置优化为环向双排交错排列,除鳞覆盖率 $\geq 98\%$,并增设除鳞后表面质量抽检工序,确保氧化皮清除效果。(3) 规范坯料预处理流程:对经检验存在局部表面缺陷的坯料,采用火焰修整或砂轮打磨方式进行清除,修整后表面光滑过渡、深宽比 $\geq 5:1$,打磨深度不超过坯料公称尺寸的 3%。制定标准化的修整作业指导书,明确修整范围、工具选型及验收标准,从源头上消除坯料原始缺陷向成品传递的风险。

3.2 核心轧制工艺参数优化改进

(1) 温控工艺优化:根据钢种碳当量及相变特性,分别制定开轧温度与终轧温度控制范围。HRB400 系列开轧温度 $1050^{\circ}\text{C} \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 、终轧温度 $1000^{\circ}\text{C} \sim 1050^{\circ}\text{C}$;优质碳素结构钢适当降低终轧温度至 $950^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 以细化晶粒。在粗轧机组后增设红外测温仪,实现逐支温度追踪;建立温度偏差自动报警与降速补偿联动机制,当温差超 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 时自动调整轧制速度以补偿温降。(2) 变形工艺优化:采用有限元模拟与现场实测相结合的方法,重新校核各道次压下量分配。粗轧阶段单道次压下率控制在 20% ~ 30%,以破碎铸态组织为主;中轧阶段调整为 25% ~ 35%,充分细化晶粒;精轧阶段单道次压下率降低至 15% ~ 20%,保证尺寸精度。各机架间延伸系数分配遵循“前松后紧”原则,避免局部过变形引发折叠。对切分轧制,优化预切分孔型设计,确保切分后各线料形偏差 $\leq \pm 0.2\text{mm}$ ^[4]。(3) 速度工艺优化:依据各机架轧件断面与延伸系数,精确计算并设定各架次线速度,实现微张力轧制(单位张力 $\leq 10\text{MPa}$)。优化升速曲线,避免急加速引起的轧件抖动,升降速斜率控制在 $\pm 0.5\text{m/s}^2$ 以内。精轧机组终轧速度根据成品规格动态匹配, $\Phi 12\text{mm}$

规格控制在16~18m/s、 $\Phi 25\text{mm}$ 规格控制在10~12m/s,确保变形速率与再结晶进程协调匹配。

3.3 设备工装及配套工艺优化

(1) 轧辊及孔型系统优化:采用改进型孔型设计,增大孔型圆角半径(由R3mm增至R6mm),降低应力集中;两侧侧壁斜度由5%增大至8%,改善金属流动条件。制定轧辊全生命周期管理制度,每轧制300~500吨后对轧辊进行离线修磨,修磨后孔型尺寸精度控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内;辊面硬度检测频率由每班一次提升至每两小时一次,硬度下降超过HRC3即强制更换。(2) 导卫及辅助设备优化:制定导卫安装对中校准标准,采用激光对中仪进行中心线校准,安装偏差 $\leq \pm 0.2\text{mm}$ 。导卫易损件(导板、耐磨衬板、切分刃)实行定时更换制,粗轧导卫每8小时检查一次,精轧导卫每2小时巡检一次。穿水冷却系统增设流量计与压力传感器,单组喷嘴流量偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内;矫直机辊系建立定期精度检测制度,每月进行一次辊缝标定,确保矫直精度 $\leq 1\text{mm/m}$ 。(3) 设备智能化升级:在精轧机组出口加装在线热态尺寸测量仪(测径仪)和表面缺陷视觉检测系统,实现直径、椭圆度及表面质量实时监测。开发轧制过程智能预警平台,集成温度、电流、扭矩、振动等多源数据,当参数偏离预设区间时自动推送预警信息并触发降速保护,变被动事后检验为主动事前防控。

3.4 生产管控及质量保障措施

(1) 规范标准化操作流程:编制覆盖轧制全工序的标准化作业指导书(SOP),明确换辊操作、料型调整、张力设定等关键动作的技术规范。建立员工技能分级培训体系,每季度组织轧制理论培训与实操考核,考核不合格者禁止独立操作。推行首支产品确认制——每批次首支轧件经尺寸、表面全面检测合格后方可连续生产,将人为操作误差降至最低。(2) 建立全流程质量追溯体系:构建“一坯一码”信息管理平台,从钢坯入库、加

热轧制到精整打包,全程记录温度、速度、轧制力、设备状态及检测结果等关键数据。产品出现缺陷时可通过二维码快速追溯至对应批次、机架及操作时段,精准定位原因后48小时内落实整改措施,形成“发现—追溯—整改—验证”的闭环管理流程^[5]。(3) 建立常态化工艺优化机制:设立质量数据统计分析专员,每周汇总缺陷类型、频次及分布规律,编制缺陷分析报告。每月召开工艺质量分析会,运用帕累托图等工具识别主要缺陷类型及其变化趋势,针对性提出工艺迭代优化方案。每季度委托第三方检测机构对成品进行全项性能验证,评估工艺改进效果,确保产品质量持续提升,满足工程应用和市场竞争要求。

结束语

本文全面剖析棒材连轧生产各类轧制缺陷的危害与成因,聚焦生产全流程痛点,从原料处理、工艺参数、设备运维、生产管控四个维度制定系统性改进对策与保障措施。通过工艺优化、设备升级及标准化管控,可有效规避各类轧制缺陷,提升棒材尺寸精度与内部、表面质量。研究成果可切实改善生产工况、降低生产成本,助力企业稳定产品品质、增强市场核心竞争力。

参考文献

- [1]朱志远,王健,李磊.热轧棒材内部裂纹缺陷成因分析及轧制工艺优化[J].轧钢,2024,41(04):76-81.
- [2]黄元康.优特钢棒材连轧表面质量缺陷成因及工艺改进研究[J].安徽冶金科技职业学院学报,2023,33(04):23-26.
- [3]许君诚,任燕雄,何文浩.棒线材连轧过程典型缺陷成因与精准控制技术[J].工程建设,2026,9(04):48-52.
- [4]张海涛.棒材切分连轧工艺缺陷分析及技术改进[J].冶金设备,2022,14(08):67-70.
- [5]李军,赵阳.高速棒材连轧生产线尺寸精度缺陷成因及优化措施[J].中国冶金,2023,33(07):89-93.