

一种抽油泵用内螺纹柱塞的防涡流结构

郭雷 段永祥 时晟伦 高军 西文磊

胜利油田分公司纯梁采油厂，山东滨州，256504；

摘要：针对往复式抽油泵内螺纹柱塞工作时因内腔变径通道形成涡流，导致柱塞冲刷损毁、检泵作业率升高的技术难题，本研究提出基于三元乙丙橡胶（EPDM）锥形衬环的防涡流结构优化方案。以73-44TH9.0-1.2CF型抽油泵为研究对象，结合数理模型模拟与胜利、河南、江苏等7个油田现场数据验证，系统分析该防涡流结构的工作原理、材料适配性、装配工艺及应用效果。

关键词：抽油泵；内螺纹柱塞；涡流冲刷；结构优化

DOI：10.69979/3041-0673.26.03.035

引言

在全球能源需求持续攀升的背景下，石油天然气作为核心能源资源，其开采效率与生产成本直接影响能源行业的可持续发展。往复式整筒抽油泵作为机采井的核心提液设备，广泛应用于常规油田、高含水油田等各类开采场景，其运行可靠性直接决定了油田的生产效率与经济效益。根据行业统计数据，机采井的产量占我国原油总产量的80%以上，而抽油泵故障导致的停产损失占油田总损失的35%左右，其中柱塞总成失效是引发抽油泵故障的首要原因之一。

1 现有技术缺陷及涡流形成机理分析

1.1 柱塞内腔涡流形成的流体力学机理

抽油泵柱塞总成连接方式与结构尺寸是涡流形成根本原因，遵循流体力学规律。柱塞与游动阀罩用圆柱管螺纹连接、端面密封隔离油液，因内螺纹长于外螺纹，装配后柱塞两端内螺纹丝扣结束处与内腔形成约90°变径台阶，为涡流产生提供几何条件。抽油杆带动柱塞上行时，下阀开、上阀关，油液从下端吸入，流经下端变径台阶时，流通截面积减小，流速从0.8-1.2m/s骤升至1.5-2.0m/s，局部压力降低形成梯度，90°直角结构使油液流动方向突变，形成剪切层并发展为漩涡，最终形成顺时针涡流。柱塞下行时，上阀开、下阀关，油液从上端排出，流经上端变径台阶形成逆时针涡流。双向涡流在柱塞往复运动中持续存在，其产生的局部负压使油液中气体析出形成空化气泡，气泡破裂产生微射流与冲击波，冲击侵蚀柱塞内腔；同时，油液中固体颗粒在涡流带动下冲刷内壁。两种作用叠加使柱塞内腔出现损伤，随着抽油泵运行，损伤扩展，当壁厚至临界值，

柱塞易断裂失效。FLUENT模拟显示，涡流区域液流速度矢量分布不均，局部高速液流冲击是柱塞快速损毁直接原因。

1.2 传统防涡流解决方案的局限性

行业采用“切削锥孔”缓解涡流冲刷，以锥面过渡替代直角台阶优化液流路径。但实际应用有诸多局限，加工工艺上，小锥度设计需定制专用细长刀具，成本高且加工精度难保证，粗糙表面加剧湍流；大锥度设计虽降低加工难度，但涡流消除率不足30%。结构强度上，切削锥孔减少局部壁厚，成为薄弱点，增加断裂风险。适配性与经济性上，不同规格柱塞需单独设计锥孔参数，无法标准化加工，生产效率低、成本高；老旧抽油泵更换锥孔柱塞需改造泵体，增加设备更新成本；锥孔柱塞维修保养难度大、成本高。传统方案缺陷使其难以满足油田生产需求，开发新型防涡流结构势在必行。

2 防涡流结构设计方案

2.1 结构设计原理与核心参数

本研究的防涡流结构采用“结构优化+材料适配”思路，在柱塞内螺纹与游动阀罩间增设EPDM锥形衬环，利用其弹性与导流特性构建液流过渡通道，消除涡流几何条件，实现密封与防涡流功能。核心设计在于EPDM锥形衬环参数优化与装配配合精准设计，确保引导液流平稳且适应工况与装配要求。EPDM锥形衬环以三元乙丙橡胶为基材，呈环形锥形。其参数基于流体力学模拟与试验确定：大端内径与柱塞内螺纹末端一致，小端内径按需匹配；锥度1:8-1:10，避免大、小锥度问题；轴向长度12-15mm，厚度3-4mm，保证强度与导流且不干涉；内表面粗糙度 $Ra \leq 0.8 \mu m$ ，减少摩擦阻力。材料性能上，

调整硫化剂与填充剂比例,控制硬度在邵氏 A80°-90°,保证加工、装配性能,填补间隙,提升密封与抗磨损能力。装配时,先在柱塞内螺纹末端铣制安装槽,将衬环压入,用热风枪加热增强贴合度。在游动阀罩外螺纹涂厌氧胶,对接后用扭矩扳手拧至 70-90N·m,使衬环弹性变形,实现紧密贴合,消除直角变径,阻断涡流。

