

基于 Workbench 的带接管封头结构有限元分析和棘轮评定

何银平¹, 夏 通², 杨 雷²

¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

²山东新华医疗器械股份有限公司, 山东 淄博

收稿日期: 2025年3月21日; 录用日期: 2025年4月14日; 发布日期: 2025年4月21日

摘 要

带接管封头结构在核电站、石油化工及航空航天等关键领域作为承压设备核心部件, 常处于高温、高压与循环载荷的严苛工况, 其几何不连续处易产生应力集中诱发棘轮效应, 威胁设备安全。国际上ASME III-5与RCC-MRx规范为主流评定依据, 但工程实践多倾向低成本的弹性分析。本文以带接管椭圆封头为对象, 基于ANSYS Workbench展示两规范的棘轮评定流程, 对比弹性分析结果差异并提供流程模板, 为工程师提供参考。通过有限元分析发现接管根部应力大, 据此提取数据进行评定, 结果显示ASME标准更保守。这些发现有助于更安全的设计实践, 并促进高风险行业的规范合规性评估。这些发现有助于更安全的设计实践, 并促进在高风险行业中进行符合规范的评估。

关键词

带接管封头, 棘轮效应, ASME III-5规范, RCC-MRx规范, 弹性分析

Finite Element Analysis and Ratcheting Assessment of Nozzle-Header Structures Using ANSYS Workbench

Yinping He¹, Tong Xia², Lei Yang²

¹School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Shinva Medical Instrument Co., Ltd., Zibo Shandong

Received: Mar. 21st, 2025; accepted: Apr. 14th, 2025; published: Apr. 21st, 2025

Abstract

Nozzle-header structures, serving as core pressure-bearing components in critical fields such as

文章引用: 何银平, 夏通, 杨雷. 基于 Workbench 的带接管封头结构有限元分析和棘轮评定[J]. 建模与仿真, 2025, 14(4): 617-627. DOI: 10.12677/mos.2025.144314

nuclear power plants, petrochemical engineering, and aerospace, often operate under harsh conditions of high temperature, high pressure, and cyclic loading. Geometric discontinuities in these structures can induce stress concentration, leading to potential ratcheting effects that threaten equipment safety. Internationally, the ASME III-5 and RCC-MRx codes are the primary assessment criteria; however, engineering practices predominantly rely on cost-effective elastic analysis. This paper focuses on elliptical headers with nozzles, presenting a systematic evaluation workflow based on ANSYS Workbench for both codes. By comparing the differences in elastic analysis results and providing a process template, this study offers a practical reference for engineers. Finite element analysis revealed significant stress at the nozzle root, and subsequent ratcheting assessments indicated that the ASME standard yields more conservative results compared to RCC-MRx. These findings contribute to safer design practices and facilitate code-compliant evaluations in high-stakes industries.

Keywords

Nozzle-Header Structures, Ratcheting Effect, ASME III-5 Code, RCC-MRx Code, Elastic Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在核电站、石油化工以及航空航天等诸多关键领域里，带接管封头结构扮演着承压设备核心部件的关键角色，诸如反应堆压力容器顶盖、换热器封头等。这些部件长时间处于高温、高压以及循环载荷的严苛工况之下。带接管封头结构作为连接管路与容器本体的关键部件，因其几何不连续特征(如接管与封头过渡区)易产生应力集中，进而诱发棘轮效应，即结构在循环载荷下塑性应变持续累积的现象。棘轮效应可能导致结构变形失稳或加速疲劳失效，严重威胁设备安全运行[1]。因此，国际核能领域普遍采用规范化的评定方法对高温设备进行防棘轮设计验证，其中美国机械工程师协会(ASME)制定的 ASME III-5 规范[2]和法国核安全局主导的 RCC-MRx 规范[3]因其技术体系的完整性，成为工程界的主流依据。ASME 规范中针对循环载荷下的结构的棘轮失效模式提出了弹性分析方法，非弹性分析方法和简化的非弹性分析方法，RCC-MRx 规范在循环载荷下要进行防止 S 型损伤的渐进性变形评定(即棘轮评定)提供了弹性和非弹性两种方法，还对是否显著蠕变和是否存在辐照进行了进一步的规定。在实践中，由于弹塑性和非弹性计算成本高，需要挑选合适的本构模型且对材料数据的要求较多，工程中更倾向于使用弹性分析的评定方法，降低计算复杂度。

