

FZ35-70防喷器承压螺纹孔改型仿真分析

亢鹏宇¹, 易仁豪¹, 王翊霖¹, 徐 畅²

¹长江大学机械工程学院, 湖北 荆州

²天津国荣精工能源科技有限公司, 天津

收稿日期: 2026年5月26日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年8月31日

摘 要

针对FZ35-70型闸板防喷器承压螺纹孔因粘扣及腐蚀介质侵蚀而频繁报废的工程瓶颈, 本研究设计了一种利用17-4PH不锈钢螺纹套进行冷处理再制造的改型修复方案。参照API 16A规范, 对其进行几何建模。在此基础上, 运用ANSYS软件建立了“螺栓-螺纹套-壳体”的有限元三维模型。在通过全局网格10 mm、局部细节加密至1 mm的网格独立性验证后, 系统模拟了该复合结构在75 MPa额定工况下的响应规律。动态应力场演化结果表明: 改型后, 原先集中于壳体的螺纹根部的应力集中效应得到缓解; 在75 MPa载荷下, 壳体最大应力由238.79 MPa骤降至170.63 MPa, 整体最大变形量也由0.18499 mm降低至0.13211 mm, 异质材料界面展现出优异的力学相容性。最终结合API 16AR再制造标准, 从理论与数值仿真两方面印证了该冷修复结构具备符合规范的承压安全性, 为高压井控核心部件的延寿与绿色再制造提供了一条可落地的工程范式。

关键词

闸板防喷器, 承压螺纹孔, 再制造, 17-4PH不锈钢, 有限元分析

Simulation Analysis on the Modification of Pressure-Bearing Threaded Holes in the FZ35-70 Blowout Preventer

Pengyu Kang¹, Renhao Yi¹, Yilin Wang¹, Chang Xu²

¹School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

²Tianjin Guorong Jinggong Energy Technology, Co., Ltd., Tianjin

Received: May 26, 2026; accepted: July 3, 2026; published: August 31, 2026

Abstract

To address the engineering bottleneck of frequent scrapping of the pressure-bearing threaded

文章引用: 亢鹏宇, 易仁豪, 王翊霖, 徐畅. FZ35-70 防喷器承压螺纹孔改型仿真分析[J]. 力学研究, 2026, 15(3): 175-184. DOI: 10.12677/ijm.2026.153017

holes in FZ35-70 ram blowout preventers (BOPs) due to galling and corrosive media, this study proposes a remanufacturing modification scheme utilizing 17-4PH stainless steel threaded inserts subjected to cryogenic treatment. In accordance with the API 16A specification, quantitative geometric reconstruction was performed on the structural features. Subsequently, a three-dimensional non-linear finite element model of the “bolt-threaded insert-shell” composite structure was established using the ANSYS platform. Following mesh independence verification with a global mesh size of 10 mm and locally refined details down to 1 mm, the structural response under the rated working condition of 75 MPa was systematically simulated. The dynamic stress field evolution results demonstrate that, after modification, the stress concentration effect originally concentrated at the thread roots of the shell is significantly alleviated. Under the 75 MPa load, the maximum stress in the shell drops sharply from 238.79 MPa to 170.63 MPa, and the overall maximum deformation decreases from 0.18499 mm to 0.13226 mm, indicating excellent mechanical compatibility at the dissimilar material interface. Ultimately, combined with the API 16AR remanufacturing standard, both theoretical analysis and numerical simulations verify that the cryogenically repaired structure meets the required pressure-bearing safety specifications. This provides a practical and implementable engineering paradigm for the life extension and green remanufacturing of high-pressure well control core components.

