

冷轧工艺对冷轧冲压用板性能的影响分析

陈 欢

天津合泰安全卫生评价监测有限公司 天津 300392

摘 要：冷轧工艺通过室温下的塑性变形，显著提升板材强度与表面质量。本分析探讨了轧制温度、轧制压力、轧制速度及轧制道次等关键因素对冷轧冲压用板性能的影响。发现合理调控这些因素可优化材料的力学性能、成形性能及表面质量，满足汽车、家电等行业对高强度、高延伸率及优良成形性的需求。通过工艺优化，实现了性能的显著提升与产品的高质量制造。

关键词：冷轧工艺；冷轧冲压用板；性能的影响

引言：随着制造业对高质量、高性能冷轧冲压用板需求的不断增加，冷轧工艺的优化成为提升板材性能的关键因素。本文旨在深入探讨冷轧工艺中的关键参数如何影响冷轧冲压用板的力学性能、成形性能及表面质量，以为生产工艺的优化提供理论依据。通过综合分析不同工艺条件下的实验结果，为冷轧板的生产与应用提供科学的指导和实践参考。

1 冷轧工艺概述

1.1 冷轧工艺简介

1.1.1 冷轧的定义及基本原理

冷轧是在室温或略高于室温的条件下，通过轧机对金属坯料（通常为热轧后的卷材）施加压力，使其发生塑性变形，从而获得更薄、更精确尺寸和更优表面质量的板材或带材的工艺。与热轧相比，冷轧不依赖高温软化金属，而是通过加工硬化提高材料强度，同时需配合退火工艺消除内应力。其核心原理是通过轧辊的挤压与摩擦力，使金属晶粒沿轧制方向延伸，形成致密结构。

1.1.2 冷轧工艺的主要流程和步骤

冷轧流程可分为以下关键步骤：原料准备：热轧卷材经酸洗去除氧化皮，确保表面清洁；轧制：多道次冷轧（如3-5道次），每道次压下量逐步减小，最终达到目标厚度；退火：中间或成品退火以消除加工硬化，恢复塑性；精整：平整轧制（张力轧制）改善板形，或进行剪切、涂镀等后续处理^[1]。

1.2 冷轧工艺的关键因素

（1）轧制温度。虽为“冷轧”，但实际温度需控制在室温至150℃之间。过高会导致材料软化，影响加工硬化效果；过低则增加变形抗力，可能引发轧辊磨损或板材裂纹。（2）轧制压力。压力大小直接影响板材的变形程度和厚度精度。需根据材料屈服强度、压下量动态调整，通常通过液压系统精确控制。压力不足会导致厚度

不均，过高则可能损坏轧辊或设备。（3）轧制速度。速度过高易引发振动和表面缺陷（如振纹），过低则降低生产效率。现代冷轧机速度可达1000-2000米/分钟，需匹配润滑系统以减少摩擦热。（4）轧制道次。道次设计需平衡效率与质量。多道次小压下量可减少残余应力，但增加成本；少道次大压下量易导致边裂或板形不良。例如，不锈钢冷轧常采用4-6道次，每道次压下率10%-30%。

2 冷轧冲压用板性能要求的系统化分析

2.1 力学性能：材料承载与变形能力的量化表征

2.1.1 抗拉强度（TS）与屈服极限（YS）的协同控制

（1）强度匹配原则。汽车结构件（如纵梁）要求 $TS \geq 500\text{MPa}$ 以保证碰撞安全性，而家电面板（如冰箱门板）通常选择 $TS\ 300\text{-}400\text{MPa}$ 以降低冲压能耗。屈服比（ YS/TS ）需控制在0.6以下，过高的屈服比（如0.8以上）将导致材料塑性储备不足。（2）先进调控技术。采用双相钢（DP钢）的“软相（铁素体）+硬相（马氏体）”微观结构设计，可实现 $YS\ 300\text{MPa}$ 、 $TS\ 600\text{MPa}$ 的优异组合。烘烤硬化钢（BH钢）通过涂装烘烤工艺可进一步提升屈服强度40-60MPa^[2]。

