

深海保压取心球阀驱动力影响机理与预测模型*

秦如雷^{1,2}, 卢秋平^{3*}, 谢文卫³, 于彦江³, 许本冲^{1,2}, 高洁云^{1,2}

1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300300

2. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 天津 300300

3. 广州海洋地质调查局, 广州 511458

摘要: 保压取心钻具对深海资源评价与开发至关重要, 其密封球阀的关闭性能直接决定原位岩心样品获取成败。针对球阀驱动力受多因素耦合影响、精确量化困难的问题, 本文融合试验与机器学习展开驱动力多因素定量预测研究。通过全面析因试验, 获取温度、密封圈类型及润滑剂粘度等多水平工况下的驱动力数据, 系统分析各因素主效应及交互效应。结果表明, 润滑剂粘度是首要影响因素, 且与温度存在强烈耦合作用。基于此, 结合数据增强技术并采用梯度提升回归算法构建多因素预测模型, 模型 R^2 值达 0.99 以上。量化评估显示关键特征重要性排序与试验分析趋势一致, 验证了方法有效性。研究结果可为深海保压取心钻具球阀密封系统优化设计和材料选型提供可靠依据。

关键词: 深海钻探; 保压取心; 球阀驱动力; 多因素交互效应; 机器学习预测

中图分类号: P634.4

收稿日期: 2025-07-16

Mechanisms and Predictive Modeling of Ball-Valve Actuating Force in Pressure-Preserved Coring Tools

Qin Rulei^{1,2}, Lu Qiuping^{3*}, Xie Wenwei³, Yu Yanjiang³, Xu Benchong^{1,2}, Gao Jieyun^{1,2}

1. Institute of Exploration Techniques, Chinese Academy of Geological Sciences, Tianjin 300300, China

2. Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300300, China

3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 511458, China

Abstract: Pressure-Preserved Coring Tools are critical to deep-sea resource assessment and development, and the closure performance of their sealing ball valve directly determines the success of acquiring in situ core samples. Addressing the difficulty of accurately quantifying the ball-valve actuating force under multi-variable interaction effects, this study integrates experiments with machine learning to achieve quantitative prediction across multiple factors. Through comprehensive factorial experiments, we obtain driving-force data under multi-level operating conditions involving temperature, seal-ring type, and lubricant viscosity, and systematically analyze main effects and interactions. The results indicate that lubricant viscosity is the primary influencing factor, exhibiting strong coupling with temperature. Building on these findings, we employ data-augmentation techniques and a gradient boosting regressor to construct a multi-factor prediction model. The model attains an R^2 exceeding 0.99, and quantitative feature-importance analysis yields a ranking consistent with experimental trends, validating the effectiveness of the approach. The results provide a reliable basis for the optimized design and materials selection of sealing systems in deep-sea Pressure-Preserved Coring Tools.

***基金项目:** 国家重点研发计划项目 (编号: 2023YFC2813102); 工业和信息化部高技术船舶项目 (CJ05N20); 自然资源部定向钻井工程技术创新中心、中国地质学会自动化智能化钻探装备创新基地开放课题资助项目 (PY202401, PY202402)

作者简介: 秦如雷 (1987—), 男, 高级工程师, 博士研究生, 从事深海钻探装备研发与应用技术研究。Email: qinrulei@foxmail.com, ORCID: 0000-0001-9143-4426。

通讯作者: 卢秋平 (1987—), 男, 高级工程师, 从事海域天然气水合物勘查技术研究, luqiupingmail@163.com。

Keywords: Deep sea drilling; Pressure-preserved coring; Ball valve actuating force; Multi-variable interaction effects; Machine learning prediction

0 引言

原位低扰动岩心是保障海洋科学研究与深海资源开发基础数据真实性的关键前提(Liu et al., 2025; Tommasi et al., 2019)。深海沉积物物性力学性质复杂，传统取心技术获得的岩心，在从深部地层提升至地表的过程中，其内部流体介质及孔隙压力已经释放，导致难以获得真实的储层物理力学参数，进而影响后续产能评价模型设计(Dugan & Germaine, 2008; Santamarina et al., 2012; Wu et al., 2020)。为了准确评估储层开发潜力，需要从地层中获取原位岩心进行物化测试、储量评估以及开采工艺研究(樊奇等., 2024; 万春燕 等, 2024)。

因国际深海钻探计划（DSDP）和国际大洋钻探计划（ODP）对水合物原位样品的采集需求，保压取心钻具作为一项关键技术应运而生(见图 1)，该工具的核心目标是在取心过程中保持岩心原位压力，从而最大限度地保存地层流体的原始物理化学性质(Schultheiss et al.,2006; Zhu et al.,2011)。保压取心技术被认为是获取岩心原位压力、含气量、水合物饱和度等参数的最优方法(Abid et al.,2015)。美国和欧盟先后研发了 PCS（Pressure Core Sampler）、FPC（Fugro Pressure Corer）、HRC（Hydrate Autoclave Coring Equipment Rotary Corer）等保压取心工具(Abegg et al., 2008; Schultheiss et al., 2009)。日本能源与金属安全机构（JOGMEC）进一步研制 PTCS（Pressure-Temperature Coring System），并在南海海槽以东海域完成多次有效的保压取样(Yamamoto, 2015)，逐步形成保压取心方法学体系。进入 21 世纪以来，中国地质调查局、中国石油集团长城钻探工程有限公司及其他科研开发单位加速攻关，研发了 WPCS（Wireline Pressure Coring System）、TKP 与 GW-CP 等多种适用于煤层气与水合物等非常规能源的系列化钻具，并在现场实现稳定应用(Lu et al., 2024; 杨立文 等., 2020; 赵义 等., 2023)。上述保压取心钻具大多以球阀作为高压密封方式(Kubo et al.,2014)，依技术路线不同采用转轴偏置或齿轮-齿条等多种驱动方案(高明忠 等., 2024)，具体结构详见图 2。

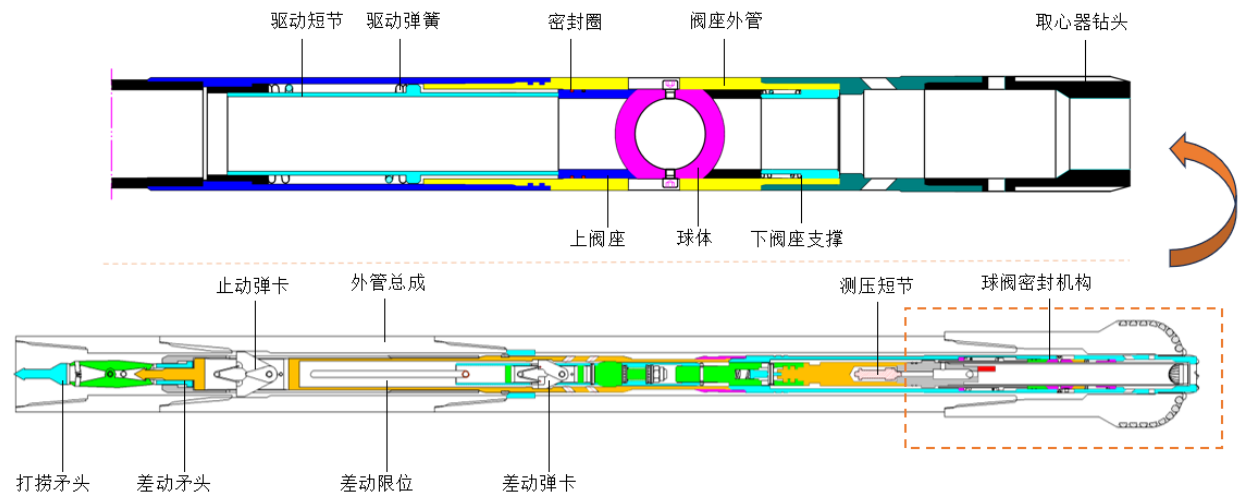


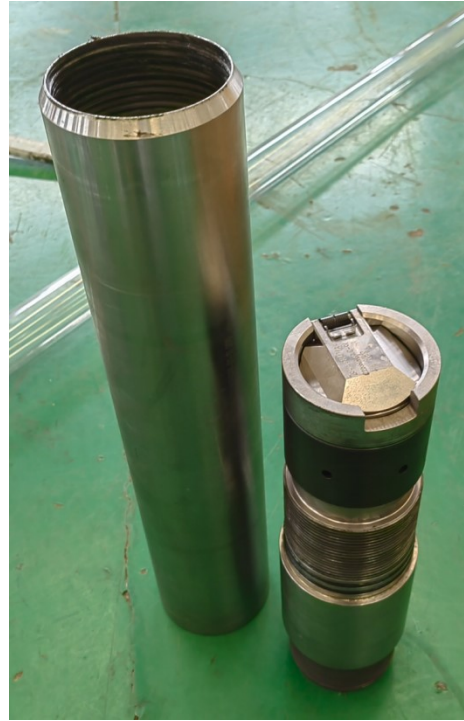
图 1 保压取心钻具
Fig.1 Pressure-preserved coring tool



