

# 海域水平井钻井连续循环短节结构设计与分析

崔淑英<sup>1,2</sup>, 陈晓君<sup>1,2,3\*</sup>, 陈根龙<sup>1,2</sup>, 田英英<sup>1,2</sup>, 赵明<sup>1,2</sup>, 张欣<sup>1,2</sup>, 韩泽龙<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 河北廊坊 065000; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:** 连续循环短节可在停钻时保持钻井液连续循环, 实现连续循环钻井, 有效解决井底沉渣、井底压力波动等问题, 尤其适合海域油气水平井钻井工程。本文设计了一种连续循环短节, 介绍了短节结构及工作原理, 并对极限工况下的短节本体强度进行了受力分析和结构优化设计, 优选了本体安全系数大于1.2的旁通阀侧开孔; 对旁通阀进行了有限元受力分析, 从应力分布和密封比压两方面综合分析, 得到了密封副半锥角和阀芯板厚度变化对旁通阀受力和密封效果的影响规律, 优选出了密封副半锥角 $\alpha=30^\circ$ 和阀芯板厚度 $\delta=8\text{ mm}$ , 并对优选结构参数的连续循环短节进行了旁通阀密封测试和本体强度测试, 证明短节强度和密封性能均满足极限内压力35 MPa和极限拉力3503 kN的实际使用需求。

**关键词:** 连续循环钻井; 连续循环短节; 旁通阀; 密封; 受力分析; 水平井钻井

**中图分类号:** TE921; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)02-0117-08

## Design and analysis of continuous circulation valve for horizontal drilling in marine areas

CUI Shuying<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaojun<sup>1,2,3\*</sup>, CHEN Genlong<sup>1,2</sup>, TIAN Yingying<sup>1,2</sup>,  
ZHAO Ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1,2</sup>, HAN Zelong<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, MNR, Langfang Hebei 065000, China; 3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** The continuous circulation valve can maintain the circulation of drilling fluid when drilling is stopped, which can effectively solve the sediment at the bottom of the hole and the fluctuation of pressure at the bottom of the hole, especially for offshore oil and gas horizontal drilling. In this paper, a continuous circulation valve is designed, the structure and working principle of the continuous circulation valve are introduced, the force analysis and structural optimization design are conducted on the strength of the body under extreme working conditions, and the side opening of the bypass valve with a safety factor greater than 1.2 times was selected; A finite element stress analysis is conducted on the bypass valve, which comprehensively analyzes the stress distribution and sealing pressure. The influence of changes in the half cone angle of the sealing pair and the thickness of the valve on the stress and sealing effect of the bypass valve is obtained. The half cone angle of the sealing pair,  $\alpha=30^\circ$ , and the thickness of the valve core plate,  $\delta=8\text{ mm}$ , are optimized. and the bypass valve sealing test and body strength test are conducted, proving that the strength and sealing performance of the continuous circulation valve meet the actual usage requirements under the ultimate internal pressure of 35MPa and ultimate tensile force of 3503kN.

**Key words:** continuous circulation drilling; continuous circulation valve; bypass valves; seal; force analysis; horizontal drilling

收稿日期: 2024-07-17; 修回日期: 2024-10-10 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.02.016

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“深海钻探工程关键技术支撑”(编号: DD20221721)

第一作者: 崔淑英, 女, 汉族, 1983年生, 高级工程师, 机械制造及其自动化专业, 硕士, 主要从事深海钻探工艺与器具研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 306011322@qq.com。

通信作者: 陈晓君, 男, 汉族, 1989年生, 工程师, 硕士, 主要从事深海钻探工艺与器具研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 648374095@qq.com。

引用格式: 崔淑英, 陈晓君, 陈根龙, 等. 海域水平井钻井连续循环短节结构设计与分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(2): 117-124.

CUI Shuying, CHEN Xiaojun, CHEN Genlong, et al. Design and analysis of continuous circulation valve for horizontal drilling in marine areas[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 117-124.

## 0 引言

常规钻井需停泵加接钻杆,钻井液循环中断造成井内沉渣堆积,对于大位移井和水平井,易形成桥塞和岩屑床导致下钻卡阻;对于深井超深井,停止钻井液循环容易导致井底温度升高,造成钻具密封失效、钻井液性能改变等问题,影响钻井安全;对于窄密度窗口井,停泵、开泵引起的井底压力波动易造成坍塌、埋钻、井涌、井漏和压差卡钻等事故<sup>[1-3]</sup>。对于海域天然气水合物钻井,由于90%以上的储层都是海底黏土质粉砂或淤泥质沉积物<sup>[3-4]</sup>,地层较软稳定性差,钻井压力波动极易导致井漏、井塌,尤其是采用水平井作为水合物开采井型时<sup>[5]</sup>,停泵后井底沉渣严重,对钻井效率影响较大。因此,连续循环钻井是海域油气水平井施工不可或缺的技术。

