引用格式:王艳芝,刘昀鑫,王帅,等. 油套管特殊螺纹密封性能的数值模拟研究[J]. 延安大学学报(自然科学版),2026,45(3):62-69. [WANG Y Z, LIU Y X, WANG S, et al. Numerical simulation on the sealing performance of special threads for oil casing[J]. Journal of Yan'an University(Natural Science Edition),2026,45(3):62-69.] **DOI**:10.13876/J.cnki.ydnse.250152

油套管特殊螺纹密封性能的数值模拟研究

王艳芝[1,3],刘昀鑫[1],王　帅[1,3*],李思雨[1],苏小东[2],黄岩岗[2]

(1. 延安大学 石油工程与环境工程学院,陕西 延安 716000;2. 延安嘉盛石油机械有限责任公司,陕西 延安 716004;3. 延安市油气高效管输与流动保障工程技术研究中心,陕西 延安 716000)

摘　要:随着油气勘探开发向复杂地质环境延伸,井下管柱密封完整性面临严峻挑战。套管特殊螺纹接头是管柱连接的关键易失效部位,本文基于ANSYS Workbench分析了载荷与结构参数对其密封性能的影响,为极端工况结构优化提供依据。结果表明,基准复合工况下,外压载荷升高可使密封面接触压力与密封指数显著提高;温度超过90 ℃后,材料热膨胀效应可显著提升密封面接触压力与密封性能;轴向拉伸载荷可提高密封面压紧程度与密封指数,但载荷超过40 kN后易导致螺纹根部发生局部塑性变形;主密封接触面长度、台肩厚度增加可同步提升密封指数,台肩角度在-5°至-15°区间内对密封性能影响较小。实际极端工况中,可通过增加主密封接触面长度、适当增大台肩厚度,提升接头抗泄漏能力与结构稳定性,降低密封失效引发的油气损失与生产风险。

关键词:特殊螺纹接头;密封性能;复合载荷;有限元分析;参数优化

中图分类号:TE931　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1004-602X(2026)03-0062-08

随着中国非常规油气勘探开发持续深入,陕北核心开发区块井下高温、高压、高载荷耦合的极端工况,对套管柱的密封完整性与服役安全性提出了严苛要求。套管柱作为井筒核心屏障,其密封可靠性直接决定油气井安全生产周期,是非常规油气开发必须解决的核心工程问题[1]。

套管特殊螺纹接头是套管柱连接的核心易失效部位,其密封可靠性与结构优化一直是行业研究重点。在基础理论研究方面,HILBERT等[2]率先采用二维轴对称有限元模型,验证了数值模拟方法用于接头应力分析的可行性;BRADLEY等[3]聚焦高温高压严苛工况,系统阐述了特殊螺纹的设计准则与密封机制;张颖等[4]通过实验手段,揭示了高温下材料蠕变与应力松弛导致密封接触压力衰减的核心规律。在密封性能优化研究方面,行业已形成从整体结构验证到局部参数优化、再到新型构型创新的成熟研究脉络。TAKANO等[5]开发了KSBEAR型特殊螺纹接头,通过实验与数值分析验证了其极端载荷下的密封可靠性;王轲[6]、刘源等[7]揭示了复合载荷削弱密封界面完整性的作用机理,为局部参数优化明确了核心方向。在此基础上,学者们针对接头局部关键参数形成了系统的量化优化方法。刘源等[8]通过参数化分析,明确了较小的螺纹承载面角度可有效控制复合载荷下的塑性变形,提升接头密封稳定性;王领等[9]量化了密封面过盈量与多工况的耦合作用关系,发现0.09 mm的密封面过盈量可有效抵消外部载荷引起的密封面分离,维持接触压力稳定分布;黎文奇

收稿日期:2025-12-25

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2024QY2-GJHX-47);陕西省教育厅重点科学研究计划项目(24JR168);延安市科技计划项目(2024-QYL-009);延安大学自然科学揭榜挂帅项目(2023JBZR-019)

作者简介:王艳芝(1991—),女,讲师,博士,主要从事油气田集输及多相流动数值模拟研究。

*通信作者　E-mail:wangs2009@163.com

等[10]验证了偏梯形螺纹结合双台肩结构可通过载荷分担效应降低应力集中，显著改善接头密封性能。唐家睿等[11]提出的锥面-球面复合密封结构，为极端工况下的密封构型创新提供了新思路。现有研究多聚焦于常规油气井工况，针对陕北非常规油气井极端耦合工况的系统量化分析仍存在明显不足，无法为现场接头优化与选型提供充分的理论支撑。

针对上述工程需求与研究缺口，本文以Φ177.80×9.19 mm N80钢级套管特殊螺纹接头为研究对象，基于ANSYS Workbench建立有限元模型，系统分析多载荷对密封性能的影响规律，量化关键结构参数的敏感性，基于密封指数准则完成极端工况适配的结构优化，研究成果可为现场接头选型与优化提供理论依据。