(a) 转轴偏置球阀



(b) 齿轮-齿条球阀(卢春华等, 2023)



(c) 翻板密封阀

图 2 保压取心钻具密封阀主要结构

Fig 2 Main structure of the ball valve of the pressure-preserved coring tool

本文以转轴偏置式球阀为研究对象, 该球阀依靠弹簧提供驱动力, 由于转轴偏置使驱动力的作用线与转轴不共线, 从而产生非零力臂并形成驱动扭矩, 球体据此绕偏置转轴发生旋转。球体沿偏心轨迹自单侧起始与阀座渐近并对通道截面实施渐进式闭合最终贴合完成密封, 其关闭效果直接关系到保压取心作业的成败(见图 3)。



(a) 球阀翻转到位获取了水合物保压岩心



(b) 球阀翻转密封失败

图 3 保压取心钻具工况对比

Fig.3 Comparison of operating conditions for pressure-preserved coring tool

针对保压取心钻具球阀的力学机制,国内外专家学者进行了深入研究,谢和平等研发了重力式、弹力式和磁力式保压控制器,并通过正交试验分析不同凹槽设计、摩擦系数等因素对密封性能的影响(谢和平等, 2023; 王天宇等, 2023)。德克萨斯大学 Flemings 等应用 Geotek 公司的保压取心钻具,解决了球阀翻转密封失效后,在墨西哥湾深水区 Green Canyon Block 955 以接近原位地层压力回收了岩芯(Flemings et al.,2020)。Wang 等提出了一种基于芯管直接密封原理的钻具保压方案,通过理论计算和实验测试研究了钻具的保压性能(Wang et al.,2022)。Lu 等研发的 WPCS 保压取心系统采用球阀密封,其球阀关闭由阀门推力弹簧的弹簧力以及翻转销和键槽机构共同作用,成功应用于中国南海天然气水合物勘查作业(Lu et al.,2024)。Guo 等研究了保压取心钻具的驱动力生成机制,并应用 CFD 对其内部流场分布进行优化,从而确定最佳设计参数(Guo et al.,2023)。韩泽龙等利用数值模拟研究了球阀机构的关闭速度和随驱动力的变化关系,提出了球阀摩擦系数与球体振动间的定性评价(韩泽龙等, 2024)。卢春华等提出一种新型齿轮-齿条关闭球阀研制,计算了球阀的工作密封比压及打捞内管所需的提拉力,该球阀具有良好的反转和密封性能(卢春华等, 2023)。现有研究多聚焦于球阀结构优化及球体动力特性的分析,而对驱动力起关键作用的弹簧-阀座结构的影响因素缺乏深入探讨,从而难以实现对最佳驱动力的定量评估。

球阀的驱动力主要用于克服阀座与球阀管之间的摩擦力以及润滑介质的粘滞阻力(Cui et al.,2017)。在深海天然气水合物钻探的特殊工况下,较低的环境温度不仅会改变密封材料的物理特性,还会显著增加润滑剂的粘度,从而对驱动力产生复杂影响。因此,研究温度、密封圈材料和润滑策略等因素对球阀驱动力的综合影响,对于优化驱动系统设计、确保关闭可靠性至关重要。

本研究采用全面析因试验方法,系统地研究了温度、密封圈类型和润滑剂粘度对保压取心钻具球阀驱动力的影响规律,着重分析了各因素间的交互效应,揭示了影响保压取心钻具球阀驱动力的关键因素及其耦合关系。

1 理论基础

1.1 钻具球阀密封系统原理

在球阀翻转密封过程中,驱动短节、上阀座(含密封)、球体及下阀座整体向下移动,同时由于转轴与键槽的协同作用,最终实现球阀 90°翻转。球阀翻转的关键在于驱动弹簧能够提供足够的驱动力。下行过程中,向下分力包括:(1)驱动力 F_d ; (2)重力 F_g 。向上分力则包含:(1)下部弹簧力 F_L ; (2)浮力 F_b ; (3)摩擦阻力 F_f (见图 4)。运动单元的浮力与自重为球阀自身特性,与环境因素关联较小,因此,决定下行运动单元能否顺利运动的关键因素是上阀座密封圈与阀座外管间的摩擦阻力,该摩擦阻力受密封圈类型及润滑方式影响。随着取样深度增加,环境温度变化影响润滑介质粘度,进一步改变了摩擦阻力。

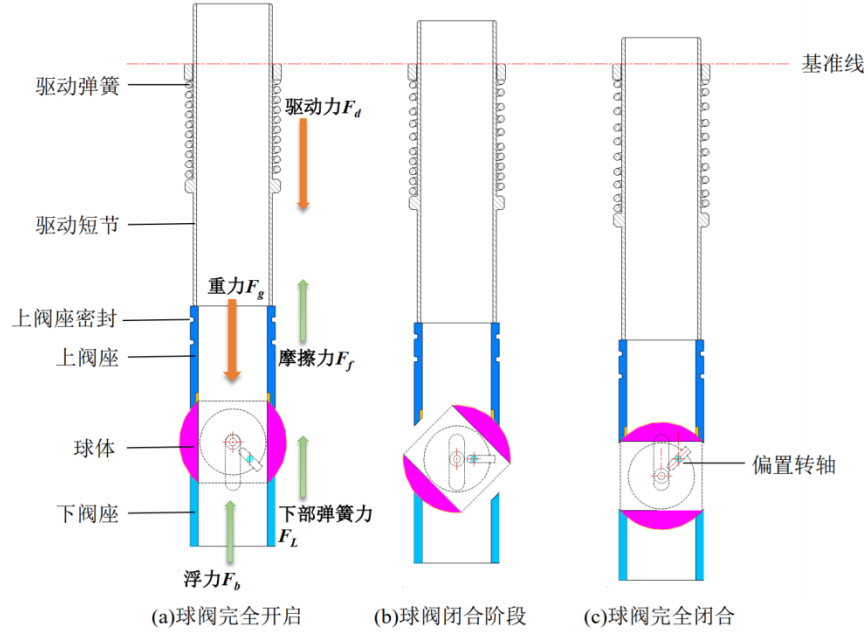


图 4 密封球阀运动过程力学分析

Fig.4 Mechanical analysis of the sealing ball valve's motion process

1.2 球阀关闭过程的力学模型

保压取心钻具球阀的关闭是一个动态力学过程，其驱动力 F_d 必须足以克服阻力才能推动阀座带动球体旋转至关闭位置。其力学平衡模型为：

$$F_d = \sum F_r = F_f + F_g + F_L + F_b \quad (1)$$

其中， $\sum F_r$ 为总阻力，主要由以下几部分构成：

上阀座密封圈与阀座外管间的摩擦力 F_f 是最主要的阻力来源，产生于密封圈在预紧力作用下与阀体内壁的接触面。

总成重力 F_g 、下部弹簧力 F_L 以及总成浮力 F_b ：这些力来自于球阀自身特性，与环境因素关联较小，可忽略不计。

因此，球阀驱动力 F_d ，其大小主要用于克服摩擦力：

$$F_d > F_f = \mu \cdot N \quad (2)$$

摩擦力 F_f 与密封圈施加的径向接触压力直接相关。总正压力 N 可表示为：

$$N = P_r \times A \quad (3)$$

其中， P_r 是密封圈的径向接触压力(Pa)， A 是接触面积(m²)。对于一个环形密封圈，该面积为：

$$A = \pi D w \quad (4)$$

此处， D 是阀管内径， w 是密封圈的有效接触宽度。

1.3 摩擦力学与粘温变化理论

1.3.1 摩擦力学与润滑状态

在干摩擦或边界润滑条件下，摩擦力 F_f 可由库仑摩擦定律描述：

$$F_f = \mu \cdot N = \mu \cdot P_r \cdot \pi D w \quad (5)$$

当润滑剂与环境温度关联后，摩擦系数 μ 不再是一个常数。其变化行为可由 Stribeck 曲线描述(王慰祖和黄平, 2004)，该曲线将 μ 描绘为无量纲参数赫西数 (Hersey number, H)的函数(张晓寒 等, 2024)，其中赫西数的一般表达式为：

$$H = \frac{\eta \cdot v}{P_L} \quad (6)$$

其中， η 是动力粘度， v 是相对速度， P_L 是单位面积载荷(可由 P_r 近似)。描述 Stribeck 曲线的经验公式为：

$$\mu(H) = \mu_b + (\mu_{\min} - \mu_b) \cdot e^{-c \cdot H^n} + k \cdot H \quad (7)$$

