

780 MPa 级汽车用双相钢冷轧 轧制稳定性攻关

Research on the Stability of Cold Rolling Process of 780 MPa Grade Dual Phase Steel for Automobiles

供稿|屈镭¹, 李春诚^{2,3}, 顾忠帅¹, 刘展岳¹, 张永¹, 安俊麟¹, 甘茂林¹, 王怡新¹, 刘立刚¹, 谭湔元¹,
徐宏良¹ / QU Lei¹, LI Chun Cheng^{2,3}, GU Zhongshuai¹, LIU Zhanyue¹, ZHANG Yong¹, AN Junlin¹,
GAN Maolin¹, WANG Yixin¹, LIU Ligang¹, TAN Haoyuan¹, XU Hongliang¹

内 容 导 读

针对 780 MPa 级汽车用双相钢冷轧轧制过程中出现的稳定性问题展开深入研究。通过对轧制工艺参数、设备状况以及原料特性等多方面因素的分析,找出影响轧制稳定性的关键因素,并提出相应的改进措施。结果表明,优化轧制力分配、改善轧辊表面质量和调整张力制度等措施,可有效提高轧制稳定性。实验数据显示,改进后轧制断带率降低 60%,产品厚度精度提高 30%,为 780 MPa 级汽车用双相钢的稳定生产提供了可靠保障。经过一系列的攻关试验,成功提高了 780 MPa 级汽车用双相钢冷轧轧制的稳定性,改善了产品质量,降低了生产成本 87 元/t,为汽车厂用户提供了高质量的双相钢产品。

随着汽车工业的快速发展,以及对轻量化和安全性要求的不断提高,用户对汽车用钢的性能要求越来越高。在冷轧非稳态过程中,原料头尾力学性能以及冷轧工艺状态的动态变化容易导致冷轧生产过程的厚度、板形控制不佳;特别是高强度钢高速轧制时引发的轧制力变化,会导致轧机振动,甚至出现断带事故^[1-3]。780 MPa 级汽车用双相钢因其具有高强度、良好的成型性和焊接性等优点,在汽车结构件和安全件中得到广泛应用。然而,由于该钢种的高强度和复杂的相变特性,在冷轧过程中常出

现轧制稳定性问题,如轧制力波动大、带钢跑偏、断带等问题,严重影响生产效率和产品质量。

有学者对高强度冷轧稳定性问题进行了广泛研究。张明等^[4]针对 780 MPa 级双相钢在不同卷取温度下的组织形貌进行了研究,发现贝氏体转变程度存在显著差异,导致热轧板性能波动,最终造成冷轧带钢厚度不均。刘宏旭等^[5]基于冷轧生产过程中低速通过焊缝、高速稳定轧制两个阶段的特点,以及带钢所处物理状态、轧制机理的差异,采用随机森林进行特征选取,并利用遗传算法优化,建立了

作者单位: 1. 本钢板材股份有限公司冷轧总厂, 辽宁 本溪 117000; 2. 本钢集团有限公司技术中心, 辽宁 本溪 117000; 3. 先进汽车用钢开发与应用技术国家地方联合工程实验室, 辽宁 本溪 117000

带钢全长厚度连续预测模型,开展冷轧厚度精度控制研究,保证冷轧轧制生产的稳定性。陈飞等^[6]研究了冷轧双相钢头尾厚度波动的原因,认为热轧带钢在卷取前空冷阶段存在的中浪缺陷和残留冷却水是影响轧制方向性能均匀性的根本原因,而热轧卷的轧制方向性能不均匀是导致冷轧生产过程失稳、冷硬卷厚度波动的重要原因。因此,对于不同类型设计的产品需要进行全流程研究,才能更好地解决后续冷轧轧制过程中的生产难题。本研究旨在通过系统分析影响轧制稳定性的关键因素,对 780 MPa 级汽车用双相钢冷轧轧制不稳定性进行研究,并提出有效的改进措施,为 780 MPa 级双相钢的稳定生产提供技术支持。

冷轧双相钢的产品特性

工业生产采用的 780 MPa 级双相钢的化学成分如表 1 所示。其化学成分中,硅、锰等元素的含量较高,还会加入少量淬透性元素,对钢材的性能有重要影响。然而,这种特殊的组织和化学成分也给

