硬质合金棒材冷拔装备及工艺研究

洪源隆　苏振华　马海宽　寇永乐　邓发明
中国重型机械研究院股份公司　陕西　西安　710018

摘　要：围绕硬质合金棒材冷拔加工，系统研究其装备结构与工艺要点，核心聚焦冷拔装备各组成部分的设计逻辑及工艺参数的优化思路，分析材料塑性变形规律、模具作用机制及润滑冷却等关键环节对产品质量的影响，探讨变形控制与质量保障的有效路径，为硬质合金棒材冷拔加工的高效、稳定开展提供理论支撑与实践指引，解决加工过程中可能出现的质量与效率相关问题。

关键词：硬质合金棒材；冷拔装备；模具设计；工艺优化；变形控制

引言：硬质合金棒材因优异的硬度、耐磨性等性能，在机械制造、冶金等领域应用广泛，冷拔加工是提升其尺寸精度与力学性能的关键工艺。当前冷拔加工中，装备稳定性不足、工艺参数不合理等问题，易导致产品出现裂纹、尺寸偏差等缺陷，制约生产效率与产品质量。基于此，需深入研究冷拔装备结构设计与工艺优化方法，明确各环节核心影响因素，为后续装备改进与工艺完善奠定基础。

1 硬质合金棒材冷拔加工的基础理论

硬质合金棒材冷拔是通过外部拉力使坯料在模具内产生塑性变形的过程，其核心在于材料内部位错运动与晶界滑移的协同作用。材料的力学性能参数（如屈服强度、延伸率）直接决定变形可行性，WC-Co 系硬质合金中 Co 含量的增加可提升塑性，但过度添加会降低硬度。冷拔过程中，坯料经历弹性变形、塑性变形及弹性恢复三个阶段，其中塑性变形阶段的应力分布均匀性是控制产品质量的关键。变形量的累积效应会导致材料加工硬化，需通过中间退火消除内应力，避免裂纹产生。此外，模具与坯料的接触摩擦不仅影响表面质量，还会改变变形区的应力状态，需通过润滑与模具表面处理实现摩擦系数的精准调控[1]。

2 硬质合金棒材冷拔装备

2.1 主机结构设计

主机结构采用框架式刚性机身，材料选用 45 号钢整体铸造，经时效处理消除内应力，确保拉伸过程中变形量≤ 0.05mm。传动系统采用伺服电机驱动滚珠丝杠，实现拉力的无级调节，最大拉伸力可达 500kN，速度控制精度 ±0.1mm/s。夹持机构采用楔形块与液压驱动结合的方式，夹持力通过压力传感器实时反馈，避免坯料打滑或损伤。导向装置设置在模具入口前，采用自定心结构，保证坯料与模具轴线同轴度≤ 0.03mm/m。

2.2 模具系统

模具是冷拔成形的关键部件，由入口锥、工作带、出口锥三部分组成。入口锥角度设计需平衡变形阻力与材料流动性，对于直径 10-30mm 的棒材，角度通常取 8°-12°；工作带长度为直径的 1.5-2 倍，确保变形区稳定；出口锥角度略大于入口锥，减少材料与模具的摩擦。模具材料选用 WC-Co 硬质合金，硬度 HRA ≥ 92，工作表面经金刚石砂轮精磨，粗糙度 Ra ≤ 0.1μm。为适应多规格加工需求，模具采用快换结构，更换时间≤ 5 分钟，并配备在线磨损监测系统，通过激光轮廓仪实时检测工作带磨损量[2]。

2.3 张力控制系统

张力控制直接影响产品直线度与尺寸精度，采用闭环反馈控制策略。在多道次冷拔中，各道次间设置张力辊组，通过磁粉制动器调节张力，控制精度 ±50N。前道次出口与后道次入口间设置张力传感器，实时监测张力波动，当偏差超过设定值时，系统自动调整拉伸速度或模具位置。对于长棒材加工，采用恒张力控制模式，避免因坯料自重导致的下垂弯曲；对于短棒材，采用递增张力模式，确保变形均匀性。

2.4 润滑与冷却系统

润滑系统采用油雾润滑方式，将极压润滑油与压缩空气混合后均匀喷射至模具入口，形成厚度 0.5-1μm 的油膜，摩擦系数控制在 0.08-0.12。润滑油需具备良好的极压性与抗氧化性，粘度指数≥ 140，闪点≥ 200℃。冷却系统针对模具与坯料接触区域，通过循环水冷却模具座，

