

钛-钢复合中厚板非对称轧制的翘扣头控制

王 兴, 温 欢, 王春锋, 余 涵, 金培元, 王小东, 黄 鹏

(陕钢集团汉中钢铁有限责任公司, 陕西 汉中 724200)

摘 要: 针对 TA2/Q235B 钛-钢爆炸复合板在 3500 mm 中厚板轧机首次轧制中出现的严重翘扣头及撞护板堆钢事故, 系统分析了异种金属非对称轧制的变形行为。上层 TA2 纯钛与下层 Q235B 钢在变形抗力(90 MPa 对 200 MPa)和摩擦系数(0.14 对 0.4)方面的显著差异是产生翘扣头的根本原因; 加热温度受界面化合物生成限制而无法提高、炉温均匀性差、轧制模型原为对称复合板设计、工作辊接近最小辊径且轧制线偏高等因素叠加加剧了翘扣头缺陷。通过重新设计专用轧制模型、改善炉温均匀性、调整轧制线与护板高度、采用低速小压下规程及辊速差控制等措施, 形成了标准化轧制工艺。

关键词: 钛-钢复合板; 爆炸复合; 非对称轧制; 翘扣头; 工艺优化

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2026)05-024-04

Control of Warping and Head-Down during Asymmetric Rolling of Titanium-Steel Clad Medium-Thick Plate

Wang Xing, Wen Huan, Wang Chunfeng, Yu Han, Jin Peiyuan, Wang Xiaodong, Huang Peng

(Shaanxi Iron and Steel Group Hanzhong Iron and Steel Co., Ltd., Hanzhong 724200, China)

Abstract: The severe warping and head-down and guard plate collision accident during the first rolling of a TA2/Q235B titanium-steel explosive clad medium-thick plate on a 3500 mm plate mill was analyzed, and the deformation behavior during asymmetric rolling of dissimilar metals was systematically investigated. The significant differences in deformation resistance (90 MPa vs. 200 MPa) and friction coefficient (0.14 vs. 0.4) between the upper layer TA2 pure titanium and the lower layer Q235B steel are the fundamental causes of warping and head-down; the heating temperature limited by interfacial compounds, poor furnace temperature uniformity, the rolling model originally designed for symmetric clad plates, work rolls near the minimum roll diameter, and a higher rolling line collectively further aggravated the warping and head-down. By redesigning a dedicated rolling model, optimizing furnace temperature uniformity, adjusting the rolling line and guard plate height, adopting a low-speed and small-reduction schedule, and implementing roll speed difference control, a standardized rolling process was established.

Keywords: titanium-steel clad plate; explosive cladding; asymmetric rolling; warping and head-down; process optimization

钛及钛合金比强度高、耐蚀性优异, 但价格昂贵、焊接性差; 碳钢韧性好、价廉, 但耐蚀性差。钛-钢复合板以钛为覆层(耐蚀层)、钢为基层(结构层), 实现了优势互补, 兼具钛材优异耐蚀性与钢材良好力学性能及焊接性, 在石油化工、海洋工程、电力、核电等领域应用广泛^[1-3]。钛层厚度仅占总厚度的 5%~15%, 与纯钛设备相比可节约 60%以上钛材, 造价降低 30%~50%。随着石化、海洋、核电等行业的发展, 钛-钢复合板需求持续增长。

钛-钢复合板通常采用爆炸焊接+轧制制备, 利用炸药爆轰产生的瞬时高压与高速冲击使钛板与钢板实现冶金结合, 其界面呈波状特征, 波峰处可见少量熔化物块, 界面区域厚度约 1 μm , 存在 FeTi、Fe₂Ti 等金属间化合物^[4-5]。爆炸复合坯料轧制过程中, 由于钛与钢在变形抗力、摩擦特性等方面存在显著差异, 该过程属于典型的非对称轧制, 极易出现翘扣头、板形不良等缺陷。某厂利用 3500 mm 中厚板轧机轧制 TA2/Q235B 复合板时, 发生了严重的翘扣头及撞护板堆钢事故。为此, 系统分析了异种金属非对称轧制的变形行为与翘扣头成因, 制定了标准化轧制工艺, 以期同类产

