

高静压下两间隙气体开关结构及电场优化设计

卢勇, 张永民, 王昊东, 张少杰, 邱爱慈

(西安交通大学电力设备电器绝缘国家重点实验室, 西安, 710049)

摘要: 为解决可控冲击波设备的两间隙气体火花开关在非常规页岩油开发中结构强度不够的问题,提出了一种适用于高静压、有限空间中的气体火花开关结构强度与电场分布同步优化的设计方法。基于有限元模拟与理论分析,评估了 50 MPa 外部高静压对气体火花开关结构强度的影响,针对结构强度足够的气体火花开关模型,通过高斯定理对开关内部的电场分布进行了优化分析,给出了两电极气体火花开关结构强度与电场分布同步优化的设计方案。研究表明:开关结构强度主要与腔室壁厚正相关,而壁厚的增加会提高开关异常放电概率,在特定的壁厚参数下,电极半径存在最佳值使得绝缘子表面电场强度最低。在保证结构强度的前提下,对现有开关电场分布进行了优化分析,优化后的开关间隙电场的不均匀度有轻微提高,而高压绝缘子内、外表面电场强度分别衰减了 59.6% 与 31.0%。通过先增加结构强度、后优化电场分布的方法,实现了对冲击波设备的两电极气体火花开关结构强度与电场分布的同步优化。

关键词: 气体火花开关;有限元模拟;高静压;电场分布

中图分类号: TH162 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202409015 **文章编号:** 0253-987X(2024)09-0154-10

Optimization Design of Two Gap Gas Switch Structure and Electric Field Under High Hydrostatic Pressure

LU Yong, ZHANG Yongmin, WANG Haodong, ZHANG Shaojie, QIU Aici

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve the problem of insufficient structural strength of two gap gas spark switches for controllable shock wave equipment in unconventional shale oil development, this paper proposes a design method for synchronously optimizing the structural strength and electric field distribution of gas spark switches in high static pressure and limited space. Based on finite element simulation and theoretical analysis, the impact of 50 MPa external high static pressure on the structural strength of the gas spark switch is evaluated. For a gas spark switch model with sufficient structural strength, the electric field distribution inside the switch is optimized and analyzed through Gauss' theorem, leading to a design scheme for synchronously optimizing the structural strength and electric field distribution of a two electrode gas spark switch. The research results indicate that the strength of the switch structure is primarily positively correlated with the chamber wall thickness, and the increase in wall thickness may increase the probability

收稿日期: 2024-01-22。 作者简介: 卢勇(1996—),男,博士生;通信作者:张永民(1961—),男,教授,博士生导师。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFA0710500)。

网络出版时间: 2024-04-18

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20240416.2000.006>

of abnormal discharge of the switch. Under specific wall thickness parameters, there is an optimal value for the electrode radius to make the electric field intensity on the insulator surface the lowest. On the premise of ensuring the structural strength, the existing switch electric field distribution is optimized and analyzed. The optimized switch gap exhibits a slight improvement in the uniformity of the electric field, and the electric field intensity on the inner and outer surfaces of the high-voltage insulator is respectively reduced by 59.6% and 31.0%. By first increasing the structural strength and then optimizing the electric field distribution, synchronous optimization of the structural strength and electric field distribution of the two electrode gas spark switch in shock wave equipment is achieved.

Keywords: spark gap switch; finite element; high hydrostatic pressure; electric field distribution

脉冲功率技术是一种通过长时间充电、短时间放电将电功率迅速放大的技术^[1-2],当脉冲功率装置产生的电脉冲加载到水间隙、金属丝等负载上,可方便有效地产生不同参数的冲击波,在医学^[3]、基础物理^[4]、机械加工^[5-6]、油气助采^[7-8]等领域具有良好的应用前景。特别是在油气资源储层改造增产方面,利用重复电脉冲驱动钝感的含能材料产生重复强冲击波的可控冲击波技术^[9],已引起了广泛的关注并实现了在油气储层改造中的应用^[10]。在国家“十四五”规划中,该技术被选作一种开发中低成熟度非常规页岩油的变革性、颠覆性的技术,其设备结构如图 1 所示。



图 1 重复脉冲强冲击波产生装置结构

Fig.1 Structure of the device for generating repetitive pulse strong shock waves

开关是可控冲击波发生设备的核心部件,在实际的非常规页岩油开发工程应用的井下环境中,开关部件需要在数十 MPa 静压的密闭有限井筒空间内连续重复运行,如何保持开关击穿特性稳定,是可控冲击波设备工程应用的基础。目前对两电极气体火花开关的研究,大多是在大气环境、开关外壳电位悬浮条件下进行。王宇等^[11]通过数值模拟研究了 4 种电极面型对开关电场分布的影响,得到了不同间距下的最佳面型。吴佳玮等研究了大电流气体火花开关的不同电极材料的烧蚀特性^[12-14]及绝缘子劣化产物^[15]等对开关性能的影响。钟伟等^[16]对 Mo、W、Cu 电极材料在大电流下的溅射特性进行了研究,结果表明采用电极烧蚀率作为衡量材料的耐烧

