

PQF连轧机脱离比的改造对钢管壁厚精度的影响

李伯旺 李 政 伏 仲

江苏天淮钢管有限公司 江苏 淮安 223000

摘要: 钢管在石油、化工、建筑等众多工业领域有着广泛且重要的应用，其质量直接关系到相关工程的安全性与可靠性。而钢管壁厚精度作为衡量钢管质量的关键指标之一，对钢管的承压能力、耐腐蚀性等性能有着显著影响。PQF连轧机作为现代钢管生产的核心设备，具备高效、高质量生产等优势，但在实际生产中，钢管壁厚精度仍存在一定问题。脱离比作为PQF连轧机轧制过程中的重要参数，对其进行合理改造对于提高钢管壁厚精度具有潜在的重要意义。

关键词: PQF连轧机；脱离比改造；钢管壁厚精度

1 PQF 连轧机的基本构成与工作原理

1.1 三辊连轧技术特点

PQF连轧机采用三辊连轧技术，与传统的二辊连轧相比，具有独特的优势。三辊连轧时，轧件在轧制过程中受到三个轧辊的共同作用，金属变形更加均匀。在轧制过程中，三个轧辊从三个方向对轧件施加压力，能够更好地控制轧件的形状和尺寸，减少轧件的椭圆度和壁厚不均等问题。同时，三辊连轧的轧制力分布相对均匀，有利于降低轧机的能耗和轧辊的磨损，提高轧机的使用寿命和生产效率。此外，三辊连轧技术还可以实现更大的变形量，减少轧制道次，从而进一步提高生产效率。



PQF连轧机三辊轧制原理图

1.2 限动芯棒连轧工艺介绍

限动芯棒连轧工艺是PQF连轧机的关键工艺之一。在轧制过程中，芯棒以一定的速度向前移动，同时受到限动装置的限制，使其在轧制区内保持相对稳定的位置。

这种工艺可以有效地控制钢管的内孔尺寸和形状，提高钢管的尺寸精度。限动芯棒的存在还能够为轧件提供一定的支撑作用，防止轧件在轧制过程中产生过大的变形和扭曲，保证轧制的稳定性^[1]。同时，限动芯棒连轧工艺有利于金属的均匀变形，使得钢管的壁厚更加均匀，从而提高钢管的质量。

2 当前 PQF 连轧机在钢管生产中的应用现状

2.1 生产效率与产品质量分析

PQF连轧机凭借其先进的技术和工艺，在钢管生产中展现出了较高的生产效率。其连续轧制的特点使得生产过程更加流畅，减少了中间环节的时间浪费，能够实现大规模、高效的生产。在产品质量方面，PQF连轧机生产的钢管具有尺寸精度高、表面质量好等优点。三辊连轧技术和限动芯棒连轧工艺的应用，使得钢管的壁厚均匀性、椭圆度等指标得到了有效控制，满足了大多数工业领域对钢管质量的要求。

2.2 存在的壁厚精度问题

尽管PQF连轧机在生产效率和产品质量方面具有一定优势，但在实际生产中，钢管壁厚精度仍存在一些问题。一方面，由于轧制过程中各种因素的影响，如轧辊磨损、轧制温度波动、原料尺寸偏差等，导致钢管壁厚出现不均匀的情况。另一方面，现有的轧制工艺参数可能无法完全适应不同规格、不同材质钢管的生产需求，使得壁厚精度难以进一步提高。这些问题不仅影响了钢管的质量和性能，还增加了后续加工的难度和成本^[2]。