目前，许多学者已通过试验方法对不同材料的棘轮变形行为进行研究从而判断是否发生棘轮效应，得到不同材料相关的棘轮变形行为和本构模型。从 21 世纪初期，牛清勇[4]就对反应堆材料如：1Cr18Ni9Ti 不锈钢、T42NG 和 T225NG 钛合金等的单轴棘轮行为进行研究，建立了相应的棘轮模型；王云和黄志影[5]发现用于高温高压环境下的 2.25Cr-1Mo-V 钢在高温下呈现循环软化，原来的力学模型导致难以反映材料的实际力学行为，通过试验对材料的蠕变-棘轮力学行为进行了总结与补充；周杨[6]研究发现，不锈钢材料 Z2CND18.12N 与奥氏体不锈钢 316 L 存在类似的力学性质，350℃以上蠕变占据主导时，其棘轮应变随温度升高而增大。近年来，随着数值分析模拟技术的发展，有限元仿真和试验技术相互补充，成功将棘轮分析预测的速率和精准度大幅提升。彭常飞[7]提出的直接法(如弹性补偿法)在三维结构安定边界的快速确定方面展现出显著优势，尤其适用于大型工程前期的初步设计阶段，能够减少 80%的计算

量；刘彩明[8]运用非线性有限元方法，嵌入 Ohno-Wang、Chaboche 等本构模型后，成功将多轴棘轮预测误差控制在 15%以内，为工程设计提供了更为精确的理论支撑。

在瞬态热机载荷等复杂运行工况下，由温差引发的热棘轮效应不容忽视。现有研究多集中于筒体、直管、弯管等简单结构的评定与对比[9]-[11]，对于接管封头等复杂几何结构的评定案例相对较少。对于核级容器，刘亚楠等[12]通过模拟分析研究发现其塑性应变增量往往集中于支承结构连接处，这一区域就是潜在的薄弱环节。对于工业管道系统，直管和弯管易发生棘轮应变的位置和类型不同。曲伟强[13]发现，局部壁厚减薄缺陷会极大改变管道的应变累积特性，显著提升环向应变累积速率，且缺陷深度与应变速率呈非线性关系，这为管道的完整性评估增添了关键考量因素。公琦[14]研究发现，直管的棘轮应变以环向为主，而弯管在面内循环弯曲载荷下，应变呈现独特分布，集中于 45°环向位置。埋地管道由于管土摩擦的存在，会产生轴向棘轮位移，玄洪伟和阮大为[15]结合安定性分析对其热膨胀下的变形风险进行预测，保障管道的长期稳定运行。常见的接管结构和换热器同样面临着因棘轮效应导致结构失效的挑战。对于斜接管结构，面内循环弯曲载荷与内压的耦合作用会显著加速棘轮速率，且最大塑性应变通常出现在接管根部，这为该类结构的优化设计与加固措施制定提供了关键依据[16][17]。苏红军[18]提出的各向异性等效板模型，提供了一种简化复杂穿孔区域力学分析的方法，防止因换热器管板孔口位置的热应力集中产生棘轮效应，提高了工程实践中的分析效率和精度。赵延义[19]运用弹性核法评估核电站直接安注接管在承压热冲击载荷下棘轮边界，并借助多场耦合分析量化温差载荷对安定域的压缩作用，确保核电站关键部件在极端工况下的可靠性。

本文以带接管的椭圆封头为研究对象，基于 ANSYS Workbench 平台，系统演示 ASME III-5 与 RCC-MRx 规范的棘轮评定流程。通过对比弹性分析结果，揭示两种规范在接管封头结构中的差异，并提供标准化流程模板，为工程师们提供参考，同时为国内自主高温设计规范的开发积累数据支撑。

2. 有限元模型建立

2.1. 有限元模型

本文选取一典型的带接管封头结构进行有限元建模与分析，使用 Ansys Workbench 平台直接进行建模，接管壁厚均设置为 12 mm，具体的三维模型见图 1 所示。