蚀性能的方法存在缺陷,其无法排除电极间溅射颗粒质量的影响。王虎等^[17]通过实验与理论分析建立了场畸变开关寿命的计算模型,用于预测开关的最大放电次数。刘志刚等^[18]研究了气压与不同绝缘气体对场畸变开关击穿特性的影响。现有气体火花开关的主要研究内容侧重于电极面型的优化^[11]、开关放电烧蚀特性^[12-14,19]、绝缘介质老化特性^[15]、开关电极溅射特性^[16]、开关工作寿命^[17]、不同绝缘气体环境下的放电现象^[18]、击穿抖动特性^[20]、开关电极材料^[21]等问题。工作在数十 MPa 静压密闭环境中且外壳接地的不换气连续自击穿开关研究尚未见相关报道。可控冲击波设备开关结构经过吴佳玮^[21]、王宇等^[11]的研究,目前已形成了以 W、Ni、Fe 为电极材料、Bruce 结构为电极面型的用于常压井下密闭空间的两间隙气体火花开关结构,如图 2 所示。

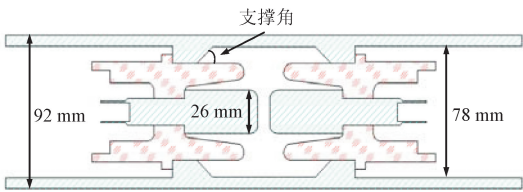


图 2 低静压环境下井下两间隙气体开关结构

Fig.2 Structure of two gap gas switch in low static pressure environment

随着冲击波装置深入地下,外部环境压力的升高使得开关结构在承载设备产生冲击波载荷时,还需要承载由外部静压所带来的高预应力。高静压与强冲击的叠加对开关的结构强度提出了更为严苛的要求,而井下狭小的空间又对开关直径形成了限制,现有开关结构能否满足在高静压环境下工程应用尚需验证。为实现冲击波设备在中低成熟度页岩油开发中的工程应用,本文以可控冲击波设备上的两电

极气体火花开关为对象,对开关的结构强度与电场强度分布进行了优化设计,通过数值模拟的方式评估了优化效果,并给出了 50 MPa 静压环境下的开关优化方案,可为高静压环境下外壳接地的可控冲击波设备及具有类似工程应用需求的开关结构设计提供参考。

1 50 MPa 静压下开关结构响应模拟

为了得到现有开关部件在高静压下的结构响应,基于 LSDYNA 软件的任意拉格朗日-欧拉(ALE)算法对开关部件进行动力学模拟。根据设备开关部件的结构进行建模并采用六面体网格对模型离散,最小网格尺寸为 5 mm、最大尺寸为 31.4 mm,网格总数为 102 743 个,部件间螺纹连接采用绑定接触模拟,其他采用摩擦接触,摩擦系数设置为 0.1。开关部件有限元网格划分结果如图 3 所示,为了更好地模拟井下工作环境,在开关部件外部设置了内径为 139 mm 的模拟井筒。

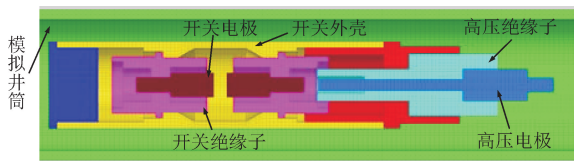
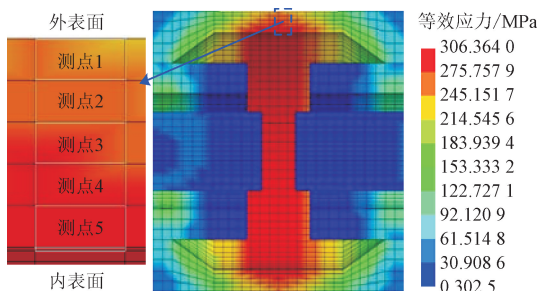