1　有限元模型及参数设置

1.1　几何模型与材料参数

假设套管与接箍材料被视为均匀、连续且各向同性的弹塑性体；轴对称结构简化：由于螺纹螺旋升角很小，其影响忽略不计，将三维螺旋接头结构简化为二维轴对称模型进行分析。因油气藏通常需要大规模水力压裂，其中压裂压力可达60~100 MPa，且储层非均质性强套管需承受交变载荷和高压冲击，所以选用油套管特殊螺纹接头规格为Φ177.80×9.19 mm。采用Workbench软件进行几何建模，密封面采用锥面-锥面密封，扭矩台肩采用-15°的逆向台肩形式，管体外螺纹、接箍内螺纹及接头密封结构的核心几何参数如表1所示。接头完整的二维轴对称几何模型见增强出版附件1中图1。

表1　特殊螺纹接头主要几何参数

几何参数	承载面角度/°	导向面角度/°	齿高/mm	螺距/mm	锥度	密封面角度/°	扭矩台肩角度/°
管体外螺纹	-3	10	1.775	5.08	1∶16	20	-15
管体内螺纹	-3	10	1.575	5.08	1∶16	20	-15

本研究选用N80钢作为套管与接箍材料，其屈服强度范围为552~758 MPa，抗拉伸强度为689 MPa，弹性模量为210 GPa，泊松比为0.3，密度为7 850 kg·m^{-3}，热膨胀系数为1.02×10^{-5} ℃$^{-1}$。

1.2　网格划分及无关性验证

为确保有限元模型的精度与计算效率，采用四边形轴对称单元对几何模型进行网格离散化[12-13]，考虑到螺纹牙型、密封面及扭矩台肩等部位的几何特征复杂且应力集中明显，对这些区域进行了局部网格细化处理，网格划分完整结果见增强出版附件1中图2。同时给螺纹牙进行编号，靠近油套管密封面和扭矩台肩的螺纹编号为1，接箍和管体共标记11个螺纹牙，见增强出版附件1中图1。

在网格无关性验证中，设置了7种不同网格密度方案开展对比分析，结果显示：当网格节点数达到46 200时，150 MPa外压载荷作用下的最大等效应力计算结果为661.21 MPa；继续增加网格密度至69 853个节点时，计算结果为658.49 MPa，两者差异仅为0.41%，表明网格节点数达到46 200时，已完全满足本文的计算精度要求。7组方案的完整对比结果见增强出版附件1中图3。

1.3　求解条件与边界设置

本研究采用基于弹塑性理论的静力学有限元方法进行求解，并激活大变形几何非线性选项。将接触非线性作为分析的关键，所有螺纹啮合面及密封接触对均定义为面与面接触并采用库仑摩擦模型描述界面切向行为，摩擦系数依据API推荐的螺纹脂特性取为0.02。在求解过程中考虑了材料非线性，采用Newton-Raphson迭代法。边界条件的设置严格依据实际井下复合载荷工况设定：在接箍端轴向对称面中施加固定支撑，以模拟其在井下的固定约束，以均布压力形式施加于管体端横截面的轴向载荷，以均布径向压力作用于管体与接箍外表面对应的外压载荷，以及在模型全域施加均匀温度场以模拟井下热环境的温度载荷。

1.4　模型可靠性验证

本研究将30 kN轴向拉伸载荷下的应力分布规律与已有研究结论进行对比，崔丽芬[14]通过建立螺纹接头的三维有限元模型分析证实，轴向载荷下螺纹接头的应力集中主要发生于螺纹末端啮合区，最大应力位于末端螺纹牙的牙根部位。本文模型在同等工况下的计算结果显示，应力集中区域位于管体编号11的螺纹牙根处，且该位置为最大等效应力点，应力分布特征与已有研究结论完全一致，充分验证了本文模型的合理性。对应工况下的等效应力云图补充展示见增强出版附件1中图4。

2 温度、外压、轴向拉伸载荷对密封性能的影响

本研究采用金属-金属接触的密封结构,其密封有效性从根本上依赖于密封界面能否在复杂载荷下维持稳定且充分的接触。流体通过密封面的泄漏本质是克服流动阻力的过程,该阻力主要取决于泄漏通道的几何特征[15]。因此,要实现可靠密封必须满足两个核心条件:接触压力足够大,即极高的界面压力可使接触表面的微观不平处产生塑性变形实现紧密贴合,从而显著减小泄漏通道的截面积增大流体通过的局部阻力;同时接触面积足够大,足够长的密封接触路径能够有效延长流体的泄漏长度,使流动阻力沿程累积进一步阻止泄漏的发生。基于上述密封原理,为量化评价密封性能,引入密封指数(M)作为评价指标[16],其定义为密封面法向接触压力沿有效接触长度的积分,计算公式为式(1)。

$$M = \int_0^{L_e} p(x)\mathrm{d}x, \tag{1}$$

其中,$p(x)$为密封面沿接触长度方向x位置处的法向接触压力(MPa),L_e为接触面的有效接触长度(mm),x为密封面接触长度方向的积分变量(mm)。工程经验表明,当M>2.0时,接头具有可靠的密封性能;当M<1.0时,泄漏风险较高。