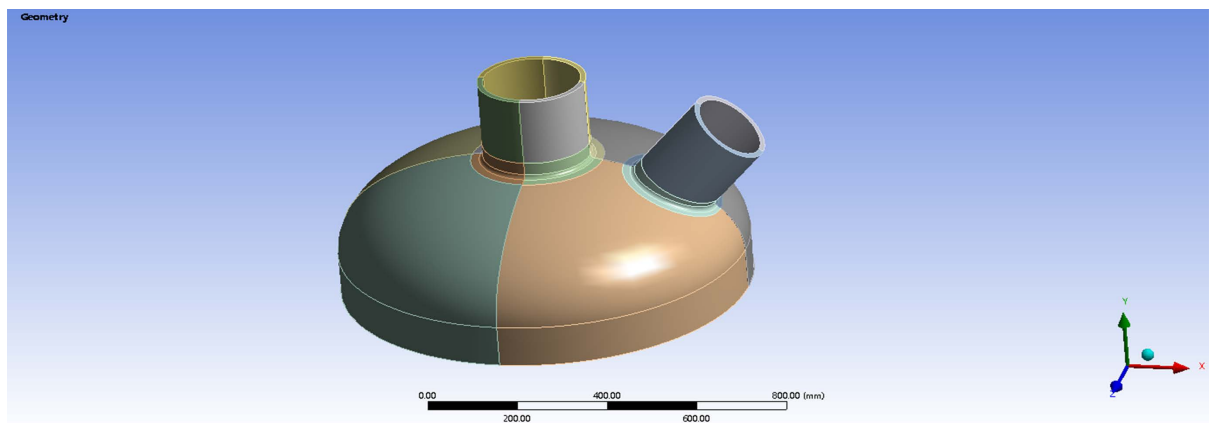


Figure 1. Structural three-dimensional model

图 1. 结构三维模型

2.2. 网格划分与材料选择

进行网格划分时，在筒体的厚度方向上设置 2 层单元，网格节点总数为 179,673，单元总数为 32,292，

进行热分析时采用 Solid90 单元，结构分析采用三维实体单元 Solid186。网格划分模型总图如图 2 所示。

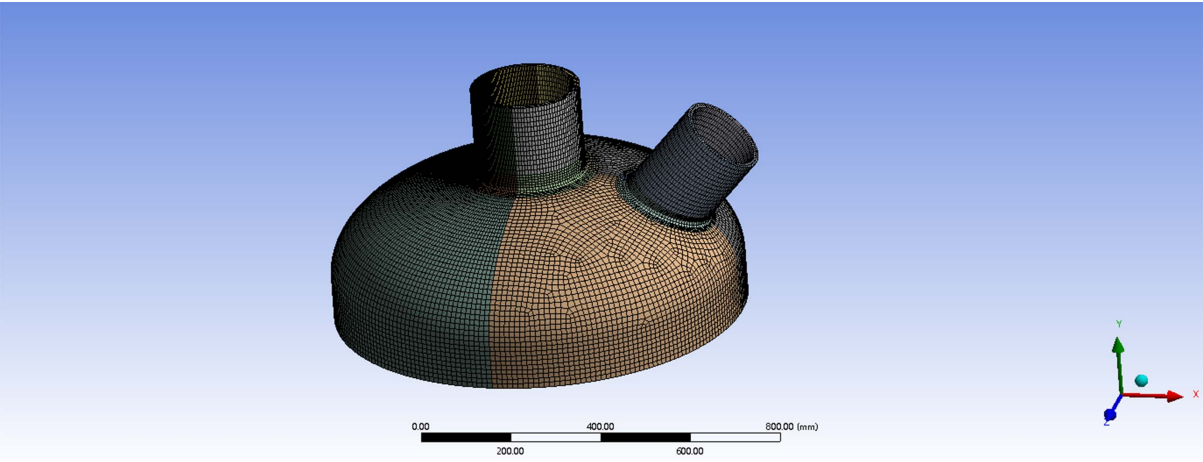


Figure 2. Meshing diagram of the model
图 2. 模型网格划分示意图

本算例选用 316 不锈钢材料进行有限元建模与分析，不同温度下材料具体的参数见下表 1 所示，材料数据来源于 ASME II-D 篇。

Table 1. Parameters of 316 material at different temperatures
表 1. 不同温度下 316 材料的参数

温度 ℃	弹性模量 E GPa	抗拉强度 S_u MPa	屈服强度 S_y MPa
200	183	496	148
250	179	495	139
300	176	495	132
350	172	495	127
400	169	493	123
425	167	489	122
450	165	482	121
475	162.5	474	120
500	160	463	118
525	158	450	117
550	156	435	116

2.3. 载荷和边界条件

本文使用的算例采取的使用载荷主要是温度载荷和压力载荷两种，内压恒定，大小为 1 MPa，外壁绝热，传热系数设置为 30 W/m²·℃，温度载荷施加在结构内壁上，如图 3 所示，温度载荷对应的瞬态条件和对应的循环次数如下图 4 所示。