## 1 连续循环钻井系统介绍

目前连续循环钻井系统主要分为两大类,一种是连续循环系统(Continuous Circulation System,简称CCS),另一种是连续循环阀(Continuous Circulation Valve,简称CCV),也称“连续循环短节”。连续循环短节连接在两根钻杆/立柱之间,需要加接钻杆/立柱时,将短节的旁通阀与旁通管路连接,旁通管路与管汇系统连接,控制系统通过控制管汇中各阀门的开闭实现钻井液连续循环。连续循环短节以其结构简单、操作便捷和经济性得到了国内外许多公司和研究机构的青睐,相继推出了多种结构形式的连续循环短节,按照主阀+旁通阀的结构形式,主要分为如下5种:两位三通球阀+无旁通阀<sup>[4-7]</sup>、翻转板阀+翻转板阀<sup>[6-9]</sup>、升降板阀+升降板阀<sup>[8-10]</sup>、球阀+滑套<sup>[9-11]</sup>、球阀+升降板阀<sup>[10-12]</sup>。旁通阀的密封方式主要有2种:金属-金属密封,金属-橡胶密封。国外连续循环短节的规格主要有7、8、8½ in(注:1 in=25.4 mm,下同),除以上规格外国内一些单位还研发了适用于小直径钻杆的短节,短节外径分别为168和133 mm,适用的压力等级分别有21、35、51.7、69和75 MPa,既可用于液体钻井也可用于气体钻井<sup>[11-18]</sup>。

在阀体强度密封分析方面,分别有针对连续循环短节本体强度、旁通阀强度和密封、旁通阀冲蚀方面的研究。冯定等<sup>[19]</sup>对适用于气体钻井的连续循环短节本体抗拉、扭、压进行了分析;夏成宇等<sup>[20]</sup>对气体连续循环短节旁通阀打开和关闭时的危险

区域进行了力学和密封性能分析;刘强等<sup>[9]</sup>对钻井液连续循环短节的翻转板阀进行了冲蚀和密封分析,通过冲蚀分析优化了阀板结构;Yue等<sup>[6]</sup>对一种T型一体式三通阀式连续循环短节在承受35 MPa内压时分别同时承受拉伸、压缩、弯曲、扭转力时的强度进行了仿真分析。综合分析前人研究成果,发现本体强度事关整个钻柱的安全,旁通阀强度和冲蚀磨损影响旁通阀寿命和密封,因此,对连续循环短节的研究,主要从以上3方面进行。但是,前人研究的旁通阀结构与本文不同,旁通阀受力变形情况也不尽相同。笔者自主研发的连续循环短节,采用了球阀作为主阀,升降板阀作为旁通阀的结构,本文对短节的工作原理进行了介绍,并对本体强度、简化的旁通阀装配体强度和密封进行了分析。

## 2 连续循环短节结构及工作原理

研制的连续循环短节主要由本体、主阀、旁通阀组成。钻井过程中连续循环短节安装在两立柱之间,作为钻柱的一部分参与钻井。需要加接立柱或钻杆时,旁通管路安装到旁通阀上,无泄漏后关闭主球阀,开始旁路循环。建立旁路循环后,可拆除或加接连续循环短节上方钻杆/立柱。设计的连续循环短节的主阀采用常规球阀结构,不过多介绍,重点介绍旁通阀的结构组成和工作原理。旁通阀为升降板阀结构(见图1),主要由阀座、阀芯、阀芯端盖、活动锁套、中心套、锁销和弹簧组成。其工作原理为:阀座通过螺纹与本体连接,阀芯安装到阀座上,与阀座通过锥面形成金属-金属密封。阀芯与阀座之间安装弹簧,为阀芯提供预紧力,保证旁通阀在低压状态下能够形成有效密封。活动锁套插入阀座内,通过凹凸配形成轴向限位,通过锁销形成圆周限位;中心套与活动锁套通过螺纹连接,螺纹紧固到位时其大端将锁销顶入阀座孔内,从而防止活动锁套与阀座产生圆周位移。钻井时本体内部的液压力将阀芯压紧到阀座上,旁通阀关闭;旁路循环时,拆除中心套、活动锁套和锁销,将旁通管路连接到阀座上,旁通管路的液压力克服弹簧预紧力后将阀芯推开,形成旁路循环。

## 3 连续循环短节本体结构强度校核

设计的连续循环短节与9.17 mm壁厚的5½ in钻杆配合,主要用于海域浅层水平井施工,强度校

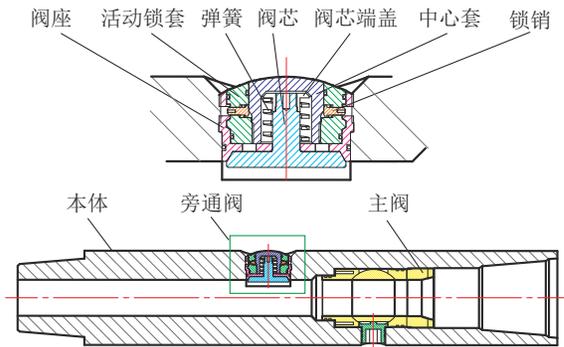


图 1 连续循环短节结构示意图  
 Fig.1 Schematic diagram of the structure of continuous circulation valve