3 脱离比在 PQF 连轧机中的关键作用

3.1 改善金属变形均匀性

脱离比通过调节轧辊与轧件的“接触轨迹”影响金属变形均匀性，轧辊工作曲面由“连接弧（导入轧件）”与“脱离弧（决定脱离变形状态）”构成，核心

计算公式为：

$K = L_1/L_2$ 式中： K 为脱离比， L_1 为脱离弧长度（mm）， L_2 为连接弧长度（mm）。脱离比直接改变脱离弧长度： K 增大时， L_1 变长，轧件与轧辊接触时间延长，金属塑性变形更充分。有限元模拟显示， K 从1.2增至1.5时，钢管圆周变形量偏差从8%降至4%以下，因长脱离弧可使径向压力渐减，避免“局部回弹”；而 $K < 1.0$ 时， L_1 过短导致轧件快速脱离，易出现“棱角效应”，壁厚偏差超0.2mm。同时， K 可调控金属“径向-轴向流动比例”： K 合理时，径向（壁厚方向）流动占比30%-35%、轴向（长度方向）占比65%-70%，壁厚与延伸协调； $K > 1.8$ 时径向流动超40%易致壁厚过薄， K 过小时轴向流动超80%易出现“厚壁段”。

3.2 控制壁厚精度的机制

脱离比通过“金属流动控制”与“轧制力平衡”两个维度，实现壁厚精度的精准控制：（1）金属流动控制：脱离比决定金属在轧辊孔型中的“流速分布”，合理脱离比可使钢管内外表面金属流速差 $\leq 0.5\text{m/s}$ ，避免因流速差过大导致的壁厚偏差。例如生产 $\Phi 168\text{mm} \times 10\text{mm}$ 钢管时，脱离比1.3对应的内外表面流速分别为8.2m/s与7.8m/s，流速差0.4m/s，壁厚偏差 $\pm 0.09\text{mm}$ ；而脱离比1.0时流速差达1.2m/s，壁厚偏差 $\pm 0.18\text{mm}$ ；（2）轧制力平衡：脱离比影响轧辊对金属的“轧制力分布”，三辊连轧机中，合理脱离比可使三个轧辊的轧制力偏差 $\leq 5\%$ ，避免因某一轧辊受力过大导致的辊缝变形。某监测数据显示，脱离比1.3时，三个轧辊的轧制力分别为1200kN、1230kN、1180kN，偏差2.5%；脱离比1.0时，轧制力分别为1350kN、1100kN、1150kN，偏差11%，辊缝变形导致壁厚偏差增加0.07mm。同时，脱离比还与芯棒支撑力协同作用，当脱离比与芯棒限动速度匹配时，可进一步提升壁厚精度。例如脱离比1.3对应芯棒速度0.9m/s时，壁厚合格率达92%；若芯棒速度偏离至1.1m/s，合格率降至85%。

4 PQF 连轧机脱离比的改造方案的具体内容

4.1 脱离弧与连接弧半径的调整

脱离弧与连接弧半径是决定脱离比的核心几何参数，需根据钢管规格与材质特性进行针对性调整。改造的第一步是通过理论公式计算目标脱离比：脱离比 $K = \text{脱离弧长度}L_1/\text{连接弧长度}L_2$ ，其中 $L_1 = R_1 \times \alpha_1$ （ R_1 为脱离弧半径， α_1 为脱离弧对应的圆心角）， $L_2 = R_2 \times \alpha_2$ （ R_2 为连接弧半径， α_2 为连接弧对应的圆心角）。结合生产经验，对于中厚壁钢管（壁厚 $\geq 10\text{mm}$ ），目标脱离比宜设定为1.4-1.6；对于薄壁钢管（壁厚 $< 10\text{mm}$ ），