Keywords

Ram Blowout Preventer, Pressure-Containing Threaded Hole, Remanufacturing, 17-4PH Stainless Steel, Finite Element Analysis

Copyright © 2026 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

由于地层中的不确定因素很多且十分复杂，每一钻井作业都有发生井喷的可能性，这对井控技术和井控装备提出了更高的要求。防喷器作为最重要的井控设备，在钻井作业中一旦发生溢流、井涌、井喷等紧急状况，防喷器需要迅速启动关井，此时防喷器一旦失效，将会导致井喷等恶性事故。因此，防喷器的合理设计对于保证钻井作业顺利进行和人身安全具有重要作用[1]。在相关油田超深层钻完井作业中，闸板防喷器长期服役于高压、高含硫及强磨蚀的恶劣工况下，其关键承压零部件如壳体、侧门的可靠性直接关系到井控安全。随着钻井地层压力的升高，尤其是海洋高温高压井的增多，对防喷器的压力等级要求越来越高，国外研制出大通径 20 K 和 25 K 压力等级的防喷器。由华北荣盛研发制造的 FZ48-105 超深井剪切闸板防喷器已成功应用于中国石油深地川科 1 井。该井位于四川盆地西北部，该区域地层岩性复杂、软硬交错，压力系统多且高低压互层，缝洞发育，井漏与气侵现象频发[2]。国外在全电动防喷器和固体燃料驱动式防喷器研究方面也取得一定进展。实际生产调查表明，FZ35-70 型防喷器在长期交变载荷与腐蚀介质侵蚀下，其连接螺纹孔部位常出现粘扣、滑丝及化学腐蚀点坑，导致连接螺栓无法拆卸，甚至造成整体部件的提前报废。传统的修复手段多依赖于通用堆焊工艺，但针对复杂受损形貌的量化评估标准及热变形控制手段仍不完善[3]。传统的堆焊修复往往伴随较大的热输入，易导致防喷器壳体产生残余应力及热影响区组织脆化，在高含硫环境下极易诱发应力腐蚀开裂。由于防喷器壳体属于厚壁高承压构件(通常为 25CrNiMo 等低合金钢)，传统的整体或局部热堆焊在极高的冷却速度下，极易在焊缝内部引入未熔合及微裂纹等随机性缺陷。这种不规则的形貌在后续长期的服役环境中，会成为新的应力集中

源与疲劳裂纹萌生点，从而严重削弱防喷器的整体承压残余强度。因此，探索一种能够完全避免热输入负面影响、实现异质界面应力优化重构的物理冷处理再制造修复技术，已成为延长超深层井控装备服役寿命的迫切需求[4]。

为解决这一工程难题，本文依据 API 16AR 标准，建立了包含非规则缺陷特征的壳体数字化模型，并开展了残余强度校核。通过引入 17-4PH 不锈钢螺纹套改型技术，不仅实现了对受损螺纹的精准修复，还利用材料升级显著提升了连接部位的抗腐蚀与抗粘扣性能。采用的 17-4PH 螺纹套冷处理修复技术，避开了传统热加工的弊端，通过材料异质化设计，将承压界面的应力重新分布。这种“以换代焊”的思路，不仅符合 API 16AR 对石油装备再制造的寿命延长要求，也为相关油田等超深井控设备的低成本、高可靠性维护提供了科学依据，结合有限元仿真试验验证，本研究旨在为老旧防喷器的绿色再制造与性能升级提供一套标准化的工艺范式。

2. 方案设计和几何模型的建立

2.1. 方案设计

17-4PH 螺纹套修复方案设计：螺纹套的结构、材质特性及安装工艺。

(1) 螺纹套的结构：螺纹套外径根据壳体受损区域的切削余量确定，内螺纹规格严格保持与原 FZ35-70 防喷器连接螺栓匹配。在螺纹套底部或端面设计密封台阶，配合高强度密封胶或过盈配合，防止高压介质沿异质界面渗漏。

(2) 材质特性：选择 17-4P 不锈钢作为修复材料，该材料通过调质处理可获得与防喷器壳体(通常为低合金钢)相近的弹性模量，有效降低界面应力突变。针对油田里高含硫、强磨蚀的工况，17-4PH 提供卓越的抗 H_2S 应力开裂性能。在 75 MPa 的额定载荷下，该材质能保证螺纹根部不发生塑性变形。