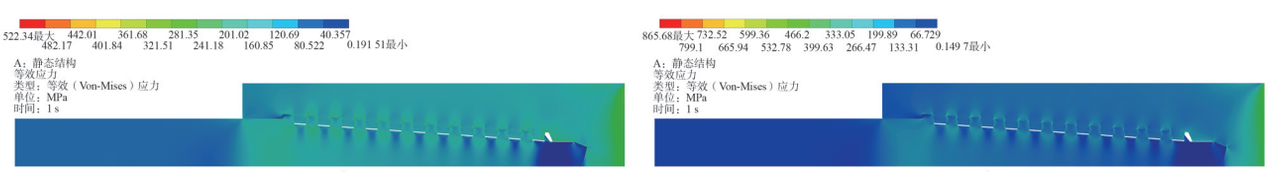
基于实际井下工况,并参考中国典型油气开发区块鄂尔多斯盆地致密油的实测工程数据,建立温度-外压-轴向拉伸复合载荷环境来分析各载荷分量对密封性能的影响。设定基准工况为:温度100 ℃、外压载荷100 MPa、轴向拉伸载荷20 kN,表2为本研究采用的三组不同的复合载荷工况。为明晰各载荷因素的独立影响机制,本节采用控制变量法,在复合载荷基础上依次分析单一变量变化对密封性能的影响规律。通过计算不同工况接头下的接触压力分布,根据密封指数是否大于临界值2.0来判断密封可靠性;同时通过计算接头最大等效应力是否超过N80的钢屈服强度来判断结构的完整性。

表2 复合载荷工况设计

载荷类型	外压载荷/MPa	轴向拉伸载荷/kN	温度/℃
温度载荷组	100	20	20~120
外压载荷组	20~120	20	100
轴向拉伸载荷组	100	20~80	100

2.1 温度

在保持外压载荷100 MPa、轴向拉伸载荷20 kN恒定不变的条件下,研究温度从20 ℃升高至120 ℃对套管接头密封性能的影响,共设置7组温度梯度:22 ℃、50 ℃、80 ℃、90 ℃、100 ℃、110 ℃、120 ℃。如图1所示,当温度为90 ℃时,接头最大等效应力为522.34 MPa,危险位置位于接箍11号螺纹牙根处,整体应力分布均匀,无塑性变形风险;当温度为120 ℃,接头的最大等效应力为865.68 MPa,接头危险位置从接箍11号螺纹牙根转移至接箍母端中面顶点。这一位置转移的核心机理:温度升高导致接箍与管体产生不均匀的热膨胀,而接箍端部受到轴向固定的约束,从而在接箍母端中面产生显著的轴向拉应力,密封面接触压力同步升高,载荷的传递路径从螺纹啮合传递转变为密封面及接箍本体的直接承载,因此接箍母端中面顶点成为新的应力集中点。最大等效应力随温度的变化趋势曲线见增强出版附件1中图5。结果分析可知,随着温度从90 ℃升高至120 ℃,接头最大等效应力从593.12 MPa逐步增大至865.68 MPa,整体呈现随温度升高显著增大的变化趋势;密封指数从2.42提升至2.56,均大于2.0的密封可靠临界阈值,高温可通过热膨胀效应提升密封面压紧程度与密封性能,但局部塑性变形对接头长期服役可靠性构成潜在危险。



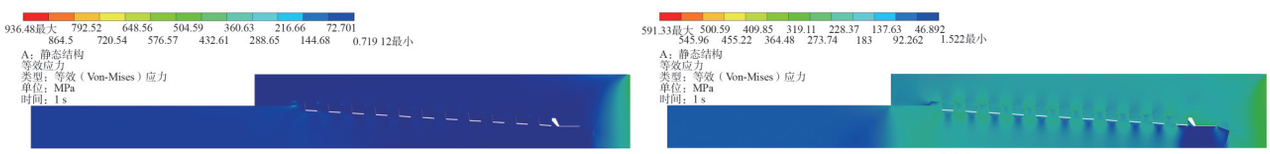
A. 90 ℃ B. 120 ℃

图1 不同温度复合载荷下等效应力云图

2.2 外压载荷

在100℃温度与20 kN轴向拉伸载荷恒定条件下,研究外压载荷从20 MPa逐步增至120 MPa对套管接头密封性能的影响,并设置5组外压载荷:20、50、80、100、120 MPa。如图2所示,在20 MPa外压载荷下接头最大等效应力为936.48 MPa,位于接箍母端中面顶点且已进入塑性变形阶段,当外压载荷显著增至120 MPa时,最大等效应力降至591.33 MPa,