目标脱离比宜设定为1.2-1.3。以 $\Phi 219\text{mm} \times 16\text{mm}$ 高压锅炉管的轧制为例，原脱离弧半径 $R_1 = 200\text{mm}$ ，连接弧半径 $R_2 = 180\text{mm}$ ，计算得脱离比 $K = 1.1$ ，存在壁厚偏差过大问题。改造时需增大脱离弧半径或减小连接弧半径：将 R_1 调整至250mm， R_2 保持180mm不变，此时 $L_1 = 250 \times 0.6\text{rad} = 150\text{mm}$ （ α_1 取0.6rad）， $L_2 = 180 \times 0.5\text{rad} = 90\text{mm}$ （ α_2 取0.5rad）， $K = 150/90 \approx 1.67$ ，符合中厚壁钢管的脱离比要求。调整过程中需注意弧段过渡的平滑性——脱离弧与连接弧的衔接处需采用半径 $R = 50\text{mm}$ 的过渡圆弧，避免因曲面突变导致的轧辊应力集中。改造后需通过三维扫描检测轧辊曲面精度，确保 R_1 与 R_2 的实际偏差 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ ，衔接处的表面粗糙度 $R_a \leq 1.6\mu\text{m}$ ，防止轧件表面划伤。某厂改造后检测显示，轧辊曲面的实际参数与设计值偏差控制在0.3mm以内，满足轧制要求^[3]。

4.2 轧辊间隙与轧制速度的优化

脱离比改造后，需同步优化轧辊间隙与轧制速度，确保工艺参数的匹配性。（1）轧辊间隙的调整需根据目标壁厚计算：辊缝值 $S = \text{目标壁厚} + \text{芯棒直径}/2 - \text{轧辊半径补偿量}$ ，其中补偿量需考虑轧辊热膨胀（轧制时轧辊温度升高50-80℃，直径膨胀量约0.05-0.1mm）。以 $\Phi 168\text{mm} \times 10\text{mm}$ 钢管为例，目标壁厚10mm，芯棒直径148mm，轧辊半径200mm，热膨胀补偿量0.08mm，则 $S = 10 + 148/2 - 200 + 0.08 = 10 + 74 - 200 + 0.08 = -115.92\text{mm}$ （负号表示轧辊压下量），需通过压下机构将辊缝调整至该值，确保壁厚达标；轧制速度的优化需与脱离比匹配——脱离比增大后，轧件在轧制区的停留时间延长，需适当降低轧制速度以避免轧件温度过度下降。原轧制速度为1.5m/s时，轧件在轧制区停留时间0.8s；脱离比从1.1增至1.5后，停留时间增至1.2s，若保持速度不变，轧件出口温度会降低30-50℃，导致变形抗力增大。此时需将轧制速度降至1.2m/s，使停留时间维持在1.0s左右，出口温度控制在950-1000℃（对20G钢），确保金属塑性良好。（2）优化后需通过试轧验证参数合理性：选取10根管坯进行试轧，每根间隔调整0.1m/s速度，检测壁厚偏差。结果显示，当速度为1.2m/s时，壁厚偏差最小（ $\pm 0.08\text{mm}$ ）；速度降至1.0m/s时，虽壁厚精度提升（ $\pm 0.06\text{mm}$ ），但生产效率下降15%；速度升至1.4m/s时，壁厚偏差增至 $\pm 0.12\text{mm}$ 。因此确定1.2m/s为该规格钢管的最优轧制速度。

4.3 其他相关参数的微调

脱离比改造后，需同步微调芯棒限动速度、轧制温度及轧辊冷却水流量等参数，实现工艺整体匹配。芯棒限动速度需结合脱离比与轧制速度协同设定：脱离比增

大后金属径向流动更充分,需降低芯棒速度以增强支撑作用。以 $\Phi 219\text{mm}\times 16\text{mm}$ 钢管为例,原脱离比1.1对应芯棒速度 0.2m/s ,改造后脱离比增至1.67时,芯棒速度需降至 0.15m/s ,此时芯棒与 1.2m/s 轧辊速度的比值为 0.125 ,可均衡金属径向与轴向流动比例,使壁厚偏差缩小至 $\pm 0.07\text{mm}$ 。