核依据 S135 钢级 API 新钻杆极限拉力 3503 kN(由抗拉强度 1080 MPa 计算得出)、泥浆泵额定泵压 35 MPa 计算。连续循环短节作为钻柱的一部分下入井内,为了安装主球阀和旁通阀在连续循环短节本体上开设了不同直径的圆孔,侧开孔势必影响短节的整体强度,因此,需要对本体强度进行安全校核。

3.1 模型建立和载荷设置

连续循环短节本体材料为 42CrMo,抗拉强度为 1080 MPa,屈服强度为 930 MPa,弹性模量为  $2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比为 0.3。外径 177.8 mm,内通径 68 mm,主阀开关孔直径 45 mm,旁通阀侧开孔为螺纹孔,模型简化为光孔,将旁通阀侧开孔直径  $D$  定为变量,变化范围为  $D=70 \sim 88$  mm,步长为 2 mm,将安全系数  $>1$  设定为约束条件,对模型进行

受力分析。本文中的连续循环短节主要应用于深海水平定向钻井施工中,水平定向井施工采用井底动力钻具组合,仅对连续循环短节本体同时承受拉力和内压的工况进行校核。将连续循环短节本体的一端固定,在另一端施加竖直向下的拉力 3503 kN,同时在连续循环短节本体内腔施加 35 MPa 压强,分析两种力同时作用下短节本体 Von Mises 应力大小和分布情况。网格划分见图 2。

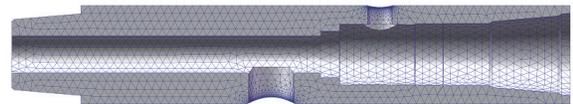


图 2 连续循环短节本体网格模型  
 Fig.2 Mesh model of continuous circulation valve

3.2 模拟结果分析及优化

在给定的两个极限作用力同时作用下,短节本体受力最大的部位发生在旁通阀侧开孔内壁,通过优化计算,分别得到侧开孔直径  $D=70 \sim 88$  mm 的 10 种本体结构承受的最大 von Mises 应力值及对应的安全系数(见图 3 和图 4)。从图 4 可知,随着旁通阀侧开孔直径增大,本体强度安全系数逐渐降低,但 10 种侧开孔直径下本体的安全系数均大于 1.2。作为连续循环短节既要考虑本体强度,又需兼顾旁通循环时流量大小,本文优选 88 mm 为侧开孔直径,此时最大应力值为 748.59 MPa,对应的本体安全系数为 1.24。

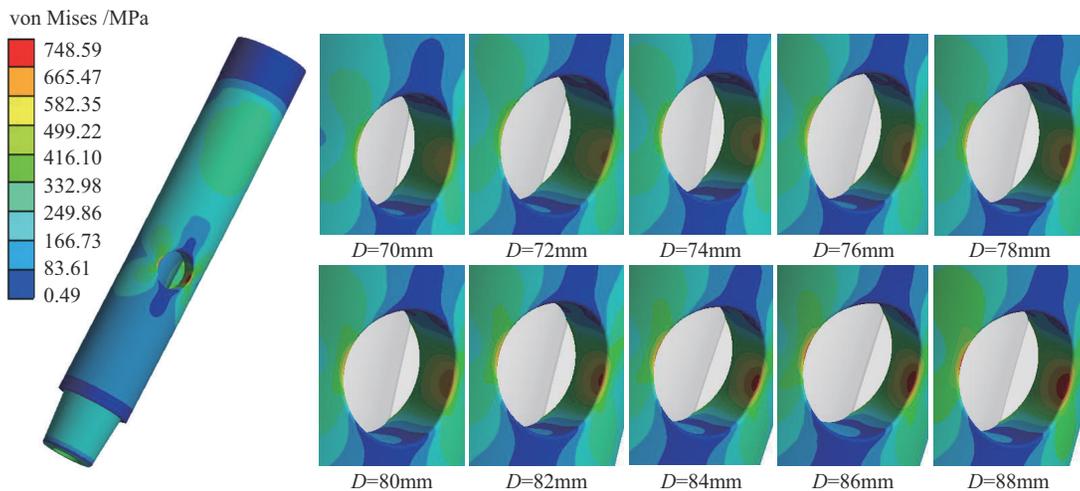


图 3 短节本体应力云图  
 Fig.3 Stress nephogram of the body

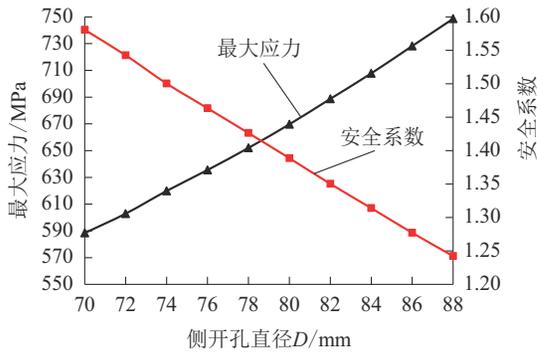


图4 10种侧开孔直径对应的最大应力和安全系数曲线

Fig.4 Maximum stress and safety factor curve

#### 4 旁通阀受力分析

正常钻井时,旁通阀阀芯承受钻杆内部的液压力压紧到阀座上,使旁通阀关闭并密封。因此,需要对旁通阀关闭时阀芯和阀座在极限压力下的受力进行分析,使其既能满足强度要求又能满足密封要求。