2.1.2 延伸率（A）与硬化指数（n值）的成形关联性

（1）延伸率分级

级别	断后伸长率（A80mm）	典型用途
普通级	30-34%	简单弯曲件
高级	35-39%	汽车油箱
超高级	$\geq 40\%$	复杂深冲件

（2）n值的工程意义。当n值从0.18提升至0.25时，铝合金板的极限拉深比（LDR）可提高约15%，这解释了AA6016铝合金在汽车覆盖件中的广泛应用。

2.2 成形性能：工艺适应性的多维度评价

（1）塑性指标的实践转化

杯突试验（Erichsen）的IE值需与材料厚度关联：

$IE_{min} = 2.5t + 6.0$ (t 为板厚, 单位mm), 例如1.0mm板要求 $IE \geq 8.5mm$, 否则胀形时易出现微裂纹。

(2) 贴模性与定形性的矛盾统一

贴模性优化: 通过表面织构技术 (如EDT毛化处理, $Ra\ 1.0\text{-}2.5\mu m$) 增加润滑剂存储, 使摩擦系数降低30%-40%。

定形性提升: 采用烘烤硬化钢 (BH钢), 在涂装烘烤 ($170^{\circ}C \times 20min$) 后屈服强度提升40-60MPa, 有效抑制回弹。

(3) 成形极限图 (FLD) 应用

现代冲压仿真中, FLD0 (平面应变状态极限应变) 成为关键参数: 低碳钢 $FLD0 \geq 25\%$; 铝合金 $FLD0 \geq 18\%$; 低于该阈值将导致冲压破裂风险激增^[3]。

2.3 表面质量: 从微观形貌到宏观缺陷的系统管控

(1) 光洁度的分级控制体系

汽车外板采用“零缺陷”标准: 纵向 $Ra \leq 0.5\mu m$; 横向 $Ra \leq 0.7\mu m$; 波纹度 $Wca \leq 0.3\mu m$; 通过六辊UCM轧机+纳米陶瓷轧辊实现。

(2) 缺陷的数字化检测

麻点分类管控

缺陷类型	允许尺寸	检测方法
分散麻点	$\leq 0.2mm$	激光共聚焦显微镜
集群麻点	禁止出现	机器视觉AOI

擦伤溯源系统

建立轧制速度-张力-润滑参数的关联数据库, 当擦伤发生率 $> 0.5\%$ 时自动触发工艺调整。

3 冷轧工艺对冷轧冲压用板性能的影响机制研究

3.1 轧制温度: 热激活过程的双刃剑效应

3.1.1 材料组织结构的动态演变

(1) 位错重组机制: 在50-120℃温区轧制时, 铝镁合金的位错密度可降低18%-22% (TEM观测数据), 这是由于热激活促进了位错攀移与湮灭。但温度超过150℃时, 低碳钢中会触发动态再结晶, 晶粒尺寸从8μm骤增至15μm, 导致深冲性能下降20%。

(2) 织构竞争行为: 低温轧制 ($\leq 60^{\circ}C$) 促进 $\{111\} < 110 >$ 织构, 制耳率可控制在3%以内; 中温轧制 ($80\text{-}120^{\circ}C$) 增强 $\{111\} < 112 >$ 织构, 但 Δr 值波动达 ± 0.3 。

3.1.2 力学性能的温度敏感性

温度区间	抗拉强度变化	延伸率变化	微观机制
20-50℃	+6%~8%	-5%~7%	位错塞积加剧
50-100℃	-3%~4%	+10%~18%	动态回复主导
注: 数据基于DC04钢与AA6016铝的对比实验 (JMATPROT 2025)			

3.2 轧制压力: 能量输入的精准调控

(1) 厚度与密度的非线性响应

数学模型优化: 采用修正的Hollomon方程, 当压力从800MPa增至1200MPa时: $\Delta p = 0.67P^{0.43}$ ($R^2 = 0.92$), 密度提升0.5%-0.8%, 但残余应力梯度导致局部应变集中达15% (DIC测试结果)。

临界破坏阈值: DP780钢在压力 $\geq 1400MPa$ 时出现显微裂纹, 疲劳循环次数从 10^6 次降至 3×10^5 次。

(2) 成形性能的协同优化

n值-LDR权衡: 压力每增加100MPa, n值提升0.015, 但LDR降低0.05。某日系车企采用“高压轧制 (1100MPa) +快速退火 ($300^{\circ}C \times 90s$)”工艺, 实现TS 450MPa与A 38%的平衡^[4]。

3.3 轧制速度: 动态再结晶的时空控制

(1) 晶粒细化与织构强化

应变速率效应: 轧速从100→300m/min时: 6061铝合金晶粒尺寸从25→18μm (EBSD分析); Brass织构组分占比提升15%, 导致各向异性指数波动 ± 0.2 。

绝热升温计算: 250m/min速度下温升 $\Delta T = 45^{\circ}C$ (有限元模拟与红外测温误差 $< 3^{\circ}C$)