其中， μ_b 是边界润滑状态下的摩擦系数(高摩擦)， $\mu_{\min}$ 是流体动压润滑状态下的最低摩擦系数， e 是自然常数的底， c 是衰减形状系数， n 是指数幂次， k 是黏性项系数 ($k \geq 0$)， H 是赫西数。

指数项模拟了在混合润滑区域摩擦力的急剧下降， $k \cdot H$ 项代表了在全膜流体润滑状态下，由粘滞阻力引起的摩擦力线性增长。

摩擦力 F_f 最终可表示为

$$F_f = \left[\mu_b + (\mu_{\min} - \mu_b) \cdot e^{-c \left(\frac{\eta v}{P_r} \right)^n} + k \cdot \frac{\eta v}{P_r} \right] \cdot P_r \cdot \pi D w \quad (8)$$

1.3.2 润滑剂的粘温特性

润滑剂的粘度通常对温度敏感，这是导致低温下驱动力增大的关键原因。对于石油基产品，且以运动粘度为主要参考指标的润滑剂，Walther-ASTM 方程适用性较强(Itoh et al.,2008)，也是 ASTM D341 粘温图的基础(Al-besharah et al.,1987)，该方程可表示为：

$$\log(\log(\eta + k)) = C_1 - C_2 \log(T) \quad (9)$$

其中， C_1 和 C_2 是常数， k 也是常数(通常为 0.6 或 0.7)， η 是润滑剂运动粘度(cSt)， T 是绝对温度。

2 试验设计与实施

2.1 试验条件与流程

根据球阀驱动力影响因素，将润滑油粘度、环境温度、密封圈类型作为自变量，将驱动力作为因变量。为实现多组试验对照，选取美孚 XHP222 极压抗磨高温复合锂基润滑脂(基础油标准运动粘度 220cSt)和长城 L-HM46 抗磨液压油(标准运动粘度 45cSt)作为球阀系统润滑剂，选取丁腈橡胶(NBR)和聚四氟乙烯(PTFE)两种材质作为阀座密封圈，采用变频冷水制冰机实现试验所需的低温环境，基于钻探船上有限的试验设备条件，主要试验流程与装置见图 5。试验中球阀采用表面粗糙度 $Ra=0.8\mu m$ 的精磨球体。

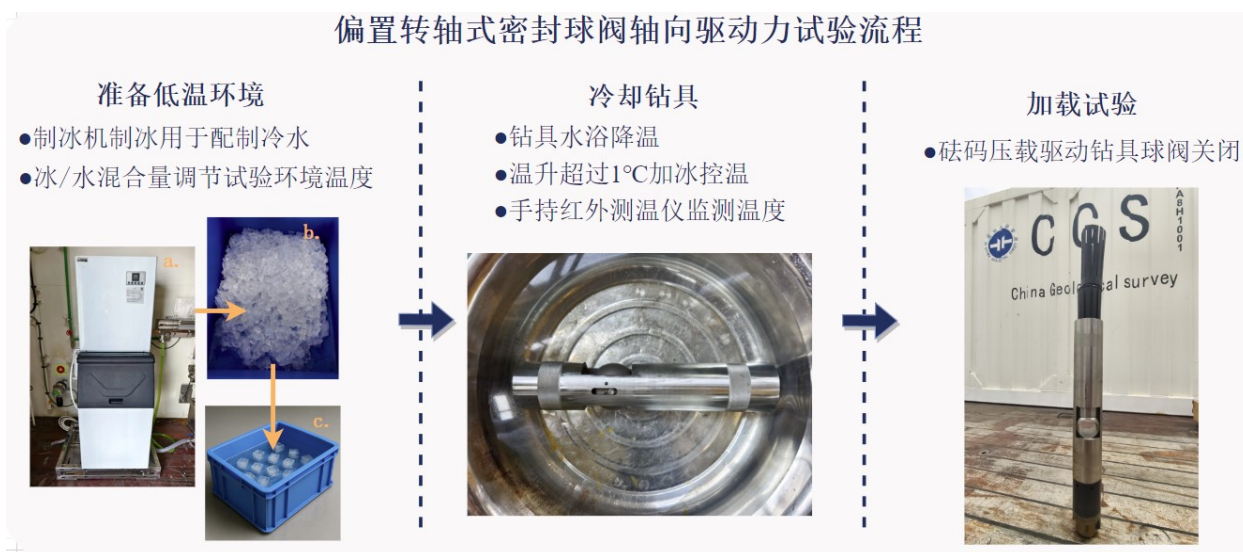


图 5 球阀驱动力测试流程图

Fig.5 Main test flowchart of the ball valve actuating force

2.2 试验因素设计

为了系统研究各因素对球阀驱动力的影响，本试验选取了三个关键因素，并为每个因素设置了不同的水平，具体如表 1 所示。试验采用全面析因设计，共计 $4(\text{温度}) \times 2(\text{密封圈}) \times 3(\text{润滑}) = 24$ 组试验，以确保能够分析所有主效应和交互效应。

表 1 试验因素与水平

Table 1 Experimental factors and levels

因素代号	因素名称	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
A	温度 (℃)	20	10	4	0
B	密封圈类型	NBR	PTFE	-	-
C	运动粘度 (cSt)	0 (无润滑)	45	220	-

根据试验设计表，采用砝码压载法测量不同润滑条件、密封材质及温度下球阀的驱动力值。试验在空气中进行，基于牛顿冷却定律与非稳态对流换热的集中参数模型分析表明，在水浴条件下，用于试验的密封球阀短节经 10min 水浴处理即可有效达到预定温度，其相对温差约为 0.2%；同时，室温环境与冷水之间的热交换在该时间尺度上引起的水浴升温小于 0.5℃。试验使用自制 1kg、0.5kg、0.1kg 等几种钢制砝码，每组工况下依次叠加砝码，每次添加后静置 30 秒以更准确找到静摩擦力阈值，直至阀座发生位移并记录临界砝码总质量，测试每组参数重复试验 3 次以确保数据可靠性。

3 试验结果与数据分析

3.1 主效应分析

主效应分析用于评估单个因素在不同水平下对驱动力的平均影响。

由图 6 可知，温度对驱动力有显著影响，驱动力随温度的增加而降低。在 0℃低温工况下的驱动力(中位数 180N)明显高于 20℃常温工况下的驱动力(中位数 152.5N)。这表明，低温环境会使驱动系统的负载显著增加。

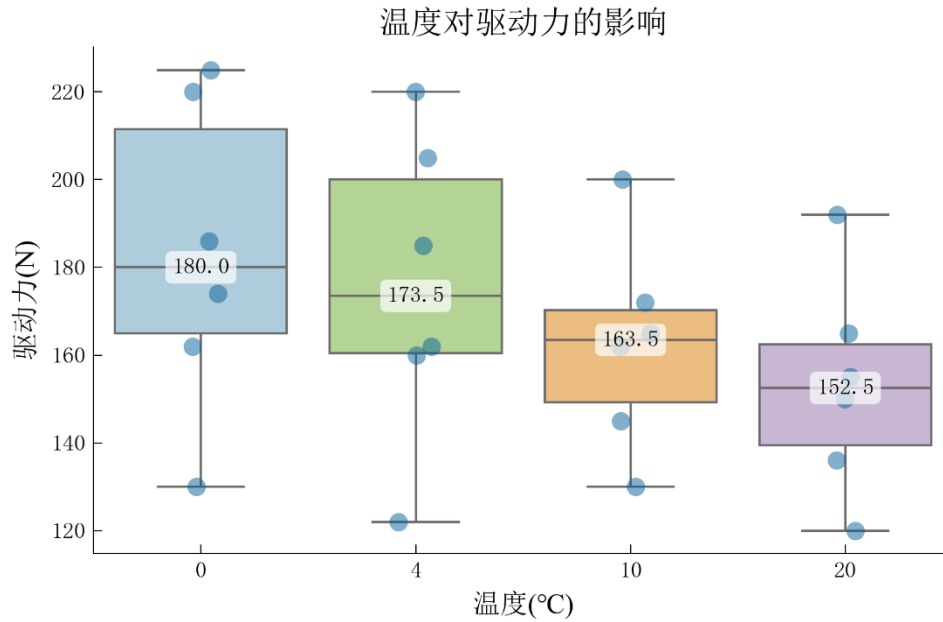


图 6 温度对驱动力的主效应

Fig.6 Main effect of temperature on actuating force

由图 7 可知，使用 NBR 密封圈所需的平均驱动力高于 PTFE。NBR 的驱动力数据分布在约 150 N 至 230 N 之间，中位数约 182N；而 PTFE 则分布在约 120 N 至 185 N 之间，中位数约 150 N。表明 PTFE 材料具有更低的摩擦特性，这与材质自身的摩擦性能是相符合的。