##### 4.1 有限元模型建立

(1)三维模型建立:单独对旁通阀阀芯和阀座建立三维模型,见图5(a)。

(2)材料设置:旁通阀阀芯与阀座材质均为P550无磁钢,抗拉强度为1035 MPa,屈服强度为965 MPa,弹性模量为 $2.00 \times 10^5$  MPa,泊松比为0.3。

(3)接触设置:两个零件根据实际装配关系设置4对相接触面组,其中相接触面组1直接接触,其余3对相接触面组未受力时存在极小间隙,受力后发生弹性变形接触,见图5(b)。

(4)网格模型:采用四面体网格,对相接触面组所在平面网格进行加密,阀芯弹簧导杆根部进行网格加密(见图5b)。

(5)约束设置:相接触面组3中阀座接触面所在的底板受到图1所示的活动锁套约束,活动锁套与阀座底板的最大间距为0.2 mm,因此,在距离底板0.2 mm的位置建立一个基准面,将其作为刚性虚拟壁(见图5b),对阀座底板的弹性变形进行约束。阀座安装到主体旁通孔内并通过螺纹固定,因此将阀座外圆进行固定约束。

(6)载荷施加:旁通阀关闭时受两种力同时作用,一种来自主体内部的液压力,作用在阀芯端面上,另一种来自弹簧提供的预紧力,弹簧一端为阀

芯提供预紧力,另一端安装到阀座底板上,因此,施加载荷时为阀芯大端端面施加35 MPa的压强 $P_1$ ,弹簧为阀芯提供的预紧力相对于阀芯受到的液压力可忽略不计,仅为阀座底板的弹簧作用面施加0.4 MPa的弹簧压强 $P_2$ (见图5b)。

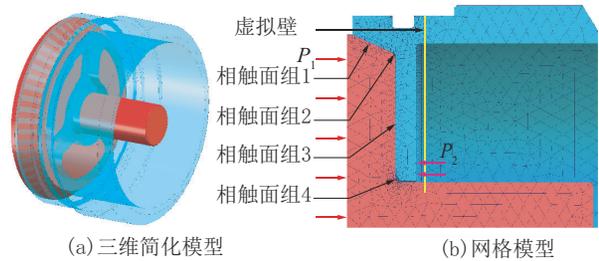


图5 旁通阀三维简化模型和网格模型

Fig.5 Three-dimensional simplified model and mesh model

##### 4.2 仿真结果分析

从旁通阀阀芯结构方面考虑,影响阀芯强度的因素主要有阀芯板厚度 $\delta$ 和密封副半锥角 $\alpha$ (见图6),因此,从以上两方面对旁通阀结构进行优化分析。优化目标为满足阀芯整体强度和密封比压要求,同时不影响阀座强度。

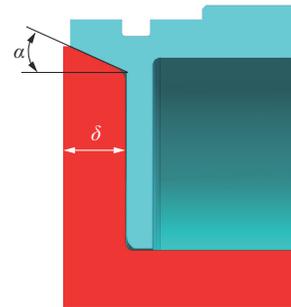


图6 密封副半锥角和阀芯厚度示意

Fig.6 Schematic diagram of sealing pair half cone angle and valve thickness

##### 4.2.1 密封副半锥角优选

###### 4.2.1.1 强度分析

为保证旁通阀入口流量不变,将阀心锥面小端直径设置为68.8 mm固定值,阀芯板厚度 $\delta$ 设置为8 mm,通过改变半锥角 $\alpha$ 大小分析旁通阀 von Mises 应力分布和密封比压变化情况。密封副半锥角 $\alpha$ 变化范围设置为 $5^\circ \sim 40^\circ$ ,步长为 $5^\circ$ 。通过对8种半锥角结构进行有限元分析,发现了随着半锥角增大阀芯应力的变化规律(如图7所示),在旁通阀关闭状

态下,阀芯承受液压力的面和与阀座底板接触的面应力较大,最大值出现在弹簧导杆根部,且随着半锥角增大阀芯应力逐渐增大。产生此现象的原因随着半锥角的增大,阀芯大端直径变大,在压强不变的情况下,阀芯承受的液压力增大,由于受力平衡,阀座给予阀芯的反作用力也增大,而弹簧导杆一端为自由端,未受到阀座约束,导致根部发生的应变逐渐增大,应力集中也随之增大。根据有限元分析结果,半锥角为40°时最大应力已超过材料屈服强度965 MPa(图8),因此,对密封面的密封分析在5°~35°之间进行。