进水温度控制在 20-25℃，确保模具工作温度≤ 60℃，避免因温度升高导致的材料软化或模具热变形。

3 硬质合金棒材冷拔工艺

3.1 坯料预处理

坯料质量直接影响冷拔可行性，需进行严格的预处理。首先对烧结后的硬质合金坯料进行外观检查，确保无裂纹、气孔等缺陷，密度≥ 99.5%理论密度。坯料尺寸精度控制在 ±0.1mm，直线度≤ 0.2mm/m。表面处理采用喷砂工艺，去除氧化层与毛刺，表面粗糙度 Ra 控制在 1.6-3.2μm，以提高润滑效果。对于高 Co 含量（≥ 10%）的坯料，需进行低温时效处理（200-300℃，保温 2h），消除烧结内应力，避免加工过程中开裂。在实际生产中，坯料的预处理环节是保障后续冷拔工艺顺利进行的基础，任何微小的缺陷都可能在冷拔过程中被放大，导致产品报废。外观检查通常采用人工目测与无损检测相结合的方式，对于关键部位需使用放大镜或显微镜进行仔细观察。密度检测则通过排水法或比重计进行，确保达到规定要求。尺寸精度的控制需要高精度的加工设备和严格的测量手段，如使用三坐标测量仪对坯料的直径、长度等进行全面检测。直线度的检查可采用水平仪或专用的直线度测量装置，确保坯料在冷拔过程中能够均匀受力。喷砂工艺参数的选择也至关重要，砂粒的大小、喷射压力和时间都会影响表面粗糙度，需要根据坯料的材质和尺寸进行调整。低温时效处理则需要精确控制温度和保温时间，以达到消除内应力的最佳效果，同时避免过度处理导致材料性能下降[3]。

3.2 道次变形参数设计

道次变形参数包括减径量、变形速度与拉伸力，需根据材料塑性合理分配。单道次减径量通常控制在 15%-25%，对于直径 20mm 的坯料，首次减径量不宜超过 4mm，后续道次逐渐减小。变形速度根据棒材直径调整，直径 10-15mm 时取 10-15mm/s，直径 20-30mm 时取 5-10mm/s，避免速度过快导致的局部应力集中。拉伸力通过材料屈服强度与变形面积计算，实际操作中需预留 10%-15%的安全余量，防止超载损伤装备或坯料。多道次变形中，道次间需进行退火处理，退火温度 800-900℃，保温时间 30-60min，随炉冷却至室温，以恢复材料塑性。道次变形参数的设计是冷拔工艺的核心环节，直接关系到产品的质量和生产效率。减径量的确定需要综合考虑材料的塑性、模具的性能以及设备的能力，过小的减径量会增加道次数量，降低生产效率；过大的减径量则可能导致材料开裂或模具损坏。变形速度的选择也需要兼顾生产效率和产品质量，速度过高会使材料在变形过程中产生过多的热量，导致局部组织过热，影响产品性能；速度过低则会降低生产效率，增加成本。拉伸力的计算需要准确的材料性能参数和变形面积数据，预留安全余量可以有效避免因材料性能波动或设备误差导致的意外事故。道次间的退火处理是恢复材料塑性的关键步骤，退火温度和保温时间需要根据材料的成分和变形程度进行精确控制，以确保材料能够在后续的冷拔过程中继续保持良好的塑性。

3.3 模具参数优化

模具参数与变形效果密切相关，需通过正交试验确定最优组合。入口锥角度对变形阻力影响显著，角度增大可降低摩擦力，但易导致材料表面划伤；角度过小则变形区长度增加，加剧模具磨损。试验表明，对于 WC-8Co 硬质合金，入口锥角度 10°、工作带长度 25mm 时，变形均匀性最佳。模具工作带表面粗糙度需控制在 Ra ≤ 0.1μm，采用化学气相沉积（CVD）涂层（如 TiN）可提高耐磨性，涂层厚度 3-5μm，硬度 HV ≥ 2000。出口锥角度通常比入口锥大 2°-3°，以减少材料出口时的弹性恢复。模具是冷拔工艺中不可或缺的关键部件，其参数的优化对于提高产品质量、降低生产成本具有重要意义。正交试验是确定模具最优参数的有效方法，通过设计多因素、多水平的试验方案，可以系统地研究各个参数对变形效果的影响，从而找到最佳的参数组合。入口锥角度的选择需要在降低摩擦力和减少表面划伤之间找到平衡，对于 WC-8Co 硬质合金，10° 的入口锥角度经过试验验证是较为理想的选择。工作带长度则直接影响变形区的长度和材料的变形均匀性，25mm 的工作带长度可以使材料在变形过程中受力均匀，提高产品的尺寸精度和表面质量。模具工作带的表面粗糙度和涂层处理对于提高模具的耐磨性和使用寿命至关重要，Ra ≤ 0.1μm 的表面粗糙度可以减少材料与模具之间的摩擦，CVD 涂层则可以显著提高模具表面的硬度和耐磨性，延长模具的使用寿命。出口锥角度的设计则考虑了材料的弹性恢复特性，适当增大出口锥角度可以减少材料出口后的弹性变形，提高产品的尺寸精度[4]。