冷轧轧制带来了一定的挑战。因此,设计合理的化学成分是保证双相钢性能的基础。780 MPa 级双相钢的热轧组织为铁素体+珠光体,退火后的成品组织主要为铁素体+马氏体,如图 1 所示。如果热轧生产过程中头尾温度低、冷却速度快,则容易形成部分贝氏体、马氏体等硬相组织。这些硬相组织会显著提高钢的强度,降低其塑性。在后续冷轧过程中会表现出较大的变形抗力和较低的塑性,这不仅容易导致轧制力分布不均匀和整体变形不均匀,还会严重影响轧制稳定性,增加轧制难度。此外,冷轧工艺参数对 780 MPa 级双相钢的轧制稳定性有显著影响。轧制速度、轧制力、张力等参数的匹配对维持稳定轧制至关重要。过高的轧制速度可能导致轧制力波动增大,而过低的张力则容易引起带钢跑偏。因此,优化这些工艺参数是提高轧制稳定性的关键。

表 1 化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cr+Mo
0.10~0.16	0.20~0.80	1.60~2.20	≤0.040	≤0.015	≤0.015

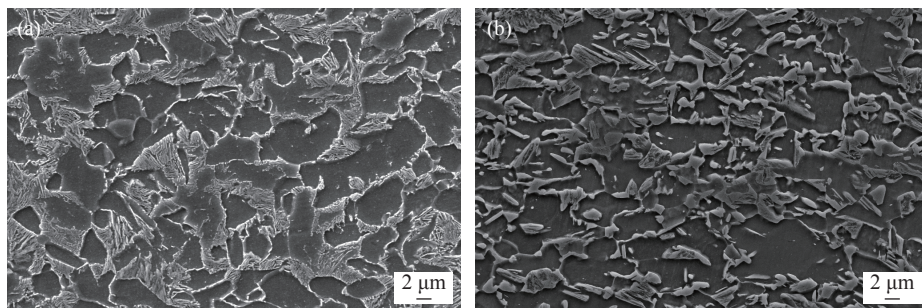


图 1 双相钢微观组织: (a) 热轧组织; (b) 成品组织

冷轧轧制稳定性的影响因素分析

原料特性

> 板坯的控制

板坯厚度不均会导致热轧过程中各部位的变形量不一致,进而影响热轧板不同位置的厚度及板形控制。特别是 780 MPa 级双相钢的强度较高,其强大的变形抗力和热轧板的厚度差异在冷轧过程中会表现得更显著,并从第一机架传递至后续机架,导致冷轧轧制力波动增大,最终可能造成冷硬卷严重的厚度超差。另外,炼钢生产过程中如果控制不

当,产生的夹杂缺陷会遗传到热轧卷中,这些夹杂物会在冷轧时引起应力集中,增加带钢轧漏甚至断带的风险。

> 热轧板的表面质量

780 MPa 级双相钢的硅、锰含量较高,且热轧生产速度较快,易形成致密的表面氧化铁皮,导致其在冷轧拉矫、酸洗后难以被彻底去除。这些残留的热轧板表面氧化铁皮、裂纹等缺陷会在冷轧过程中被放大,影响冷轧板的表面质量。此外,热轧板表面清洁度差会增加冷轧时的摩擦,导致轧辊磨损加剧,也会影响冷轧轧制稳定性。

热轧板的厚度均匀性

热轧板厚度不均会导致冷轧时轧制力波动，而其板形不良则会增加冷轧时的调整难度，二者均会影响冷轧轧制的稳定性。目前，国内热轧采用连续可变凸度（CVC）辊形较多，该辊形及其衍生系列因具备凸度连续可变、调整范围大等优点而得到了广泛应用^[7]。但是，CVC 辊形在生产大批量同规格、同钢种的带钢时，其工作辊轴向横移范围有限，容易产生局部严重磨损，造成带钢边部发生厚度波动的边翘问题^[8]，如图 2 所示。在攻关前，随机选取 200 卷 780 MPa 级双相钢热轧生产数据，对热轧厚度控制情况进行统计，其厚度公差百分比平均值为 93.9%，热轧厚度公差控制情况如图 3 所示。