(3) 安装工艺：采用“扩孔-攻丝-置入-固化”的再制造流程。a) 对壳体进行扩孔以清除疲劳层，并在其内壁加工高精度安装螺纹。b) 采用冷收缩或预应力旋入方式将 17-4PH 螺纹套安装至壳体预定深度。c) 在螺纹套底部或端面的密封台阶处，配合高强度密封胶或过盈配合，防止介质沿界面渗漏。d) 同时通过物理锁紧或专用厌氧胶确保两者形成整体承压结构。e) 将螺栓旋入螺纹套内孔，完成整体紧固。为了保证在 75 MPa (工作压力)下的承压安全，螺纹套必须保持足够的壁厚。

因此：防喷器模型最内层螺栓外螺纹设置尺寸为 $M56 \times 4$ ；中间层 17-4PH 螺纹套(标注出内、外双螺纹)，外径设置尺寸为 $M90 \times 4$ 内径设置尺寸为 $M56 \times 4$ ；螺纹套径向壁厚为： $(90\text{ mm} - 56\text{ mm})/2 = 17\text{ mm}$ 。最外层防喷器壳体在扩孔后的安装孔尺寸 $\Phi 90\text{ mm}$ 。

对于 17-4PH 这种高强度材料，17 mm 的壁厚足以应对高压载荷下的剪切力，并能有效缓解螺纹根部的应力集中。在确定 17 mm 径向壁厚时，本研究综合考虑了抗剪切强度与刚度匹配。17-4PH 不锈钢具有极高的屈服强度，远超普通低合金钢壳体。这种高强度壁垒能有效阻断受损螺纹孔处的裂纹扩展路径，通过螺纹套的径向约束力，对扩孔后的壳体基体产生一定的预紧增强效应。同时，密封台阶处配合的专用胶粘剂不仅起到辅助密封作用，更在异质材料间形成了微米级的弹性缓冲层，减少了振动载荷下的微动磨损[5]。

2.2. 几何模型的建立

对 FZ35-70 闸板防喷器壳体进行建模与模型简化。首先通过阅读参考文献以及防喷器相关尺寸图纸获取壳体尺寸数据。在 SolidWorks 环境下，基于参数化设计原理对壳体进行数字化几何重构，建立与实物 1:1 对应的三维模型[6]，如图 1。

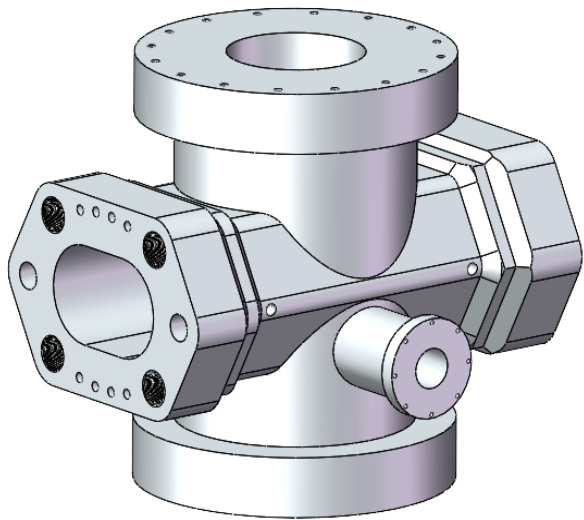


Figure 1. 3D model of blowout preventer housing
图 1. 防喷器壳体三维模型图

为提高后续有限元仿真效率，在不影响承压结构强度的前提下，对壳体上的非承压倒角、微小孔洞及标识铭牌等非关键特征进行合理简化。为了节省计算空间，将壳体上一些不影响分析结果的结构省略，如部分圆孔、螺纹、倒角等。承压分析时密封橡胶条对闸板的应力无影响，故将顶密封、侧密封、底密封橡胶条都略去。此外，钻杆的应力及变形不是关心的重点，可以把它作为刚体部件来建模，从而减小模型的规模[7]。