收稿日期: 2026-07-31

通信作者: 王兴(1987—), 男, 工程师。

线生产钛-钢复合板提供参考。

1 钛-钢复合板轧制存在的主要问题

1.1 异种金属变形不协调

钛与钢的变形抗力、摩擦系数等本征性能差异显著, 轧制时上下层金属流动速度不协调、出口延伸率不一致, 极易产生翘扣头缺陷, 且轧制速度越高缺陷越显著; 钛的导热系数约为钢的 $1/4$, 加热与冷却不同步加剧了温度梯度和变形不均。研究表明, 轧制变形量越大, 波状界面越趋于平直, 结合强度随之提高^[5]; 界面粗糙度亦会显著影响非对称轧制的翘曲程度与变形协调性^[6]。图 1 为轧制过程中双金属复合板变形及变形区内金属流动速度示意图^[7]。

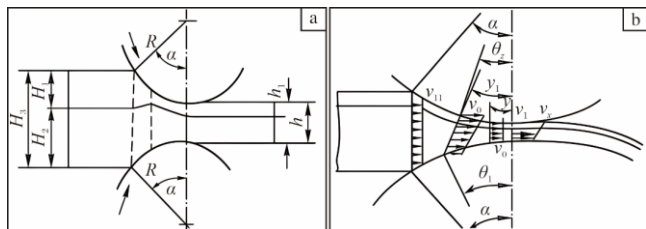


图 1 轧制过程中双金属复合板变形及变形区内金属流动速度示意图^[7]

Fig.1 Schematic diagrams of deformation (a) and metal flow velocity (b) in the deformation zone of bimetallic clad plates during rolling

1.2 加热温度受界面化合物限制

钛的相变点约为 $882\text{ }^{\circ}\text{C}$, 钛/钢界面在 $925\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时会生成 Fe_2Ti 和 TiC , $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时出现 FeTi , 温度越高化合物层越厚, 复合板剪切性能越差^[8]。因此, 轧制加热温度通常控制在 $850\sim 880\text{ }^{\circ}\text{C}$, 远低于碳钢轧制的加热温度($1150\sim 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$)。轧制温度偏低时金属变形抗力较大、温降快, 头尾温差扩大, 上下层变形不协调进一步加剧。定量研究表明, 轧制温度由 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 钛/钢界面剪切强度由 207 MPa 降至 160 MPa ^[9]; 真空热轧条件下, 轧制温度为 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可获得最高结合强度, 约 416 MPa , 超过 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后反应层迅速扩大, 结合强度下降^[10]。界面反应层主要由 $\beta\text{-Ti}$ 、 TiC 和 FeTi 等相组成, 其中 TiC 可抑制 Fe 、 C 元素向钛侧扩散, 发挥扩散屏障作用^[10]。

1.3 宽幅中厚板产线适配性差

宽幅中厚板轧机以轧制碳钢为主, 设备参数和控制系统均围绕碳钢轧制设计, 轧制钛-钢复合板时存在多方面适配性问题。

(1) 轧制线高度不匹配。产线轧制线高度(850 mm)

仍按钢板设定, 而专业钛材企业轧制线标高为 $815\sim 825\text{ mm}$, 因此厚度为 56 mm 的钛-钢复合板坯在轧制时会因轧制线偏高形成爬坡咬入, 加剧扣头缺陷。

(2) 护板参数未优化。下轧辊护板高度按钢板轧制设计, 轧件扣头时头部易撞击下轧辊护板造成堆钢事故。

(3) 轧制模型不适配。现有轧制模型多为钢-钛-钢对称复合板设计, 采用抢温快轧模式(轧制速度为 $1.6\sim 2.2\text{ m/s}$, 首道次大压下), 对非对称单面复合板的稳定性考虑不足, 且首道次大压下会放大上下层延伸差异。