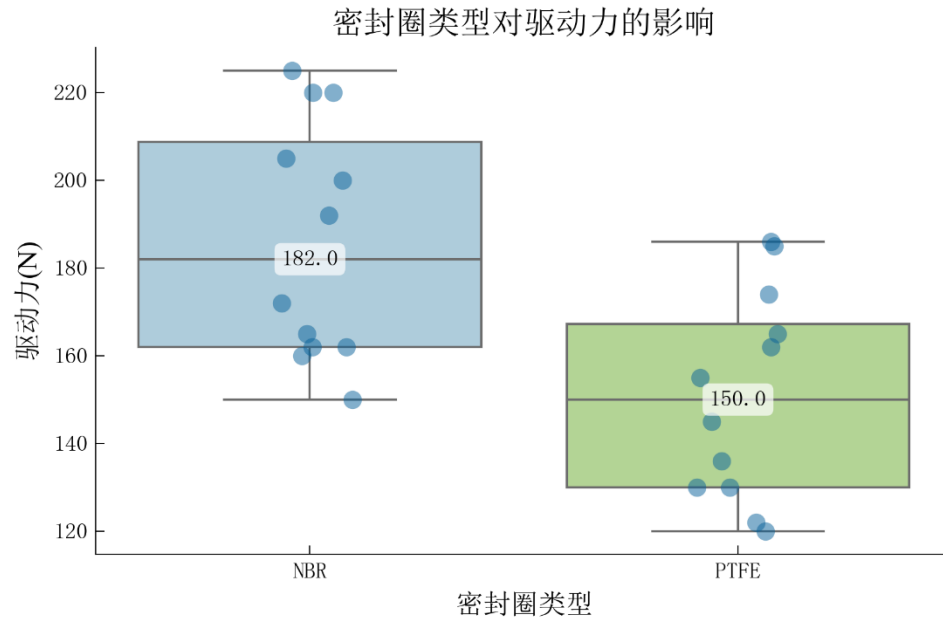


图 7 密封圈类型对驱动力的主效应

Fig.7 Main effect of seal type on actuating force

由图 8 可知，润滑剂粘度的影响呈现出非线性特征。与无润滑(0 cSt, 驱动力中位数约 183 N)相比，使用 45 cSt 润滑剂后驱动力显著降低(中位数约 140 N)。然而，当粘度进一步增加到 220 cSt 时，驱动

力反而回升(中位数约 178.5 N)。这说明了系统存在最佳润滑粘度。

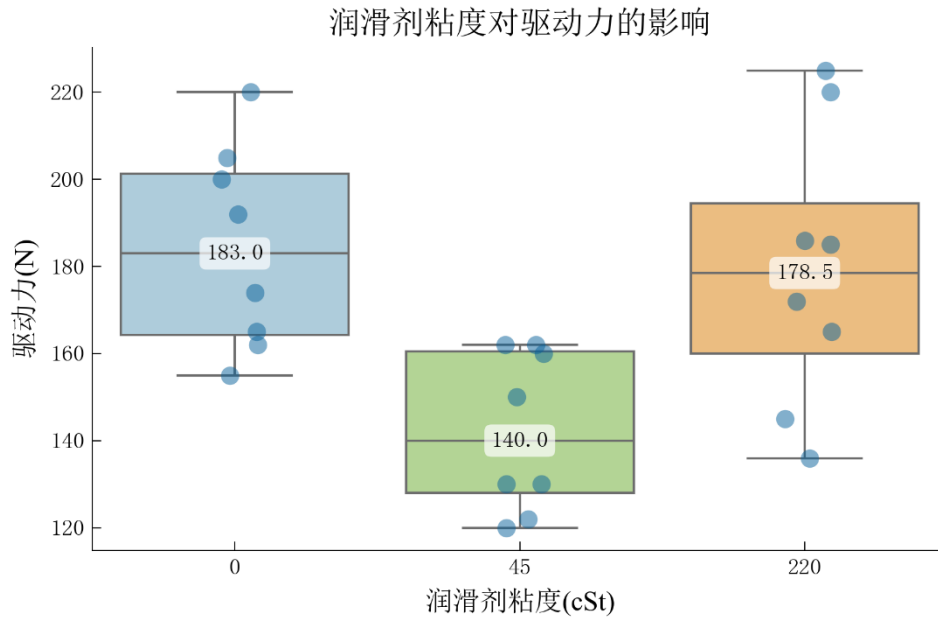


图 8 润滑剂粘度对驱动力的主效应

Fig.8 Main effect of lubricant viscosity on actuating force

3.2 双因素交互效应分析

交互效应分析用于揭示一个因素的影响是否依赖于另一个因素的水平。

如图 9 所示（阴影为 CI=95%置信区间，下同），两种密封圈的驱动力均值线段近于平行，表明温度和密封圈类型之间无显著的交互作用。无论是在 20℃还是 4℃，NBR 所需的驱动力均稳定地高于 PTFE。

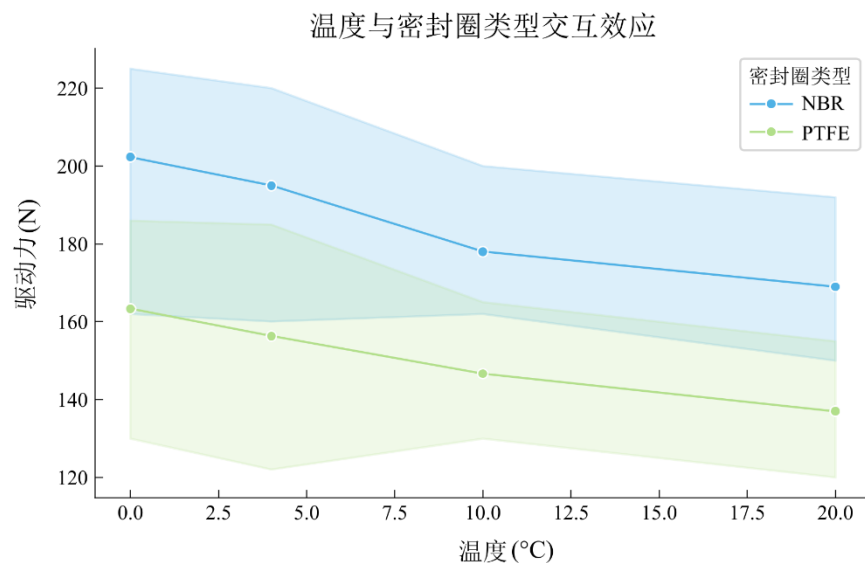


图 9 温度与密封圈类型的交互效应

Fig.9 Interaction effect between temperature and seal type

如图 10 所示，代表两种温度的线段呈现明显的不平行，表明润滑剂粘度与温度之间存在强烈的交

互作用。在 45 cSt 粘度点，两种温度下的驱动力均为最低，且差异最小。然而，当粘度为 220 cSt 时，4℃低温下的驱动力均值 (约 202N)急剧上升，远高于 20℃常温下的驱动力均值(约 150N)。这说明高粘度润滑剂在低温下性能会因粘性阻力增加严重恶化。

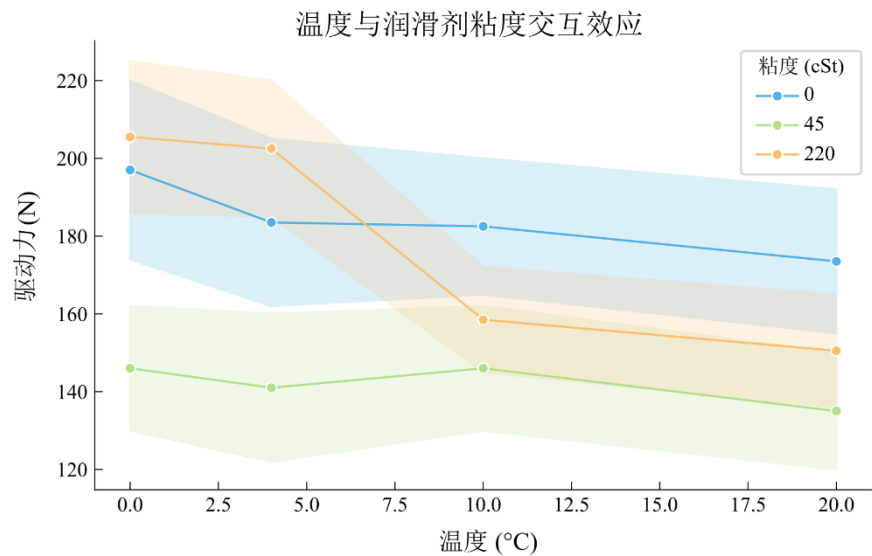


图 10 润滑剂粘度与温度的交互效应

Fig.10 Interaction effect between lubricant viscosity and temperature

如图 11 所示，两条线发生交叉，表明润滑剂粘度与密封圈类型之间同样存在强烈的交互作用。在室温条件下，对于 NBR 从无润滑到 45 cSt 润滑，驱动力均值下降幅度约 47N(从 205N 降至 158N)。而对于 PTFE，这种改善效果则无明显优势，驱动力均值下降幅度约 38N(从 163N 降至 125N)。这说明 45 cSt 润滑剂对 NBR 的摩擦改善效果优于 PTFE。