虽仍高于N80钢的屈服强度下限(532 MPa)，但塑性变形区域显著缩小，接头整体应力分布更均匀，同时危险位置从接箍母端中面顶点转移至接箍11号螺纹牙根。这种转移是因为外压载荷的增大使管体与接箍发生径向压缩变形，极大地增强了整个螺纹啮合区的法向接触紧密度，从而使载荷传递路径重新以螺纹的剪切承载为主导。且因受螺纹连接自身载荷分配特性的影响，处于传递路径末端的11号螺纹的牙根区域仍会承担更高的载荷。此时管体与接箍应力虽有所上升，但仍低于N80钢的屈服强度上限(758 MPa)，无结构失效风险。最大等效应力随外压的完整变化曲线补充展示见增强出版附件1中图6。可知随着外压载荷从20 MPa升高至120 MPa，接头最大等效应力从936.48 MPa降至591.33 MPa，整体呈现随外压增大而显著降低的变化趋势。这一规律表明，基准复合工况下，增大外压不仅可有效降低接头应力集中、抑制局部塑性变形，还可使密封面接触压力与密封指数显著提高。

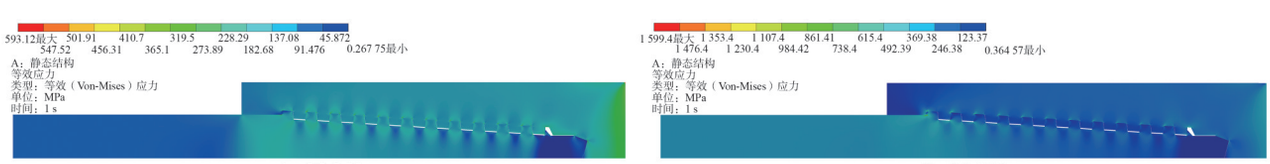


A. 20 MPa　　B. 120 MPa

图2　不同外压复合载荷下等效应力云图

2.3　轴向拉伸载荷

在温度100 ℃、外压载荷100 MPa恒定的工况下，研究轴向拉伸载荷(20~80 kN)对套管接头性能的影响，共设置5组轴向拉伸载荷：20、40、50、60、80 kN。如图3所示，在20 kN轴向拉伸载荷时，最大等效应力为593.12 MPa，已超过N80钢的屈服强度下限，接箍母端中面顶点处出现初始局部塑性变形；当轴向拉伸载荷增至80 kN时，最大等效应力急剧升高至1 599.4 MPa，危险位置从接箍母端转移至管体末端螺纹牙根区域。这一转移是因为随着拉伸载荷的增加，载荷必须通过螺纹齿面进行传递，而螺纹连接固有的载荷分配不均匀使得11号螺纹牙承受的轴向拉力最为集中。因此，该区域有局部塑性变形的风险。最大等效应力随轴向拉伸载荷的完整变化曲线补充展示见增强出版附件1中图7。随着轴向拉伸载荷从20 kN逐步增大至80 kN，接头最大等效应力从593.12 MPa急剧升高至1 599.4 MPa，整体呈现随轴向拉伸载荷增大而显著升高的变化趋势。尽管轴向拉伸载荷从20 kN增至80 kN时，密封指数M从2.48提升至2.61，全区间内M均高于2.0的密封可靠临界阈值，虽然较高轴向拉伸有助于提升密封面压紧程度，但由此引发的极高局部应力会导致螺纹根部进入塑性变形阶段，对结构的长期密封完整性构成潜在威胁。



A. 20 kN　　B. 80 kN

图3　不同轴向拉伸复合载荷下等效应力云图

3　螺纹结构参数对密封性能的影响

本研究为提升特殊螺纹接头在高温、高压、高轴向拉伸复合载荷工况下的密封可靠性，基于锥面-锥面主密封结构，选取对密封性能具有直接影响的三个几何参数：主密封接触面长度、逆向台肩角度、台肩厚度[17]。并在基准工况下，分析各参数单独变化对主密封面接触压力分布及综合密封指数M的影响规律[18]。

3.1　接触面长度

本研究选取了2.423 0、2.598 8和2.967 5 mm三种接触面长度，分析其对主密封面接触压力的影响。如图4所示，在相同复合载荷下，三种不同接触面长度的主密封面接触压力整体分布形态相似，都呈现为起点向终点单调递增，但具体的接触压力值存在差异，终点接触压力分别为380.78、401.30和385.47 MPa。2.423 0、2.598 8和2.967 5 m的接触长度对应的密封指数分别为2.025 4、2.180 3和2.478 3。结果均满足M>2.0的工程安全阈值要求。数据表明，密封指数随主密封接触面长度增加显著提升，长度从2.423 mm增至2.967 5 mm，增幅22.5%时，M值相应从2.025 4提高至2.478 3，增幅22.4%，呈现

