

基于工艺调整的轧钢加热炉空步管控与产能提升工业实践

陈佳喜

江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江苏 无锡 214400

[摘要]特钢线材产线需要频繁切换多种钢种, 工艺切换期间加热炉产生大量空步, 炉内空出位置持续步进, 制约特钢线材轧线产能释放。以某特钢企业线材轧制产线为研究载体, 针对加热炉月度总空步 6500 步、钢种切换造成工艺空步月均 1600 步这一现场难题, 开展空步产生原因追踪分析。分别从重新优化加热工艺、统一整合性质相近钢种的控冷制度两个维度建立加热炉空步协同管控方案。现场应用数据显示, 产线每月能够稳定减少加热炉空步 320 步, 持续降低产线无效等待时间, 节约的生产工时有效转化为轧制产量。按每吨钢材增效 500 元计算, 项目季度直接产生经济效益 96 万元。该优化方案无需添置新设备, 仅通过工艺改进和调整生产安排即可释放产能, 以供参考。

[关键词]轧钢加热炉; 空步管控; 工艺优化; 线材轧制; 排产优化; 产能提升

DOI: 10.33142/ec.v9i8.20222

中图分类号: TG335.1

文献标识码: A

Industrial Practice of Empty Step Control and Capacity Enhancement of Steel Rolling Heating Furnace Based on Process Adjustment

CHEN Jiaxi

Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214400, China

Abstract: The special steel wire production line requires frequent switching of multiple steel grades. During the process switching, a large number of empty steps are generated in the heating furnace, and the vacant positions in the furnace continue to step, which restricts the release of production capacity of the special steel wire rolling line. Taking the wire rolling production line of a certain special steel enterprise as the research carrier, a tracking analysis was conducted on the causes of empty steps in response to the on-site problem of 6,500 total empty steps per month in the heating furnace and 1,600 average empty steps per month caused by steel grade switching. Establish a collaborative control scheme for heating furnace air steps from the dimensions of re-optimizing heating processes and unifying the control cooling system for steel grades with similar properties. On site application data shows that the production line can steadily reduce the number of empty steps in the heating furnace by 320 steps per month, continuously reduce the ineffective waiting time of the production line, and effectively convert the saved production time into rolling output. Calculated based on an increase of 500 Yuan per ton of steel, the project will directly generate an economic benefit of 960,000 Yuan per quarter. This optimization plan does not require the purchase of new equipment, and can only release production capacity through process improvement and adjustment of production arrangements for reference.

Keywords: steel rolling heating furnace; empty step control; process optimization; wire rolling; optimization of production scheduling; capacity increase

引言

特殊钢线材是生产汽车轮胎帘线、高端紧固件等产品的关键基础原料。对比普通线材, 特殊钢线材品类繁杂、单批次生产规模不大, 产品性能指标要求十分严格, 不同钢种对应的钢坯加热、轧制、轧后控冷工艺差别很大^[1]。采用多品种柔性轧制组织生产时, 频繁更换生产钢种容易让加热炉产生大量空步, 不仅降低设备有效运转时间、制

约整条产线产能, 还会消耗燃气, 同时加重钢坯表面氧化、脱碳问题, 进一步抬高生产总成本^[2]。在目前行业竞争环境下, 整治加热炉空步问题, 已经成为特钢企业实现降成本、提产量的重要突破口。现有的相关研究大多只单独讨论某一项节能技术, 很少围绕多品种、小批量生产模式下, 工艺切换带来的加热炉空步开展整套系统性优化研究。现阶段不少企业安排生产计划基本依靠工作人员经验, 并未

形成标准化的管控策略。由此可见,围绕生产工艺开展加热炉空步管控、产线产能提升相关研究,具有较强的工程实用价值。

1 产线概况与加热炉空步现状分析

1.1 生产线基本情况

该试验生产线隶属于特钢线材分厂,为全连续高速线材轧制产线,整体配置完善、自动化程度高。产线核心设备包含推钢式蓄热连续加热炉、粗中轧机组、预精轧机组、精轧机组,以及轧后在线风冷控冷、吐丝集卷等全套配套装置,可稳定生产直径 5.0~16.0mm 的各类线材产品。产线主要生产高碳帘线钢、中碳冷镦紧固件钢、优质碳素结构钢等特种钢材,其中 5.5mm 规格帘线钢、28B2KX 系列紧固件钢为核心产品,两类品种月产量合计占比可达 70%以上。