3.4 润滑工艺控制

润滑效果取决于润滑油性能、供油方式与环境温度。润滑油选用极压型硫化鲸鱼油，添加 1%-2%的 MoS2 纳米颗粒，可将摩擦系数降低至 0.08 以下。供油压力控制在 0.3-0.5MPa，油雾颗粒直径 5-10μm，确保均匀覆盖模具表面。环境温度对润滑效果影响较大，当温度低于 15℃时，需对润滑油进行预热（40-50℃），防止粘度增加导致润滑不良；温度高于 35℃时，需加强模具

冷却，避免润滑油失效。道次间需清理坯料表面残留的润滑杂质，防止划伤模具或影响后续变形。良好的润滑是冷拔工艺顺利进行的重要保障，可以有效减少材料与模具之间的摩擦，降低变形阻力，提高产品表面质量，延长模具使用寿命。极压型硫化鲸鱼油具有良好的极压性能和润滑性能，添加 MoS2 纳米颗粒可以进一步提高其润滑效果，降低摩擦系数。供油方式的选择需要确保润滑油能够均匀、连续地供应到模具表面，油雾润滑是一种较为理想的供油方式，通过控制供油压力和油雾颗粒直径，可以使润滑油以雾状形式均匀覆盖模具表面，提高润滑效果。环境温度的变化会影响润滑油的粘度和性能，因此需要根据环境温度的变化对润滑油进行相应的处理。在低温环境下，对润滑油进行预热可以降低其粘度，保证润滑效果；在高温环境下，加强模具冷却可以防止润滑油因温度过高而失效。道次间清理坯料表面残留的润滑杂质可以避免杂质在后续的冷拔过程中划伤模具或影响产品表面质量，确保冷拔工艺的稳定进行。

3.5 质量控制与检测

冷拔过程质量控制涵盖在线监测与离线检测。在线监测采用激光测径仪实时测量棒材直径，精度达 ±0.005mm，偏差超 ±0.02mm 时自动停机调整；通过红外测温仪监测模具温度，超过 60℃启动冷却系统。离线检测包括尺寸精度（直径、圆度）、表面质量（粗糙度、划伤）、力学性能（硬度、弯曲强度）及内部组织（金相结构、孔隙率）。其中，硬度检测使用洛氏硬度计，HRA 值波动范围需≤ 1；弯曲强度通过三点弯曲试验测定，数值≥ 2000MPa；金相分析要求晶粒尺寸均匀，无异常长大或偏析。

质量控制与检测是保障硬质合金棒材冷拔产品质量的关键。在线监测可实时发现生产异常并及时调整，避免不合格品产生。激光测径仪高精度、高响应，实时反馈直径数据，超差自动停机确保尺寸精度；红外测温仪实时监控模具温度，超温启动冷却防止模具损坏及产品质量受影响。离线检测则全面深入检测产品性能指标，确保质量稳定可靠。尺寸精度检测采用千分尺、圆度仪等精密仪器；表面质量通过目测、粗糙度仪检测；力学性能检测使用洛氏硬度计、万能材料试验机；内部组织需进行金相分析，通过显微镜观察晶粒结构与孔隙率。通过严格的质量控制与检测，确保硬质合金棒材冷拔产品性能优良、质量可靠[5]。

结束语：综合分析硬质合金棒材冷拔的基础理论、装备设计及工艺要点，明确主机结构、模具系统等装备部件的核心作用，以及坯料预处理、道次参数优化等工艺环节的关键意义。通过合理设计装备、优化工艺参数、强化质量控制，可有效解决冷拔加工中的常见缺陷，提升产品性能与生产效率，为该技术工业化应用提供可靠保障，并为后续相关研究提供参考方向。

参考文献

[1] 张雲飞, 张震, 陈威, 等.GH2132 合金棒丝材制备工艺的研究现状与趋势 [J]. 哈尔滨工程大学学报,2026,47(1):169-181.

[2] 刘军凯, 于一鹏, 沈亚秋, 等.Ni-Cr-Al 合金冷拉棒材的力学性能研究 [J]. 特殊钢,2025,46(3):34-37.

[3] 田曾, 金万军, 王倩, 等. 冷拔态 GH4738 合金热变形本构方程及热加工图 [J]. 精密成形工程,2024,16(5):193-200.

[4] 刘岩岩, 张鹏, 熊德树, 等. 碳纳米管增强硬质合金的制备及性能研究 [J]. 有色金属材料与工程,2024,45(02):9-16.

[5] 王倩玉, 秦明礼, 吴昊阳, 等. 新型纳米晶硬质合金的研究现状及发展趋势 [J]. 粉末冶金技术,2022,40(04):362-375+382.