3. 数值仿真验证

3.1. 几何简化与材料属性设置

针对“螺栓 - 螺纹套 - 基体”这一涉及多体接触的非线性力学问题，本文借助 ANSYS 软件抓取 75 MPa 的典型载荷步下的全局应力响应。“螺栓 - 螺纹套”以及“螺纹套 - 壳体”的接触面均设定为摩擦接触(Frictional)，接触算法采用增广拉格朗日法(Augmented Lagrange)，摩擦系数根据钢 - 钢接触面润滑状态统一设为 0.2 [8]。壳体材料为 25CrNiMo 合金渗碳钢；螺纹套采用调质态 17-4PH 不锈钢；连接螺栓采用 40Cr 合金钢。各组成构件的具体力学参数严格按照表 1 进行赋予，考虑到原始结构在超压载荷下的最高应力可能超过材料的屈服极限，本研究在仿真中采用了双线性各向同性强化弹塑性材料模型。通过引入屈服后的切线模量，能够更真实地捕捉材料在步入塑性阶段后的应力 - 应变非线性响应规律。

Table 1. Model component parameter table
表 1. 模型零件参数表

类型	材料	弹性模量	泊松比	屈服强度
壳体	25CrNiMo 合金渗碳钢	200 GPa	0.3	835 MPa
螺纹套	17-4PH 不锈钢	200 GPa	0.28	700 MPa
螺栓	40Cr 合金钢	210 GPa	0.28	785 MPa

3.2. 网格划分与无关性验证

为了让有限元计算工作量保持在合理区间，计算中充分利用了防喷器壳体结构在几何与载荷上的对

称特性，将模型简化为 1/4 对称模型，同时螺纹模型里没有设置螺纹线，可忽略对计算结果的影响，随后在剖切面上施加严格的对称边界约束，如图 2。

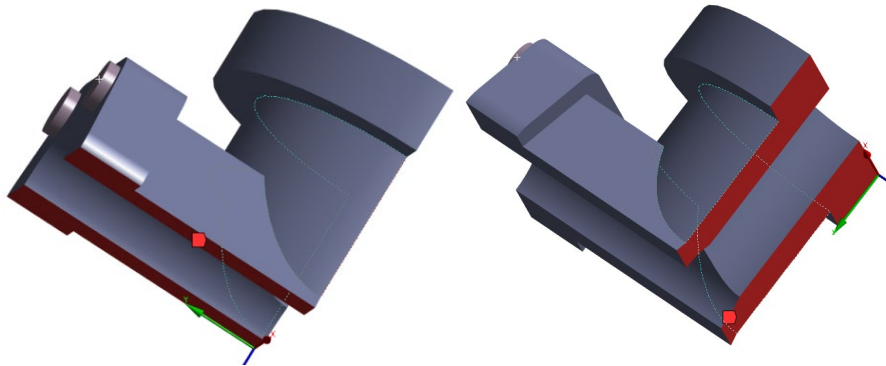


Figure 2. Symmetry constraints of 1/4 model
图 2. 1/4 模型对称约束图

由于螺纹孔及相贯线部位为应力集中危险区，需进行局部网格加密。针对 M56 螺纹牙尖等曲率变化剧烈的部位，采用六面体主导网格划分如图 5。选取壳体危险部位的最大等效应力作为评价指标[9]。

数据对标：设定全局网格尺寸分别为 20 mm、15 mm、10 mm 进行对比分析。设定局部加密网格尺寸在 1~5 mm 范围内波动。壳体网格为 15 mm，螺栓网格进行局部加密为 5 mm，两者连接处设置自适应性，如图 3。