近似线性的强正相关关系。基于上述分析该线性正相关关系的适用区间约为 2.4 mm 至 3.0 mm。因此在 2.4 mm 至 3.0 mm 区间内增加主密封接触面长度,可将接头密封指数 M 稳定维持在 2.0 以上,是提升接头密封指数的核心优化方向,其核心机理在于更长的接触路径能极大增加流体泄漏阻力,从而提升密封可靠性。

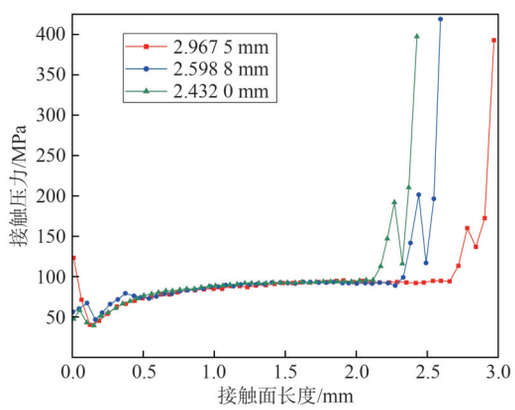


图 4 不同接触面长度下接触压力分布图

3.2 台肩角度

本研究选取 −5°、−10°和 −15°三种台肩角度,分析其对主密封面接触压力的影响规律。三种台肩角度下的接触压力分布曲线补充展示见增强出版附件 1 中图 8,结果显示,三种角度下主密封面的接触压力分布形态高度一致,均呈现起点高、中间略低、终点最高的特征;−5°、−10°和 −15°不同角度对应的密封指数分别为 2.450 8、2.471 5 和 2.478 3,所有结果均满足 M>2.0 的工程安全阈值要求。数据对比表明,随着逆向台肩角度从 −5°负向增大至 −15°,密封指数虽呈轻微增加趋势,但最小值 2.450 8 与最大值 2.478 3 仅相差约 0.027 5,波动幅度不足 1.1%,说明逆向台肩在 −5°至 −15°区间内的变化,对接头整体密封性能影响甚微,可视为非敏感性参数。在该台肩角度范围内的接头设计选型中,可基于加工工艺和力学性能要求灵活选取。

3.3 台肩厚度

本研究选取 3.257 8、3.448 4 和 3.724 6 mm 三种台肩厚度,分析其对主密封面接触压力的影响。如图 5 所示,台肩厚度对主密封面接触压力分布形态的影响较为明显,当厚度为 3.724 6、3.448 4 mm 时,接触压力分布曲线相似,都呈现两端高、中间低的特征;而当厚度减小至 3.257 8 mm 时,接触压力分布曲线发生显著变化,起点与终点的压力峰值降低,中间区域的接触压力相对升高分布趋于平缓。三种厚度对应的密封指数分别为 2.456 5、2.474 8 和 2.478 3,均满足密封要求。数据表明,随着台肩厚度增加,密封指数呈现轻微的上升趋势。厚度从 3.257 8 mm 增加至 3.724 6 mm 增幅约 14.3% 时,密封指数从 2.456 5 提升至 2.478 3 增幅约 0.9%。尽管提升幅度有限,但其趋势表明,较厚的台肩因具备更高的局部刚度,能在复合载荷下更好地维持主密封面设计的接触状态,保障密封指数 M 稳定在 2.0 以上,从而有助于密封界面的稳定。

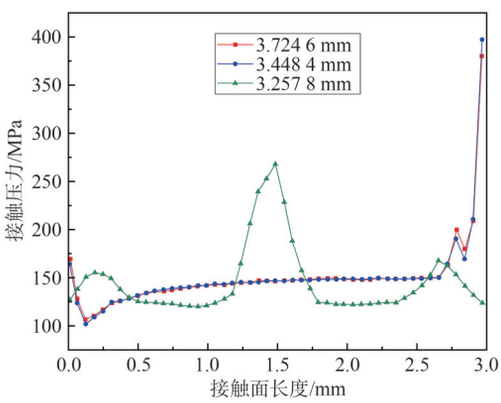


图 5 不同台肩厚度下接触压力分布图

4 套管特殊螺纹优化设计

基于上述研究,本文集成优化参数形成最优的一组特殊螺纹密封面参数组合:接触面长度 2.967 5 mm,密封面角度 20°,扭矩台肩角度 −15°,扭矩台肩厚度 3.724 6 mm。基于上述优化参数组合并结合表 1 中的螺纹牙参数,最终设计出特殊螺纹的几何结构。

4.1 基于接触压力分布的密封稳定性分析

本研究为系统评估优化设计后特殊螺纹接头的密封可靠性,基于接触压力分布对其稳定性进行验证[19]。为量化验证优化方案的实际提升效果,将优化后结构与本文初始基准模型在统一基准复合工况下进行核心性能对标,对比结果如表 3 所示。