(4) 工作辊辊径限制。工作辊接近最小辊径时, 一方面会增大咬入角, 在钛-钢复合板低温轧制条件下, 头部咬入难度增大, 不均匀变形加剧, 更容易翘扣头; 另一方面, 小辊径轧制时, 一般会下下辊系垫高, 将正常轧制线高度升高 50 mm , 以保证有足够的辊缝调节余量, 但此时会增大爬坡咬入的不利影响, 造成扣头。另外, 上下工作辊辊径差形成的上压力也会造成翘扣头。

(5) 炉温均匀性差。目前中厚板产线普遍选用多工位分区控温的大型电加热炉, 有的长度超过 20 m , 炉温均匀性控制难度大, 易出现炉温均匀性差的问题。当坯料上下表面温度不一致时, 会导致金属塑性变形阻力不均, 表面温度高的金属流动快, 温度低的金属流动慢, 轧制过程中金属会向温度低的一侧弯曲。

2 翘扣头原因分析及改进措施

2.1 事故概况

2025 年 4 月 10 日, 某厂首次采用 3500 mm 中厚板轧机轧制 TA2/Q235B 钛-钢爆炸复合板, 坯料规格为 $56\text{ mm}(6\text{ mm 钛层}+50\text{ mm 钢层})\times 2060\text{ mm}\times 3110\text{ mm}$, 成品规格为 $11.2\text{ mm}\times 2060\text{ mm}$ 。加热工艺: 坯料装炉, 炉温 $\leq 840\text{ }^{\circ}\text{C}$; 随炉升温至 $840\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温 30 min ; 再以 $60\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 升温至 $870\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温 75 min 后出炉。轧制策略为全纵轧 6 道次, 轧制速度为 $1.6\sim 2.2\text{ m/s}$ 。

第 1 块坯料轧制时, 为防止翘头将第 1 道次辊速差设为 $+1\%$, 但现场反馈扣头严重, 至第 6 道次逐步调至 -8% 后效果仍不明显, 末道次坯料头部扣头撞击辊道后向上弓起。第 2 块坯料辊速差调为 -5% , 咬入后钛板撞击工作辊下护板导致堆钢, 造成约 11 h 停机事故。轧制时上下工作辊辊径分别为 1034.86 mm 和 1033.48 mm , 已接近最小辊径(1020 mm), 护板间隙增大、轧制线相对升高, 扣头风险加剧。图 2 为堆钢事故现场与事故后板坯的照片。

2.2 翘扣头原因分析

(1) 材料差异(根本原因): 上层 TA2 纯钛的变形

抗力约为 90 MPa, 远小于下层 Q235B 钢的 200 MPa, 上层流动速度大于下层, 导致向下扣头; 钛的摩擦系数(0.14)远小于钢(0.4), 前滑差可达 30%以上, 1.6~2.2 m/s 的快轧模式进一步放大了前滑差。

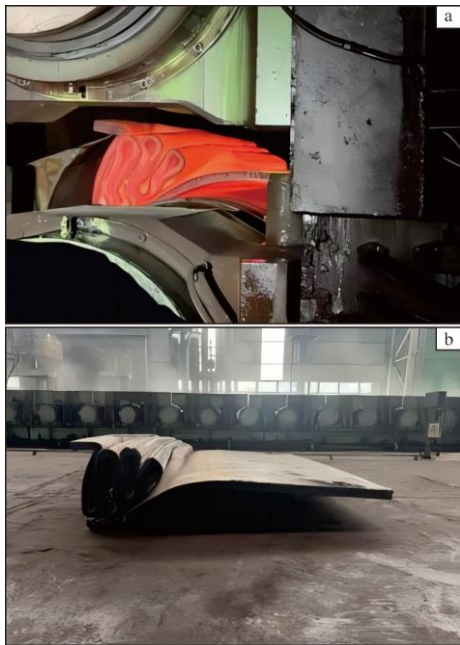


图2 堆钢事故现场与事故后板坯的照片

Fig.2 Photos of collision accident site (a) and slab after the accident (b)

(2) 加热因素: 轧制厚度为 11.2 mm 的钛-钢复合板时, 870 °C 的轧制温度偏低, 但受钛相变点(882 °C)限制不能提高; 二、四工位电阻丝断裂导致炉温冲温超过 20 °C, 坯料头尾加热不均。