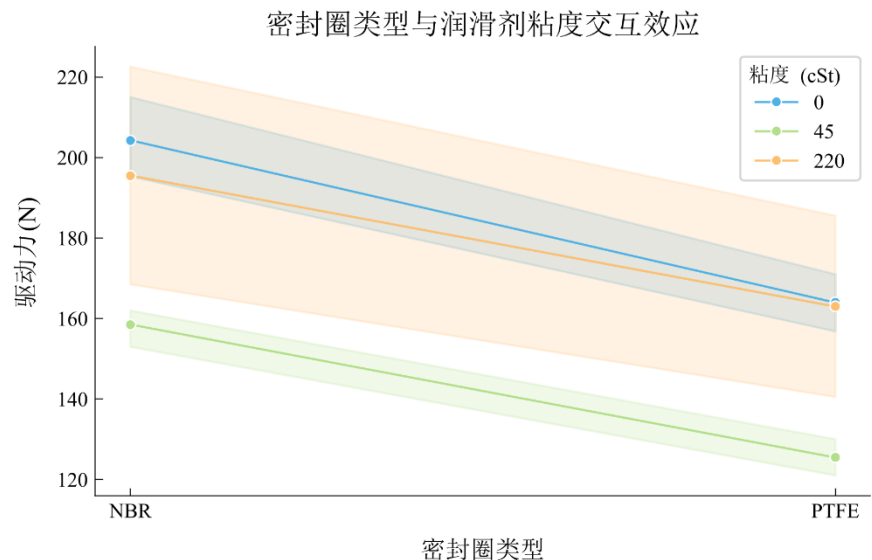


图 11 润滑剂粘度与密封圈类型的交互效应

Fig.11 Interaction effect between lubricant viscosity and seal type

3.3 三因素交互效应分析

双因素分析可探究密封圈类型与润滑剂粘度等两两组合的交互效应，揭示部分性能影响规律，但

仅聚焦双变量，无法涵盖温度等第三因素的潜在作用，也难以呈现多因素耦合下更复杂的交互机制。而三因素分析可纳入温度等变量，精准捕捉多条件协同影响，完善对密封性能规律的认识，为系统优化提供更全面支撑。

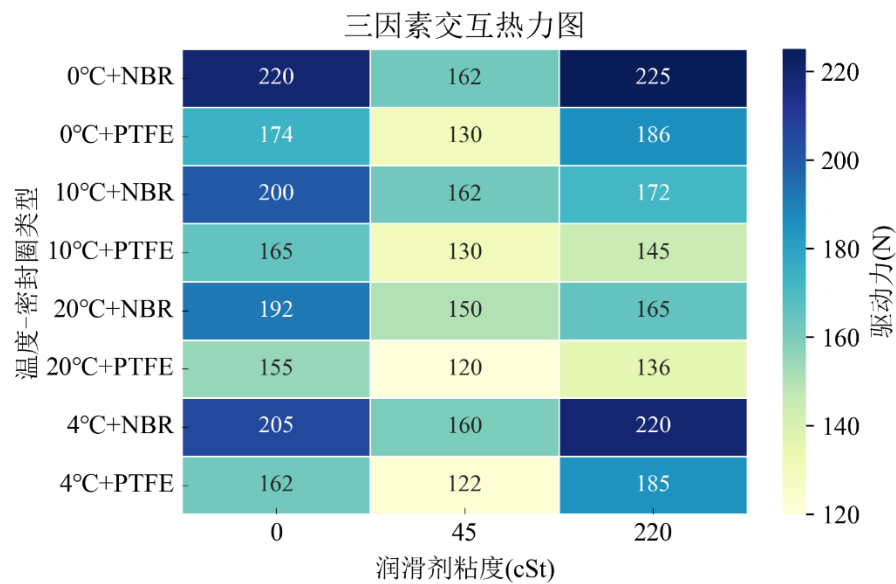


图 12 驱动力三因素交互图

Fig.12 Three-factor interaction diagram of actuating force

三因素交互热力图呈现温度、密封圈类型、润滑剂粘度对结果指标的协同影响。纵轴为温度-密封圈类型组合，横轴是润滑剂粘度，色块颜色与数值对应结果大小。不同因素组合下结果差异显著，如 0°C+NBR 密封圈时，粘度 220cSt 对应值 225N 为试验测得的最高驱动力，而 20°C+PTFE 密封型式，粘度 45cSt 时的驱动力最小，为 120N。相同粘度下，温度、密封圈类型变化会改变结果。

3.4 理论与试验一致性分析

基于球阀关闭过程的力学框架，驱动力主要用于克服密封副的摩擦（公式 2），其中摩擦系数 μ 随赫西数呈 Stribeck 的边界、混合与全膜三段型变化，温度通过 Walther-ASTM 方程间接调控 μ 。据此可得三个可检验趋势：一是接触压力 P_r 升高应推高 F_f ；二是在给定载荷与速度下，随粘度从低到高，摩擦力呈“先降后升”的非单调性；三是低温致运动粘度上升，会将系统推向粘滞主导区，使关闭驱动力系统性增大。上述趋势为试验对照提供了明确的方向性判据。

试验结果与理论趋势在方向性上一致：不同密封材料的可压缩性导致的等效 P_r 差异，对应驱动力分布呈由 NBR 至 PTFE 单调下降（见图 7）；在多种润滑对比条件下，驱动力表现为“先下降、后回升”的走势（见图 8），与 Stribeck 的混合润滑最优区间相吻合；温度方面，在高粘度介质下，低温下的驱动力显著高于高温情形（见图 6），而中等粘度下温差效应减弱（见图 10），符合运动粘度上升将系统引入粘滞剪切主导区的机理。

4 驱动力影响因素定量评价

4.1 预测模型建模方法

基于对关键驱动力影响因素的定量分析，特别是润滑剂粘度、温度和密封圈类型所表现出的复杂非线性关系及耦合效应，为了更精准地预测和评估球阀在不同工况下的驱动力需求，并为工程实践提

供直接有效的指导，进一步引入了机器学习方法构建高精度的预测模型，克服传统经验公式和简化模型在处理此类复杂工程问题时的局限性，实现对驱动力的定量评估与优化。

由于初始试验样本量较小(24 组)，直接用于训练复杂的机器学习模型容易导致过拟合。为提升模型的泛化能力和稳健性，采用了基于初始模型的预测与噪声叠加策略，具体的数据扩充实现路径为：

（1）原始数据与标签处理。依据全面析因设计获取驱动力数据，每个工况重复试验 3 次以抑制偶然误差。模型训练以各工况的均值曲线作为标签值 y ，以避免重复样本对某一工况的过度加权。

（2）特征工程。输入特征为温度（℃）、润滑剂粘度（cSt）与密封圈类型（类别特征）。数值特征经标准化，类别特征采用独热编码；上述处理通过 Scikit-learn 库中 Column transformer 与 Pipeline 类结合实现，以保证训练到推理的一致性。

（3）数据扩充。为提升模型对“温度—粘度—密封类型”联合空间的覆盖度，在小数据样本前提下采用“初始模型预测+微幅物理一致噪声”策略：

- ①以原始数据先训练一个浅层 GBR 初模；
- ②在温度与粘度数据集上进行规则化取样，并在 45cSt 邻域加密采样以覆盖已知最优润滑区间；密封类型在两类间均匀抽样；
- ③丢弃与原始工况或已生成样本重复的点；
- ④用初模对候选点做预测，并叠加零均值高斯噪声，噪声标准差取原始 y 标准差的 5%，并对物理量作下界裁剪以避免负值；
- ⑤合并为扩充数据集，流程中的随机种子固定为 42。

选用梯度提升回归(Gradient Boosting Regression, GBR)算法构建驱动力预测模型。GBR 是一种集成学习算法，它通过迭代地训练一系列弱学习器(决策树)，并将它们线性组合成一个强学习器，能够有效捕捉变量间的非线性关系和交互效应，适用于复杂映射问题。模型的输入特征为温度、润滑剂粘度和密封圈类型，输出目标为球阀驱动力。本研究采用系统性的超参数优化方法来确定模型的最佳配置。整个优化过程在训练集上通过 5 折交叉验证来执行。训练集被平均分为 5 个子集，每次迭代中，模型使用其中 4 个子集进行训练，在剩余的 1 个子集上进行验证。经过 100 轮迭代搜索后，获得了能够使 5 折交叉验证平均 RMSE 最小化的最优超参数组合。最终确定的参数值如表 2 所示。