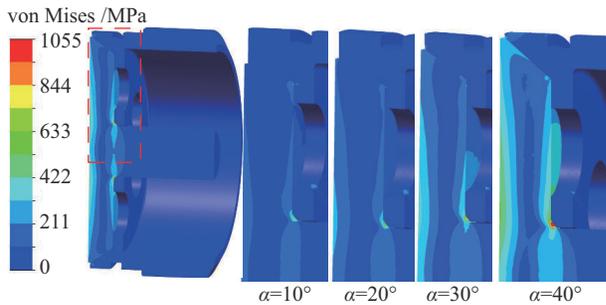


图7 不同半锥角下旁通阀应力云图  
Fig.7 Stress nephogram of bypass valve

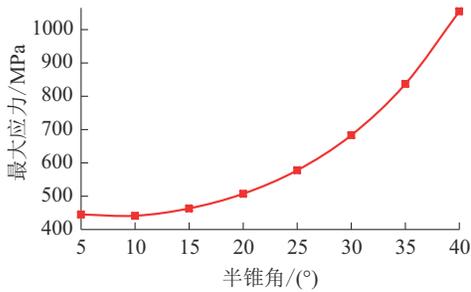


图8 半锥角与旁通阀阀芯最大应力关系曲线  
Fig.8 Curve of the relationship between the half cone angle and the maximum stress of the bypass valve

#### 4.2.1.2 密封分析

密封比压是判断密封件设计是否合理的关键参数。密封比压分为必须比压 $q_b$ 、许用比压 $[q]$ 和设计比压 $q$ ,三者之间的关系为<sup>[12-14]</sup>:

$$q_b < q < [q] \quad (1)$$

$$q_b = m(a + cP)\sqrt{10/b} \quad (2)$$

式中: $m$ ——介质系数,无因次,常温流体 $m = 1$ ;  $a$ ——材料系数 I,无因次,当密封面材料为钢或硬质合金时 $a = 3.5$ ;  $c$ ——材料系数 II,无因次,当密

封面材料为钢或硬质合金时 $c = 1$ <sup>[19]</sup>;  $b$ ——密封副宽度,mm;  $P$ ——系统液压压强,MPa。

密封副为无滑动摩擦,密封件材质为P550,该材料属于高氮铬锰无磁不锈钢,许用比压参照铬基硬质合金计算, $[q] = 150$  MPa。

$$q = \frac{F}{\pi db} \quad (3)$$

式中: $F$ ——作用在密封面的作用力;  $d$ ——密封副内径。

本结构阀芯受力与常规密封不同,阀芯承受的液压力并未全部作用于密封面上,由于结构设计原因,在受力状态下,阀芯板发生弹性变形,小径端面与阀座底板接触,导致作用于阀芯上的液压力分解为作用于密封面上的力和作用于阀座底板上的力。密封面设计比压计算时需采用直接作用于密封面上的法向合力,而此力无法通过理论计算直接得出,因此需要通过有限元分析提取作用于密封面上的法向合力进行计算。

通过提取35 MPa下半锥角为5°~35°的7种结构的密封面法向合力,并将其换算为密封比压,得到设计比压均满足 $q_b < q < [q]$ ,设计比压与半锥角成反比关系(见图9)。因此低压状态下,为提高密封效果,优选小角度半锥角,高压状态下,为防止密封面压溃,优选大角度半锥角,综合考虑实际工况,优选30°半锥角,既能保证低压状态下的密封比压又能充分保证密封面不被压溃。

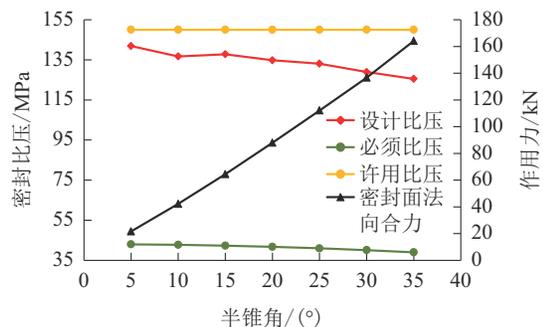


图9 半锥角与密封比压和作用力关系曲线  
Fig.9 Curve of the relationship between half cone angle and sealing pressure & force