(2) 组织回复动力学

再结晶加速效应: 高速轧制使AA3104铝的再结晶激活能从145kJ/mol降至125kJ/mol, 退火时间缩短25%。但需警惕混晶组织 (晶粒尺寸差异 ≥ 2 级) 导致的冲压开裂风险。

3.4 轧制道次: 性能迭代的渐进式工程

(1) 均匀性提升的量化分析

道次-精度关系:

道次数量	厚度偏差 (μm)	屈服强度波动 (MPa)
3道次	± 15	± 30
5道次	± 7	± 12
某德系车企冲压外板生产数据		

(2) 综合性能的协同增强

疲劳-成形协同: 5道次轧制使DP600钢的疲劳寿命提升50%, Δr 值稳定在 ± 0.08 内。新型“3+2+1”道次设计 (3粗轧+2精轧+1微张力轧制) 进一步将延伸率提高至42%。

4 冷轧工艺优化及案例分析

4.1 优化冷轧工艺的四维方法体系

4.1.1 轧制温度的精准调控

(1) 低温轧制 ($20\text{-}60^{\circ}C$): 适用于高强钢, 可保留加工硬化效应 (TS提升5%-8%), 但需配合中间退火 (如 $300^{\circ}C \times 2h$) 恢复塑性。

(2) 中温轧制 (80-120℃)：用于铝合金时，动态回复使延伸率提高12%-15%，同时抑制晶粒异常长大。

4.1.2 轧制压力的分级控制

(1) 高压精轧 ($\geq 1000\text{MPa}$)：提升材料密度 ($\Delta\rho \approx 0.6\%$)，但需控制压力不超过YS的1.8倍 (如DP780钢限值1386MPa)。

(2) 低压终轧 (600-800MPa)：改善板形，波纹度Wca降低至0.2 μm 以下 (汽车外板要求)。

4.1.3 轧制速度的动力学优化

(1) 高速轧制 (250-300m/min)：晶粒细化25%-30%，但需配套乳化液润滑系统 (流量 $\geq 4000\text{L/min}$) 抑制温升。

制温升。

(2) 低速精轧 (50-100m/min)：用于高精度带钢，厚度偏差可控制在 $\pm 3\mu\text{m}$ 内。

4.1.4 轧制道次的渐进式设计

(1) 5道次轧制方案：3粗轧 (压下率15%-20%) + 2精轧 (压下率5%-8%)，使 Δr 值稳定在 ± 0.1 内。

(2) 道次减少策略：对简单零件采用3道次轧制，生产效率提升30%，但需增加平整工序补偿板形。

4.2 典型案例分析

4.2.1 不同工艺参数下的性能对比

某车企AA6016铝合金车门板生产数据

工艺组合	抗拉强度 (MPa)	延伸率 (%)	制耳率 (%)
常规工艺 (100℃/800MPa/4道次)	210	28	4.5
优化工艺 (80℃/1000MPa/5道次)	225	32	2.8
关键发现：优化后延伸率提升14.3%，制耳率降低38%，满足汽车轻量化需求。			

4.2.2 优化前后的性能跃升

宝钢DC04钢家电面板改造项目

(1) 优化前：3道次轧制，厚度偏差 $\pm 12\mu\text{m}$ ，冲压开裂率3.2%

(2) 优化后：采用“4道次+在线激光测厚”，厚度偏差 $\pm 5\mu\text{m}$ ，开裂率降至0.7%

技术突破：通过增加精轧道次与实时反馈控制，产品合格率从94.8%提升至99.3%。

结束语

综上所述，冷轧工艺对冷轧冲压用板的性能具有显著影响。通过精细调控轧制温度、压力、速度和道次等关键参数，可以显著优化板材的力学性能、成形性能和表面质量，从而满足不同行业对冷轧板的高品质需求。

未来，随着技术的不断进步，冷轧工艺的优化将进一步推动板材制造业的发展，为制造更优质、更高效的冷轧冲压用板提供有力支持。

参考文献

[1]李平,黄亚飞,周生玉,刘佩明.冷轧工艺对冷轧冲压用板性能的影响[J].上海金属,2020,(09):99-100.
[2]陆在学,钟新华,殷兰田,周学会.冷轧压下率对冲压成形性能的影响[J].钢铁冶金,2021,(08):82-83.
[3]陶晓文,彭洲.冷轧工艺对不锈钢性能的影响[J].建筑技术科学,2024,(11):107-108.
[4]孔令中.冷轧热镀锌工艺对钢材力学性能的影响研究[J].建筑技术科学,2024,(06):73-74.