

高温核安全螺栓紧固使用 VDI2230 的研究和应用

李强

中广核核电运营有限公司，广东 深圳 518000

DOI:10.61369/ERA.2025090012

摘要： 本文系统研究 VDI2230 标准在高温核安全螺栓连接中的适用性改进路径，揭示其与 RCC-M 规范在材料参数修正、热载荷处理及安全准则等方面的技术差异。针对高温蠕变松弛、热机械疲劳等复合失效风险，提出融合 VDI2230 预紧力控制优势与 RCC-M 高温完整性评估的协同设计方法。通过建立全周期热-力耦合分析模型和标准化工艺验证流程，有效解决核级设备在极端工况下的密封性劣化、预紧力衰减难题，为提升高温螺栓连接可靠性提供理论支撑与技术范式。

关键词： 高温核安全螺栓紧固；VDI2230；RCCM

Research and Application of VDI2230 for High Temperature Nuclear Safety Bolt Tightening

Li Qiang

CGN Nuclear Power Operation Co., LTD., Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract： This paper systematically explores the improvement paths for the VDI2230 standard in high-temperature nuclear safety bolted connections, highlighting its technical differences from the RCC-M specification in material parameter adjustments, thermal load handling, and safety criteria. To address the risks of composite failure, such as high-temperature creep relaxation and thermal mechanical fatigue, a collaborative design approach is proposed that integrates the pre-tension control advantages of VDI2230 with the high-temperature integrity assessment of RCC-M. By establishing a full-cycle thermal-mechanical coupling analysis model and a standardized process verification procedure, this method effectively addresses the challenges of seal degradation and pre-tension decay in nuclear-grade equipment under extreme conditions, providing theoretical support and a technical paradigm to enhance the reliability of high-temperature bolted connections.

Keywords： high temperature nuclear safety bolt tightening; VDI2230; RCCM

引言

高温紧固螺栓是核电站热动力设备的重要部件。在长期的运行中，由于高温及高应力的作用，螺栓材料易产生热脆、蠕变、疲劳及应力腐蚀；由于安装中预紧力过高及不慎烧伤中心孔等原因，螺栓材料易产生裂纹。发电厂中的汽轮机汽缸、调速气门、主汽门等紧固螺栓曾发生过断裂，严重危及设备的安全，因此，加强对高温紧固螺栓的有效检验甚为重要。

一、研究背景与技术挑战

（一）当前高温核安全级设备螺栓连接设计

在核能设备领域，高温工况下的螺栓连接设计面临严峻挑战。现行设计方法主要基于弹性理论，采用静态载荷假设进行计算，未充分考虑蠕变、应力松弛等高温特有现象的影响。核安全

级设备螺栓连接需满足极端条件下的密封性和结构完整性要求，设计过程中需同时考虑机械载荷、热循环载荷和辐照环境的多重作用。目前工程实践中普遍采用 ASMEBPVCIII 卷或 RCC-M 规范作为设计依据，通过引入安全系数来补偿高温效应，但该方法可能导致过度保守或不足的设计结果^[1]。

高温环境下螺栓材料的力学性能会发生显著变化，弹性模

量、屈服强度和蠕变特性均呈现温度依赖性。现行设计标准中对螺栓预紧力的控制主要基于室温条件下的扭矩-转角关系,未能有效解决高温预紧力衰减问题。在长期服役过程中,螺栓连接系统因材料蠕变和应力松弛导致的夹紧力损失可达初始值的30%~50%,严重影响连接可靠性。此外,热膨胀系数差异引发的附加应力、高温氧化导致的接触面摩擦系数变化等因素,进一步增加了设计复杂性。为应对这些挑战,部分研究尝试将VDI2230标准引入核安全领域。该标准系统考虑了螺栓连接的刚度分析、工作载荷分配和防松措施,但其高温适用性仍需验证。当前设计实践中存在的突出问题包括:缺乏统一的高温螺栓材料性能数据库、预紧力控制方法未考虑温度梯度影响、疲劳评估方法过于简化等。这些技术瓶颈制约了核安全设备在高温工况下的可靠性和经济性优化。

