

高强钢剪切不再“堵丝崩刃”—— 连退机组碎断剪的优化改造之路

No More Jamming or Blade Breakage: Optimizing the Scrap Chopper in Continuous Annealing Lines for High-strength Steel

供稿|葛祥 / Ge Xiang

内
容
导
读

针对连退机组碎断剪在高强钢剪切过程中存在的碎断不完全、堵丝、崩剪刀以及通讯网络干扰等问题，分析了原设计的不足，提出了一套系统的性能优化与改造方案。通过对碎断剪主传动电机扩容、刀盘剪刀结构改进、增设废料运输与自动布料装置，并重构基于工业以太网（Profinet）的通讯网络与可编程逻辑控制器（PLC）控制程序，有效解决了堵丝与网络故障难题。现场应用结果表明，改造后网络故障次数由年均 49 次降至 0 次，崩刃次数由 281 次降至 16 次，因堵丝导致的废品量减少 94% 以上，显著提升了机组作业率与产品质量。该改造方案解决了高强钢生产下碎断剪的运行瓶颈，为冶金行业同类设备的升级改造提供了切实可行的技术参考。

碎断剪是冷轧连续退火机组出口段的关键设备之一，其功能是将圆盘剪剪切下来的两侧废边（带钢）裁剪成规定长度的小段，以便于后续输送与回收，其运行稳定性直接影响整线生产效率、产品质量及生产连续性^[1-2]。随着汽车工业向轻量化、高安全性方向快速发展，高强钢因兼具高强度、高屈服比与良好冷成形性，成为汽车板核心用材，国内钢铁企业高强钢（DP590、DP780 等双相钢）产能占比逐年提升，对连退机组各工序设备的适配性与可靠性提出了更高要求^[3]。近年来，冶金行业针对碎断剪的研究与改造持续推进，首钢京唐通过新增“单塔圆盘剪+碎边剪”集成化设备，攻克了高强钢碎边易卡

滞的行业难题^[4]；也有研究通过设计双副螺旋剪刀滚筒飞剪、优化剪盒装配结构，分别实现了高强钢冷态稳定剪切、解决碎边剪卡钢等故障，但现有研究多聚焦于设备局部结构改进或单一故障解决，针对高强钢剪切特性的碎断剪全系统优化改造研究仍相对不足，且缺乏机械结构与电气控制系统的协同设计方案，难以适配高强钢规模化生产的全工况需求^[5]。

马钢（合肥）钢铁有限责任公司连退机组原碎断剪为适配普通低碳钢设计，在高强钢规模化生产后，设备固有缺陷逐渐凸显，核心表现为碎断不完全、废边堵丝、剪刀频繁崩裂及通讯网络干扰严重等问题，尤其在 DP780 等高强钢生产时，堵丝现象

作者单位：马钢（合肥）钢铁有限责任公司，安徽 合肥 230011

频发,严重时引发带钢撕裂,如图1所示,造成产量与质量的双重损失。同时,网络故障与剪刀崩裂大幅降低了机组作业率,制约了高强钢产能释放。据统计,仅2024年度因堵丝造成的废品量达6725.4 t,网络故障停机49次,严重制约了产线的稳定运行。本文结合马钢(合肥)公司连退机组的改造实践,系统阐述了碎断剪机械结构、传动系统、废料输送及网络通讯的优化方案,通过机械与电气的协同改造破解高强钢剪切运行瓶颈,为冶金行业同类设备的升级改造提供了切实可行的工程实践参考,也为高强钢生产背景下冶金设备的全系统优化提供了新的技术路径。

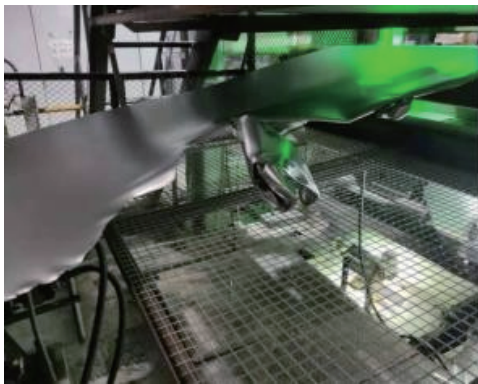


图1 碎断剪堵丝导致带钢撕裂

问题分析与总体改造思路

原碎断剪存在问题

原碎断剪为悬臂式刀盘结构,主要由主传动系统、刀盘剪刀单元、宽度调整机构及基础框架组成,配套分布式外围设备现场总线(Profibus-DP)通讯网络与可编程逻辑控制器(PLC)控制系统,设计剪切速度0~600 m/min,适配带钢厚度0.3~2.0 mm、宽度700~1430 mm^[3]。经现场故障统计、设备运行参数监测及剪切力学分析,原设备在高强钢生产中暴露的核心问题可归纳为4个方面:

(1) 主传动系统能力不足,速度匹配性差。原主传动电机为37 kW交流变频电机,额定转矩236 N·m,过载能力1.5倍。高强钢剪切强度约为普通低碳钢的2.5倍,导致剪切DP780时电机转矩持续维持在70%以上,电机输出能力达到极限。同

时,原宽度调整机构由1台变频电机同步控制两侧刀箱,传动链长、间隙大,两侧刀轴位置偏差达 ± 0.35 mm,废边剪切面不平整,进一步增加剪切阻力;且碎断剪转速信号经三级PLC转发,通讯延迟大,转速滞后于主线带钢速度,废边堆积引发堵丝。

(2) 刀盘剪刀结构不合理,剪切冲击大。原刀盘直径250 mm,布置3片直刃剪刀,剪切能力与抗冲击性不足。较小的刀盘直径导致剪刀线速度偏低,与主线速度匹配时需提高电机转速,加剧电机负载;3片剪刀使单刀剪切频率过高,疲劳损伤加快。直刃剪刀的剪切过程为瞬时全断面剪切,剪切力瞬间达到峰值,对刀盘、剪刀及传动系统产生强烈冲击载荷,不仅导致剪刀频繁崩裂,还引发刀盘轴系振动,降低设备结构刚度。

(3) 废料输送系统缺失,人工清理存在安全与效率隐患。碎断后的废料直接落入地坑,需人工清理,劳动强度大且易造成二次堵塞。地坑空间狭小,清理作业存在安全隐患。此外,地坑内废边杂乱堆积,清理过程易发生人员划伤、挤压等安全事故。

(4) 通讯网络架构缺陷,抗干扰能力差且单点故障风险高。原编码器采用Profibus-DP串联总线型网络架构,该总线抗电磁干扰能力弱,而碎断剪周边布置大量变频器、电机等强电设备,电机励磁产生的电磁辐射易导致编码器数据波动,刀盘位置、转速信号失真,控制精度下降。同时,串联架构存在单点故障风险,单个编码器故障会导致整个网络瘫痪。

总体改造思路

针对原碎断剪的核心问题,结合高强钢剪切特性与连退机组连续化、自动化生产要求,实现机械系统与电气控制系统的协同优化,具体改造方向为:

(1) 对主传动系统进行扩容升级,提升电机输出转矩与过载能力,优化宽度调整机构,提高位置控制精度,解决剪切能力不足与速度匹配性差问题;

(2) 创新刀盘剪刀结构,增大刀盘直径、增加剪刀数量,优化剪刀几何参数与材质,降低剪切冲击载荷,延长剪刀使用寿命;

(3) 增设废料自动输送与布料装置,实现废料连续化输送、均匀布料与自动化回收,消除人工清

理环节,解决废料堆积与二次堵塞问题;

(4) 重构电气控制系统,替换为高抗干扰性的工业以太网(Profinet)总线,采用星型拓扑结构,消除单点故障风险,提升数据传输稳定性与实时性,优化传动控制算法,简化通讯链路,实现碎断剪与主线速度的实时跟随,提高响应速度与可靠性。

机械系统优化设计

主传动系统扩容

为满足高强钢剪切的瞬时转矩需求,将原 37 kW 交流变频电机更换为 75 kW 高效交流变频电机,电机额定转矩由 236 N·m 提升至 477 N·m,过载能力由 1.5 倍提高至 2.0 倍,瞬时过载转矩可达 954 N·m,可有效应对 DP780 等高强钢剪切过程中的转矩峰值,确保剪切过程稳定。针对原宽度调整机构控制精度低的问题,摒弃“一台变频电机控制两侧刀箱”的传统结构,改为两侧刀箱各由一台独立伺服变频电机驱动,取消原有长传动链,采用直连式传动结构,大幅减少传动间隙。