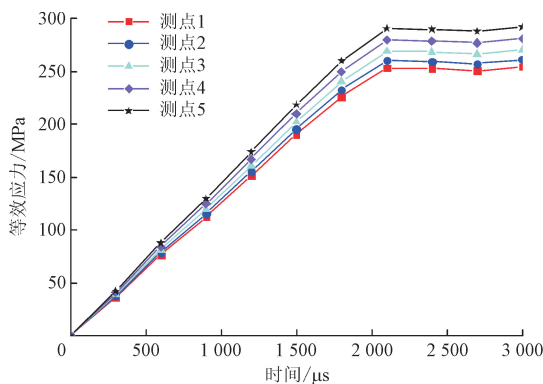
图 3 开关部件有限元网格划分结果

Fig. 3 Finite element mesh division results of switch components

在仿真模型中,绝缘子材料采用 ANSYS 软件中自带的聚乙烯,其余部件材料采用 42CrMo 钢,42CrMo 钢材料本构由 LSDYNA 软件中的简化 J-C 本构(98 号材料)描述,其屈服强度 A 为 960.7 MPa,硬化强度 B 为 763.7 MPa、硬化指数 n 为 0.316,应变率强化系数 C 为 0.093。设置好模型后给开关外壳加载一个由 0 缓慢上升到 50 MPa 的外部静压力,来模拟开关在下井过程中外部逐渐增加的静液压力对设备造成的影响。图 4 展示了开关部件在缓慢上升的静压下,开关外壁处的等效应力曲线及云图,从云图上看,预应力主要集中在开关腔室中部。为分析静压造成的预应力在腔壁径向上分布,在腔室中部径向上由外向内添加了 5 个等效应力测点,具体如图 4(a)所示。图 4(b)展示了在外部静压上升过程中各测点的等效应力变化曲线,从中可以看出,静压造成的预应力由外向内逐渐增加,50 MPa 静压在 7 mm 腔室内、外壁面产生的预应力峰值分别为 306.36、245.15 MPa。



(a) 等效应力云图



(b) 测点等效应力时程曲线

图 4 50 MPa 静压下开关部件结构响应

Fig. 4 Structural response of switch components under 50 MPa hydrostatic pressure

在 50 MPa 静压的基础上,使用 ALE 算法对开关部件的冲击结构响应进行了模拟研究,其中水域外部设置了无反射边界模拟无限水域来滤除轴向反射波对模拟结果的干扰。在激励等效过程中,可控冲击波设备的激励为金属丝电爆炸驱动含能材料,LSDYNA 软件中不存在相关材料模型,因此使用了 TNT 材料替代。为了保证仿真激励产生的冲击波分布与实际设备相同,将 TNT 药柱设置成与设备负载相同的长为 8 cm、直径为 20 mm 的圆柱结构,开关部件冲击响应仿真模型如图 5 所示。其中 TNT 药柱与开关内部空腔内空气均采用体积填充法进行填充,通过 dynain 文件法^[22]将静压下的结构响应作为初始条件引入模型。

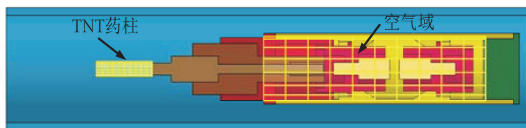


图 5 开关部件冲击响应仿真模型

Fig. 5 Simulation model of switch component impact response

其中 TNT 状态方程由 Jones-Wilkins-Lee(JWL)方程表示为

$$P=A_1\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B_1\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E_0}{V}$$

(1)

式中： P 为爆炸压力； E_0 为初始单位体积能量； V 为相对体积； A_1 、 B_1 、 R_1 、 R_2 、 ω 为 JWL 状态方程相关参数， A_1 为流体的体积压缩系数，用于衡量流体受压时的压缩性， B_1 为流体的容积相关系数，用于描述流体体积与压力的关系， R_1 、 R_2 分别表示体积变化受到压力与温度变化的影响程度， ω 为初始能量密度系数。

TNT 的初始 JWL 方程参数见表 1。

表 1 TNT 的初始 JWL 方程参数^[23]

Table 1 Initial JWL equation parameters for TNT^[23]

A_1/GPa	B_1/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
371	3.23	4.15	0.95	0.3	6	1 630

注： ρ 为材料密度。

空气与水采用空材料表述，状态方程采用如下多项式表达

$$P=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+(C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E_0$$

(2)

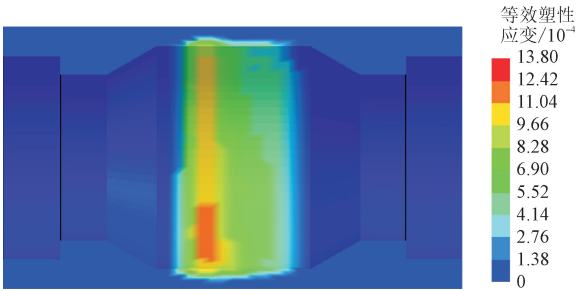
式中： $C_0\sim C_6$ 为多项式状态方程相关参数， $C_0\sim C_3$ 为与材料体积模量相关的系数， $C_4\sim C_6$ 为与材料初始能量密度相关的系数。空气与水多项式的状态方程参数见表 2，其中 $C_0=C_6=0$ ， $\mu=-1+\rho/\rho_0$ ， ρ_0 为材料的初始密度，材料的 E_0 根据大气压力换算得到。