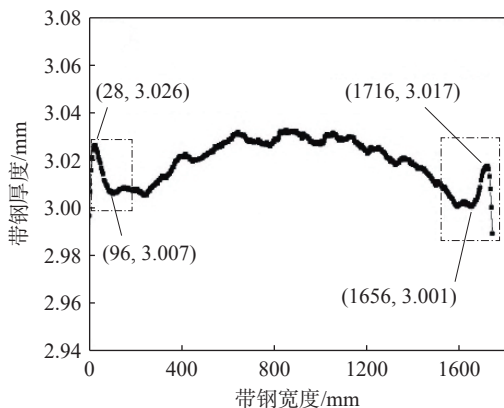


图 2 下游机架采用 CVC 辊形时带钢的板廓情况^[8]

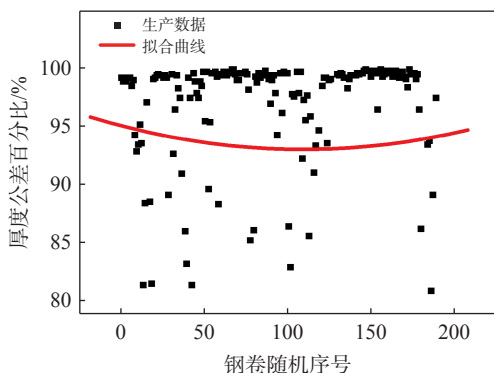


图 3 780 MPa 级双相钢攻关前热轧厚度公差控制情况

热轧板的温度控制

热轧过程中的温度波动大、不同位置温度不均、冷却速率变化大等因素，会导致双相钢晶粒尺寸变化以及组织性能不均匀。对于淬透性较强的 780 MPa 级双相钢，在冷却过程中容易生成部分贝氏体、马

氏体等硬相组织，会影响冷轧时的变形均匀性，造成冷轧时变形抗力不一致，导致轧制力波动增大，从而增加冷轧时的断裂风险。攻关前，随机选取 200 卷 780 MPa 级双相钢热轧生产数据，对热轧终轧温度控制情况进行统计，其终轧温度命中率平均值为 85.3%，终轧温度控制情况如图 4 所示。

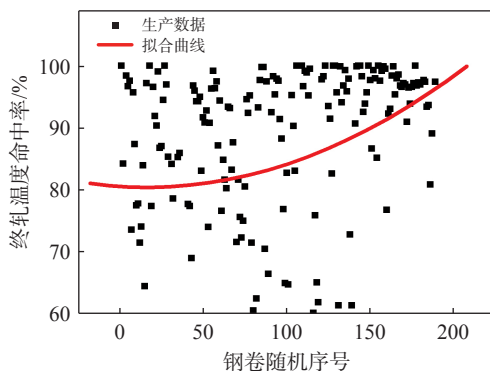


图 4 780 MPa 级双相钢攻关前终轧温度控制情况

热轧板的尺寸精度

对于 780 MPa 级冷轧双相钢，其本身加工硬化倾向大，对轧制力波动更为敏感。热轧原料的尺寸精度是保障其冷轧轧制稳定性的先决条件，热轧板的尺寸精度除了体现在厚度方面外，其宽度精度同样关键。热轧宽度精度不足或存在严重“浪边”，在冷轧连续生产中可能导致带钢在焊缝处跑偏，甚至刮撞设备。更重要的是，宽度波动大意味着在冷轧过程中，带钢两侧边部的金属流动量与中部存在差异，这种不均匀变形会直接诱发严重的边浪或翘曲等板形缺陷，使得高精度的板形控制无法实现，同样威胁冷轧轧制的稳定性。同时，热轧板的宽度和长度偏差还会影响冷轧时的对中和张力控制，从而增加调整难度。另外，热轧板边部质量差会增加冷轧时的边裂风险，影响冷轧轧制稳定性。

设备状况

张力辊辊体弯曲、轴承座松动等结构缺陷会导致生产运行时振动加剧；振动传递到带钢或后续机架，可能引发轧辊共振，影响轧制稳定性，甚至造成设备损伤。冷轧入口机架的侧导板、纠偏辊、光电对中装置等纠偏设备状况，直接影响带钢进入轧机的初始位置精度，对轧制稳定性至关重要。一旦其机械部件（如侧导板、纠偏辊轴承）出现故障，