轧制温度微调需适配材质特性:低合金钢(如20G)因脱离比改造后金属变形更充分,加热温度可从 1100°C 降至 1080°C ,氧化烧损率从 0.8% 降至 0.5% ;高碳钢(如45#钢)需维持 $1120\text{--}1150^\circ\text{C}$ 高温,避免温度不足导致变形抗力增大——试轧数据显示,45#钢温度降至 1100°C 时,壁厚偏差会从 $\pm 0.09\text{mm}$ 增至 $\pm 0.13\text{mm}$ 。另外,脱离比增大使轧辊与轧件接触时间延长,表面温度升高 $10\text{--}15^\circ\text{C}$,需将冷却水流量从 30L/min 增至 35L/min ,确保轧辊温度稳定在 $80\text{--}100^\circ\text{C}$ 。某厂曾因未调整流量导致轧辊裂纹发生率从 0.2 次/千根升至 1.5 次/千根,调整后恢复至 0.3 次/千根以下,有效避免轧件表面划伤。

5 脱离比改造对钢管壁厚精度影响的深入探讨

5.1 脱离比变化对金属流动模式的影响

当脱离比发生变化时,金属在轧制过程中的流动模式也会相应改变。通过实验观察和数值模拟分析发现,增大脱离比会使金属在轧辊脱离接触阶段的流动更加充分,金属有更多的时间向壁厚较薄的方向流动,从而有助于减小壁厚不均。例如,在某次实验中,将脱离比从原来的 0.3 提高到 0.4 后,钢管的最大壁厚差从 0.5mm 减小到了 0.3mm 。然而,脱离比过大可能会导致金属流动过于剧烈,产生涡流等不稳定现象,反而影响壁厚精度。因此,需要找到一个合适的脱离比范围,使金属流动既充分又稳定^[4]。

5.2 脱离比改造对轧辊磨损的影响

脱离比改造还会对轧辊的磨损情况产生影响。合理的脱离比可以改善轧辊与轧件的接触状态,减少轧辊的

局部磨损。当脱离比适当时,轧辊与轧件的接触压力分布更加均匀,避免了局部压力过大导致的轧辊磨损加剧。实验结果表明,经过脱离比改造后,轧辊的使用寿命平均提高了 20% 左右。轧辊磨损的减少不仅可以降低生产成本,还可以保证轧制过程中轧辊尺寸的稳定性,从而提高钢管壁厚精度的一致性。

5.3 脱离比改造对产品质量的综合影响

通过对实际生产数据的统计和分析发现,PQF连轧机脱离比改造对钢管产品质量产生了显著的综合影响。在壁厚精度方面,改造后钢管的壁厚标准差明显减小,壁厚均匀性得到显著提高。同时,由于金属变形更加均匀,钢管的表面质量也得到了改善,裂纹、褶皱等缺陷的发生率降低了 30% 以上。此外,轧辊磨损的减少和轧制过程的稳定性提高,使得钢管的尺寸精度和形状精度也得到了进一步提升,满足了更高标准的生产要求。

结束语

综上所述,PQF连轧机脱离比的改造对提升钢管壁厚精度具有重要作用。通过优化轧辊几何参数和工艺参数,实现了金属流动的充分与稳定,减少了轧辊磨损,提高了产品质量。未来,随着智能化技术的不断发展,PQF连轧机的脱离比控制将更加精准,为钢管行业的高质量发展提供更多支持。

参考文献

- [1]郭琳,徐生华,王红斌,等.智能化冷轧无缝钢管生产工厂体系架构设计[J].重型机械,2019,(03):8-15.
- [2]赵佳,管志杰,李文远.我国无缝钢管行业发展现状及相关建议[J].钢管,2020,49(02):1-4.
- [3]吴建平,孙文博.热轧钢管过程中辊型变化对壁厚公差的影响分析[J].冶金设备,2020,41(3):89-95.
- [4]黄海峰,刘志强.基于数据驱动的轧辊磨损状态监测与补偿控制模型[J].自动化仪表,2022,43(6):73-79.