表 2 空气与水多项式的状态方程参数

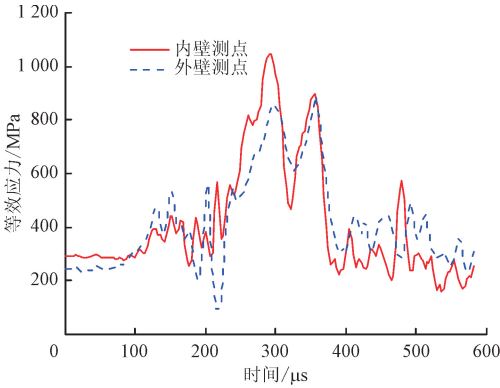
Table 2 State equation parameters for water and air polynomials

介质	C_1/GPa	C_2/GPa	C_3/GPa	C_4	C_5	$E_0/(\text{10}^5\text{ J}\cdot\text{m}^{-3})$
空气	0	0	0	0.40	0.40	2.5
水	2.2	9.5	14	0.28	0.28	3.6

图 6(a)展示了开关外壳在 50 MPa 静压叠加冲击条件下的塑性应变云图，从图 6(a)中可以看出，在静压条件下，与含能棒尺寸相同 TNT 药柱爆炸将在开关腔室内壁产生约为 1.3‰ 的塑性应变。一套冲击波设备开关在工程应用现场需连续工作数千次，微小的局部变形在上千次累积下可能造成开关局部发生明显形变，进而影响其放电过程与稳定性。图 6(b)给出了开关腔壁内、外表面测点的等效应力时程，内壁测点的等效应力最高峰值为 1 050 MPa，超过了 42CrMo 设定屈服强度 967 MPa，因此腔室内壁出现塑性应变。



(a) 等效塑性应变云图



(b) 开关腔壁内外测点等效应力

图 6 50 MPa 静压环境下开关外壳冲击结构响应

Fig. 6 Impact structural response of switch housing under 50 MPa static pressure environment

从等效应力曲线上可以看出，静压造成的预应力会降低结构的抗冲击强度。根据模拟结果，现有开关结构在 50 MPa 静压叠加含能棒冲击的条件下存在塑性应变的风险，而开关是脉冲功率设备上关键部件且成本较高，从工程应用上无法作为耗材使用，故要实现冲击波设备在非常规页岩油中的可靠应用，需提高开关部件的结构强度。

2 开关结构与电场优化分析

2.1 结构优化分析

在开关部件制作材料确定的条件下，开关的结构强度主要与开关腔室壁厚相关。在增加壁厚的过程中，由于井筒尺寸（一般直径为 139 mm）的限制，为了方便设备在井中移动，开关外径应尽可能小，因此对于壁厚的增加首先考虑将壁面向内扩展。在研究壁厚对结构强度影响的过程中，为了降低计算量及模型难度，对开关部件进行了简化，去除了内部的绝缘子、电极等不承压部件，两端设置了承压封堵，封堵与开关外壳之间为共节点连接，简化后的开关模型如图 7 所示。

针对图 7 展示的模型，以初始的 7 mm 厚度为基础，将开关腔室壁厚向内以 1 mm 的梯度扩展到 10 mm，随后加载 50 MPa 静压，模型其他设置与前文相同，开关腔壁等效应力分布如图 8 所示。从图

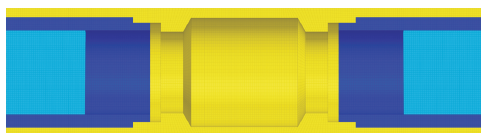
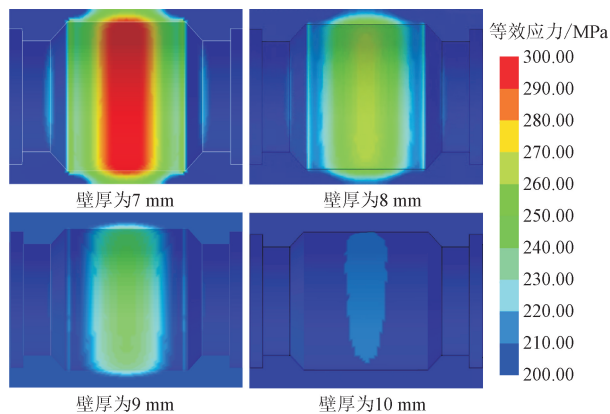


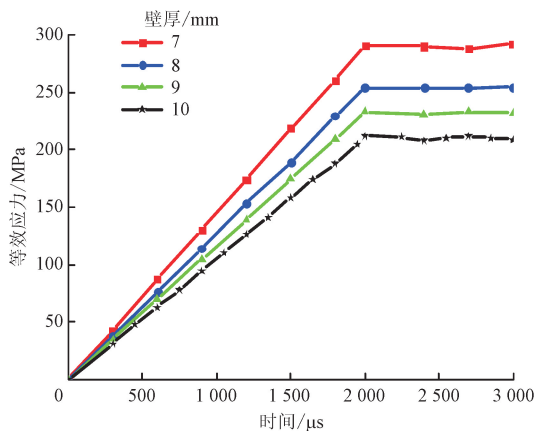
图7 简化开关模型

Fig. 7 Simplified switch model

8(a)可以看出,腔室壁厚的增加可以有效降低开关腔室壁面的等效应力峰值;图8(b)展示了腔壁内侧的等效应力曲线。在7 mm壁厚条件下,开关腔室内壁测点等效应力峰值为292.00 MPa,当壁厚向内扩展1 mm时,腔体对应测点等效应力下降为254.00 MPa,衰减幅度为13%;而当壁厚增加至10 mm时,测点等效应力下降更为显著,内壁静压峰值下降为212.00 MPa,衰减幅度为27.4%。