表 3 基准复合工况下初始结构与优化后结构密封性能对比

密封性能指标	原结构	优化后结构	优化提升幅度/%
密封指数 M	2.025 4	2.478 3	+22.4
接头最大等效应力/MPa	593.12	551.8	−6.97

从密封性能方面来看,优化前后结构的密封指数均满足 M>2.0 的密封可靠临界要求,优化后结构

的密封指数较原结构提升 22.4%，综合密封能力显著增强；从结构安全方面来看，优化后结构的最大等效应力降至N80钢552 MPa的屈服强度下限以下，消除了原结构在基准工况下存在的初始局部塑性变形风险，接头长期服役的结构安全性显著提升。

在此基础上，采用控制变量法，在基准复合载荷基础上，依次将轴向拉伸载荷、外压载荷和温度提升至极端水平，分析密封面接触压力的变化规律与密封指数变化规律。在固定温度与压力条件下，将轴向拉伸载荷由 20 kN 逐步提高至 300 kN，接触压力分布结果如图 6A 所示，随着拉伸载荷增加，密封面整体接触压力持续上升，当载荷超过 100 kN 后，接触压力最低点从密封面 0.1 mm 处转向 2.85 mm 处，在 300 kN 极端拉伸下，最大接触压力仍达 618.55 MPa，对应密封指数 M 为 2.49，仅从密封接触状态来看，接头仍具备短期密封能力；但此时螺纹根部最大等效应力远超材料屈服强度，已发生严重塑性变形，长期服役过程中可能发生应力松弛，导致密封面接触压力随时间逐渐衰减，对整体结构完整性与长期密封可靠性构成威胁。保持温度与轴向载荷不变，将外压载荷由 100 MPa 增至 250 MPa，如图 6B 所示，接触压力随外压载荷协同增长且分布形态一致，说明高压在界面诱发均匀附加应力，使接头在 20~250 MPa 外压范围内的密封指数均大于 2.0 可保证接头可靠密封。保持外压和轴向拉伸载荷不变，将温度从 100 ℃提升至 250 ℃，如图 6C 所示，随着温度升高，材料热膨胀效应加剧，密封面最大接触压力与接触面长度围成的面积增加，密封指数仍保持小幅增长，表明接头在高温下能维持并增强整体密封效能。

上述分析表明，优化后的特殊螺纹接头在轴向拉伸、外压与高温三类极端复合载荷下，其应力分布呈现显著的区域化特征：尽管螺纹根部等非密封区域因应力集中可能进入塑性状态，但承担核心密封功能的主密封面及扭矩台肩等关键区域的等效应力始终低于 N80 钢屈服强度下限 552 MPa，因此该结构处于弹性安全范围内。

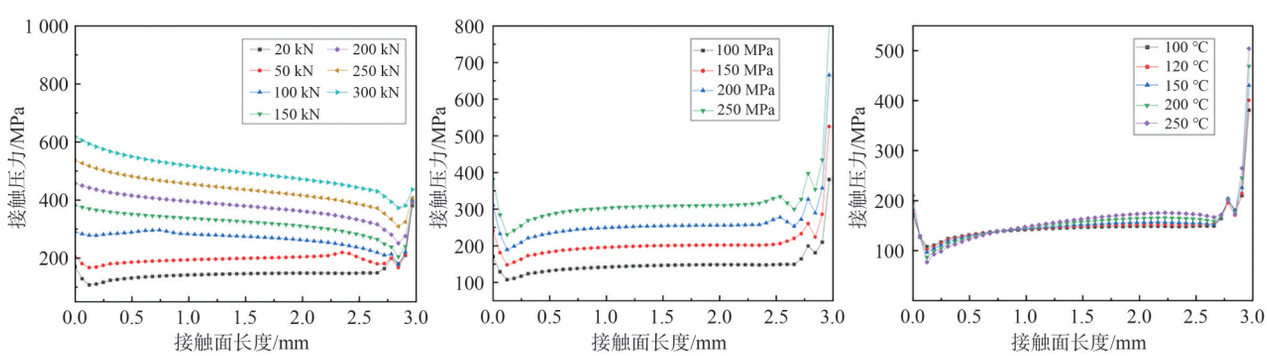
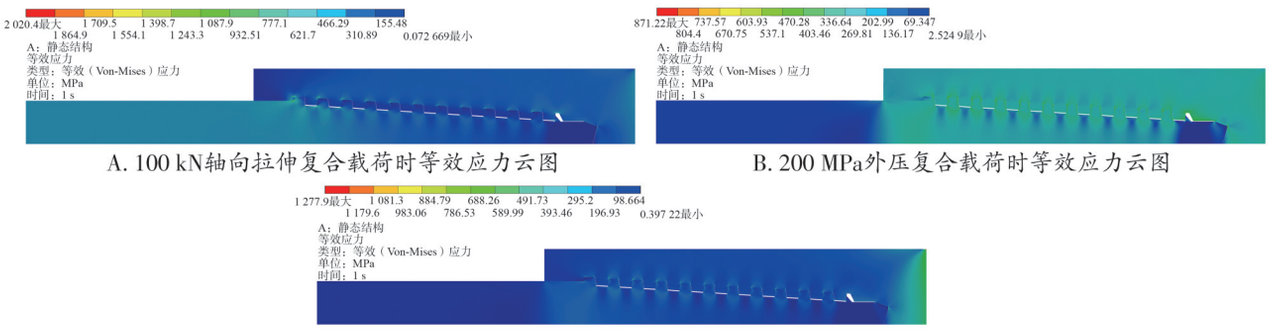