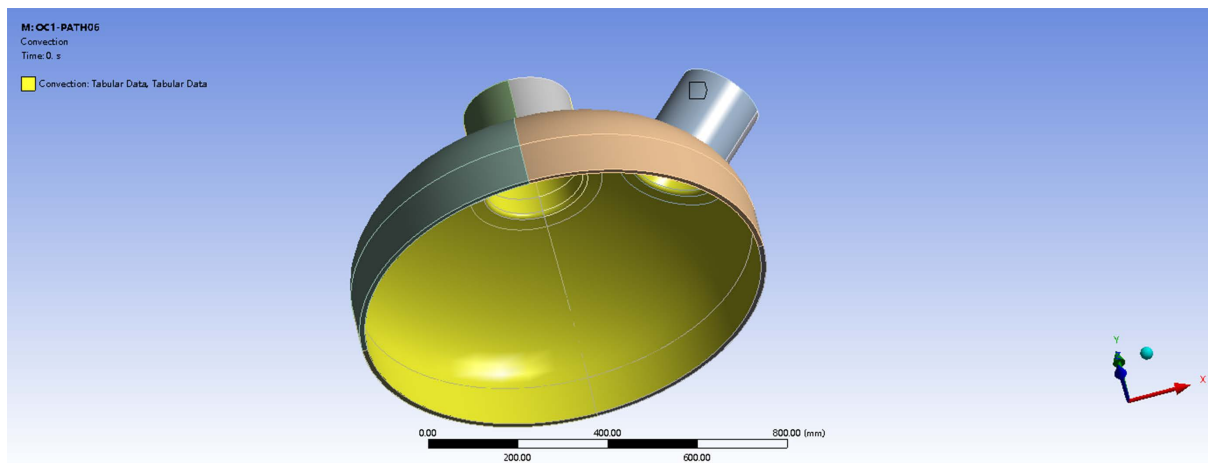


Figure 3. Diagram of temperature load application locations

图 3. 温度载荷施加位置示意图

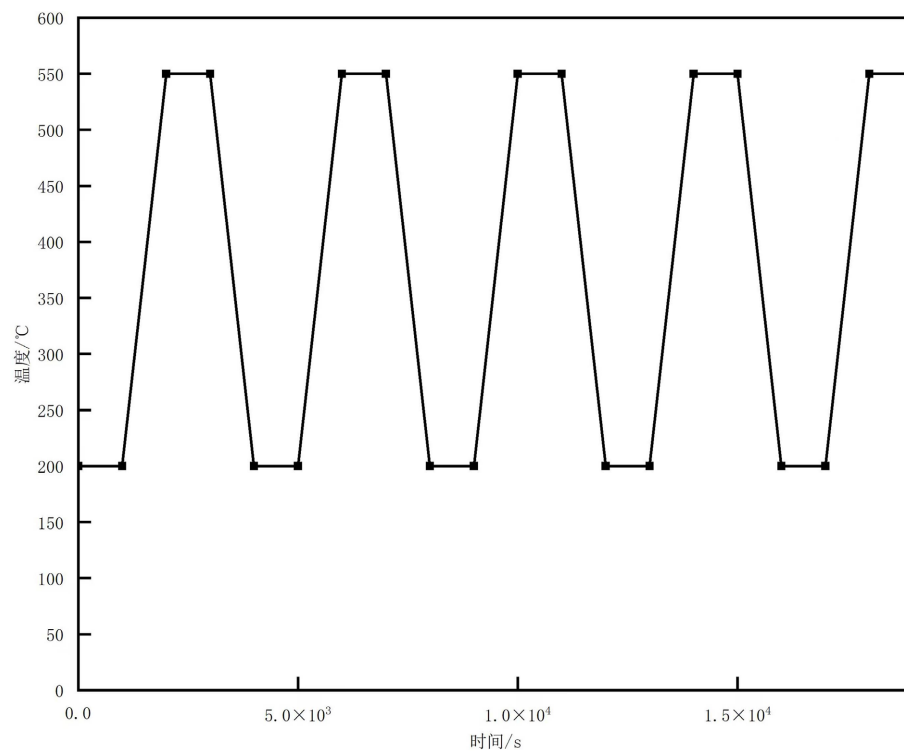


Figure 4. Temperature transient conditions

图 4. 温度瞬态条件

内压设置为 1 MPa，施加在封头以及接管的内壁面上，如图 5 所示，由于内压的存在产生的接管端面上的等效施加在两个接管的端面上。

在封头结构的底部端面上施加位移约束，如图 6 所示。

3. 有限元结果

使用建立好的三维模型，分别施加温度载荷、机械载荷、温度载荷 + 机械载荷进行计算，提取出

热 + 机械载荷循环下等效应力的结果云图如下图 7 所示。

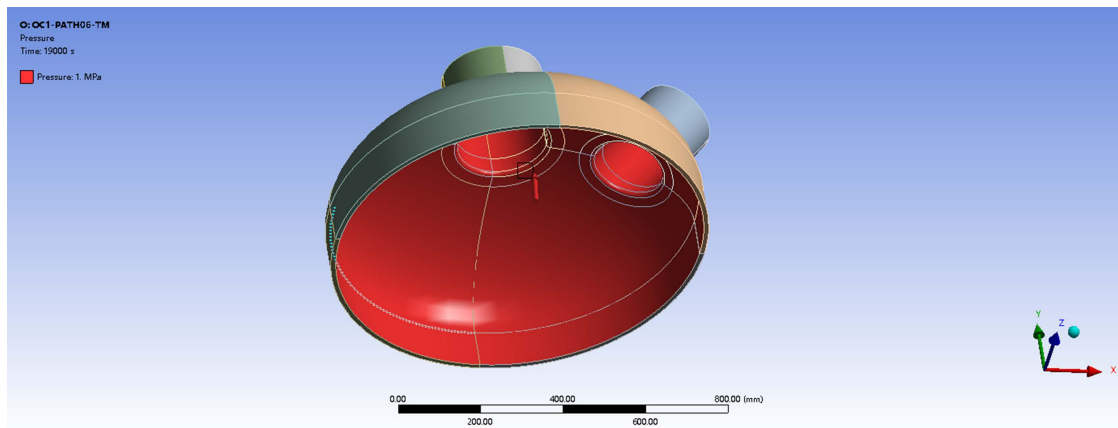


Figure 5. Diagram of pressure load application locations
图 5. 压力载荷施加位置示意图

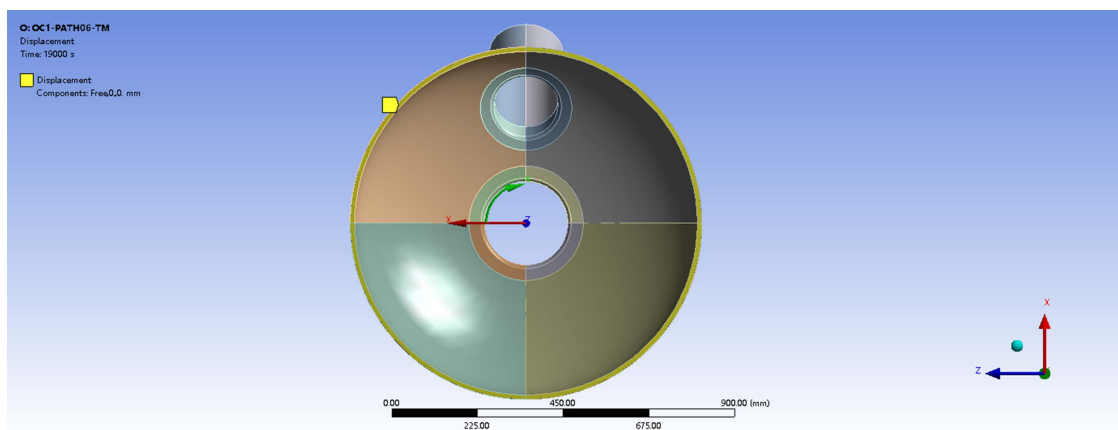


Figure 6. Diagram of constraint condition settings