会导致对带钢的导向或纠正能力下降,使带钢易偏离轧制中心线。跑偏的带钢进入轧辊时,会造成轧制力分布不均,可能引发轧辊单侧过载,甚至导致带钢边缘与轧辊或机架碰撞,引发断带、设备刮伤等事故。此外,纠偏设备传感器故障会导致检测信号失真,致使控制系统无法精准调节,可能产生纠偏动作滞后或误动作,反而加剧带钢跑偏。弯辊缸或窜辊机构的机械卡阻、异响等故障,会导致设备运行振动加剧。这种振动会传递至带钢和轧辊,破坏轧制过程的平稳性,可能引发轧辊共振或带钢弹跳。若液压缸泄漏、伺服阀卡阻等弯辊设备出现故障,会导致弯辊力输出不稳定或调节滞后,无法及时补偿轧辊弯曲变形,使带钢易出现边浪、中浪等板形缺陷,严重时还会因板形不良引发带钢褶皱或跑偏。同样,轴向移动机构磨损、定位精度下降等窜辊设备故障,会导致工作辊窜动量与设定值产生偏差,破坏轧辊原始辊形与带钢接触的匹配性,使板形调节失准,加剧带钢的波浪或瓢曲。对于 780 MPa 级双相钢,轧辊在长期的冷轧过程中会逐渐磨损,表面粗糙度发生变化。磨损不均匀的轧辊会导致带钢在轧制过程中受力不均,从而引起轧制力波动和带钢跑偏。轧机的刚度不足会使轧制过程中轧机的弹性变形过大,导致轧制力不稳定,影响带钢的轧制精度和板形质量。此外,轧制导卫装置的作用是引导带钢正确进入轧辊,保证轧制过程的顺利进行。如果导卫装置安装不当或磨损严重,会使带钢在进入轧辊时出现偏差,引发带钢跑偏和断带等问题。

冷轧工艺参数

首先,冷轧轧制速度过快会使带钢与轧辊之间的摩擦力降低,导致轧制力波动加剧。同时,高速轧制时,带钢的冷却速度不均匀,容易产生内部应力,从而引发带钢跑偏甚至断带。其次,轧制力的大小直接影响带钢的变形程度。如果轧制力过大,超出带钢的承受能力,会导致带钢局部变形过大,产生裂纹甚至断带;而轧制力过小,则无法保证带钢的轧制精度,影响产品质量。最后,张力是保证冷轧轧制过程稳定的又一个重要因素。张力过大,会使带钢在轧制过程中承受过大的拉应力,容易导致带钢拉伸变形甚至断裂;张力过小,则无法有效

控制带钢的板形,容易引起带钢跑偏。

轧制稳定性问题分析

在实际生产过程中,高级别双相钢冷轧常出现跑偏、振动和断带等问题。跑偏与张力分布不均和轧辊磨损有关,振动问题往往源于轧制力分配不当和轧机刚度不足,而断带主要发生在轧制力波动较大的情况下。这些问题不仅影响生产效率,还会导致产品表面质量下降和尺寸精度降低。

通过分析生产数据和现场观察发现,影响 780 MPa 级汽车用双相钢冷轧轧制稳定性的主要因素包括冷轧原料异常、轧机设备故障、冷轧轧制力分配不均、轧辊表面质量下降、张力制度不合理等。其中,轧制力分配不均是最主要的影响因素,它直接导致带钢变形不均匀,进而引发跑偏、振动和断带等问题。

提高冷轧轧制稳定性的措施

严格控制原料质量

➤ 加强板坯的质量控制

加强板坯质量控制是确保 780 MPa 级冷轧双相钢性能稳定的源头,其核心措施在于严格控制板坯的化学成分均匀性与钢质洁净度。首先,必须精确控制炼钢环节,确保 Si、Mn 合金元素的含量精确且分布均匀。同时,最大限度地降低钢中 P、S 等有害元素及夹杂物含量,通过高效的炉外精炼和洁净钢生产技术,提升钢水纯净度,避免其在后续轧制和相变过程中成为裂纹源或应力集中点,从而显著改善钢材的延展性。其次,连铸过程需采用低过热度浇铸与电磁搅拌技术,以细化凝固组织、减轻中心偏析与缩孔,获得成分均匀、致密的高质量板坯。钢质纯净、组织均匀的板坯为后续的热轧、冷轧生产创造稳定条件,最终实现 780 MPa 级冷轧双相钢高强度与高塑性的稳定匹配。

➤ 加强热轧的质量控制

热轧板质量对冷轧轧制稳定性有显著影响,需在热轧阶段严格控制其表面质量、厚度均匀性、机械性能、内部组织、温度控制和尺寸精度,以确保冷轧过程的稳定性和产品质量。针对热轧连续生产