(3) 轧制模型: 原模型为钢-钛-钛-钢对称复合板设计, 采用快轧、首道次大压下模式。虽大压下有利于界面组织细化, 压缩比由 3 增至 6 时界面剪切强度提高 84 MPa, 60%压下率为界面良好冶金结合的临界变形量^[10], 但对于非对称轧制则稳定性不足, 首道次大压下会放大上下层延伸差异, 从而加剧翘扣头缺陷的形成。

(4) 设备参数: 轧制线较高, 轧制 56 mm 厚板坯会形成爬坡咬入; 上工作辊辊径大于下工作辊, 形成上压力; 轧机工作辊设计最小辊径为 1020 mm, 实际生产中当工作辊辊径接近该值时, 其与护板间隙过大, 易导致板带头部顶撞护板。以上因素共同作用导致翘扣头严重。

(5) 生产组织: 人员经验不足, 将辊速差设置为 +1%, 对翘扣头趋势预判错误; 第 1 块坯料扣头后未停机即轧制第 2 块坯料, 导致事故扩大。

2.3 改进措施

(1) 重新设计专用轧制模型: 以稳定性为首要原则, 采用低速咬入(1.0~1.5 m/s)、小压下、低-高-低压下规程, 主变形纵轧道次压下量 12~15 mm, 横轧道次压下量 8~10 mm, 总道次≤8 道次。

(2) 改善炉温均匀性: 更换损坏的电阻丝, 将炉内温差控制在±10 °C 以内。

(3) 调整轧制线与护板参数: 将轧制基准线降至 815~825 mm, 降低下护板高度; 避免工作辊在接近最小辊径时进行轧制。

(4) 调整辊速差: 纵轧时辊速差设定为(-10%, +5%)、作用长度为 600~1000 mm; 横轧时辊速差设定为(-15%, +0%)、作用长度为 300~700 mm。

(5) 完善异常处理措施: 当出现严重翘扣头、设备异响等异常情况时, 应立即停轧并及时回炉补温。

3 优化后钛-钢复合板轧制工艺

基于上述事故分析及改进措施, 结合后续生产实践, 形成了适用于 3500 mm 中厚板轧机的钛-钢复合板标准化轧制工艺: 坯料检查→上料→表面吹扫→推床对中→电炉加热→轧制→热矫直→辊道摆动冷却→(热处理)→热矫直→辊道摆动冷却→下线堆垛→成品检查→出库。

3.1 坯料准备与装炉

坯料入厂后应完成尺寸及表面质量检查; 坯料下表面不得刷涂防氧化涂料, 表面的油污、杂物应清理干净。入炉前用压缩空气吹扫, 经推床对中后控制装炉位置, 使板坯两端悬空长度一致。

3.2 加热工艺

TA2/Q235B 复合板采用两段式加热制度: 坯料在炉温≤840 °C 时装炉, 随炉升温至 840 °C 保温 5~30 min, 以 60 °C/h 升温至 870 °C 保温 60~90 min 后出炉。对于 91 mm 厚的对称组坯, 可采用 870 °C 直接入炉、保温 120 min 的简化工艺。加热温度严禁超过 882 °C (钛的相变点), 炉温均匀性需控制在±10 °C 以内, 钛-钢复合板加热工艺参数如表 1 所示。

3.3 轧制工艺

(1) 闭水轧制: 轧制前 10 min 关闭轧机和辊道冷却水, 确保整个轧制过程坯料温度不受水冷影响; 自动出料时间≤60 s, 进行抢温快轧, 减少坯料温损。

(2) 轧制温度: 纵轧≥750 °C, 横轧≥780 °C; 连续两道次低于 800 °C 时立即停轧回炉补温。

(3) 轧制速度: 纵轧 1.2~1.5 m/s, 横轧 1.0~1.2 m/s, 低速咬入以保证稳定性。

表 1 钛-钢复合板加热工艺参数
Table 1 Heating parameters of Ti-steel clad plate

Slab thickness /mm	Charging temperature/°C	First stage temperature/°C	Holding time /min	Heating rate /(°C·h ⁻¹)	Second stage temperature/°C	Holding time /min
56	≤840	840 ± 10	5–30	60	870 ± 10	75 ± 15
91	870	870	120	—	—	—