图 6. 约束条件设置示意图

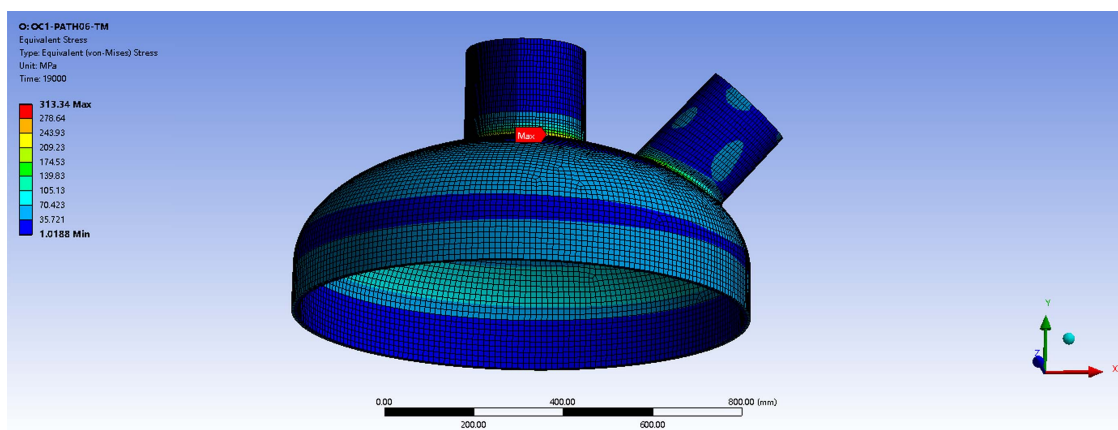


Figure 7. Equivalent stress cloud diagram under thermomechanical cyclic loads
图 7. 热机循环载荷下等效应力云图

根据得到的等效应力云图结果可以看出，在热机循环载荷下带接管的封头结构的接管根部区域的等效应力更大，呈现显著应力集中，等效应力最大值达 313.34 MPa，远超封头其他部位。这是由于温度载荷引发的热应力与机械载荷产生的结构应力在此叠加，且几何不连续性加剧了应力集中，使该区域成为结构失效的高风险部位，在后续使用过程中可能会出现局部失效的情况，因此在中央接管的根部划分三条不同的路径，具体路径如图 8 所示，分别提取出三条路径上的等效应力值如下表 2~5 所示，进一步对比三条路径数据，Path2 在各载荷工况下的等效应力值均为最大，如热 + 机械循环载荷下其 $P_L + P_b$ 的等效应力值高达 191.440 MPa，显著高于其他路径。这是因为 Path2 位于接管与封头连接的关键位置，承受复合载荷作用更复杂，可以看出最危险的路径是 Path2，之后的棘轮评定以这条路径上的应力线性化数据为例进行，其中 P_L 为薄膜应力， P_b 为弯曲应力。