(a) 等效应力云图



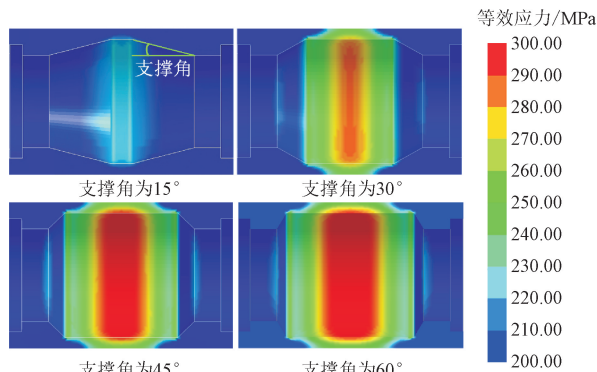
(b) 腔壁测点等效应力时程

图8 不同壁厚开关在50 MPa静压下的结构响应

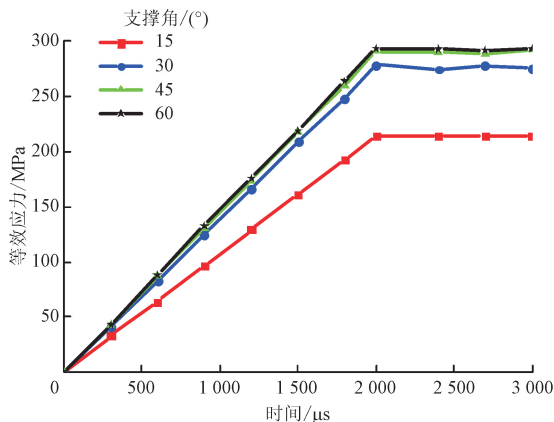
Fig. 8 Structural response of switches with different wall thicknesses under a hydrostatic pressure of 50 MPa

在壁厚确定的条件下,开关腔室的支撑角对开关的结构强度也具有明显影响,图9展示了7 mm壁厚下不同支撑角开关结构加载50 MPa静压后的等效应力分布。从图9中可以看出,随着支撑角逐

渐增加,静压在开关腔壁上产生的等效应力峰值及范围也随之增加与扩大。图9(b)展示了不同支撑角开关结构腔室内侧等效应力曲线,15°、30°支撑角结构腔室内壁面应力峰值分别约为214.00、278.00 MPa。与45°支撑角相比,开关腔室内壁静压等效预应力峰值分别衰减了26.7%与4.8%,而将支撑角扩大到60°时对预应力峰值无明显影响,但从云图8(a)上可以看出,预应力范围较45°有明显增加。



(a) 等效应力云图



(b) 腔室测点等效应力时程曲线

图9 不同支撑角开关在50 MPa静压下的结构响应

Fig. 9 Structural response of switches with different support angles under a static pressure of 50 MPa

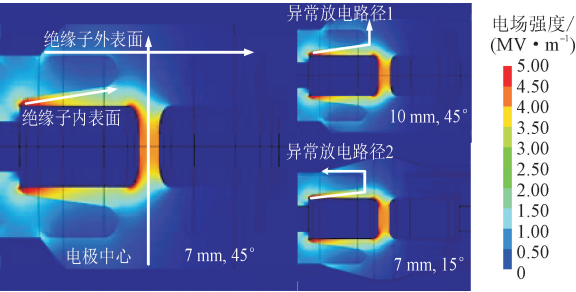
综上所述,增加腔室壁厚与缩小支撑角均可提升开关外壳的结构强度,其中壁厚增加对静压造成的预应力峰值衰减呈现近似线性的关系,而支撑角的缩小主要降低腔室内壁应力集中区的范围,当应力集中区缩小到一定程度后开始对预应力峰值造成影响。对于可控冲击波设备的开关结构,当支撑角低于30°以后,支撑角缩小对应力峰值的衰减幅度开始逐渐增加,当支撑角缩小到15°时腔室内壁50 MPa静压预应力可衰减到214.00 MPa,衰减幅度约为26.7%。