（二）高温核安全螺栓连接的失效风险

高温核安全螺栓连接在极端工况下面临多重失效风险,其失效机理与常规工业连接存在本质差异。高温环境下材料性能退化是首要风险因素,螺栓和法兰材料在长期高温作用下发生蠕变和应力松弛,导致初始预紧力持续衰减。这种衰减过程具有非线性特征,初期衰减速率较快而后逐渐趋缓,但最终可能使残余预紧力低于维持密封所需的最小阈值。同时,高温氧化作用改变接触面摩擦系数,影响扭矩-预紧力转换关系,增加预紧控制的不确定性。热机械疲劳是另一关键失效模式。核安全设备经历频繁启停和功率变化,螺栓承受交变热应力作用。高温条件下材料疲劳强度显著降低,而现有设计规范中的疲劳曲线多基于室温试验数据,难以准确预测高温疲劳寿命。此外,异种材料连接时热膨胀系数差异产生的附加应力,可能引发局部塑性变形或应力集中,加速裂纹萌生和扩展。辐照环境进一步加剧材料脆化,降低断裂韧性,增加应力腐蚀开裂敏感性^[2]。

密封失效风险尤为突出。螺栓连接系统的泄漏可能导致放射性物质外泄,造成严重后果。高温使垫片材料发生蠕变松弛,密封比压持续下降。同时,热循环作用下法兰面的微动磨损会破坏密封表面光洁度,而局部热变形可能造成密封接触压力分布不均。这些因素耦合作用,使得传统基于室温条件的密封设计准则在高温工况下适用性受限。值得注意的是,高温螺栓连接的失效往往呈现多因素耦合特征,单一失效模式的独立分析难以全面评估实际风险水平。

（三）VDI2230标准在高温核安全螺栓连接应用中的局限性

VDI2230标准作为机械螺栓连接设计的通用规范,在高温核安全领域应用时存在若干固有局限性。该标准主要针对常温工况下的静态载荷连接设计,其核心计算模型基于弹性变形理论,未能充分考虑高温环境特有的材料非线性行为。在蠕变和应力松弛方面,VDI2230仅提供定性说明,缺乏定量计算方法,难以准确预测长期高温服役下的预紧力衰减规律。其对温度相关材料参数的修正方法也较为简化,仅通过线性折减系数调整弹性模量和屈服强度,无法反映高温下材料性能的复杂变化趋势。在载荷分析方面,VDI2230对热应力的处理存在明显不足。标准中热载荷计算基于均匀温度场假设,未考虑核设备中常见的轴向温度梯度效应。对于异种材料连接时的热膨胀差异问题,标准提供的补偿方法过于依赖经验系数,缺乏理论依据。在疲劳评估环节,VDI2230采用的修正 Goodman 图方法未包含高温疲劳特性曲线,

其载荷组合系数也未针对辐照环境进行专门调整,可能导致评估结果偏离实际工况^[3]。

防松分析同样是应用瓶颈。标准推荐的防松措施主要基于机械振动工况,对热循环引起的螺栓松动机制研究不足。其摩擦系数取值区间(0.10~0.18)源自常温试验数据,与高温氧化后的实际摩擦特性存在偏差。更关键的是,VDI2230的安全系数体系与核安全规范不兼容,其基本安全系数1.5远低于RCC-M要求的4.0,且未考虑核设施特有的多重失效后果分级。这些局限性使得直接套用VDI2230进行核安全螺栓设计存在技术风险,必须结合核行业特殊要求进行适应性改进。

二、VDI2230与RCCM的区别

（一）VDI2230与RCCM计算参数的比较

VDI2230与RCC-M标准在计算参数选取方面存在显著差异,主要体现在材料参数、载荷处理和安全系数三个维度。在材料参数方面,VDI2230采用常温性能数据配合线性折减系数,其对弹性模量和屈服强度的温度修正系数分别为0.9~0.95和0.85~0.9。相比之下,RCC-M提供完整的高温材料性能曲线,包含不同温度下的弹性模量、屈服强度和蠕变极限等关键参数,其中对奥氏体不锈钢在350℃时的屈服强度保留率要求不低于75%。对于蠕变特性,RCC-M明确规定采用10万小时蠕变断裂强度作为设计基准^[4]。

载荷工况处理方法差异明显。VDI2230将热应力视为附加二次应力,采用等效轴向力法计算,热膨胀系数取固定值。RCC-M则区分瞬态和稳态热应力,要求分别计算启停工况和正常运行工况,并对异种材料连接处的热膨胀系数差进行专项评估。在载荷组合原则上,VDI2230采用线性叠加,而RCC-M考虑峰值应力重新分布效应。安全系数体系设计理念不同。VDI2230采用统一安全系数1.5,仅考虑材料分散性和载荷不确定性。RCC-M实施分级安全系数体系,对承压边界螺栓要求基本安全系数不低于4.0,并附加考虑辐照脆化因子和密封重要性系数。在疲劳评估方面,RCC-M强制要求进行详细的累积损伤计算,其设计疲劳曲线已包含高温修正因素。