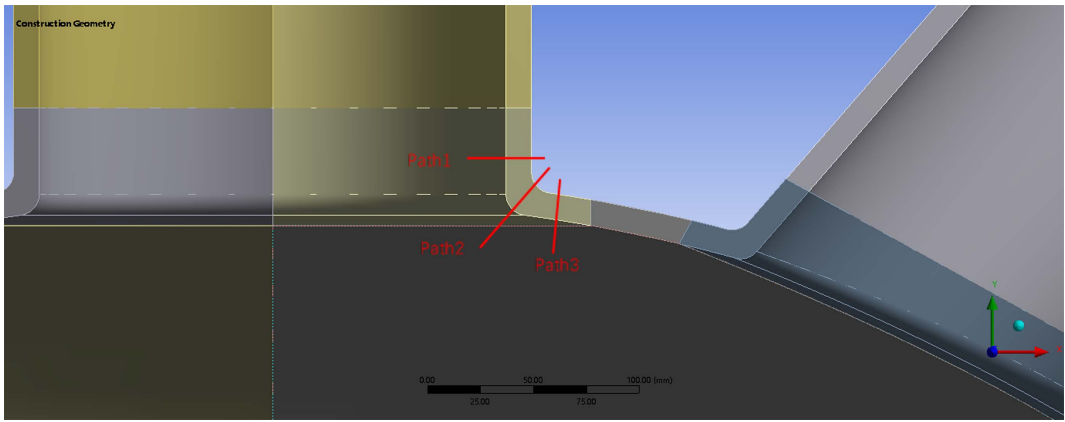


Figure 8. Stress path diagram at the root of the central pipe connection
图 8. 中央接管根部的应力路径示意图

Table 2. Equivalent stress values on three paths
表 2. 三条路径上的等效应力值

路径	等效应力值		
	最大等效应力	最小等效应力	平均等效应力
Path1	126.35	101.08	112.29
Path2	215.7	115.44	148.11
Path3	210.31	107.64	139.51

Table 3. Stress linearization data of Path2 under pure thermal load
表 3. 纯热载荷下 Path2 的应力线性化数据

	S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}	S_{INT}	S_{EQV}
P_L	0.528	0.423	-1.786	0.511	0.000	0.000	2.775	2.430
P_b (inside)	1.251	1.898	3.427	-1.725	-0.001	-0.002	3.607	3.559
P_b (outside)	-1.251	-1.898	-3.427	1.725	0.001	0.002	3.607	3.559
$P_L + P_b$ (inside)	1.779	2.321	1.641	-1.214	-0.001	-0.002	2.487	2.192
$P_L + P_b$ (center)	0.528	0.423	-1.786	0.511	0.000	0.000	2.775	2.430
$P_L + P_b$ (outside)	-0.723	-1.474	-5.213	2.236	0.001	0.003	6.381	5.687

Table 4. Stress linearization data of Path2 under mechanical load
表 4. 机械载荷下 Path2 的应力线性化数据

	S_X	S_Y	S_Z	S_{XY}	S_{YZ}	S_{XZ}	S_{INT}	S_{EQV}
P_L	39.291	16.248	148.090	-0.652	-0.010	-0.006	131.860	121.970
P_b (inside)	56.931	71.705	33.731	-66.758	0.038	0.005	134.330	120.290
P_b (outside)	-56.931	-71.705	-33.731	66.758	-0.038	-0.005	134.330	120.290
$P_L + P_b$ (inside)	96.222	87.953	181.820	-67.410	0.027	-0.001	157.270	147.430
$P_L + P_b$ (center)	39.291	16.248	148.090	-0.652	-0.010	-0.006	131.860	121.970
$P_L + P_b$ (outside)	-17.641	-55.457	114.360	66.106	-0.048	-0.010	219.660	192.240

Table 5. Stress linearization data of Path2 under thermomechanical cyclic loads
表 5. 热 + 机械循环载荷下 Path2 的应力线性化数据

	S_X	S_Y	S_Z	S_{XY}	S_{YZ}	S_{XZ}	S_{INT}	S_{EQV}
P_L	39.815	16.669	146.270	-0.144	-0.010	-0.005	129.600	119.720
P_b (inside)	58.183	73.599	37.201	-68.479	0.037	0.002	137.820	122.760
P_b (outside)	-58.183	-73.599	-37.201	68.479	-0.037	-0.002	137.820	122.760
$P_L + P_b$ (inside)	97.998	90.268	183.470	-68.623	0.026	-0.003	158.070	148.840
$P_L + P_b$ (center)	39.815	16.669	146.270	-0.144	-0.010	-0.005	129.600	119.720
$P_L + P_b$ (outside)	-18.368	-56.930	109.070	68.335	-0.047	-0.008	217.720	191.440