Figure 3. Mesh of 1/4 housing
图 3. 1/4 壳体网格划分图

无关性验证：

Table 2. Mesh independence verification results table
表 2. 网格无关性验证结果表

面网格尺寸/mm	局部网格加密尺寸/mm	最大应力	误差%
20	10	355.32	
15	5	253.50	28
10	1	238.88	5

结论陈述：由表 2 可知，当网格从 20 mm 过渡到 15 mm 时，最大应力出现了 21% 的显著变化。这主要是因为原始粗糙网格(20 mm)未能有效捕捉螺纹根部倒角及相贯线处的几何曲率突变，产生了严重的数值剪切自锁及应力平滑现象。而当局部加密至 5 mm 及以下时，网格能够开始解析该高梯度应力集中区的几何特征。当进一步加密至 1 mm 时，最大应力变化率仅为 5%，结果趋于稳定。这充分证明了对该关键部位进行 1 mm 局部加密的必要性。当全局网格为 15 mm、局部加密为 5 mm 时，应力结果趋于稳定(变化率小于 5%)如表 2。因此，后续所有分析均采用此网格方案，以确保计算精度与效率。

3.3. 载荷条件与边界条件

3.3.1. 载荷条件

明确 75 MPa 的工况设定；边界条件设置如图 6：对壳体远端进行全约束处理，压力载荷分步施加：第一步施加螺栓预紧力，根据机械设计手册 3.5.2 预紧力的控制中合金钢螺栓相关公式[10]，计算 M56 高强度螺栓的预紧力。

螺栓预紧力计算：

合金钢螺栓

$$F' = (0.5 \sim 0.6) \sigma_s A_s \quad (1)$$

σ_s —— 螺栓材料的屈服点，MPa；

A_s —— 螺栓公称应力截面积，mm²。

$$d_3 = d_1 - \frac{H}{6} \quad (2)$$

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2} P \quad (3)$$

$$A_s = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 \quad (4)$$

式中 d_1 —— 外螺纹小径， $d_1 = 51.670$ mm；

d_2 —— 外螺纹中径， $d_2 = 53.402$ mm；

d_3 —— 螺纹的计算直径，mm；

H —— 螺纹的原始三角形高度，mm；

P —— 螺纹螺距， $P = 4$ mm。

由公式(4)可得 $H \approx 3.4$ mm；

由公式(3)可得 $d_3 = 51.103$ mm；

由公式(2)可得 $A_s = 2143.68$ mm²；

10.9 级合金钢螺栓：屈服强度 $\sigma_s = 940$ MPa；

由上述公式(1)可得： $F'_{\min} = 1007.53$ kN；

$$F'_{\max} = 1209.04 \text{ kN}。$$

为了保证螺栓自身绝对不会发生屈服(留有充足的安全余量)，又提供了足够的压紧力来对抗 75 MP 的井控高压，因此螺栓预紧力取中间值 $F' \approx 1108$ kN。

3.3.2. 条件设置

在壳体内腔施加 1 秒时间，从 0 递增至 75 MPa 的流体压力，以精确模拟实际井控开启瞬间的瞬态响应，并且施加固定支撑，对壳体进行 ANSYS 有限元分析[11]，如图 4。