同规格双相钢时产生的边翘缺陷,可在精轧机组使用 CVC 辊形与凹形辊组合的策略,配合初期加大弯辊力的投入来保证凸度,从而保证后续冷轧正常生产。通过加强对终轧温度和热轧厚度精度控制,热轧原料质量得到提高,终轧温度命中率平均值为 92.4%,热轧厚度公差百分比平均值为 97.8%。攻关后的终轧温度和热轧厚度精度控制情况分别如图 5、图 6 所示,可以看出攻关后整体水平明显提高。

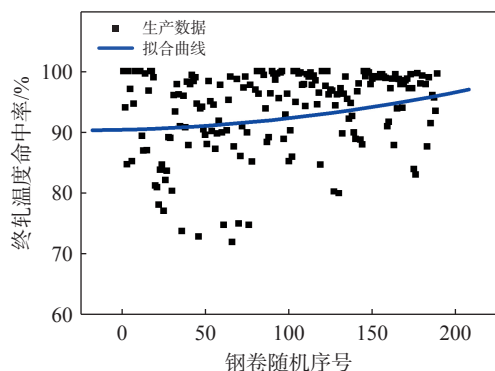


图 5 780 MPa 级双相钢攻关后终轧温度控制情况

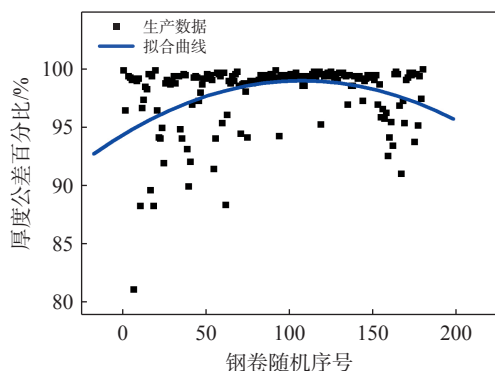


图 6 780 MPa 级双相钢攻关后热轧厚度公差控制情况

改善设备状况

(1) 加强轧辊管理。保持张力辊设备状态良好,需定期检修传动系统、校准传感器、维护辊面精度,以确保其对中精度和响应速度。为确保板形调节的有效性,必须保持弯辊与窜辊设备的机械精度,并维持液压系统、电气系统的稳定性以及传感器的准确性。定期对轧辊进行磨削和检查,保证其表面粗糙度和圆柱度符合要求。采用先进的轧辊材质和涂层技术,以提高轧辊的耐磨性和抗剥落性能。同时,合理安排轧辊的使用周期,避免因轧辊过度磨损而影响轧制稳定性。

(2) 提高轧机刚度。对轧机机架、牌坊等关键部件进行强度和刚度核算,必要时进行加固和改进。采用高精度的轧机轴承和压下装置,提高轧机的装配精度和调整精度,从而减小轧机在轧制过程中的弹性变形,保证轧制力的稳定传递和带钢的轧制精度。

(3) 优化导卫装置。根据带钢的规格和轧制工艺要求,设计和安装相匹配的导卫装置。定期检查导卫装置的磨损情况,并及时更换磨损严重的部件。同时,通过调整导卫装置的位置和角度,确保带钢能够准确、平稳地进入轧辊,有效防止因导卫问题引起的带钢跑偏和断带。

优化冷轧轧制工艺参数

(1) 合理调整轧制速度。通过试验确定不同规格 780 MPa 级汽车用双相钢的最佳轧制速度范围为 350~450 m/min。在保证生产效率的前提下,适当降低轧制速度,以减少带钢与轧辊之间的摩擦力和内部应力,提高轧制稳定性。例如,对于厚度较薄的带钢,将轧制速度控制在较低水平,避免因高速轧制导致的变形不均和应力集中问题。

(2) 精确控制轧制力。采用先进的轧制力控制系统,根据带钢的材质、规格和轧制工艺要求,精确设定轧制力。在轧制过程中,实时监测轧制力的变化,并根据反馈信号及时调整,保证轧制力的稳定。同时,通过优化轧制道次分配,使带钢在各道次的变形量合理分布,减小轧制力的波动。