2.2 结构对电场分布的影响

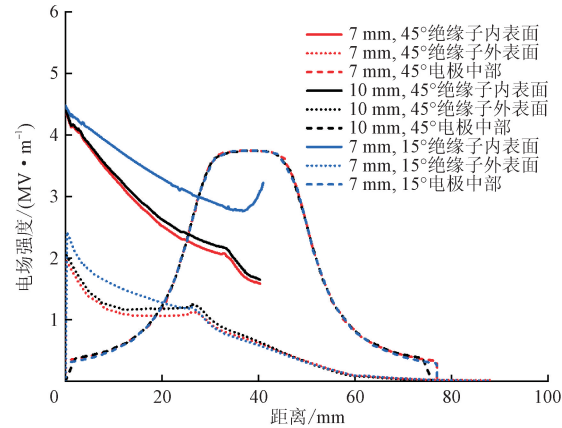
放电稳定性是评估开关性能的关键指标,而开

关腔室内部结构的改变可能影响其内部电场强度的分布,根据气体击穿理论,气体间隙中的电场强度分布是影响气体间隙击穿的主要因素,因此在改变开关结构后,需要对开关内部电场重新评估以确保其放电稳定性。电场分布计算采用 COMSOL 的静电分析模块进行,通过 3D 建模软件对开关模型进行建模,在外部设置了一个 400 mm×150 mm×150 mm 的长方体空气域作为边界条件,模型网格采用自由四面体划分,在电极头处采用细化提高精度。冲击波设备电源加载的最高电压为 30 kV,为保证间隙可靠击穿开关间距设置为 8 mm,根据王宇等^[11]的研究,在 8 mm 间距下 Bruce 面型电极在间隙中形成的电场更为均匀,故电极面型采用 Bruce 结构。在电场仿真的过程中,开关外壳与电极材料设置为不锈钢,而绝缘子采用聚乙烯材料,将 30 kV 电压加载到高压电极,另一端低压电极与开关外壳接地。

图 10 展示了不同结构的开关在 30 kV 电压下的电场强度分布。与外壳悬浮条件不同,在外壳接地情况下,电场除集中在电极间隙外,还存在于高压电极底部与绝缘子接触部分,在电极间隙为 8 cm、电极间加载 30 kV 电压条件下,此处最高电场强度达到了 4.8 MV/m。



(a) 电场强度分布云图



(b) 电场强度随空间变换曲线

图 10 不同结构开关内部电场强度分布

Fig. 10 Internal electric field intensity distribution of switches with different structures

从电场云图 10(a)上看,壁厚与支撑角对电场强度分布影响并不明显。图 10(b)展示了不同开关结构的电极中心及绝缘子内、外表面上电场强度随空间距离的变化。在电极中心径向空间上,壁厚与支撑角的改变对电场强度分布无明显影响,电场强度基本沿电极中心对称分布,最高电场强度出现在电极中间部分,约为 3.74 MV/m;从绝缘子表面电场强度上可以看到,高压端绝缘子内表面电场强度比电极中心更高,在升压过程中,电极导通前此处已存在非常高的电场强度,可能造成绝缘子内表面绝缘失效发生沿面闪络到绝缘子端部。当开关腔室内壁向内扩展或支撑角缩小时,绝缘子内、外表面电场强度将进一步升高。当腔室壁厚向内延伸到 10 mm 时,较 7 mm 腔室壁厚,高压绝缘子内、外表面电场强度在绝缘子头部近场均存在轻微上升,内表面电场强度由 2.08 MV/m 上升到 2.19 MV/m,外表面电场强度则由 1.14 MV/m 上升到 1.21 MV/m,上升幅度均在 5% 左右。支撑角的缩小会显著增加高压绝缘子内表面电场强度,当支撑角由 45° 缩小到 15° 时,高压绝缘子头部电场强度由 2.08 MV/m 上升到 2.82 MV/m,上升幅度达到了 36%。同时,在经过绝缘子头部后其电场强度还存在异常增加现象,这将显著增加绝缘子表面出现沿面闪络的风险。

2.3 电场优化分析

根据电场分布计算结果,开关工作时异常放电的可能路径如图 10(a)所示。在开关腔室壁面向内扩展或缩小支撑角的过程中,将增加异常放电的概率。为了提高开关外壁结构强度的同时保证开关的放电性能,需对电极与绝缘子进行优化。从图 10(a)的云图上看,造成异常放电的主要原因是高压端绝缘子端部电场强度过大,为了降低此处电场强度减小异常放电概率,对开关电场强度进行了分析。对于高压绝缘子端部电场强度分布可近似看作同轴线电场,对于同轴电场强度分布可通过高斯定理法^[24]或拉普拉斯方程法^[25]进行计算,本文采用高斯定理法来进行计算。