表 2 预测模型设定参数值
Tab.2 Setting parameter values of prediction model

超参数	最优值
树的数量	100
收缩系数	0.1
最大深度	3
随机种子	42

为定量评估各输入变量对模型预测性能的贡献，本研究采用梯度提升回归（GBR）内置的特征重要性。该指标以“平均不纯度减少量”为核心：以方差度量节点不纯度，特征被选为分裂变量时记录其引致的方差下降；单树重要性为该特征在全部分裂上的方差减少量之和。最终在集成层面对各树取均值并归一化（总和为 1），据此获得其对整体预测能力的相对贡献。其标准化公式描述为：对于决策树中的任意一个节点 m ，其不纯度 $I(m)$ 等于该节点内所有样本目标值（驱动力 y ）的方差。

$$I(m) = \frac{1}{N_m} \sum_{i \in S_m} (y_i - \bar{y}_m)^2 \quad (10)$$

其中, S_m 是节点 m 中的样本集合, N_m 是节点 m 中的样本数量, y_i 是第 i 个样本的目标值, $\bar{y}_m$ 是节点 m 中所有样本目标值的平均值。

当一个父节点 m 通过特征 f 和阈值 t 分裂成左子节点 m_L 和右子节点 m_R 时, 这次分裂带来的不纯度减少量 (即方差减少量) $\Delta I(m)$ 计算如下:

$$\Delta I(m) = I(m) - \left(\frac{N_{m_L}}{N_m} I(m_L) + \frac{N_{m_R}}{N_m} I(m_R) \right) \quad (11)$$

其中, $I(m), I(m_L), I(m_R)$ 分别是父节点、左子节点和右子节点的不纯度 (方差), N_m, N_{m_L}, N_{m_R} 分别是父节点、左子节点和右子节点的样本数量, 一个特征 f 在一棵树 T 中的总重要性 $Imp(f, T)$, 是所有使用该特征进行分裂的节点所产生的不纯度减少量的总和。

$$Imp(f, T) = \sum_{m \in M_f} \Delta I(m) \quad (12)$$

其中, M_f 是树 T 中所有使用特征 f 进行分裂的节点的集合, 梯度提升模型是由 K 棵树组成的集成模型, 特征 f 的最终重要性 $Imp(f)$ 是它在所有 K 棵树中的重要性的平均值。

$$Imp(f) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K Imp(f, T_k) \quad (13)$$

其中, K 是模型中树的总数, $Imp(f, T_k)$ 是特征 f 在第 k 棵树中的重要性。

4.2 评价结果讨论

为评估模型的预测精度, 将增强后的数据集按 7:3 划分为训练集和测试集。模型的预测精度通过决定系数 (R^2) 来衡量。如图 13 所示, 模型在增强数据集上的预测值与真实值高度吻合, 散点紧密分布在 $y=x$ 对角线周围, R^2 值超过 0.99, RMSE=1.68 N, 表明模型具备极高的预测精度和可靠性。

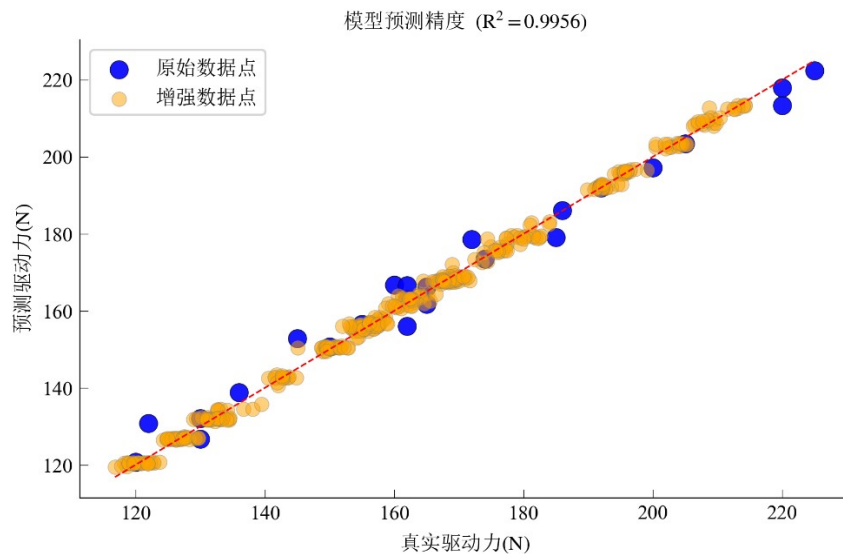


Fig.13 Model prediction accuracy

为检验模型预测稳定性，对测试集残差分布进行统计分析。残差分布如图 14 所示，整体呈现近似正态分布形态，均值接近 0，且残差值主要集中于 $\pm 2N$ 范围内，无显著偏态和离群点，说明预测模型误差分布均衡，无系统性偏差，预测结果稳健可靠。结合模型 R^2 值超过 0.99，表明该模型具备较强的拟合优度和较好的泛化能力，可有效用于复杂工况下球阀驱动力预测需求。

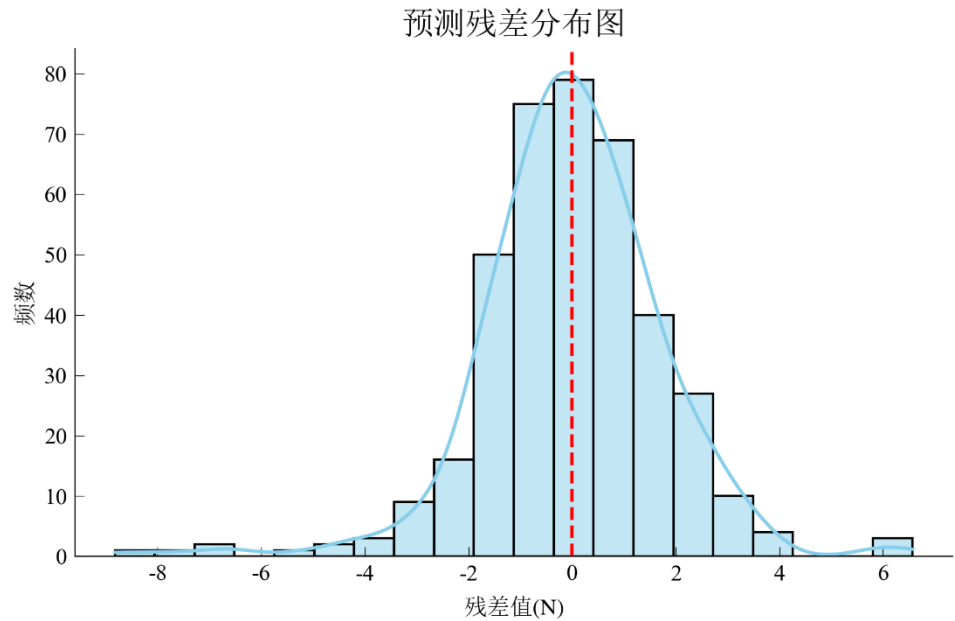


图 14 预测残差分布图

Fig.14 Predicted residual distribution plot

为了确定不同因素对驱动力影响的主次关系，进行了特征重要性分析，如图 15 所示。分析结果表明，润滑剂粘度是影响球阀驱动力的最关键因素，其重要性占比最高，达 0.4938；温度是次要影响因素，重要性达 0.39，说明其影响同样不可忽视；密封圈类型的影响相对最小为 0.1162，在特定工况下仍对驱动力造成一定影响。

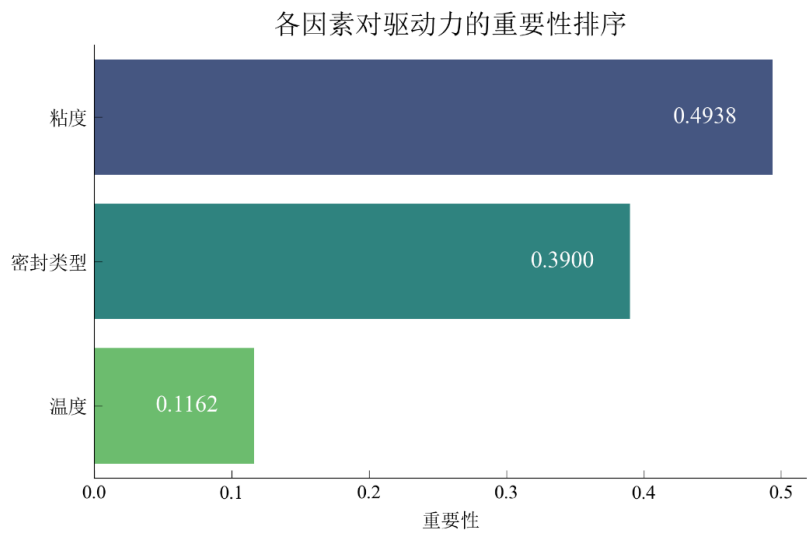


图 15 驱动力影响因素重要性排序

Fig.15 Importance ranking of actuating force influencing factors

基于 GBR 算法的球阀驱动力预测模型具有较高的准确性，该模型不仅能够量化各输入特征的影响重要性，更可作为一个高精度的代理模型代替物理试验，探索全工况空间下的最优设计参数，快速评价球阀在特定工况下的驱动力需求。为了直观、连续地展示驱动力与温度、粘度、密封圈类型的非线性映射关系，本研究采用三次样条插值法生成驱动力三维预测曲面，如图 16 所示，其中 X 轴为润滑剂粘度，Y 轴为温度，Z 轴为通过三次样条插值得到的驱动力。三维预测曲面提供了连续的驱动力量化工具，能够直观获得多因素耦合作用下驱动力的量化数值。