刀盘与剪刀改进

基于剪切力学与结构力学分析,对刀盘剪刀结构进行全方位改进,具体为增大刀盘直径、增加剪刀数量及优化剪刀几何参数。将刀盘直径由 250 增至 300 mm,剪刀数量由 3 片增至 4 片,刀盘结构刚

度提升约 40%,单刀剪切频率降低 25%。增大的刀盘直径使剪刀线速度提升,与主线速度匹配性更好,无需提高电机转速即可满足剪切速度要求,进一步降低电机负载。将原直刀剪刀改为 15°螺旋剪刀,均匀螺旋状布置于刀头体圆周,相邻剪刀螺旋相位差 90°,螺旋剪刀使剪切过程由瞬时全断面剪切变为渐进式剪切,剪切力逐步施加于废边,峰值剪切力比直刀剪刀降低 30%,大幅降低剪切冲击载荷对刀盘、剪刀及传动系统的影响。刀盘与刀轴采用过盈配合+平键连接的方式,提升连接刚度,减少轴系振动,确保剪切过程的连续性与稳定性。

新增废料输送与自动布料装置

新增废料输送系统由 2 条皮带运输机和 1 套自动布料装置组成,如图 2 所示。1#皮带将碎断后的废料转运至 2#皮带,2#皮带末端设有布料小车,通过气缸驱动下料板绕转轴上下摆动,PLC 控制器依据位移传感器信号精准调节摆动速度,确保废料初步均匀掉落,同时下料板摆动时带动偏心块同步转动,当下料板摆动至最低角度时,对应出料流量最大的工况,通过连杆拉动节流板翻转抵挡废料,控制下料流量,避免重力导致的局部堆积,从而将废料均匀分布在接料斗各个区域,保证废料收集的稳定性和均匀性,有效解决了传统布料器废料集中堆积于废料斗中间、两侧空置的问题^[1]。

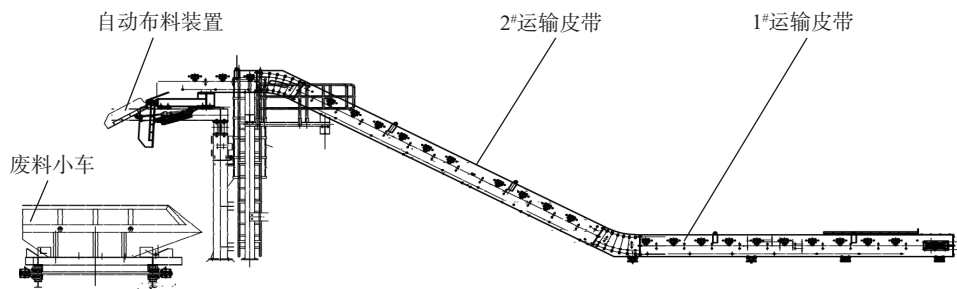


图2 废料运输装置

电气控制系统优化

编码器选型与网络架构重构

针对原 Profibus-DP 网络抗干扰能力差、单点故障风险高的问题,对通讯网络进行全维度重构^[4],将原普通增量式编码器更换为带 Profinet 接口的高精度

绝对值编码器,通讯延迟大幅降低,同时采用全双工通信方式,抗电磁干扰能力强,适应强电磁干扰的复杂生产环境,有效解决编码器数据波动问题。网络架构由原串联总线型改为星型拓扑结构,每个编码器独立接入工业交换机,再统一与 PLC 的 Profinet 通讯模块连接。新架构消除了单点故障风

险，数据传输稳定性显著提升^[6]。改造前后切边剪宽度位置反馈波形对比如图3、图4所示，可见波动幅度由 $\pm 5\text{ mm}$ 减小至 $\pm 1\text{ mm}$ 以内。