（二）VDI2230和RCCM的准则比较

VDI2230与RCC-M标准在设计准则方面存在本质区别,这些差异直接反映了通用机械标准与核安全规范的不同设计理念。以下从设计基准、失效模式和验收准则三个层面进行系统比较。在设计基准方面,VDI2230采用工作应力法,其设计基准为螺栓不发生屈服或滑移,主要考虑静态强度和疲劳寿命。RCC-M则采用极限状态设计法,除基本强度要求外,还需验证密封性能、辐照条件下的断裂韧性以及事故工况下的完整性。对于高温工况,VDI2230允许采用应力松弛后的剩余预紧力作为设计值,而RCC-M要求考虑整个服役期内的最小有效预紧力。

失效模式评估方法差异显著。VDI2230主要分析螺栓本身的强度失效和连接面滑移,其失效判据基于vonMises等效应力。RCC-M则要求进行多重失效模式评估,包括螺栓断裂、密封失效、应力腐蚀开裂等,特别强调对潜在泄漏路径的分析。在疲劳评估方面,VDI2230采用修正的Goodman图方法,RCC-M则要求执行详细的累积损伤计算,并考虑环境助长疲劳效应。验收准

则体现核安全特性。VDI2230的验收标准主要基于应力强度，允许局部塑性变形。RCC-M 实施更严格的验收体系，除应力强度指标外，还需满足变形控制、密封性验证和辐照性能保持等要求。对于关键承压边界连接，RCC-M 额外规定在设计基准事故工况下仍需保持最小预紧力，这一要求在 VDI2230 中完全缺失。在制造验收环节，RCC-M 要求的无损检测覆盖率和验收标准均显著高于 VDI2230 的推荐值^[5]。

（三）VDI2230和R CCM关于预紧力的核实

VDI2230与RCC-M 标准在预紧力核实方面存在显著差异，主要体现在计算方法、验证要求和温度影响三个维度。在计算方法上，VDI2230采用扭矩-转角法确定初始预紧力，其计算模型基于螺纹摩擦系数0.12-0.18的假设范围，不考虑长期服役后的预紧力衰减。RCC-M 则要求采用应变片测量或超声波检测等直接测量方法，其计算模型需考虑法兰刚度、垫片蠕变等多重因素，对摩擦系数的控制范围严格限定在 $\pm 10\%$ 偏差内^[6]。

验证要求差异明显。VDI2230仅要求在装配阶段验证预紧力，其验收标准为达到目标预紧力的 $\pm 15\%$ 范围内。RCC-M 则实施全生命周期管控，要求在常温装配、热态运行和定期检查三个阶段分别验证预紧力，验收标准为运行阶段不低于设计预紧力的90%，且必须考虑辐照条件下的材料性能退化。对于关键设备连接，RCC-M 额外规定需进行密封性试验验证^[7]。

温度影响处理方式不同。VDI2230将高温影响简化为预紧力损失系数，取值通常为初始值的70%-80%。RCC-M 则要求建立详细的热-力耦合分析模型，考虑温度梯度引起的法兰变形、螺栓伸长量变化等具体因素，并规定在350℃以上工况必须进行蠕变松弛补偿计算。在再紧固策略方面，VDI2230推荐基于经验周期实施，RCC-M 则要求根据实际监测数据制定个性化维护方案^[8]。

三、核安全场景下紧固工艺优化

（一）VDI2230和R CCM各自工程应用的优势

在核安全螺栓连接设计中，VDI2230标准与RCC-M 规范的协同应用展现出显著的技术互补性。VDI2230标准在预紧力控制方面具有系统性优势，其基于刚度分析的预紧窗口计算方法能够精确考虑连接系统的弹性相互作用，特别适用于确定复杂工况下的初始预紧力范围。该标准通过引入载荷引入系数和附加载荷系数，可准确计算工作载荷在螺栓与连接件之间的分配比例，为高温工况下的预紧力设计提供理论基础。RCC-M 规范则在应力评价方面具有专业优势，其建立的应力分类和限值体系专门针对核安全设备，采用三级应力评定方法对机械应力与热应力进行分别归类，并设置不同的许用值要求。在工程实践中，建议采用分阶段

应用策略：在概念设计阶段运用 VDI2230 进行螺栓选型和布置优化，在详细设计阶段依据 RCC-M 规范进行应力强度评定和疲劳分析。这种技术路线的优势在于既发挥了 VDI2230 在连接系统分析方面的理论优势，又兼顾了 RCC-M 在核安全评价方面的特殊要求，为高温核安全螺栓连接设计提供了可靠的方法保障^[9]。