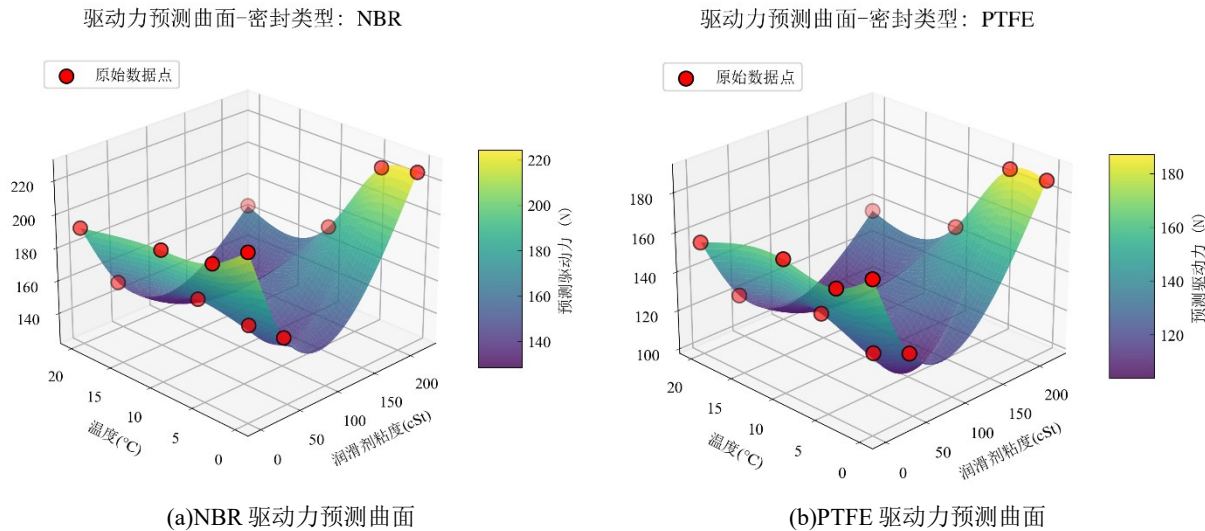


图 16 驱动力三维预测曲面

Fig.16 Actuating force 3D response surface plot

针对南海某海域前期勘查获取的储层地温 12.5℃，使用代理模型进行了不同工程参数组合情况下的球阀驱动力的预测，并提出了密封、润滑类型的智能建议，结果如表 3 所示，结果与在该海域实施的天然气水合物取心航次中优选的“PTFE 密封+LHM46 润滑油”组合具有较高的一致性。证明了代理模型的精度和可靠性较好，可为特定工况球阀密封机构驱动力供应单元的合理化配置提供科学、量化数据支撑。

表 3 地温 12.5℃条件下的球阀工程参数建议

Table 3 Recommended engineering parameters for ball valves under 12.5℃ ground temperature conditions				
序号	密封圈类型	润滑剂粘度 cSt	预测驱动力 N	建议
1	PTFE	43.1	126.9	性能最优方案
2	NBR	29.8	155.8	NBR 的最优选择

5 结论

本研究围绕深海保压取心钻具球阀驱动力受多因素耦合影响的问题，采用全面析因试验与机器学习融合的方法，系统评估了温度、密封圈类型和润滑剂粘度对驱动力的影响规律，得到以下主要结论：

- (1) 润滑剂粘度是影响球阀驱动力的首要因素，其重要性占比达到 49.38%；其次为环境温度(39%)，密封圈类型影响相对较小(11.62%)。
- (2) 温度显著影响润滑剂粘度与摩擦特性，低温(0℃)环境下驱动力较常温(20℃)增加约 28 N。高粘度润滑剂(220 cSt)在低温环境下性能劣化，驱动力增幅最大，表明应避免高粘度润滑剂在低温下使用。
- (3) 密封圈类型方面，PTFE 材质较 NBR 具备更低的摩擦特性，平均驱动力降低约 30 N，尤其在

配合 43.1 cSt 润滑剂时效果最佳。

(4) 驱动力三因素交互效应显著, 润滑剂粘度与温度存在强烈耦合作用, 润滑剂粘度与密封圈类型也呈复杂交互特性, 确定了 45 cSt 润滑剂+PTFE 密封圈为当前测试条件下性能最优组合。

(5) 基于梯度提升回归(GBR)构建的驱动力预测模型 R^2 值超过 0.99, 预测精度优异, 可作为保压取心钻具球阀驱动力工程预测与系统优化设计的代理模型, 为南海实际勘查工况推荐了 PTFE+43.1 cSt、NBR+29.8 cSt 两组工程配置方案。

上述结论可为保压取心钻具球阀的驱动系统设计、功率选型及材料优化提供直接指导, 对提升深海油气资源勘探装备研发过程的科学性和合理性具有一定价值。

References

- Abegg, F.; Hohnberg, H.-J.; Pape, T.; Bohrmann, G.; Freitag, J. (2008). Development and application of pressure-core-sampling systems for the investigation of gas- and gas-hydrate-bearing sediments. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 55(11), 1590–1599. DOI: 10.1016/j.dsr.2008.06.006.
- Abid, K.; Spagnoli, G.; Teodoriu, C.; Falcone, G. (2015). Review of Pressure Coring Systems for Offshore Gas Hydrates Research. *Underwater Technology* 33(1), 19–30. DOI: 10.3723/ut.33.019.
- Al-Besharah, J. M.; Salman, O. A.; Akashah, S. A. (1987). Viscosity of Crude Oil Blends. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 26(12), 2445–2449. DOI: 10.1021/ie00072a010.
- Cui, B.; Lin, Z.; Zhu, Z.; Wang, H.; Ma, G. (2017). Influence of Opening and Closing Process of Ball Valve on External Performance and Internal Flow Characteristics. *Experimental Thermal and Fluid Science* 80, 193–202. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.08.022.
- Dugan, B.; Germaine, J. T. (2008). Near-Seafloor Overpressure in the Deepwater Mississippi Canyon, Northern Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters* 35(2), L02304. DOI: 10.1029/2007GL032275.
- Fan, Q.; Zhu, Z.; Pang, W.; et al. (2024). Reservoir Characteristics and Exploration Implications of Gas Hydrate-Rich Areas in the Qiongdongnan Basin. *Earth Science* 49(4), 1421–1430. DOI: 10.3799/dqkx.2023.123. (in Chinese with English abstract)
- Gao, M.; Song, J.; Cui, P.; et al. (2024). In-situ Pressure-Retaining Coring and Gas-Retaining Technology and Its Preliminary Application in Deep Coal Seams. *Coal Science and Technology* 52(4), 143–154. DOI: 10.12438/cst.2024-0156. (in Chinese with English abstract)
- Guo, D.; Chen, L.; Zhou, Z.; et al. (2023). Development of a Pressure Coring System for the Investigation of Deep Underground Exploration. *International Journal of Mining Science and Technology* 33(11), 1351–1364. DOI: 10.1016/j.ijmst.2023.10.001
- Han, Z.-L.; Li, X.-Y.; Zhao, M.; et al. (2024). Analysis of Working Dynamic of Ball Valve with Pressure Core Sampler. *Exploration Engineering* 51(6), 32–38. DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.06.004. (in Chinese with English abstract)
- Itoh, S.; Fukuzawa, K.; Hamamoto, Y.; et al. (2008). Temperature Dependence of Viscoelasticity of PFPE Lubricant Confined in Nanometer-Sized Gaps. *Proceedings of the International Joint Tribology Conference*. DOI:10.1115/IJTC2008-71169.
- Kubo, Y.; Mizuguchi, Y.; Inagaki, F.; et al. (2014). A New Hybrid Pressure-Coring System for the Drilling Vessel Chikyu. *Scientific Drilling* 17, 37–43. DOI: 10.5194/sd-17-37-2014.
- Li, Q.-P.; Zhou, S.-W.; Zhao, J.-F.; et al. (2022). Research Status and Prospects of Natural Gas Hydrate Exploitation Technology. *Strategic Study of CAE*. 24(3), 214–224. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.022. (in Chinese with English abstract)
- Liu, G.; Jiang, S.; Jin, Y.; Wan, B.; Liu, L.; Peng, Y. (2025). Mechanism of Low-Disturbance and High-Pressure-Retaining Sampling of Seafloor Sediments at 10,000-m Depth and Its Laboratory Experiment and On-site Sea Trials. *International Journal of Mining Science and Technology*. DOI: 10.1016/j.ijmst.2025.06.001
- Lu, Q.; Qin, R.; Yu, Y.; Qi, L.; Xie, W.; Lu, H.; Xu, B.; Shi, H.; Xu, C.; Li, X. (2024). The Design and Application of a New Wireline Pressure Coring System for the Guangzhou Marine Geological Survey Methane Hydrate Expedition in the South China Sea. *Applied Sciences* 14(15), 6753. DOI: 10.3390/app14156753.
- Lu, C.-H.; Zhang, T.; Xu, J.; et al. (2023). Development and Experiment of Pressure Core Sampler for Marine Natural Gas Hydrates. *Exploration Engineering* 50(6), 18–26. DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.06.003. (in Chinese with English abstract)