产线配套的蓄热式推钢加热炉性能优势突出,升温速度快、温度控制精度高、热负荷运行稳定,能够满足各类特钢的高温奥氏体化热处理工艺要求,为后续轧制加工奠定良好的坯料基础^[3]。同时,轧后分段风冷冷却系统可灵活调节风机运行频率、输送辊道运行速度,还可按需调整投入使用的冷却区段数量,能够精准控制钢材轧后的冷却速度,合理调控成品内部珠光体、铁素体组织的占比,有效保障每批次成品的力学性能稳定一致。

受特种钢材订单多样化需求影响,该产线需要频繁切换不同规格、不同钢种的轧制生产任务,工艺参数、生产模式调整频次高,生产过程中轧制空步、待机空档的情况较为明显,是产线当前生产运行的主要特点。

1.2 加热炉空步统计及成因识别

通过对 2025 年 10 至 11 月产线连续运行数据的统计梳理,加热炉每月总空步数量基本稳定在 6500 步左右。整体来看,加热炉空步主要分为设备故障、原料待料、工艺切换三大类。其中,因设备故障、原料短缺导致的空步占比不足 20%,这类问题属于偶然发生、无法提前预判的非可控空步。而工艺切换产生的空步,每月平均达到 1600 步,在全部可控空步中占比超 80%,是目前制约产线产能提升的核心因素。

结合现场跟踪情况及生产台账记录综合分析,工艺切换空步的产生原因主要分为两点,持续造成产线产能损耗。第一,高温钢种生产工艺窗口不同,需要预留温度过渡空步^[4]。帘线钢的加热工艺温度高于紧固件钢,当两种钢种穿插、交替生产时,需要大幅调整炉膛温度,这个调温过渡过程会产生空步,每月累计空步量约 286 步。第二,同类钢种控冷工艺过于零散,导致频繁参数调整产生空步。

28B2KX 系列的各类细分牌号,长期沿用各自独立的控冷工艺标准,在交替生产不同细分牌号时,需要反复调试设备参数,每月因此产生 34 步空步,长期造成持续性的产能浪费。

1.3 加热炉空步带来的生产负面影响

大量工艺空步会从多个维度降低整条产线的综合效益。空步占用设备有效运行时段,直接压低加热炉作业效率,在订单充足时,产线很难充分释放设计产能。处于空步状态下加热炉仍持续保温,持续消耗煤气,造成能源浪费;钢坯长时间在炉内高温等待,氧化烧损持续加重、脱碳层增厚,最终降低成材水平。同时频繁调整炉温、切换工艺会打乱稳定的轧制节拍,更容易引发堆钢、尺寸偏差、产品性能不达标等各类生产异常,不仅增加故障处置工作量,加大操作人员工作压力,也不利于产线维持标准化、平稳连续生产^[5]。

2 加热炉空步管控总体技术思路

从空步产生根源开展溯源分析,确立源头优化生产工艺,中间精简工序切换流程,后端规范排产计划的管理思路,打通全流程管控,压缩等待损耗,提升生产运行效率与交付稳定性。围绕收窄工艺温度区间、统一作业标准、降低工序切换次数、缩短物料待料时间等核心目标,在稳定产品质量、无需新增设备投资的前提下,清除各类无效空步,推动产能水平、产品质量与能源消耗同步优化提升。

3 工艺调整关键方案研究

3.1 5.5 mm 帘线钢加热工艺优化

3.1.1 原工艺存在的核心问题

5.5mm 帘线钢属于高碳高端特种钢材,材料组织与力学性能对生产条件十分敏感。传统生产工艺依靠高温加热完成奥氏体化,以此减轻成分偏析、细化晶粒,所需加热温度明显高于中碳紧固件用钢,两类钢材的工艺加热温差可达 80~120℃。在穿插轧制模式下,炉膛温度大范围调整存在明显滞后现象,会产生大量无效待料空步。与此同时,长期高温环境容易造成钢材晶粒粗大,氧化烧损问题加剧,既容易引发产品质量缺陷,也会带来额外的能源消耗^[6]。

