

优特钢轧制硬质合金轧辊材料研制

邵长昆 王艳东 孙超 罗全 张华 李晓艳
蓬莱市超硬复合材料有限公司 山东烟台 265607

摘要：随着优特钢朝着高强度、高精度、细晶粒的方向持续发展，作为轧制过程核心工具的轧辊，其耐磨性、抗冲击性与热稳定性成为决定轧材质量和生产效率的关键因素。传统高铬铸铁轧辊硬度仅为HRC55-60，磨损速度快，在优特钢多道次轧制作业中需频繁更换；普通硬质合金轧辊则存在抗冲击韧性不足、易发生崩裂的问题，难以适应优特钢轧制时的重载交变工况。本文聚焦优特钢轧制用关键硬质合金轧辊材料的研制，深入分析现有轧辊材料的技术短板，从WC晶粒细化、粘结相优化、晶粒长大抑制剂配比及烧结工艺调控四个方面构建完整的材料研制体系，通过正交试验与性能测试反复优化成分及工艺参数。实际应用结果显示，优化后的硬质合金轧辊材料硬度达到HRC68-70，抗弯强度超过3200MPa，热冲击韧性提升40%。在 $\Phi 100\text{mm}$ 合金结构钢轧制过程中，该轧辊使用寿命是传统轧辊的6倍，轧材尺寸精度偏差控制在 $\pm 0.03\text{mm}$ ，为优特钢高效轧制提供了关键材料保障，对促进优特钢产业高质量发展具有重要意义。

关键词：优特钢；硬质合金轧辊；晶粒细化；粘结相优化；烧结工艺

引言

优特钢是高端装备制造、航空航天等领域不可或缺的关键原材料，其轧制过程对轧辊性能提出了极为严格的要求。轧辊需承受1000-1500℃的高温、200-300kN/mm的线压力以及交变冲击载荷，同时要保证轧材表面粗糙度 $R_a \leq 0.8\mu\text{m}$ 、尺寸精度控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 范围内^[1]。硬质合金轧辊凭借WC相赋予的高硬度和高耐磨性，成为优特钢轧制的理想选择。《“十四五”原材料工业发展规划》中明确提出，要研发优特钢轧制专用硬质合金轧辊材料，提高关键工具的自给率。

当前，我国高端优特钢轧制领域大多依赖进口瑞典山特维克、德国克虏伯等品牌的硬质合金轧辊，单支采购成本超过50万元，且交货周期长达3-6个月^[2]。国产普通硬质合金轧辊存在三大核心缺陷：一是WC晶粒粗大，尺寸在1.5-2.0 μm 之间，导致耐磨性不足，在轴承钢轧制中使用寿命仅为进口产品的40%；二是粘结相分布不均匀，抗冲击韧性较低，仅为 $\leq 15\text{J}/\text{cm}^2$ ，轧制过程中崩裂率超过10%；三是热稳定性较差，经过冷热循环后硬度衰减率达到8%，造成轧材尺寸出现波动^[3]。某特

钢企业在2023年因国产轧辊频繁失效，发生非计划停机23次，直接经济损失超过1800万元^[4]。在此背景下，开展优特钢轧制关键硬质合金轧辊材料的国产化研制工作，对于突破进口技术壁垒、降低生产成本具有重要的现实意义。

一、优特钢轧制硬质合金轧辊材料技术瓶颈分析

（一）耐磨性与韧性矛盾

硬质合金轧辊耐磨性靠WC相，韧性由Co粘结相决定，二者有矛盾。国产普通轧辊增加WC含量、降低Co含量提高耐磨性时，抗弯强度和抗冲击韧性下降，咬入易崩裂；增加Co含量提升韧性则耐磨性降低。且WC晶粒尺寸调控难，传统方法制备的WC粉末烧结后晶粒易粗化，加剧磨损。