(3) 优化张力控制。根据带钢的宽度、厚度和轧制速度等参数,合理设定张力值。采用张力自动控制系统,在轧制过程中实时调整张力,确保带钢在整个轧制过程中保持稳定的张力状态。例如,在带钢头部进入轧机和尾部离开轧机时,适当调整张力,避免因张力突变引起的带钢跑偏和断带。

攻关试验及效果验证

为提高 780 MPa 级双相钢的轧制稳定性,结合先前生产情况,针对冷轧双相钢原料提出更高要求,对不符合要求的原料进行严格把控,并在生产周期前进行设备维护和管控,以保证满足批量化生产条件。结合冷轧厂实际,相关技术人员实施开展了一系列改进措施:首先,优化了轧制力分配方

案,通过调整各机架的压下率,使轧制力分布更加均匀;其次,改善了轧辊表面质量,采用新型轧辊材料和表面处理工艺,提高了轧辊的耐磨性和表面光洁度;此外,调整了张力制度,通过优化前后张力比,有效减少了带钢跑偏现象。在某钢铁企业的冷轧生产线进行了 780 MPa 级汽车用双相钢冷轧生产试验,选取不同规格的双相钢卷,分别采用优化前和优化后的轧制工艺参数、设备条件以及原材料质量控制措施进行轧制试验。试验过程中,实时监测轧制力、张力、带钢厚度、板形等参数,并记录轧制过程中出现的问题。攻关前,带钢头尾厚度波动超差和原料板形不良,导致轧后张力偏差大,轧后超调无法调整,最终冷轧后板形不良,如图 7、图 8 所示。

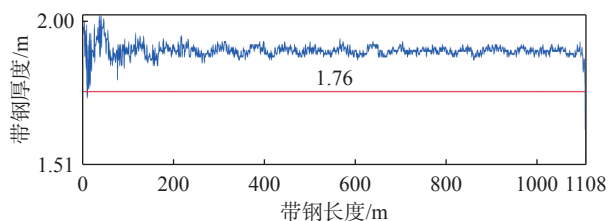


图 7 攻关前 780 MPa 级双相钢的典型厚度曲线

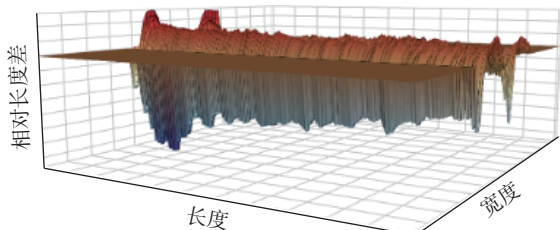


图 8 攻关前 780 MPa 级双相钢的典型板形图

通过多次生产实践,优化了各机架的轧制力分布,采用适当降低第 1、4、5 机架 (S1、S4、S5) 冷轧轧制力,提高第 2、3 机架 (S2、S3) 冷轧轧制力的方法,充分发挥了轧机各机架设备能力,获得明显效果。某规格 780 MPa 级双相钢攻关前后的轧制力参数如表 2 所示,张力参数如表 3 所示。对比优化前后的轧制试验数据发现,采用优化措施后,轧制力波动明显减小,平均轧制力波动幅度从优化前的 ± 300 kN 降低到 ± 100 kN 以内;轧制速度平均值从原来的 339 m/min 提高到 423 m/min;带钢跑偏现象得到有效改善,跑偏量控制在 ± 5 mm 以内,而优

化前跑偏量经常超过 ± 12 mm;断带次数显著减少,轧制断带率降低了 60%;厚度精度由 ± 5.0 μm 提高到 ± 3.5 μm ,提高了 30%;表面质量显著改善。改进前断带率为 1.6 次/kt,改进后降至 0.5 次/kt;表面缺陷率由 2.8% 降低至 0.8%。优化后的双相钢产品厚度精度和板形质量明显提高,如图 9、图 10 所示,满足汽车行业对高精度板材的要求;板形良好,浪形和瓢曲等缺陷得到有效消除,产品的成材率从优化前的 84% 提高到 96% 以上。由于轧制稳定性的提高和产品质量的改善,生产效率大幅提升,废品率降低,生产成本显著下降。经核算,采用优化措施后,每吨双相钢的生产成本降低了约 87 元,为企业带来了显著的经济效益。

表 2 各机架轧制力设定值 kN

项目	S1	S2	S3	S4	S5
攻关前	16960	16572	16707	15889	8567
攻关后	16298	17688	17073	14109	7322