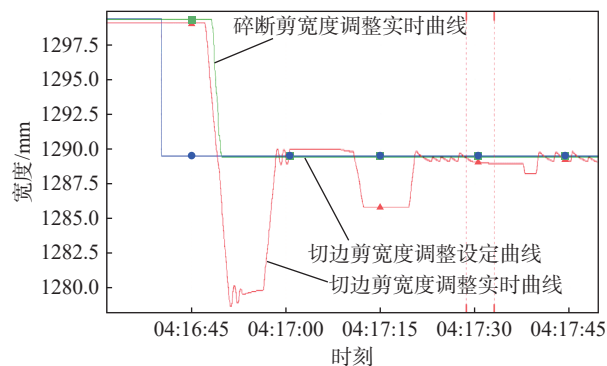


图3 改造前切边剪宽度位置反馈

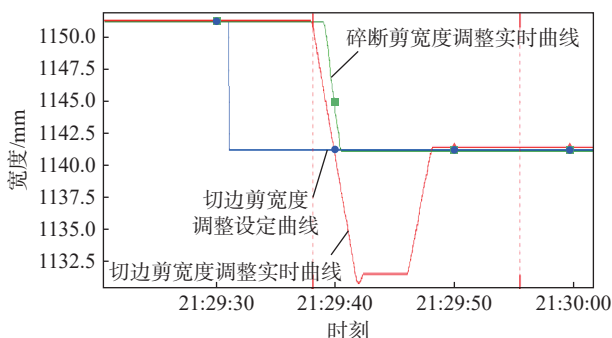


图4 改造后切边剪宽度位置反馈

传动控制优化

原速度给定信号需经主令可编程逻辑控制器 (MRG PLC) → 主控可编程逻辑控制器 (LCO PLC) → 切边剪 PLC 三级转发，通讯周期长达 20 个扫描周期，导致速度响应滞后^[7]。改造后，将碎断剪传动装置直接接入 MRG PLC 的 Profinet 网络，通讯周期缩短至 5 个扫描周期以内，系统响应时间大幅缩短，速度信号传输延迟可忽略不计。同时，优化了速度前馈控制算法，并引入转矩补偿控制，在机组升降速阶段，根据主线速度变化率对碎断剪电机进行转矩补偿，确保电机在速度变化过程中始终保持足够输出转矩，避免转速滞后。经优化，碎断剪在机组升降速阶段的电机转矩由原 70% 降至 30% 左右，速度匹配曲线见图 5、图 6，彻底消除了因速度滞后导致的废边堆积与堵丝问题。

PLC 控制程序开发

基于西门子 TIA Portal V16 平台，开发了碎断剪

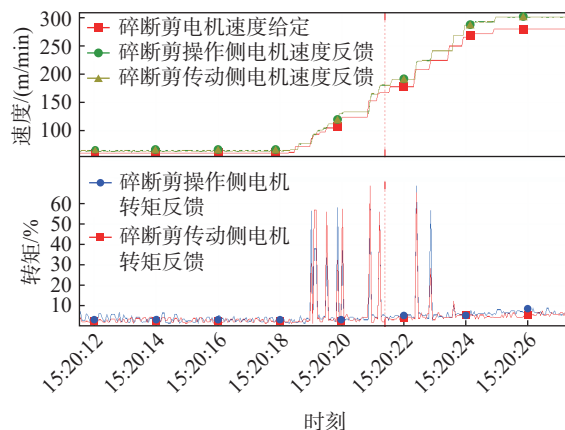


图5 传动优化前碎断剪与主线速度匹配图

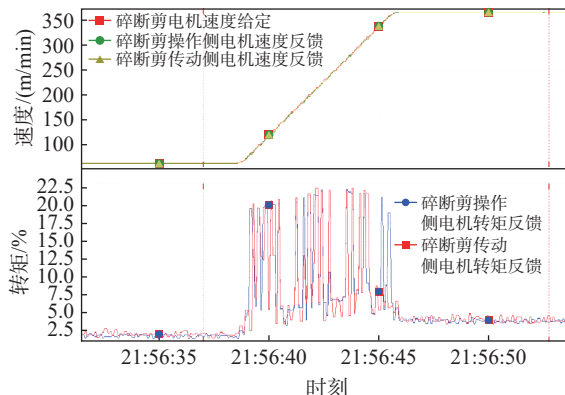


图6 传动优化后碎断剪与主线速度匹配

专用控制功能块，确保设备稳定高效运行，核心功能模块包括：

(1) 自动宽度与间隙调整：程序实时读取钢卷数据（带钢宽度、厚度、钢种等），根据预设剪切工艺参数，自动计算刀盘宽度与剪刀间隙，向宽度调整电机发出控制指令，实现刀盘宽度与剪刀间隙的自动调整；针对不同钢种预设差异化剪切间隙，确保剪切质量。