#### 4.2.2 阀芯板厚度优化

##### 4.2.2.1 强度分析

保持密封副半锥角30°、阀芯板小端直径68.8 mm和其他安装配合尺寸不变,通过改变阀芯板厚

度  $\delta$ , 进而分析旁通阀的 von Mises 应力分布和密封比压变化规律。阀芯板厚度  $\delta$  取 5~10 mm, 步长为 1mm, 对比以上 6 种结构的阀芯和阀座应力分布和大小。图 10 显示了 6 种阀芯板厚度下的旁通阀应力分布云图。由于阀芯组件为圆周对称结构, 因此截取 1/4 图形放大对比 6 种结构下的应力分布情况。从图 10 可看出, 阀芯最大应力仍发生在弹簧导杆根部, 且随着阀芯板厚度增加, 阀芯板整体应力分布更加均匀。从图 10 和图 11 可看出, 阀芯产生的最大应力远远大于阀座, 但随着阀芯板厚度的增加, 阀芯最大应力呈递减趋势, 阀座最大应力呈递增趋势, 且阀芯板厚度为 5 mm 时的最大应力超过了材料的屈服强度, 后续密封比压分析将在 6~10 mm 的阀芯板厚度中进行。因此, 从旁通阀阀芯和阀座应力变化看, 宜选择阀芯应力较小的方案, 即阀芯板较厚的方案。

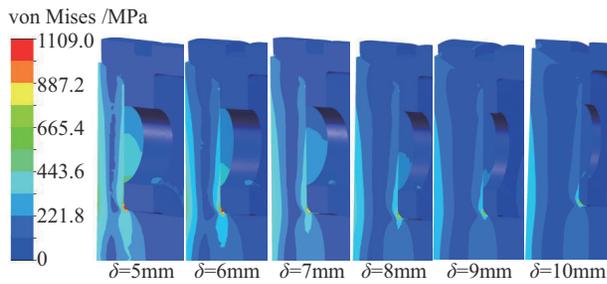


图 10 不同厚度阀芯应力云图

Fig.10 Stress nephogram of different valve core thicknesses

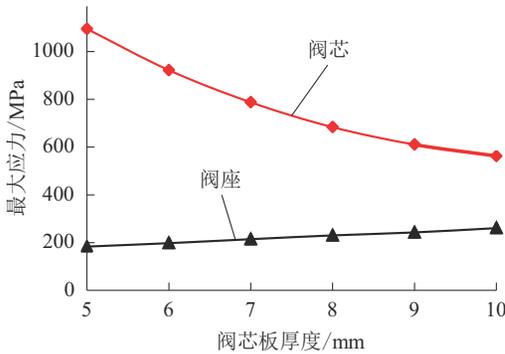


图 11 阀芯板厚度与最大应力关系曲线

Fig.11 Curve of the relationship between valve core thickness and maximum stress

#### 4.2.2.2 密封分析

进一步分析阀芯板厚度增加对密封面设计比压的影响。从图 12 可看出, 随着阀芯板厚度增加,

提取到的密封面法向合力迅速上升, 阀芯板底面的法向合力逐渐下降。主要原因是随着阀芯板厚度增加, 阀芯大端直径增大, 受力面积增大, 导致阀芯整体承受的液压力增大, 同时较厚的阀芯板受力后发生的弹性变形减小, 进一步导致作用于阀芯的液压力更大比例地作用到密封面上, 因此出现密封面上的法向合力迅速增加, 阀芯底面法向合力降低的情况。还可看出, 密封面设计比压呈波动变化, 但最大波动量仅为 3.49 MPa, 波动比仅为 2.6%, 说明密封副半锥角和小端直径不变的情况下, 阀芯板厚度变化对设计比压基本无影响。

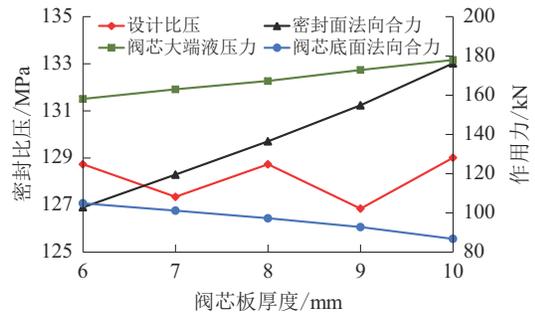


图 12 阀芯板厚度与密封比压和作用力关系曲线

Fig.12 Curve of the Relationship between valve core thickness and sealing pressure & force

综合分析阀芯板厚度变化对阀芯应力和密封比压的影响, 优选阀芯板较厚的方案, 但本文未进行冲蚀分析, 考虑到旁通阀打开后, 旁路流体会对阀座底板进行冲刷, 因此阀座底板不宜太薄, 优选阀芯板厚度为 8 mm。

#### 4.2.3 仿真分析结论

(1) 在阀芯小端直径和厚度不变的情况下, 半锥角在 5°~40° 范围内: 半锥角与阀芯最大应力成正比, 与设计比压成反比, 且半锥角对阀芯强度影响较大, 对设计比压影响较小, 优选半锥角时应以阀芯强度为主要考虑因素。

(2) 在阀芯小端直径和半锥角不变的情况下, 阀芯板厚度在 5~10 mm 范围内: 阀芯板越厚, 阀芯最大应力越小, 阀座最大应力越大, 但最大应力仍发生在阀芯上; 阀芯板越厚, 密封面承受的法向合力越大, 但由于密封面宽度同步增加, 导致密封比压仅在小范围波动, 未发生明显增减。因此, 阀芯板厚度优选较大尺寸。