2.2 材料选型依据与性能验证

EPDM 材料选型是防涡流结构关键,综合考虑抽油泵工作介质、工况、经济性与加工性能,经模拟与试验确定为最优基材。在工作介质适配性方面,抽油泵举升介质多为含水原油且含腐蚀性气体,对衬环耐水、耐腐蚀性要求高。对比试验显示,EPDM 耐水、耐酸碱性能优,在高含水率原油中浸泡后体积和硬度变化率小,耐油性满足需求,抵御腐蚀性气体能力强且成本低。而在工况适应性上,抽油泵工作温度与压力范围大,要求材料具备良好的弹性、强度与耐疲劳性。EPDM 在温度区间内弹性保持率高,硬度合适,能承受冲击载荷,经 100 万次轴向冲击试验后性能稳定,满足长期运行要求。EPDM 材料加工成型性能良好,可通过模压硫化工艺标准化、大批量生产,效率高、成本低,能适配不同规格柱塞衬环生产,保障结构规模化应用。为验证可靠性,本研究开展加速老化试验与耐磨性能测试。加速老化试验在 150℃ 高温、高湿环境下进行 1000 小时,试验后 EPDM 衬环拉伸强度保留率 $\geq 80\%$,断裂伸长率 $\geq 70\%$,无明显老化龟裂;耐磨性能测试采用 MM-200 型磨损试验机,在模拟原油介质环境下,以 2m/s 滑动速度、5N 载荷摩擦试验 100 小时,衬环磨损量 $\leq 0.01\text{mm}$,耐磨性能优异。综合试验结果,EPDM 材料在介质适配性、工况适应性、加工性能与经济性等方面优势显著,是锥形衬环理想选材。

3 实施例与效果验证

3.1 常规工况下的结构优化与模拟测试

为验证本防涡流结构常规工况应用效果,以 73-44TH9.0-1.2CF 型抽油泵柱塞为研究对象开展结构优化与模拟测试。该型号抽油泵用于常规油田机采井,参数符合行业标准,泵挂深度 1200m,沉没度 200m,冲次 2 次/min,举升介质为含水 60%原油;柱塞本体基材为 45#未调质钢,游动阀罩基材是 20Cr13 调质钢,阀副材质为硬质合金(WC)。根据柱塞结构参数确定 EPDM

锥形衬环参数:大端内径 44mm,小端内径 38mm,锥度 1:8,轴向长度 12mm,硬度邵氏 A85°,内表面粗糙度 $Ra=0.6\ \mu\text{m}$ 。

装配时,先对柱塞内螺纹末端铣槽,确保槽深 3mm、槽宽 12mm,用粗糙度仪检测内壁粗糙度 $Ra\leq 1.6\ \mu\text{m}$;接着将 EPDM 衬环压入安装槽,用 80℃ 热风枪加热 5 分钟,冷却后检查是否松动、翘边;在游动阀罩外螺纹涂 LOCTITE243 厌氧胶,厚度 0.1-0.2mm;将游动阀罩与柱塞内螺纹对接,用扭矩扳手拧至 80N·m;最后静置 24h 待胶固化,用气压试验检测密封性,试验压力 8MPa,保压 30 分钟,无渗漏则装配合格。

模拟测试用 FLUENT 软件建立液流场模型,模拟抽油泵 1 年运行(等效 100 万次轴向冲击)的液流与柱塞冲刷情况。建模时,用四面体网格划分柱塞内腔与衬环区域,网格密度每立方毫米 100 个节点;边界条件为入口流速 0.8-1.2m/s,出口压力 0.5MPa,温度 25℃;用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型模拟液流。结果显示,优化后柱塞内腔液流流速平稳过渡,最大流速 1.3m/s,无明显涡流,速度矢量分布均匀,压力波动 $\pm 0.1\text{MPa}$ 以内;100 万次冲击后,冲刷磨损量 $\leq 0.02\text{mm}$,损毁概率 1.434%。对比显示,未加装衬环的传统柱塞内腔有明显涡流,局部最大流速 2.5m/s,冲刷磨损量 $\geq 0.15\text{mm}$,损毁概率 3.3%,优化后结构抗损毁能力提升 23 倍以上,防涡流与抗冲刷性能显著。

3.2 高含水油田井的现场应用效果

针对高含水油田特殊工况,调整防涡流结构参数,并在胜利油田高含水区块开展现场应用试验。该区块原油含水率达 90%,泵挂深度 1500m,沉没度 250m,冲次 3 次/min,液流对柱塞冲刷强,对衬环耐水性和稳定性要求高。为此,对 EPDM 衬环参数优化:基材中加 3%耐水改性剂提升耐水性;硬度调为邵氏 A88° 增强抗冲击能力;锥度调为 1:10 优化液流过渡;小端内径减至 36mm 适应原油流动;轴向长度增至 15mm 提高结构稳定性;内表面做微纹理处理,纹理深 0.1mm 增强液流附着性、减少湍流。同时,为防高冲次下衬环移位,在柱塞与游动阀罩对接处钻 2 个直径 4mm 销孔,插入 10mm 长不锈钢销钉确保固定可靠。