图6　不同轴向拉伸(A)、外压(B)和温度(C)复合载荷下接触压力分布图

4.2　基于等效应力分布的结构可靠性分析

本研究为评估优化后螺纹接头在极端载荷下的密封结构可靠性，基于等效应力云图对其结构完整性进行分析。在基准复合载荷基础上，分别研究接头在高轴向拉伸、高外压与高温极端载荷工况下的应力集中行为与塑性形变趋势。当轴向拉伸载荷增至100 kN时，如图7A所示，接头最大等效应力急剧上升至2 020.4 MPa，远超N80钢屈服强度758 MPa，应力集中主要出现在管体末端螺纹牙根区域，成为塑性变形的潜在起始点，尽管管体应力水平均低于材料屈服强度，但主密封功能区密封指数 M 大于2.0，因此判定该主密封功能区仍具有密封性。当外压载荷提升至 200 MPa 时，如图 7B 所示，最大等效应力达到 877.22 MPa 并超出 N80 钢的屈服极限，此时接箍末端螺纹牙根部出现应力集中的现象，而密封面及邻近结构应力水平仍显著低于屈服强度，表明高压下接头可通过局部应力重分布维持整体完整性与密封功能。将温度升高至 150 ℃后，如图 7C 所示，接头最大等效应力进一步增至 1 277.9 MPa，集中于管体与接箍的螺纹牙根区域，热膨胀虽加剧局部屈服风险，但接箍和管体应力水平均很低，主密封区域应力始终处于安全范围。

总的来说，优化后的特殊螺纹接头在不同类型的极端载荷作用下，尽管轴向拉伸、外压与高温均会诱发螺纹根部等非关键区域的显著应力集中乃至局部塑性变形，但承担核心密封功能的接触面、扭矩台肩及邻近本体结构始终维持在弹性安全范围内。



A. 100 kN轴向拉伸复合载荷时等效应力云图　　B. 200 MPa外压复合载荷时等效应力云图

C. 150 ℃复合载荷时等效应力云图

图7　优化螺纹的结构完整性

5　结论

1)基准复合工况下,外压载荷的增大能稳定提升密封面接触压力并改善整体应力分布;温度超过90 ℃后材料热膨胀效应显著增强密封界面紧密性,但同时引发局部塑性状态;轴向拉伸载荷虽可提高密封面压紧程度,但载荷超过40 kN后螺纹根部塑性变形风险急剧上升。对实际油气井中处于运行状态的套管柱接头螺纹,工程师可优先利用外压载荷的增强效应,并将轴向拉伸载荷控制在40 kN以下,以实现密封性能与结构安全的平衡。

2)螺纹结构参数敏感性分析表明,密封面接触长度是影响密封性能的核心参数,在2.4 mm至3.0 mm范围内其与密封指数呈近似线性正相关;台肩角度在-5°至-15°区间内对密封性能影响微弱;台肩厚度增加可通过提高局部刚度来增强密封稳定性。在特殊螺纹优化的工程设计中应以增长密封接触长度为主导,同时适当增加台肩厚度,来实现整体性能的优化。

3)优化后的特殊螺纹接头在极端复合载荷下螺纹根部等非密封区域可能发生局部塑性变形,但主密封面接触压力始终处于弹性范围且密封指数大于2.0,表明整体密封功能不受影响。据此,在实际井下对特殊螺纹密封性可靠性的工程评价应以主密封面应力低于材料屈服强度为关键判据,且允许螺纹根部等非关键区域发生可控塑性变形,从而合理判定接头在长期复杂载荷下的密封可靠性。

特别提醒:本文的附件材料见知网增强出版附件。

参考文献:

[1]闫建平,来思俣,郭伟,等.页岩气井地质工程套管变形类型及影响因素研究进展[J].岩性油气藏,2024,36(5):1-14.

[2]HILBERT L B Jr, KALIL I A. Evaluation of premium threaded connections using finite-element analysis and full-scale testing[C]//IADC/SPE Drilling Conference. February 18-21, 1992. OrleansNew, Louisiana. Richardson: Society of Petroleum Engineers,1992:SPE 23904-MS.