假设电极半径为 r_1 、绝缘子内径为 r_2 、外径为 r_3 、开关外壳内径为 r_4 ,如图 11 所示,空气介电常数为 ϵ_1 、绝缘子介电常数为 ϵ_2 ,根据高斯定理得到

$$\oint_s D ds = q \tag{3}$$

式中: D 为电通量; q 为电荷量。对于电极径向电场分布存在

$$D = \frac{\rho_l}{2\pi r} = E\epsilon \tag{4}$$

式中: p_l 为单位长度电极的电荷密度; r 为开关内部某点与开关轴线的径向距离; E 为电场强度, 可表示为

$$E = \frac{p_l}{2\pi r \epsilon} \quad (5)$$

由于电极半径 r_1 最小且空气介电常数 ϵ_1 小于绝缘子材料聚乙烯介电常数 ϵ_2 , 因此电场强度最大值出现在高压电极外表面上。由于绝缘子内、外表面不存在电荷, 那么电通量 D 在径向上保持不变, 那么电极与开关外壳电势差 U 可被表示为

$$U = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho_l}{2\pi r \epsilon_1} dr + \int_{r_2}^{r_3} \frac{\rho_l}{2\pi r \epsilon_2} dr + \int_{r_3}^{r_4} \frac{\rho_l}{2\pi r \epsilon_1} dr \quad (6)$$

对式(6)积分则有

$$U = \frac{p_l}{2\pi} \left[\frac{1}{\epsilon_1} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + \ln \frac{r_4}{r_3} \right) + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right] \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)可以得到, 场强最高的电极表面电场强度可被表示为

$$E_a = U / \left[r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + r_1 \left(\ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right) \right] \quad (8)$$

根据式(8)可以看出, 开关内壁半径 r_4 减小或绝缘子介电常数 ϵ_2 增大均会提高电极表面电场强度, 故开关腔体内壁向内扩展时由于 r_4 减小, 将造成开关内部电场强度升高。

电极半径 r_1 、绝缘子内外半径 r_2 及 r_3 与 E_0 之间均不存在明显的单调关系。在静压力叠加冲击的环境下, 冲击波设备开关正常工作需同时满足结构强度与电场合理分布两个条件, 而开关结构强度主要与外壳及绝缘子结构有关, 故电极表面电场强度的变化主要通过调节电极半径 r_1 实现。电极表面电场强度 E_a 对 r_1 的偏导数为

$$\frac{\partial E_a}{\partial r_1} = \ln \frac{r_2}{r_1} - 1 + \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \quad (9)$$

在通过结构强度需要来确定 r_2 、 r_3 、 r_4 后, 通过式(9)可以计算得到在该条件下使电极表面电场强度最低的电极半径 r_1 。

3 50 MPa 静压下开关结构优化方案

根据前文的分析, 开关腔室向内扩展可有效降低静压在结构上产生的预应力, 同时对开关内部电场强度分布影响较小, 而缩小支撑角将会使得绝缘子内、外表面电场强度明显提高, 不利于开关内部电场的合理分布, 因此在优化冲击波设备开关的过程中主要通过调节开关腔室壁厚进行。当腔壁厚度由 7 mm 增加到 10 mm 时, 静压在腔室上造成的等效

应力峰值可以降低 27.4%。在腔室内壁向内扩展的过程中, 将缩小绝缘子端部到外壁的绝缘距离, 为防止高压绝缘子内表面闪络后, 击穿此处间隙造成异常放电(路径 1), 将绝缘子端部半径随开关腔室内壁向内缩小 3 mm, 同时为了保障绝缘子的抗冲击强度, 保持原有绝缘子厚度不变, 具体结构如图 11 所示。

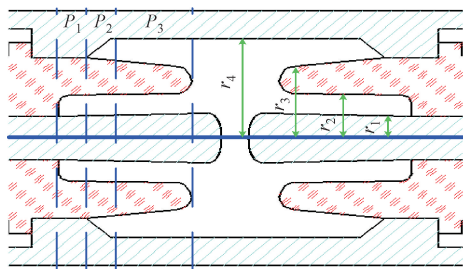


图 11 开关结构与电场优化示意图

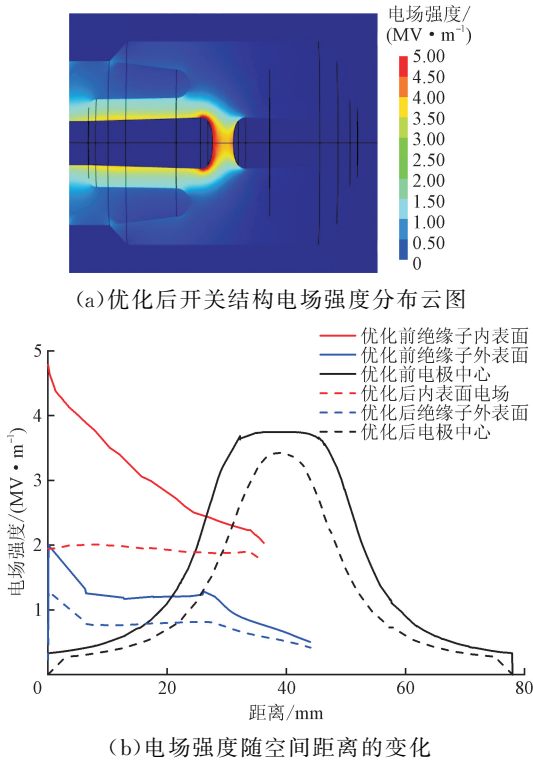
Fig. 11 Schematic diagram of switch structure and electric field optimization