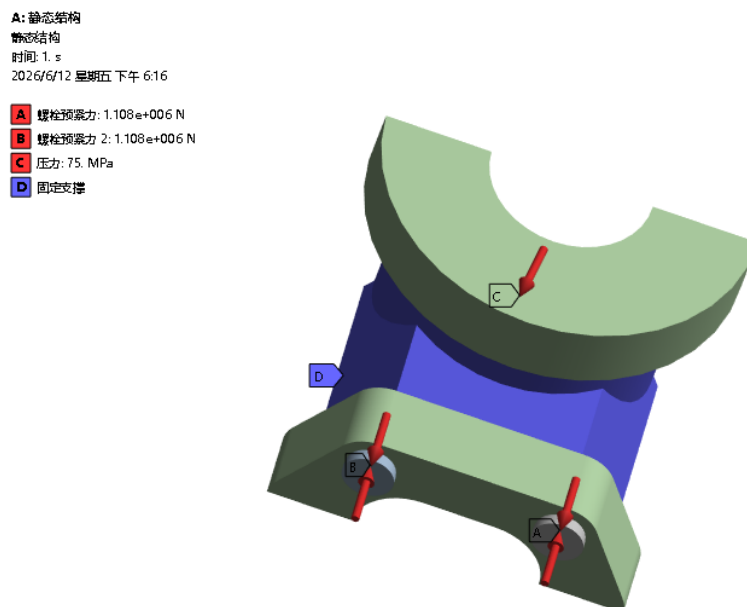


Figure 4. Boundary condition setup for 1/4 housing
图 4. 1/4 壳体条件设置图

4. 结果分析与对比

4.1. 原始壳体结构的应力分布

原始壳体有限元分析结果如图 5、图 6：在壳体内腔施加 1 秒时间，从 0 递增至 75 MPa 的压力后，原始壳体结构最大总变形位于防喷器壳体顶端内侧，最大总变形为 0.18499 (mm)；最小总变形位于防喷器壳体腔室内部，最小变形为 0 (mm)；最大等效应力位于防喷器壳体顶端内侧，最大等效应力为 238.79 (MPa)；最小等效应力位于防喷器壳体腔室内部，最小等效应力为 0.0030764 (MPa)。

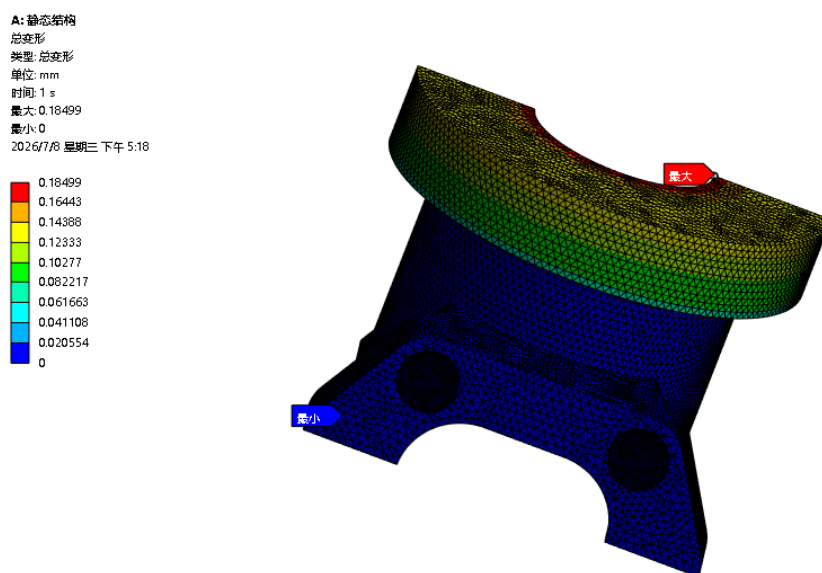


Figure 5. Finite element analysis of total deformation in 1/4 housing
图 5. 1/4 壳体总变形有限元分析

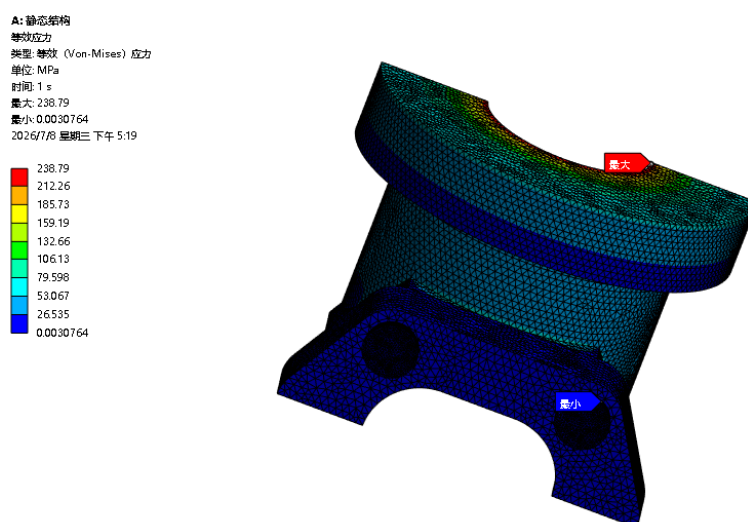


Figure 6. Finite element analysis of equivalent stress in 1/4 housing
图 6. 1/4 壳体等效应力有限元分析