- Santamarina, J. C.; Dai, S.; Jang, J.; Terzariol, M. (2012). Pressure Core Characterization Tools for Hydrate-Bearing Sediments. *Scientific Drilling* 14, 44–48. DOI: 10.2204/iodp.sd.14.06.2012.
- Schultheiss, P. J.; Francis, T. J. G.; Holland, M.; Roberts, J. A.; Amann, H.; Thjunjoto; Parkes, R. J.; Martin, D.; Rothfuss, M.; Tyunder, F.; Jackson, P. D. (2006). Pressure Coring, Logging and Subsampling with the HYACINTH System. *Geological Society, London, Special Publications* 267(1), 151–163. DOI: 10.1144/GSL.SP.2006.267.01.11.
- Schultheiss, P.; Holland, M.; Humphrey, G. (2009). Wireline Coring and Analysis Under Pressure: Recent Use and Future Developments of the HYACINTH System. *Scientific Drilling* 7, 44–50. DOI: 10.2204/iodp.sd.7.07.2009.
- Tommasi, P.; Avalle, A.; Budillon, F.; et al. (2019). Evaluation of Disturbance Induced on Soft Offshore Sediments by Two Types of Gravity Piston Coring Techniques. *Marine Geology* 417, 106005. DOI: 10.1016/j.margeo.2019.106005.
- Wan, C.-Y.; Zhang, H.-E.; Li, L.; et al. (2024). Current Status and Techniques of Equipment for Depressurization Exploitation of Marine Natural Gas Hydrate. *China Petroleum Machinery* 52(10), 83–90. DOI: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2024.10.011. (in Chinese with English abstract)
- Wang, J.; Sun, Y.; Qian, D.; et al. (2022). Scheme Design and Performance Analysis of Thin-Walled Pressure-Retaining Coring Tools for Seafloor Drills in the Deep-Sea Operating Environment. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 208, 109790. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109790.
- Wang, T.-Y.; Li, J.-N.; Zhang, Y.-W.; et al. (2023). Sealing Performance Analysis and Structure Optimization of Pressure-Preserved Controller for Pressure-Preserved Coring in Deep Coal Mine. *Coal Geology & Exploration* 51(8), 88–97. DOI: 10.12363/issn.1001-1986.22.12.0961. (in Chinese with English abstract)
- Wang, W.-Z.; Huang, P. (2004). Study on the Lubrication State of Frictional Pairs with Different Surface Roughness Based on Stribeck Curves. *Tribology* 24(3), 254–257. (in Chinese with English abstract)
- Wu, N.; Xie, H.; Chen, L.; Gao, M.; Li, C. (2020). Sealing Form and Failure Mechanism of Deep In Situ Rock Core Pressure-Maintaining Controller. *Geofluids* 2020(1), 8892720. DOI: 10.1155/2020/8892720.
- Xie, H.-P.; Cui, P.-F.; Shang, D.-L.; et al. (2023). Research Advances on the In-situ Pressure-Preserved Coring and Gas Parameter Determination for Deep Coal Seams. *Coal Geology & Exploration* 51(8), 1–12. DOI: 10.12363/issn.1001-1986.23.02.0075. (in Chinese with English abstract)
- Yamamoto, K. (2015). Overview and Introduction: Pressure Core-Sampling and Analyses in the 2012–2013 MH21 Offshore Test of Gas Production from Methane Hydrates in the Eastern Nankai Trough. *Marine and Petroleum Geology* 66, 296–309. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2015.02.024.
- Yang, L.-W.; Su, Y.; Luo, J.; et al. (2020). Development of GW-CP194-80A Pressure-Retaining Coring Tool. *Natural Gas Industry* 40(4), 91–96. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.04.011. (in Chinese with English abstract)
- Zhang, X.-H.; Ji, H.; Yu, T.; et al. (2025). Water-Lubricated Frictional Behaviour Enhanced by Small Quantity of Secondary Lubricating Medium of Thordon Material. *Tribology* 45(4), 571–581. DOI: 10.16078/j.tribology.2024058. (in Chinese with English abstract)
- Zhao, Y.; Liu, H.; Cai, J.; et al. (2023). Development and Application of TKP194-80 Pressure-Retaining Coring Tool. *Exploration Engineering* 50(4), 77–83. DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.04.011. (in Chinese with English abstract)
- Zhu, H.; Liu, Q.; Deng, J.; et al. (2011). Pressure and Temperature Preservation Techniques for Gas-Hydrate-Bearing Sediments Sampling. *Energy* 36(7), 4542–4551. DOI: 10.1016/j.energy.2011.03.053.

中文参考文献

- 樊奇, 朱振宇, 庞维新, 等, 2024. 琼东南盆地水合物富集区储层特征及勘探启示. *地球科学*, 49(4):1421–1430. DOI: 10.3799/dqkx.2023.123.
- 高明忠, 宋杰, 崔鹏飞, 等, 2024. 深部煤层原位保压保瓦斯取心技术装备及初步应用. *煤炭科学技术*, 52(4):143–154. DOI: 10.12438/cst.2024-0156.
- 韩泽龙, 李小洋, 赵明, 等, 2024. 保压取心钻具球阀工作动力学分析. *钻探工程*, 51(6):32–38. DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.06.004.
- 李清平, 周守为, 赵佳飞, 等, 2022. 天然气水合物开采技术研究现状与展望. *中国工程科学*, 24(3):214–224. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.022.
- 卢春华, 张涛, 徐俊, 等, 2023. 海域天然气水合物保压取心钻具的研制与试验. *钻探工程*, 50(6):18–26. DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.06.003.

万春燕, 张贺恩, 李磊, 等, 2024. 海洋天然气水合物降压开采装备现状与技术探讨. 石油机械, 52(10):83–90. DOI: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2024.10.011.

王天宇, 李佳南, 张益玮, 等, 2023. 深部煤矿保压取心保压控制器密封性能分析与结构优化. 煤田地质与勘探, 51(8):88–97. DOI: 10.12363/issn.1001-1986.22.12.0961.

王慰祖, 黄平, 2004. 不同表面粗糙度的摩擦副润滑状态的 Stribeck 曲线研究. 摩擦学学报, 24(3):254–257.

谢和平, 崔鹏飞, 尚德磊, 等, 2023. 深部煤层原位保压取心技术原理与瓦斯参数测定研究进展. 煤田地质与勘探, 51(8):1–12. DOI: 10.12363/issn.1001-1986.23.02.0075.

杨立文, 苏洋, 罗军, 等, 2020. GW-CP194-80A 型保压取心工具的研制. 天然气工业, 40(4):91–96. DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2020.04.011.

张晓寒, 季浩, 禹涛, 等, 2024. 赛龙材料微量第二润滑介质增强水润滑摩擦学特性研究. 摩擦学学报, 45(4):571–581. DOI: 10.16078/j.tribology.2024058.

赵义, 刘海龙, 蔡家品, 等, 2023. TKP194-80 型密闭保压取心工具的研制与应用. 钻探工程, 50(4):77–83. DOI:10.12143/j.ztgc.2023.04.011.

作者贡献: 作者 1 秦如雷 理论建模, 数据分析, 初稿撰写; 作者 2 卢秋平 方法论, 实验实施; 作者 3 谢文卫 项目管理, 资源保障; 作者 4 于彦江 概念设计, 修改审阅; 作者 5 许本冲 技术支持; 作者 6 高洁云 验证结果。