## 5 试验测试

### 5.1 旁通阀密封性测试

综合仿真结果,选择半锥角 $30^\circ$ ,阀芯板厚度8 mm的旁通阀进行加工测试。为验证高压密封的可靠性,室内压力测试高压设定为38 MPa。分别对2个短节进行低压和高压保压测试,测试结果:第1个,低压打压1.81 MPa,保压10 min,压降0.05 MPa;高压打压37.16 MPa,保压10 min,压降0.25 MPa。第2个,低压打压1.84 MPa,保压10 min,压降0.03 MPa;高压打压38.01 MPa,保压10 min,压降0.21 MPa。两个测试短节压降均在合理范围内。室内测试证明,设计的旁通阀结构可满足低压和高压密封需求,与理论计算相符。测试现场见图13。



图13 旁通阀室内压力测试

Fig.13 Indoor pressure test of bypass valve

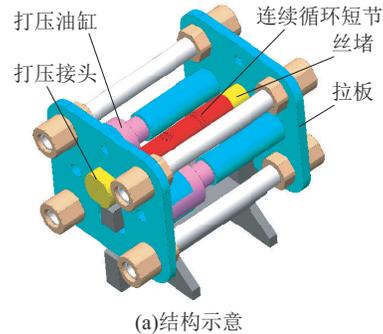
### 5.2 本体强度测试

为验证连续循环短节实际承受外拉力和内压力时的受力和密封情况,专门研制了测试台架(图14)对连续循环短节的受力和密封进行测试。短节本体参数为:外径177.8 mm,内通径68 mm,主阀开关孔直径45 mm,旁通阀侧向安装螺纹孔M88。旁通阀参数为:阀芯板小端直径68.8 mm,厚度8 mm,半锥角 $30^\circ$ 。将组装好的短节安装到测试台架上,打压管路连接到打压接头上,主球阀打开,向短节内注入35 MPa的液体,保压过程将油缸伸出同时对短节进行轴向拉拔。最终油缸施加到短节上的拉力为4571 kN,旁通阀未出现泄漏,短节本体未发生变形损伤,证明连续循环短节本体强度和受拉力作用下旁通阀密封性能满足要求。

## 6 结论

设计了一种适用于海域水平井的球阀+升降板阀式连续循环短节,对其结构和工作原理进行了说明,通过仿真分析和试验测试,得出如下结论:

(1)本体同时承受外拉力和内压力的工况下,



(a)结构示意图



(b)实物

图14 连续循环短节测试台架及强度测试

Fig.14 Test bench and strength test of the continuous circulation valve

应力集中出现在旁通阀侧开孔孔壁,通过优化设计,得出不同侧开孔直径对应的本体最大应力及安全系数。侧开孔直径越大越有利于旁通阀结构设计,但孔壁应力也越大,因此,在满足安全系数不低于1.2的前提下,优选最大侧开孔直径。

(2)旁通阀关闭时应力集中出现在阀芯弹簧导杆根部,半锥角在 $5^\circ\sim 40^\circ$ 范围内,应力随半锥角增大而增大,密封面设计比压随半锥角增大而减小;阀芯板厚度在5~10 mm范围内,应力随阀芯板厚度增加而减小,密封面设计比压变化极小,可忽略不计。

(3)通过对连续循环短节进行的旁通阀密封性能测试和本体强度测试,证明优选的旁通阀侧开孔直径88 mm、阀芯半锥角 $30^\circ$ 和阀芯板厚度8 mm满足实际使用需求。

## 参考文献(References):

- [1] 梁健,李鑫淼,王汉宝,等.连续循环系统在科学超深井中的需求分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(4):1-5.  
LIANG Jian, LI Xinmiao, WANG Hanbao, et al. Requirement analysis on continuous circulation system for scientific ultra-deep drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(4):1-5.
- [2] 胡志坚,马青芳,邵强,等.连续循环钻井技术的发展与研究[J].石油钻采工艺,2011,33(1):1-6.