[3]BRADLEY A B, NAGASAKU S, VERGER E. Premium connection design, testing, and installation for HPHT sour wells[C]//SPE High Pressure/High Temperature Sour Well Design Applied Technology Workshop. May 17-19, 2005. The Woodlands, Texas. Richardson: Society of Petroleum Engineers,2005:SPE 97585-MS.

[4]张颖,练章华,周谧,等.油套管特殊螺纹密封面接触应力松弛行为研究[J].应用力学学报,2019,36(6):1355-1361+1521.

[5]TAKANO J,YAMAGUCHI M,KUNISHIGE H. Development of premium connection "KSBEAR" for withstanding high compression, high external pressure, and severe bending[J]. Kawasaki Steel Technical Report,2002,47:14-22.

[6]王轲.特殊螺纹油管接头密封性能评价及上扣扭矩控制技术研究[D].西安:西安石油大学,2015.

[7]刘源,纪爱敏,李堑,等.油套管特殊螺纹接头密封性能的有限元分析[J].机械设计与制造工程,2017,46(6):21-24.

[8]刘源,纪爱敏,李堑,等.特殊螺纹接头参数对套管连接性能影响的有限元分析[J].机械与电子,2017,35(2):3-8+12.

[9]王领,袁浩,张文星,等.HST特殊螺纹油套管力学与密封性能有限元分析[J].中国海洋平台,2024,39(1):97-102.

[10]黎文奇,刘洋,管锋,等.复合载荷下小尺寸高强度钻杆螺纹的优化设计与研究[J].塑性工程学报,2025,32(8):248-259.

[11]唐家睿,陈鸥,苑清英,等.高温高压气井用油管特殊螺纹接头密封性能研究[J].焊管,2025(48):54-60+67.

[12]王帅,杨成功,周海,等.T型天然气管道掺氢输送流动特性数值模拟研究[J].延安大学学报(自然科学版),2023,42(4):1-8.

[13]蒙炳坤,田苗苗,高歌阳,等.基于数值模拟的埋地天然

气管道泄漏扩散规律研究[J]. 延安大学学报(自然科学版),2026,45(1):38-43.
[14]崔丽芬. 基于ANSYS的螺杆钻具螺纹优化设计[J]. 西安石油大学学报,2019,34(6):88-92+125.
[15]程晓峰. 螺纹参数误差对钻杆接头密封性的影响分析[J]. 石油机械,2024,52(9):1001-4578.
[16]汪强,唐家睿,苑清英,等. Φ177.8 mm BJC-Ⅱ型高气密封特殊螺纹接头性能研究[J]. 焊管,2025,48(5):67-73.
[17]王雷,胡海波,左斌. 油管特殊螺纹齿形设计技术分析[J]. 设备管理与维修,2024(6):76-79.
[18]韩鑫. 动载作用下特殊螺纹接头密封特性及密封判据研究[D]. 西安:西安石油大学,2020.
[19]张颖,高安琪,杨坤,等. 油井管特殊螺纹力学损伤与控制研究进展[J]. 科学技术与工程,2022,22(30):13172-13180.

[责任编辑　张　香]

Numerical simulation on the sealing performance of special threads for oil casing

WANG Yanzhi[1,3], LIU Yunxin[1], WANG Shuai[1,3*], LI Siyu[1], SU Xiaodong[2], HUANG Yangang[2]

(1. School of Petroleum Engineering and Environmental Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000;
2. Yan'an Jiasheng Petroleum Machinery Co, Ltd, Yan'an 716004; 3. Yan'an Oil and Gas Efficient Pipeline Transportation and Flow Assurance Engineering Technology Research Center, Yan'an 716000, China)

Abstract: As oil and gas exploration and development extend into complex geological environments, the sealing integrity of the downhole pipe string is facing severe challenges. The special threaded joint of the casing is a key and easily failure-prone part of the pipe string connection. Based on ANSYS Workbench, this paper analyzes the influence of load and structural parameters on the sealing performance of the joint, providing a basis for optimizing the structure under extreme conditions. The research results show that under the reference composite load condition, an increase in external pressure load can significantly improve the contact pressure and sealing index of the sealing surface; after the temperature exceeds 90 ℃, the thermal expansion effect of the material can significantly enhance the contact pressure and sealing performance of the sealing surface; the axial tensile load can increase the compression degree of the sealing surface and the sealing index, but when the load exceeds 40 kN, it is prone to cause local plastic deformation at the root of the thread; the length of the main sealing contact surface and the thickness of the shoulder can be increased simultaneously to improve the sealing index; the angle of the shoulder is within the range of −5° to −15° has a small impact on the sealing performance. In actual extreme conditions, by increasing the length of the main sealing contact surface and appropriately increasing the thickness of the shoulder, the anti-leakage ability and structural stability of the joint can be enhanced, and the loss of oil and gas and production risks caused by sealing failure can be reduced.

Key words: special threaded joints; sealing performance; composite loads; finite element analysis; parameter optimization