4.2. 改型修复后的应力分布

“螺栓 - 螺纹套 - 壳体”界面的应力传递及根部应力集中缓解情况如图 7、图 8。在壳体内腔施加 1 秒时间，从 0 递增至 75 MPa 的压力后，1/4 壳体带螺纹套仿真结果显示：壳体结构最大总变形位于防喷器壳体顶端内侧，最大总变形为 0.13211 (mm)；壳体结构最小总变形位于防喷器壳体腔室外侧，最小变形为 0 (mm)；壳体结构最大等效应力位于防喷器壳体顶端内侧，最大等效应力为 170.63 (MPa)；壳体结构最小等效应力位于防喷器壳体腔室外侧，最小等效应力为 0.0035533 (MPa)。

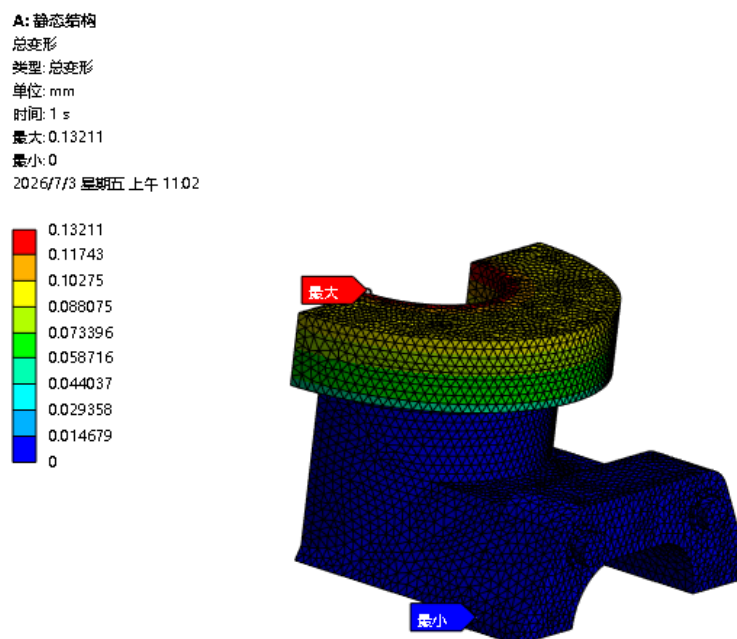


Figure 7. Finite element analysis contour plot of total deformation in 1/4 housing with threaded insert
图 7. 1/4 壳体带螺纹套总变形有限元分析图

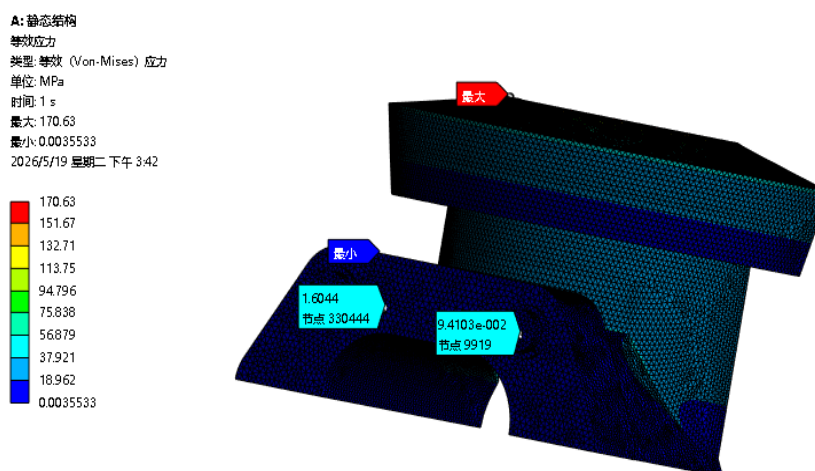


Figure 8. Finite element analysis contour plot of equivalent stress in 1/4 housing with threaded insert