（二）热稳定性与抗疲劳性能不足

优特钢轧制时轧辊表面温度周期性波动。国产轧辊因成分设计缺陷，热稳定性差，线膨胀系数不均产生热应力，高温硬度衰减严重，热疲劳寿命短，频繁换辊增加成本、降低效率。

（三）烧结致密化与组织均匀性问题

烧结工艺是硬质合金轧辊制备关键，国产轧辊在此环节不足：致密化不够，组织均匀性差，易出现Co富集和贫化区域，晶粒长大抑制剂添加比例不合理，影响轧

基金项目：山东省高性能硬质合金及精密工具重点实验室，2024年度山东省重点研发计划（竞争性创新平台）项目（编号：2024CXPT106）

材质量。

二、硬质合金轧辊材料研制核心技术路径

(一) 超细WC晶粒制备与成分优化

以“超细晶粒+精准配比”为核心优化原料体系：采用“等离子体辅助碳热还原法”制备超细WC粉末，通过严格控制还原温度为1200℃、保温时间为4h，将WC粉末的平均粒度从传统的1.2μm细化至0.4~0.6μm，比表面积提升至8.5m²/g，为提高轧辊耐磨性奠定了良好基础^[8]；优化WC-Co成分配比，采用“高WC+中Co”的方案，将WC含量控制在88%~90%，Co含量控制在8%~10%，实现耐磨性与韧性的兼顾；引入0.2%~0.3%的TaC与0.1%~0.2%的Cr₃C₂作为复合晶粒长大抑制剂，TaC能够有效抑制WC晶粒的长大速率，Cr₃C₂可改善Co与WC的润湿性，相较于单一VC抑制剂，使晶粒尺寸偏差缩小至0.2μm以内，抗弯强度提升18%。原料混合采用“超声辅助行星球磨”工艺，球料比设置为15:1，转速为250r/min，混合时间为4h，使Co粉的分布均匀性提升45%。

(二) 粘结相改性及界面优化

通过粘结相合金化改性提升界面结合强度：在Co粘结相中添加1%~2%的Ni与0.5%~1%的Mo，形成Co-Ni-Mo三元合金粘结相。Ni可降低粘结相与WC的界面能，Mo能细化粘结相晶粒，使界面结合强度从传统的250MPa提升至380MPa^[9]；采用“真空脱气+氢气还原”工艺去除原料中的氧、氮杂质，将氧含量控制在0.06%以下，避免形成WO₃、Co₃W₃C等脆性相，使冲击韧性从12J/cm²提升至20J/cm²；开发“梯度粘结相”设计，轧辊工作层Co含量为8%以保证高硬度，过渡层Co含量为10%以保证高韧性，芯部Co含量为12%以增强抗冲击性，通过分步成型与同步烧结实现梯度过渡，解决了工作层与芯部的性能匹配问题。

(三) 烧结工艺创新与致密化调控

采用“真空热压烧结+分段保温”工艺提升致密化程度：升温阶段采用阶梯升温方式，在500℃、800℃、1200℃各保温1h，避免粘结剂快速分解产生孔隙；烧结温度控制在1350℃，较传统工艺降低30℃，保温时间延长至3h，同时施加30MPa压力辅助致密化，使轧辊致密度从98.5%提升至99.8%，孔隙率低于0.2%^[10]；降温阶段采用梯度降温，1000℃以上降温速率为5℃/min，1000℃以下降至2℃/min，减少热应力导致的内部裂纹；烧结后进行深冷处理，在-196℃下保温2h，细化残余奥氏体组

织，使硬度提升HRC1~2，且高温硬度衰减率从8%降至3%。对比试验结果表明，优化后的烧结工艺使轧辊热疲劳循环次数从2000次提升至5500次。

(四) 表面强化处理与性能提升

对轧辊工作表面进行复合强化处理，进一步提升服役性能：采用物理气相沉积(PVD)技术制备TiC-Al₂O₃复合涂层，涂层厚度为8μm，硬度达到HV3500，摩擦系数从0.18降至0.09，耐磨性提升60%^[11]；涂层后进行抛光处理，使表面粗糙度从Ra0.4μm降至Ra0.2μm，减少轧材表面划伤；对轧辊边部进行圆弧过渡处理，半径设置为R3mm，降低咬入阶段的应力集中，使崩裂率从10%降至1.5%。同时，建立完善材料性能检测体系，涵盖室温硬度、高温硬度(1000℃)、抗弯强度、冲击韧性、热疲劳寿命等全维度指标，确保每批次产品性能稳定。

三、材料研制实践与性能验证

(一) 小试与中试优化

小试阶段采用正交试验(L16(4⁵))优化成分与工艺参数，以硬度、抗弯强度、热疲劳寿命为核心评价指标，确定最优方案：WC粒度0.5μm，Co含量9%，Ni含量1.5%，Mo含量0.8%，VC+TaC复合抑制剂0.4%，烧结温度1350℃，压力30MPa^[12]。中试阶段(月产10支Φ500×1200mm轧辊)采用该优化方案进行生产，关键性能指标较传统产品提升显著：硬度达到HRC69，抗弯强度3350MPa，冲击韧性22J/cm²，热疲劳循环次数5800次，分别较传统产品提升10.3%、34%、83.3%、190%。中试产品经超声波探伤检测，内部无裂纹、孔隙等缺陷，组织均匀性偏差≤5%。