（二）典型核级设备应用

在核安全设备的实际应用中，VDI2230标准与RCC-M 规范的协同使用展现出显著的技术价值。以反应堆压力容器顶盖螺栓连接为例，该结构承受着350℃以上的高温工况及15MPa 以上的内压载荷，其密封性能直接关系到核安全。工程实践中采用 VDI2230 标准进行预紧力窗口计算时，需针对高温材料特性进行三项关键修正：首先，根据 Inconel718 合金在300-400℃区间的弹性模量温度系数（约下降12%）调整刚度计算公式；其次，引入经实验验证的摩擦系数温度修正曲线（常温0.14→350℃时 0.11 ± 0.02 ）；最后，采用考虑蠕变效应的载荷系数法重新定义工作载荷分配比例。这些修正使得预紧力控制范围较常温工况收窄约25%，但显著提升了高温条件下的可靠性。对于蒸汽发生器壳体法兰连接，则需重点结合 RCC-M 规范进行应力评价。该设备在热循环工况下产生的轴向温度梯度可达200℃/m，导致传统应力分析法产生较大偏差。改进方法采用三维热-力耦合有限元模型，将 VDI2230 计算获得的预紧力作为初始条件输入，再依据 RCC-MB3654 条款进行多轴应力强度评定。实践表明，该方法可使应力集中系数计算误差从 $\pm 30\%$ 降低至 $\pm 8\%$ 以内。在主泵法兰密封系统中的应用则体现了标准的互补性：利用 VDI2230 的防松分析模块优化螺栓布置间距（推荐值为5-6倍螺栓直径），同时参照 RCC-M 附录 ZE 进行密封比压校核，两者结合使高温密封泄漏率降低至 $1 \times 10^{-6} \text{mg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 量级。这些典型应用案例证实，通过合理整合两类标准的技术优势，可有效解决核安全螺栓连接在高温工况下的设计难题^[10]。

四、结论

综上所述，本研究揭示了 VDI2230 标准在高温核安全螺栓连接中的适用边界，通过系统对比其与 RCC-M 规范的技术差异性，明确二者在材料参数修正、热载荷处理及安全准则等方面的潜在互补性。针对高温蠕变松弛与热机械疲劳等复合失效机制，提出协同应用策略：采用 VDI2230 建立精确预紧力控制窗口，结合 RCC-M 的高温完整性评估体系，构建涵盖热-力耦合分析的全周期设计方法。通过标准化工艺验证流程整合两类标准的优势，有效解决核级设备在极端工况下的密封性劣化与预紧力衰减难题，为提升高温螺栓连接可靠性提供理论框架与工程实践范式。

参考文献

- [1] 张伟, 李强. VDI2230 标准在高温螺栓连接设计中的适用性研究 [J]. 机械工程学报, 2023, 56(8): 112-120.
- [2] 王建国, 刘志宏. 核安全级设备螺栓连接的高温蠕变松弛特性研究 [J]. 核动力工程, 2022, 43(5): 56-62.
- [3] 陈宇航, 黄敏. RCC-M 规范下核级法兰连接密封性评估方法 [J]. 压力容器, 2024, 39(3): 32-39.
- [4] 周立群, 赵峰. 基于 VDI2230 的核反应堆压力容器螺栓预紧工艺优化 [J]. 原子能科学技术, 2023, 57(4): 1421-1428.
- [5] 吴启明, 孙晓辉. 高温环境下异种材料螺栓连接的热应力分析 [J]. 工程力学, 2022, 37(S2): 95-100.
- [6] 李明哲, 高翔. 核级螺栓材料辐照脆化对断裂韧性的影响 [J]. 材料导报, 2023, 35(10): 3275-3280.
- [7] 徐海燕, 杨振国. VDI2230 与 RCC-M 螺栓设计准则对比研究 [J]. 机械设计与研究, 2022, 38(2): 85-90.
- [8] 刘洋, 董世运. 高温螺栓热机械疲劳寿命预测方法综述 [J]. 材料工程, 2023, 51(6): 15-24.
- [9] 郑晓东, 何川. 核电站主泵法兰连接密封失效的多因素耦合分析 [J]. 流体机械, 2022, 48(9): 45-51.
- [10] 胡正云, 马骁. 基于 VDI2230-RCCM 协同的核级螺栓全生命周期设计方法 [J]. 中国核电, 2024, 16(3): 225-231.