图 8. 1/4 壳体带螺纹套等效应力有限元分析图

结果对比：引入螺纹套后，原先直接作用于壳体相关区域的载荷被有效疏导。在 75 MPa 载荷下，壳体螺纹根部的第一主应力峰值下降，应力高值区由壳体基体向 17-4PH 螺纹套中部转移。这种应力“转移机制”利用了 17-4PH 材料的高承载限值，使整体结构在超压工况下仍保持在弹性变形范围内，显著提升了结构的疲劳寿命上限。从深层次的力学传递机理来看，引入 17-4PH 螺纹套后，原本直接作用于低合金钢壳体脆弱螺纹牙上的集中载荷，被巧妙地转化为螺纹套内、外双层螺纹副的渐进式剪切传递。17-4PH 不锈钢具备高达 700 MPa 的屈服强度，其承载上限远高于壳体基体。在大载荷压迫下，螺纹套发挥了“刚性屏蔽与柔性过渡”的双重功效，径向层面：17 mm 的壁厚形成了强大的径向约束环，有效锁住了扩孔后壳体内部的膨胀变形，使整体最大变形量处于在 0.13211 mm (下降了近 30%)；轴向层面：载荷在异质界面间被二次重组分配，应力高值区成功被疏导并“合围”在螺纹套的中部核心区域。由于该区域远离外部硫化氢腐蚀介质，且材料本身抗应力腐蚀开裂性能极为优异，这种峰值应力的安全转移，成功使壳体主体的受力状态恢复至安全的弹性变形低应力区间。降低了螺纹根部的应力集中，预示着其疲劳性能将得到有效提升。

5. 结论

有限元仿真结果表明，在超压强度校核载荷下，引入 17-4PH 螺纹套后，使壳体高应力集中场的分布状态得到改善。壳体最大等效应力由原始状态下的 238.7 MPa 骤降至 170.63 MPa，远低于基体材料的屈服极限；同时，整体结构的最大变形量由 0.18499 mm 大幅收缩至 0.13211 mm。有效降低了原结构因局部应力集中而步入塑性失稳阶段的风险，从而有助于抑制微观晶格滑移与宏观疲劳裂纹的萌生与演化路径。改型设计利用厚壁螺纹套的径向约束效应与空间疏导机制，将主体结构的受力状态维持在弹性变形范围内。该方案满足 API 16A 保压要求，其材料特性更提供了针对高含硫环境的抗腐蚀性能储备。相比于壳体整体报废更换，该修复技术可有效缩短维修周期，降低井控维护成本，为老旧装备的绿色再制造提供了可行的学术与工程范式。

参考文献

- [1] 杨利强. 防喷器智能控制装置研制及应用[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(5): 138-144.
- [2] 张建, 屈志明, 张旭, 等. 超深井剪切闸板防喷器高温密封结构优化与试验[J]. 石油钻采工艺, 2025, 47(4): 434-

441.

- [3] 王佳丽, 李斌. 旋转防喷器壳体疲劳裂纹扩展研究[J]. 应用力学学报, 2023, 40(4): 824-831.
- [4] 李灿霞. 闸板防喷器组件拆装装置关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2025.
- [5] 何莎, 邓勇刚, 俞嘉敏, 等. 螺栓损伤对环形防喷器密封性能的影响及量化评定指标研究[J]. 化学工程与装备, 2025(12): 14-16+19.
- [6] 周思益. 基于失效分析的双闸板防喷器优化设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2024.
- [7] 郭旭阳. 2FZ28-140 双闸板防喷器核心件设计研究与结构优化[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2023.
- [8] 冯少波, 张耀明, 武胜男, 等. 极端温度条件下环形防喷器胶芯密封响应演化与失效分析[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(9): 3753-3762.
- [9] 姚方旭, 刘洋, 孙龙飞, 等. 锥形防喷器密封性能分析及结构改进[J]. 润滑与密封, 2024, 49(11): 145-152.
- [10] 成大先, 主编. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2025.
- [11] 李树梨, 徐崇文, 孙正洋. 顶驱防喷器设计仿真优化与实验研究[J]. 钻采工艺, 2026, 49(2): 169-174.