(二) 工业应用与成效对比

在某特钢企业Φ500mm优特钢棒材生产线进行了为期12个月的工业应用，采用研制的硬质合金轧辊轧制Φ100mm 42CrMo合金结构钢，并与传统高铬铸铁轧辊、进口硬质合金轧辊进行对比，结果如表1所示。研制的轧辊在使用寿命、轧材质量及综合成本方面均表现优异，其中使用寿命达到进口产品的85%，而采购成本仅为进口产品的40%。

应用期间，研制的轧辊累计轧制42CrMo钢3万吨，未出现崩裂、裂纹等失效现象，换辊次数从传统轧辊的每月15次降至每月2次，生产线有效作业率提升18%；轧材尺寸合格率从95%提升至99.5%，表面划伤率从8%降至0.5%，年创造直接经济效益超过2000万元。

表1 不同轧辊材料工业应用性能对比

性能指标	研制硬质合金轧辊	传统高铬铸铁轧辊	进口硬质合金轧辊
室温硬度	HRC69	HRC58	HRC70
抗弯强度 (MPa)	3350	1800	3500
使用寿命 (轧制吨数)	2500吨	400吨	3000吨
轧材尺寸精度	± 0.03mm	± 0.08mm	± 0.02mm
单支采购成本 (万元)	20	5	50
吨钢轧辊成本 (元/吨)	8.0	12.5	16.7

四、结论与展望

优特钢轧制关键硬质合金轧辊材料研制的核心在于突破耐磨性与韧性的性能矛盾、热稳定性不足及烧结致密化差三大技术瓶颈。通过“超细晶粒制备-粘结相改性-烧结工艺创新-表面强化”的一体化研制路径，成功解决了传统轧辊寿命短、易失效的问题。实践表明，研制的硬质合金轧辊材料硬度达到HRC68-70，抗弯强度超过3200MPa，使用寿命是传统轧辊的6倍，关键性能指标接近进口产品，且成本降低60%，为优特钢轧制核心材料国产化提供了可行方案。

未来研发可向三个方向深化：一是纳米复合强化，引入纳米TiN颗粒弥散强化WC-Co基体，进一步提升高温硬度与耐磨性；二是定制化研制，针对轴承钢、齿轮钢等不同优特钢品种，开发专用成分体系的轧辊材料；三是智能化生产，采用数字孪生技术模拟烧结过程中的组织演化，实现材料性能的精准预测与调控。同时，需加强产学研协同，推动轧辊材料与轧制工艺的深度融合，实现“材料-装备-工艺”的协同优化，助力我国优特钢产业向高端化、高效化转型。

参考文献

[1] 王国栋, 刘相华. 优特钢轧制技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2021.

[2] 中国钢铁工业协会. 2024年中国优特钢产业发展报告[R]. 北京: 冶金工业出版社, 2024.

[3] 李刚, 王芳. 进口与国产硬质合金轧辊性能对比及失效分析[J]. 钢铁, 2023, 58(7): 189-196.

[4] 张伟, 刘静. 硬质合金轧辊失效对优特钢生产的影响及对策[J]. 冶金设备, 2022(6): 56-61.

[5] 王强, 赵伟. WC-Co硬质合金耐磨性与韧性调控机制研究[J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41(4): 623-629.

[6] 陈静, 孙浩. 硬质合金轧辊热疲劳性能及改进措施[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(11): 135-141.

[7] 黄海波, 周丽. 真空热压烧结工艺对硬质合金轧辊致密化的影响[J]. 粉末冶金技术, 2023, 41(3): 215-221.

[8] 刘辉, 陈明. 超细WC粉末制备工艺优化及性能研究[J]. 稀有金属, 2023, 47(7): 987-994.

[9] 赵刚, 孙俪. Co-Ni-Mo粘结相对WC-Co硬质合金界面性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(7): 1987-1995.

[10] 陈晓峰, 王宇. 硬质合金轧辊分段烧结工艺研发[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(5): 45-50.

[11] 李娜, 王健. TiC-Al₂O₃复合涂层对硬质合金轧辊性能的提升作用[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 289-296.

[12] 张磊, 赵敏. 硬质合金轧辊材料正交试验优化设计[J]. 有色金属加工, 2023, 52(4): 34-39.