(2) 溜槽自动切换：碎断剪使用时，溜槽导向废料输送皮带；下直丝时自动切换至压块机溜槽，切换由气缸驱动，电磁阀控制，位置检测采用磁性开关。

(3) 布料小车自动控制：PLC 控制器依据位移传感器信号精准调节摆动速度，确保废料初步均匀掉落，避免重力导致的局部堆积，有效解决了传统布料器废料集中堆积于废料斗中间、两侧空置的问题。

(4) 人机交互 (HMI) 界面：基于 WinCC 开

发，HMI 监控界面采用分层设计，分为主监控界面、参数设置界面、故障报警界面、历史数据界面 4 大模块，各界面通过快捷键快速切换，操作便捷、直观，实现设备运行状态的实时监控、关键参数的可视化展示、故障信息的及时预警与历史数据的查询追溯。

改造效果分析

碎断剪优化改造工程于 2025 年初完成，经半年现场调试与稳定运行，设备各项性能指标均达到设计要求，完全适配高强钢规模化生产需求。对 2025 年运行数据的统计，并与改造前 2024 年度数据对比如表 1 所示。

表 1 碎断剪优化改造前后效果对比

项目	网络故障 次数/次	崩剪刀 次数/次	堵丝降 废量/t	年维修 成本/万元
改造前	49	281	6725.4	278.3
改造后	0	16	381.6	15.8

改造后未发生网络故障，崩刀和堵丝现象得到有效遏制，年降废量减少 6343.8 t，维修成本降低 94.3%。同时，机组作业率提升约 2.5%（由 92% 提升至 94.5%），高强钢（DP590/DP780）生产能力由每月 1.2 万 t 提升至 1.8 万 t。

经济效益分析：按吨钢利润 500 元计算，年减少废品损失约 317 万元；维修成本节约 262.5 万元；合计年效益约 580 万元，改造总投资约 150 万元，投资回收期约 3 个月。

结束语

针对马钢（合肥）连退机组碎断剪在高强钢剪切过程中出现的碎断不完全、堵丝、崩刀及通讯网络干扰等核心问题，通过全维度问题分析与一体化

改造设计，提出的“主传动电机扩容、刀盘剪刀结构创新、废料自动输送布料装置增设、Profinet 星型网络重构+控制算法优化”的一体化改造方案，精准解决了原设备的固有缺陷，实现了碎断剪对高强钢剪切特性的全面适配，显著提升了产线运行效率与产品质量，为冶金行业同类设备的升级改造提供了切实可行的技术路径与工程实践参考。

随着钢铁行业高端化、智能化发展，高强钢、超高强钢产能占比将进一步提升，后续可结合工业互联网、大数据分析技术，在碎断剪关键部位增设振动、磨损传感器，实现设备运行状态的智能监测与预测性维护；同时开发剪刀磨损自适应补偿系统，进一步延长剪刀使用寿命，推动碎断剪向智能化、高效化、绿色化方向发展。

参考文献

- [1] 葛祥，王浩晴，吴昊，等. 一种新型自动布料装置及其方法：中国专利，121493638. 2026-02-10
- [2] 曹新星，贾冬梅. 告别毛刺与崩刀：高强钢圆盘剪切边工艺研究. 金属世界，2025(5)：58
- [3] 闫丹. 精整线圆盘剪和碎断剪组合机构设计. 冶金设备，2020(2)：19
- [4] 孟凡通，孙志鹏，吴冬冬，等. 某产线圆盘剪剪切质量及稳定性分析. 冶金管理，2023(5)：49
- [5] 翟家森. 探索降低 DP 网络通讯干扰的方法. 机械工程与自动化，2016(4)：198
- [6] 李晋玲. PROFINET IO 分布式设备在输送机控制系统中的应用. 自动化技术与应用，2015，34(1)：105
- [7] 贾建，余琼，吴昊，等. 连退机组圆盘剪控制系统改造. 金属世界，2021(2)：81

作者简介：葛祥（1987—），男，安徽省合肥人，自动化工程师，2014 年毕业于安徽工业大学自动化专业，主要从事冶金自动化系统的集成、维护和优化工作。通信地址：安徽省合肥市肥东循环经济园天工大道与宏图大道交口；E-mail：361756693@qq.com。