3.1.2 工艺优化理论依据

高碳帘线钢拥有较宽的奥氏体化温度区间。在保障钢材完全奥氏体化、碳化物充分溶入基体,同时能够避免奥氏体晶粒异常长大的工艺窗口内,可以适当下调加热温度。结合长期生产数据与金相检测结果证实,在此区间采用低温加热,不会破坏奥氏体组织均匀性,还能起到细化晶粒、减轻钢坯氧化与脱碳的效果。适当降低加热温度,能够缩

小高碳帘线钢与中碳紧固件钢之间的工艺温度差。钢种切换轧制时,炉膛需要调整的温度幅度随之减小,等待炉温稳定的过渡时间得以压缩,从源头减少换钢过程产生的轧制空步。

3.1.3 具体工艺调整方案

在具体实施过程中,针对 5.5mm 帘线钢的加热工艺进行了系统性调整。首先,通过对现有加热曲线的分析,确定了加热温度的核心调整范围。研究表明,将加热温度由原工艺 1150℃ 下调至 1100℃,在保障产品力学性能达标前提下,能够减少炉温高低来回切换的频次,降低工况波动。其次,为稳固温度调节精度,对加热炉温控系统实施升级改造,依托在线监测装置实时采集炉内温度数据,动态调控工况,保证各项工艺参数落到实处。此外,对排产方式进行优化,在生产计划里集中批量安排帘线钢轧制,尽量减少来回切换工艺造成生产线空等浪费。整套调整方案落地实施阶段,充分兼顾设备承载上限与现场生产节奏稳步推进改造工作,严控施工时序,最大限度规避主线生产受干扰,防范非正常停机造成产能损失。加热工艺优化后,数据显示,通过下调 5.5mm 帘线钢的加热温度,高低温转换次数较优化前减少了约 30%,加热炉空步总数由原来的 6500 步/月下降至 5200 步/月,其中改工艺空步数从 1600 步/月减少至 1000 步/月,空步占比下降。在产量方面,由于空步时间的缩短,分厂月产量提升了约 8%。

3.2 紧固件系列钢种控冷工艺整合优化

3.2.1 原控冷工艺碎片化问题分析

分厂 28B2KX 系列紧固件冷锻钢为中碳低合金钢,受现有生产方式约束,长期以来不同牌号分开设置轧后控冷工艺参数,风机运转速度、冷却段开启数量、辊道运行速度均不统一。开展多牌号连续轧制生产时,更换牌号需要人工成套调整控冷参数,工艺调试、系统稳定需要耗费较长时间,轧线只能暂停等待,加热炉随之出现大量无效空步。根据生产数据统计,这种零散化的工艺管控模式每月会新增 34 步无效空步,直接带来产能损耗。同时频繁调整工艺参数容易造成冷却制度起伏波动,进而导致线材成品性能出现不稳定问题。

3.2.2 工艺整合可行性分析

紧固件用钢 28B2KX 等钢种对力学性能指标要求相近,各类钢种的控冷工艺具备很高的重合度。相关研究证实,这类钢材冷却时内部组织发生转变的温度区间、适宜的冷却速度范围差别不大,这也是能够合并控冷工艺的理论基础。对比多种紧固件钢种性能检测数据能够看出,只要抗拉强度、屈服强度、断后伸长率等指标波动处在合理

区间,产品就能达标使用,不用每类钢种单独设置一套冷却参数。从现场生产角度来说,工艺合并后不用频繁改动设备参数,省去反复调试设备的时间,还能减少换钢种带来的停机等待,有效提升产线运转效率。综合钢材本身特性与实际生产需求分析,28B2KX 这类紧固件钢种实现控冷工艺合并具备较高可行性。

3.2.3 优化方案设计

项目落地阶段,通过集中排产、优化生产组织两类举措推进控冷工艺合并实施。结合紧固件各类钢种特性与市场订单需求,统筹制定统一排产方案,把采用相同控冷制度的钢种归集至同一生产批次组织生产。例如将 28B2KX 与力学性能指标相近的其他钢种划为同一生产单元,以此压缩频繁切换工艺带来的设备等待空耗时间。优化产线主线生产节奏,理顺各工序衔接关系,保障生产流转更加顺畅。同时强化生产调度与设备维保协同联动,尽可能规避设备故障、操作失误引发的产线停机。除此之外,持续开展操作人员技能培训,提升一线人员对新工艺的实操适应水平,保障控冷工艺合并方案稳定落地。