表 3 各机架间张力设定值 kN

项目	S1入口	S1—S2	S2—S3	S3—S4	S4—S5	S5出口
攻关前	301	363	319	295	252	91
攻关后	426	361	300	268	258	91

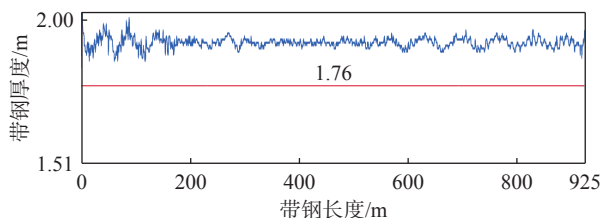


图 9 攻关后 780 MPa 级双相钢的典型厚度曲线

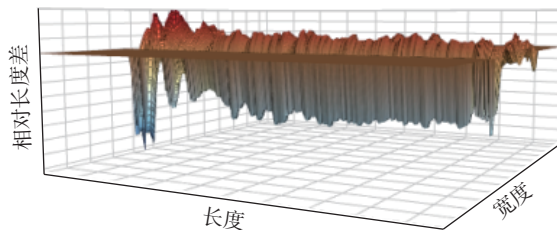


图 10 攻关后 780 MPa 级双相钢的典型板形图

结束语

对 780 MPa 级汽车用双相钢冷轧过程中的稳定

性问题及其影响因素的进行深入分析,通过优化轧制力分配、改善轧辊表面质量和调整张力制度等轧制工艺参数,采取改善设备状况、严格控制原料质量等一系列有效措施,成功解决了其在冷轧轧制过程中的稳定性问题。轧制稳定性的提高,不仅使产品厚度精度提高 30%,而且冷轧生产成本降低 87 元/t,为企业创造了良好的经济效益。这些成果为 780 MPa 级双相钢的稳定生产提供了可靠保障,对推动高强钢在汽车工业中的应用具有重要意义。同时,相关经验对其他汽车用高强钢的冷轧轧制生产也具有一定的参考和借鉴价值。在今后的生产过程中,还应继续关注轧制技术的发展和市场需求的变化,不断优化轧制工艺和设备,进一步提高汽车用钢的质量和性能。

参考文献

- [1] 孙杰,陈树宗,王云龙,等.冷连轧关键质量指标与轧制稳定性智能优化控制技术.钢铁研究学报,2022,34(12):1387
 - [2] 郭立伟,宋浩源,王佃龙,等.提高轧制稳定性的冷连轧动态张应力补偿模型研究.冶金自动化,2022,46(1):75
 - [3] 孙荣生,王植,王静,等.冷轧先进高强钢酸轧机组生产技术研究.鞍钢技术,2020(6):23
 - [4] 张明,陈禄祯,杨庭松,等.基于性能波动的双相钢厚度精准控制策略研究.轧钢,2024,41(6):86
 - [5] 刘宏旭,李旭,丁敬国,等.基于随机森林特征选取和遗传算法优化的带钢厚度预测.轧钢,2024,41(6):76
 - [6] 陈飞,蒋自武,李旭东,等.冷轧高强钢头尾厚度波动原因分析及优化.轧钢,2024,41(3):127
 - [7] 李兴田,李帅,刘鹏宇,等.热轧 CVC 工作辊周期轴向横移技术的开发与应用.轧钢,2023,40(2):129
 - [8] 吴玉霄,霍建生,张欣靓,等.热轧宽带钢生产线精轧工作辊辊形研究.轧钢,2024,41(6):94
- 基金项目:** NSFC-辽宁联合基金资助项目 (U1908224); 辽宁省“百千万人才工程”资助项目 (辽人社函 [2021]79 号 A 类项目 21 号); 辽宁省“兴辽英才计划”资助项目 (XLYC2007066)。
- 作者简介:** 屈镭 (1975—), 男, 辽宁本溪人, 工程师, 1998 年毕业于东北大学金属压力加工专业, 主要研究方向: 冷轧轧制工艺技术。通信地址: 辽宁省本溪市平山区胜利路 36 号; E-mail: 18004042266@163.com。
- 通信作者:** 李春诚 (1987—), 男, 辽宁阜新人, 高级工程师, 本钢集团有限公司技术中心副研究员。主要研究方向: 汽车用先进高强钢的研制开发与工艺技术攻关。E-mail: lichuncheng1987@sina.com。