(4) 压下制度：采用低-高-低压下规程，避免首道次大压下；纵轧主变形道次压下量 12~15 mm、总道次 ≤8，横轧主变形道次压下量 8~10 mm、总道次 ≤4。

(5) 翘扣头控制：纵轧辊速差(−10%, +5%)，作用长度 600~1000 mm；横轧辊速差(−15%, +0%)，作用长度 300~700 mm，根据实际情况及时调整。钛-钢复合板轧制工艺参数具体见表 2。

表 2 钛-钢复合板轧制工艺参数
Table 2 Rolling parameters of Ti-steel clad plate

	Longitudinal rolling	Transverse rolling
Rolling speed/(m·s ⁻¹)	1.2–1.5	1.0–1.2
Pass reduction/mm	12–15	8–10
Total rolling passes	≤8	≤4
Mini-rolling temperature/°C	≥750	≥780
Roll speed difference	−10%, +5%	−15%, +0%
Acting length/mm	600–1000	300–700

3.4 矫直

轧制后将轧件快速运送至预矫直机，利用轧件余温进行矫直：若板形良好，则采用通过式矫直完成一遍；若板形差，则先抬高辊缝使轧件通过后，再用热矫直机进行矫直。矫直温度 ≥650 °C，矫直速度为 0.5~1.0 m/s，矫直 3~5 道次，出口辊缝设定为比实际厚度小 0~3 mm。

3.5 冷却与堆放

轧件经热矫直后，移送至冷床或延伸辊道进行摆动风冷，待冷却至 200 °C 以下后方可吊运。

4 结 论

(1) TA2/Q235B 钛-钢爆炸复合板的轧制属于异种金属非对称轧制，上下层变形抗力和摩擦系数的显著差异是产生翘扣头的根本原因，且轧制速度越高，复合板的弯曲程度越严重。

(2) 大型轧钢产线因设备参数主要围绕钢材设计，轧制钛-钢复合板时适配性差，主要表现在加热温度受复合板界面化合物生成限制而无法提高，炉温均

匀性差，轧制模型原为对称复合板设计，工作辊接近最小辊径且轧制线偏高等。

(3) 通过重新设计专用轧制模型(低速咬入、小压下、低-高-低压下规程)、将炉温均匀性改善至 ±10 °C 以内、调整轧制线高度至 815~825 mm 并降低护板高度、引入辊速差控制翘扣头及完善异常处理机制等综合措施，构建了包含加热、轧制、矫直、冷却、堆放及异常处理的标准化工艺体系。该工艺可有效提高钛-钢复合板轧制的稳定性，避免翘扣头及堆钢事故，对同类异种金属复合板的工业化轧制生产具有参考价值。

参考文献 References

[1] 吴江涛, 李南南. 退火温度对 TA1/X65 爆炸复合板微观组织与力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2025, 42(5): 24-29.

[2] Shi C G, Jiang J L, Wang H T, et al. Numerical simulation and experiment of TA1/Q235 composite plate by explosive welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2025, 54(12): 3032-3047.

[3] Wu J T, Wang D, Huang X L, et al. Preparation and performance of large-size seamless zirconium-titanium-steel composite plate[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2025, 54(2): 319-326.

[4] 李斌, 徐鹏, 赵峰, 等. 钛钢复合板界面组织研究[J]. 装备制造技术, 2023(5): 98-103.

[5] 王存. 钛/钢复合板的轧制变形行为及成形性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.

[6] 白晋龙. 钛/钢复合板表面预处理工艺对界面结合的作用机制研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2025.

[7] 庞玉华, 杜忠泽. 金属塑性加工学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2011: 96-104.

[8] 柴希阳, 师仲然, 柴锋, 等. 加热温度对轧制钛/钢复合板组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(8): 2701-2710.

[9] 王明坤, 骆宗安, 周宏宇, 等. 组坯方式及轧制工艺对钛/钢复合板组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(12): 4004-4015.

[10] 杨啸雨. 桥梁用真空热轧钛/钢复合板界面组织及结合强度调控研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.