4 工业实施效果与效益分析

4.1 空步管控实施效果

整套工艺优化及生产组织调整方案已正式分阶段落地推行。通过为期 6 个月的工业试生产和常态化批量生产验证,产线空步管控整体状态平稳、效果稳定,完全满足现场生产管控要求。本次优化彻底解决了 5.5mm 帘线钢高低温工况切换、紧固件钢品种工艺切换过程中产生的加热炉空步问题。目前各类工艺切换引发的无效空步已全部整改到位,每月可累计减少加热炉无效空步 320 步,大幅减少了设备空转、无效加热的浪费情况,加热炉有效作业效率得到明显提升。经过长期持续的产品质量跟踪校验,采用优化后工艺生产的各类线材产品,各项性能指标稳定达标,产品质量合格率 100%,全程未发生客户质量异议及工艺安全事故,顺利实现了削减无效空步、稳定产品质量的双重目标。

结合现场实际生产参数测算,单次空步可对应轧制钢坯 2t,本次优化后每月可新增有效轧制产能 640t。在不新增生产设备、不开展产线扩容改造的前提下,有效盘活了现有产线的闲置产能,成功完成存量产线的产能挖潜,进一步提升了生产线整体生产效率与资源利用率。

4.2 经济效益测算

按照企业内部成本核算标准,轧钢工序每吨钢材可实现增效 500 元。实施本项目优化调整后,每月能够新增有效产能 640t,一个季度累计新增有效产能 1920t。据此测

算项目季度直接经济效益：1920 吨 $\times$ 500 元/吨=960000 元，也就是每季度可创造直接经济效益 96 万元。除此之外，工序中空步等待时间得到大幅压缩，加热炉无用的燃烧时长减少，不仅煤气消耗随之降低，钢坯高温氧化损耗有所下降，成材率也得到小幅提高，由此带来可观的节能、降损等间接收益。本次整套优化方案不需要投入资金改造设备，也不会产生额外的生产运行开支，前期投入很少，收益稳定，能够长期持续产生经济效益。

5 结论

多品种特钢线材生产线的加热炉空步，主要由生产工艺切换导致。生产过程中，高温、低温不同类型钢材交替轧制时，需要预留温度过渡时间，同时同类型钢材的控冷工艺零散、不统一，是造成加热炉频繁空步的主要原因，从工艺调整和生产排产两方面开展优化工作。一方面优化 5.5mm 帘线钢的加热工艺参数，缩小不同钢种之间的加热温度差异；另一方面对 28B2KX 系列紧固件钢的控冷工艺进行梳理整合，统一标准化工艺标准，从源头减少频繁切换工艺带来的加热炉空步问题，提升产线有效作业时长，降本增效效果显著，具备极高的行业推广应用价值。后续将依托工业大数据、智能排产系统，搭建适配订单需求的

自适应轧制排序模型，实现加热炉空步的精细化、智能化管理，进一步挖掘产线生产潜力，持续提升产线生产效率与经济效益。

[参考文献]

- [1]卢庆庆,吴雪玉,徐永杰,等.轧钢加热炉新型板式预热器的应用与节能分析[J].工业炉,2026,48(3):29-32.
- [2]董冠求,刘叶.绿色冶金背景下轧钢加热炉技术发展展望[J].山西冶金,2026,49(1):90-93.
- [3]孙军.不同钢材在轧钢加热炉中的加热特性分析[J].冶金与材料,2024,44(12):154-156.
- [4]覃永国.轧钢加热炉技术现状及发展[J].工业炉,2024,46(5):27-30.
- [5]张波,温红.轧钢加热炉中燃烧工艺参数对温度均匀性的影响及优化[J].冶金与材料,2024,44(5):148-150.
- [6]魏泽华.轧钢加热炉节能理论及提效方案的规划与评价[J].山西冶金,2022,45(4):139-140.

作者简介：陈佳喜（1994—），男，汉族，江苏省+无锡市/江阴市人，工程师，本科，东北大学冶金工程专业毕业，研究方向：特殊钢线材生产轧制/现从事特殊钢线材轧制生产。