4. 棘轮评定的弹性分析方法

4.1. 基于 ASME III-5 标准的棘轮评定

ASME-III-5 标准中提供了三种弹性分析的测试方法来判断部件是否发生棘轮失效, 分别是 TestA-1、TestA-2 以及 TestA-3, TestA-1 和 TestA-2 定义了两个参数, 即一次应力参量 X 和二次应力参量 Y , 计算公式如下:

$$X = \frac{(P_L + P_b / K_t)_{\max}}{S_y} \quad (1)$$

$$Y = \frac{(Q_R)_{\max}}{S_y} \quad (2)$$

通过判断这两个参数是否超过限制判断评定是否通过, 其中 TestA-1 适用于在循环的两端的温度都处于蠕变温度的情况, 其判断准则为:

$$X + Y \leq S_a / S_y \quad (3)$$

TestA-2 适用于循环中与定义二次应力最大范围 $(Q_r)_{\max}$ 的一个应力极值相对应的平均壁温低于各材料的适用温度限值，其需要满足的判断准则为：

$$X + Y \leq 1.0 \quad (4)$$

TestA-3 适用于所有条件，但是最初只用于对蠕变工况的部件剩余寿命的评估。满足该试验就表明蠕变可忽略，可以直接按照第 VIII-2 分册的规则进行设计，需要满足的限值要求为：

$$P_L + P_b + Q \leq \min(3S_m, 3\bar{S}_m) \quad (5)$$

$$\sum \varepsilon_i \leq 0.2\% \quad (6)$$

$$\sum (t_i)/(t_{id}) \leq 0.1 \quad (7)$$

只需要满足这三种测试其中的任意一种都可以认为结构的棘轮评定通过，不会发生棘轮失效。

4.2. 基于 RCC-MRx 规范的棘轮评定

RCC-MRx 规范中对于循环载荷条件下，主要考虑 S 型损伤中的棘轮变形失效。首先需要定义两个与一次薄膜应力有关和与一次应力有关的二次比 SR_1 和 SR_2 再进行计算，

$$SR_1 = \Delta q / \max(\sigma_m) \quad (8)$$

$$SR_2 = \Delta q / \max(\sigma_L + \Phi \sigma_b) \quad (9)$$

根据得到的二次比查询效率图得效率因子 v_1 和 v_2 ，根据公式算出有效一次薄膜应力强度和有效一次应力强度 P_1 和 P_2 。

$$P_1 = \max(\sigma_m) / v_1 \quad (10)$$

$$P_2 = \max(\sigma_L + \Phi \sigma_b) / v_2 \quad (11)$$

当蠕变可忽略的情况下，需要对 P_1 和 P_2 进行限值校核评定，要求满足 $P_1 \leq k_{dp1} S_m$ ， $P_2 \leq K \cdot k_{dp2} S_m$ 。

当蠕变不可忽略，即温度超过材料的蠕变温度情况下，结构上的点需要满足下面准则：

- 1) 有效一次薄膜应力强度的 1.25 倍时塑性应变 + 相关蠕变应变不应超过 Dmax；
- 2) 经蠕变效应修正的有效一次应力强度总和的 1.25 倍时塑性应变 + 相关蠕变应变不应超过 2Dmax。

其中，塑性应变可以根据 RB 3261.1123 给出的计算流程确定，蠕变应变可以根据 RCC-MRx 附录 A3.3S.54 确定，Dmax 的值通过附录 A3.3S.46 查得。

4.3. 评定结果

本工况下的路径 Path2 一端低于 316 材料的蠕变温度，一端高于材料的高温规范部分给出的最低适用温度(425℃)，故选择 TestA-2 进行验证(表 6)。

Table 6. Evaluation results of TestA-2

表 6. TestA-2 评定结果

路径	T_{i_L}	T_{i_H}	S_{y_L}	K_t	$P_L + P_b/K_t$
Path2	200	439.05	148	1.25	185.456
$(Q_r)_{\max}$	X	Y	X + Y	$X + Y \leq 1$	评定结果
6.381	1.253	0.043	1.296	否	不通过

根据温度场分析的结果, 加载时间内结构上的平均温度最大为 435.06℃, 未达到 RCC-MRx 规范附录 A3 中给出的可忽略蠕变的温度限值(450℃), 因此这部分评定使用可忽略蠕变的限值评定。下面是 RCC-MRx 规范中弹性分析方法的评定结果(表 7)。