- HU Zhijian, MA Qingfang, SHAO Qiang, et al. Development and investigation of continuous circulation drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011,33(1):1-6.
- [3] 秦如雷,王林清,陈浩文,等. 钻井液连续循环钻井技术及自动化装备设计[J]. 钻探工程, 2021,48(6):63-67.
- QIN Rulei, WANG Linqing, CHEN Haowen, et al. Drilling fluid continuous circulation drilling technology and automatic equipment design[J]. Drilling Engineering, 2021,48(6):63-67.
- [4] Wu N Y, Li Y L, Wan Y Z, et al. Prospect of marine natural gas hydrate stimulation theory and technology system[J]. Natural Gas Industry B, 2021,8(2):173-187.
- [5] 侯岳,刘春生,刘聘,等. 海域天然气水合物浅软地层水平井钻井液技术[J]. 钻探工程, 2022,49(2):16-21.
- HOU Yue, LIU Chunsheng, LIU Dan, et al. Drilling fluid technology for natural gas hydrate horizontal wells in marine shallow soft formation[J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):16-21.
- [6] Yue J X, Liu Y C, Wang G D. Design and simulation study on continuous circulation valve drilling system[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019,242(3):032036.
- [7] 岳吉祥,王国栋,周扬理. 一种连续循环钻井系统T型集成式三通阀及其使用方法:CN201810330191.6[P].2018-04-13.
- YUE Jixiang, WANG Guodong, ZHOU Yangli. The invention relates to a T-type integrated three-way valve of a continuous circulation drilling system and a use method: CN201810330191.6 [P]. 2018-04-13.
- [8] 田志欣,李文金,张武攀,等. 阀式连续循环钻井技术在番禺油田大位移井的应用[J]. 石油钻采工艺, 2017,39(4):413-416.
- TIAN Zhixin, LI Wenjin, ZHANG Wunian, et al. Application of valve-type continuous circulation drilling technology to the extended reach wells in Panyu Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017,39(4):413-416.
- [9] 刘强,张武攀. 钻井液连续循环短节结构优化设计与分析[J]. 石油矿场机械, 2021,50(1):7-14.
- LIU Qiang, ZHANG Wunian. Optimal design and analysis of drilling fluid continuous circulation sub structure[J]. Oil Field Equipment, 2021,50(1):7-14.
- [10] 石建刚,杨光,熊超,等. 箭型连续循环阀设计与分析[J]. 石油机械, 2019,47(8):8-14.
- SHI Jiangan, YANG Guang, XIONG Chao, et al. Design and analysis of arrow type continuous circulation valve[J]. China Petroleum Machinery, 2019,47(8):8-14.
- [11] 魏臣兴,齐金涛,郭衍茹,等. 不同结构连续循环阀工作原理探讨[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2015,17(5):115-118.
- WEI Chenxing, QI Jintao, GUO Yanru, et al. Discussion on the principle of different structure continuous circulation valve[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition), 2015,17(5):115-118.
- [12] Nabors. Non Stop Driller™ System[EB/OL]. [2024-07-11]. [https://www.nabors.com/wp-content/uploads/2021/12/BRCH-NSD\\_ONLINE\\_0.pdf](https://www.nabors.com/wp-content/uploads/2021/12/BRCH-NSD_ONLINE_0.pdf).
- [13] Halliburton. e-cd™ Circulating Sub[EB/OL]. [2024-07-11]. [https://cdn.brandfolder.io/G1R8FA5S/at/pfrpfcwcs8fp3p85gsf99ht/e-cd\\_Circulating\\_Sub\\_-\\_H013477\\_-\\_v2.pdf](https://cdn.brandfolder.io/G1R8FA5S/at/pfrpfcwcs8fp3p85gsf99ht/e-cd_Circulating_Sub_-_H013477_-_v2.pdf).
- [14] 王佳露. 连续循环配套钻井工具研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2017.
- WANG Jialu. Research on continuous circulation drilling tools [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [15] Weatherford. Steadystate™ Continuous Flow System [EB/OL]. [2024-07-11]. <https://www.weatherford.com/documents/brochure/products-and-services/drilling/steadystate-continuous-flow-system/>.
- [16] 张武攀,贾银鸽,张静,等. 阀式连续循环钻井装置的工业化应用探讨[J]. 石油钻采工艺, 2014,36(6):1-6.
- ZHANG Wunian, JIA Yinge, ZHANG Jing, et al. Industrialized application of valve-type continuous circulation drilling device[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014,36(6):1-6.
- [17] 魏臣兴,黄强,林铁军,等. Ø133mm连续循环阀的研制与应用[J]. 广东石油化工学院学报, 2023,33(4):78-81.
- WEI Chenxing, HUANG Qiang, LIN Tiejun, et al. Development and application of Ø133mm continuous circulation valve [J]. Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology, 2023,33(4):78-81.
- [18] 李露春,练章华,蒲克勇,等. 气体连续循环钻井技术在博孜区块砾石层的应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021,43(4):44-50.
- LI Luchun, LIAN Zhanghua, PU Keyong, et al. Application of gas continuous circulation drilling technology in gravel layer in Bozi block[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021,43(4):44-50.
- [19] 冯定,孙巧雷,夏成宇,等. 气体钻井连续循环短节的设计与本体的力学分析[J]. 天然气工业, 2016,36(1):94-98.
- FENG Ding, SUN Qiaolei, XIA Chengyu, et al. Design of continuous circulating sub for gas drilling and the mechanical analysis on the sub body[J]. Natural Gas Industry, 2016,36(1):94-98.
- [20] 夏成宇,孙巧雷,于章丽,等. 气体钻井连续循环短节旁通阀的设计与分析[J]. 石油钻采工艺, 2014,36(6):101-104.
- XIA Chengyu, SUN Qiaolei, YU Zhangli, et al. Nalysis and research on the bypass valve of continuous circulation sub for gas drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014,36(6):101-104.

(编辑 王跃伟)