选该区块 3 口参数一致试验井进行现场应用,同时选 3 口相邻用传统锥孔柱塞油井作对比井确保结果可比。现场安装由专业人员按流程操作,安装后试运井并监测

泵效、电流、振动幅度等运行参数确保设备正常。试验井运行12个月后拆检,结果显示:柱塞内腔无明显冲刷,表面粗糙度 $Ra \leq 0.8 \mu m$; EPDM衬环无老化、变形、移位,密封面贴合紧密无渗漏;衬环尺寸变化率 $\leq 0.3\%$,硬度变化率 $\leq 5\%$,各项性能指标在设计范围内。同期对比井中2口因柱塞涡流冲刷失效检泵,检泵作业率66.7%,试验井无因柱塞冲刷故障,检泵作业率降低66.7%,现场应用效果十分明显。

运行参数监测方面,试验井抽油泵泵效平均85%,较对比井提升7个百分点;电流波动控制在 $\pm 5A$ 以内,运行稳定性更好;单井日均产油量较对比井增加0.8吨,年增产约292吨,单井年增收约116.8万元,经济效益显著。此外,试验井运行无安全事故、设备平稳,验证了防涡流结构在高含水油田工况下的适用性。

3.3 多油田现场数据验证与经济性分析

为全面验证本防涡流结构的可靠性,收集了胜利油田、河南油田、江苏油田等7个油田2023-2024年的现场应用数据,涵盖常规工况、高含水工况、中深井工况等多种场景,累计应用井数达500口,其中常规工况井320口,高含水工况井130口,中深井(泵挂深度 $\geq 1800m$)50口,涉及57型、73型、83型等多种规格的抽油泵柱塞。数据统计内容包括单井柱塞损毁数量、检泵作业次数、作业成本、运行周期等关键指标,并与各油田同期使用传统柱塞的油井数据进行对比分析。

统计结果显示,采用传统柱塞的油井中,百口作业井一年期柱塞内腔损毁数量平均为11.1口,三年期平均为10.7口,损毁率基本稳定在10%以上;而采用本方案优化后的柱塞,百口作业井一年期损毁数量降至0.5以下,损毁率 $\leq 0.5\%$,三年期损毁数量平均为1.2口,损毁率 $\leq 1.2\%$,损毁率较传统柱塞降低90%以上。从检泵作业情况来看,传统柱塞油井的年均检泵作业次数为0.35次/井,而优化后柱塞油井的年均检泵作业次数降至0.05次/井,检泵作业频率降低85.7%,按此计算,年度可减少躺井概率(泵失效主因)10%以上,有效保障了油田的连续生产。

从经济性分析来说,本防涡流结构应用效益明显。单井改造费用约1500元,含EPDM衬环成本等,较传统锥孔柱塞加工成本(约2300元)降低超35%。长期运行成本方面,传统柱塞油井单井年均检泵作业成本3-5万元,优化后降至0.5万元以下,单井年均节省3-5万元。以500口应用井计,年节省检泵成本约1500-2500万元。而且,减少停产带来的增产收益可观,按单井日均增产0.5吨原油算,500口井年增产约91250吨,增收约3.65亿元。此外,该结构可直接替换现有抽油泵柱塞,降低设备更新成本,对老旧油田有改造价值与推广前景。

可靠性上,500口应用井平均运行周期达36个月,较传统柱塞(24个月)延长50%,最长连续运行48个月,拆检后柱塞与衬环状态良好。不同工况应用数据表明,该结构在含水率30%-90%、泵挂深度800-2000m、冲次2-3次/min范围内适应性良好,无性能波动,验证了普适性。

4 结语

本研究针对抽油泵内螺纹柱塞涡流冲刷难题,提出EPDM锥形衬环防涡流优化方案,实现结构创新与材料适配双重突破。方案消除柱塞内腔直角变径台阶,阻断涡流形成,EPDM材料保障结构在复杂工况下的稳定性。模拟测试与7个油田500口井现场验证显示,优化后柱塞损毁率降低90%以上,检泵作业频率下降85.7%,还提升泵效与产油量,经济效益显著。该结构适配多种工况与规格抽油泵,无需改造泵体可直接替换。推广应用此方案可降低油田生产成本、保障开采连续性,为能源行业可持续发展提供技术支撑。

参考文献

- [1]李宏威.抽油泵产品质量控制与检验[J].化学工程与装备,2020,03:142+134.
- [2]刘帅.抽油泵短期失效井治理[J].江汉石油职工大学学报,2021,3401:20-22.
- [3]孙涛.抽油泵的漏失原因及预防办法研究[J].化工管理,2019(30):208-209.