Table 7. Evaluation results of RCC-MRx
表 7. RCC-MRx 评定结果

路径	最高温度	$\text{Max}(\sigma_m)$	$\text{Max}(\sigma_L + \sigma_b)$	$\text{Max}(\Delta q)$	SR_1	SR_2
Path1	435.06	129.6	196.56	71.67	0.553	0.365
V_1	V_2	P_1	P_2	K_{dp1}	K_{dp2}	K
0.981	1	132.052	196.559	1.3	1.3	1.5
S_m	$K_{dp1} * S_m$	$K * K_{dp2} * S_m$	$P_1 \leq k_{dp1} * S_m$	$P_2 \leq K * k_{dp2} * S_m$	结论	
102.196	132.854	199.281	是	是	通过	

5. 结论

本文通过使用 ANSYS Workbench 软件进行有限元分析, 对带接管的椭圆封头在循环载荷作用下的有限元分析结果进行分析与探讨, 通过建立精确的有限元模型并进行模拟分析, 得到了封头内部的应力分布情况。分析发现, 在接管根部的位置应力集中现象较为显著, 此处的应力较大, 更加危险, 为了更详细地了解该区域的应力变化情况, 我们在接管根部划分路径提取应力线性化数据, 为后续的棘轮分析与评定工作提供可靠的数据支持。根据得到的应力分析数据, 使用 ASME III-5 和 RCC-MRx 规范中的弹性分析方法分别进行棘轮评定, 在评定过程中, 两种规范展现出不同的评定标准和结果, 发现使用 ASME 标准进行评定时超过限值无法通过, 这意味着按照 ASME 标准, 带接管的椭圆封头在循环载荷作用下的安全性无法通过评定, 然而使用 RCC-MRx 规范时评定可以通过, 因此 ASME 标准在进行棘轮评定时更加保守。这一差异表明, 在进行棘轮评定时, ASME 标准相对更为保守, 对结构的安全性要求更为严格。而 RCC-MRx 规范在评定该结构时则表现出相对宽松的特点。ASME 规范的保守性可用于高风险场景的安全把控, RCC-MRx 规范的适用性则为常规工程设计提供更灵活的评估路径, 因此, 在实际工程应用中, 选择何种评定规范需要综合考虑工程的具体要求和安全标准。

参考文献

- [1] 康国政, 高庆, 杨显杰. 棘轮效应研究的若干进展[J]. 力学进展, 2005, 35(4): 526-532.
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee (2021) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III Division 5: High Temperature Reactors.
- [3] AFCEN (2015) Design and Construction Rules for Mechanical Components of Nuclear Installations: High Temperature, Research and Fusion Reactors RCC-MRx, Section III, Tome 1. Subsection B.
- [4] 牛清勇. 反应堆材料的棘轮与疲劳行为研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- [5] 王云, 黄志影. 2.25Cr-1Mo-V 钢制反应器的近似棘轮分析[J]. 一重技术, 2017(5): 1-7.
- [6] 周杨. 核用不锈钢棘轮本构模型描述及压力管道棘轮效应研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2021.
- [7] 彭常飞. 压力管道对焊焊接接头安定性分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉工程大学, 2013.
- [8] 刘彩明. 核电管道棘轮效应及疲劳失效行为研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2022.
- [9] Sarkar, R., Sati, B.C. and Kumar, R.S. (2024) Assessment of Ratcheting in SGDHR Pipe Bend Based on Linear and Bi-Linear Analysis. *Procedia Structural Integrity*, **60**, 75-92. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.05.032>
- [10] Lee, H., Eoh, J. and Jeong, J. (2019) Elevated Temperature Design and Integrity Evaluation of a Large-Scale Sodium Test Facility, Stella-2. *Nuclear Engineering and Design*, **346**, 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.02.024>

-
- [11] 徐志锋. 弯管结构的塑性极限与安定分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2000.
 - [12] 刘亚楠, 莫亚飞, 高付海, 等. 基于非线性方法的核级双层容器及支承结构热棘轮效应研究[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(2): 431-440.
 - [13] 曲伟强. 复杂载荷下核电管道棘轮变形分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2017.
 - [14] 公琦. 动力作用下工业管道安定与棘轮性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北方工业大学, 2023.
 - [15] 玄洪伟, 阮大为. 埋地管道安定性能分析[J]. 中国科技信息, 2022(7): 41-43.
 - [16] 杨立栋, 高炳军. 循环弯矩作用下内压斜接管结构棘轮效应的数值分析[J]. 河北工业大学学报, 2011, 40(4): 32-36.
 - [17] 杨立栋, 董俊华, 高炳军. 内压圆筒斜接管结构的棘轮效应分析[J]. 力学学报, 2011, 43(3): 523-532.
 - [18] 苏红军. 换热器管板孔口不连续处棘轮现象模拟试验与分析[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
 - [19] 赵延义. 热冲击下直接安注接管力学行为及棘轮效应研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2022.