对高压电极径向电场强度分布主要分为 3 个阶段, 从电场强度云图上可以看出, 电场强度主要集中在 P_1 与 P_2 段, 因此优化开关内部电场强度主要考虑 P_1 与 P_2 段电场强度优化。其中 P_1 段 $r_3 = r_4 = 29$ mm, 在 P_2 段 r_4 是一个动态变化参数, 同时由于 r_3 变化量降低, 可近似认为其在 P_2 段内基本保持不变, 空气介电常数为 1, 聚乙烯介电常数为 2.1。

在 P_1 段, r_2 约为 15.5 mm, 根据式(7), 当 $r_2 = 2r_1$ 、 r_1 为 7.75 时, E_0 可近似取得最小值; 而在 P_2 段, r_4 随距离变化, 同时 r_2 与 r_3 变化幅度较小, 近似认为其在 P_2 段内保持不变, 根据式(6)可以得到在其他参数相同的条件下, 随着 r_4 增加电极表面电场强度应逐渐降低, 即在 P_2 段电极表面最高电场强度应出现在 P_2 前端, 因此以 P_2 段前端参数为依据, 得到近似的最优电场强度出现在 $r_2 = 2.1r_1$ 处, 即 r_1 约为 7.85 mm。根据 P_1 与 P_2 段的计算结果, 在壁厚 10 mm 条件下, 电极在 P_1 段与 P_2 段的半径取 7.8 mm 时, 此处高压电极径向电场强度可以近似达到最小值, 为了保障电极头部 Bruce 面型, 提高开关间隙电场均匀性, 电极头部半径由 13 mm 缩小到 9 mm。

图 12(a)展示了开关结构优化前后的电场强度分布对比。从云图 12(a)上可以看出, 优化后的开关结构高压绝缘子底部电场强度明显降低, 将显著降低开关异常放电的概率。同时随着电极头部半径的缩小, 绝缘子端部与电极间距增加了 1 mm, 这也有利于降低高压电极在绝缘子端部发生体击穿随后沿绝缘子外表面闪络(路径 2)的风险。图 12(b)展

示了优化前后绝缘子表面及电极中心电场强度在空间上的变化。从图 12 中可以看出,优化后开关高压绝缘子表面电场强度明显下降,尤其对于绝缘子内表面,最高电场强度由 4.8 MV/m 下降到 1.94 MV/m,衰减幅度达到 59.6%,在外表面电场强度同样也产生了明显的衰减,最高电场强度由 2.0 MV/m 下降到 1.38 MV/m,衰减幅度为 31%。



(a) 优化后开关结构电场强度分布云图

(b) 电场强度随空间距离的变化

图 12 结构优化后电场强度分布对比

Fig. 12 Comparison of electric field intensity distribution after structural optimization

根据高压绝缘子表面电场强度分布的对比结果及电场强度云图可以看出,与原有开关结构相比,腔室壁厚增加为 10 mm 后,通过优化电极及绝缘子参数可使得开关内部电场强度分布更为合理,绝缘子表面出现沿面闪络导致异常放电概率更低。值得注意的是,由于电极半径的缩小,优化结构间隙间电场强度分布均匀度较原始开关有所下降,电场更多的集中在高压电极表面,原始开关间隙最高电场强度约为 5.0 MV/m,不均匀系数 f 约为 1.33,而优化结构间隙最高电场强度达到约 5.6 MV/m,不均匀系数上升为 1.49。不均匀系数的增加可能提高开关击穿电压分散性,但对于可控冲击波设备而言,脉冲电流的作用只用于驱动含能材料负载,开关击穿电压的细微波动对设备产生的冲击波威力并无实际影响,因此,只要保证开关结构正常击穿,击穿电压

分散性的轻微增加并不影响其工程应用。

4 结 论

本文对工作在高静压密闭有限空间环境下的两电极气体火花开关进行了结构强度及电场强度分布的优化计算,通过冲击动力学模拟对静压下的开关结构响应进行了分析,在此基础上基于电场理论计算与仿真对开关腔体内电场进行了优化,主要得到以下结论。

(1) 开关外壳腔壁厚度的增加及支撑角的缩小均可提高开关的结构强度。对于静压所造成的预应力,腔室壁面厚度的增加与预应力峰值的衰减存在明显的正相关效应,腔室壁厚从 7 mm 增加到 10 mm,预应力峰值可衰减 27.4%;而支撑角的变化主要对支撑部位的预应力峰值造成影响,支撑角从 45°缩小到 15°时预应力峰值可衰减 26.7%。

(2) 开关结构的改变会影响其内部电场,其中电极中心电场强度分布与开关的壁厚及支撑角无明显关联,腔室壁面向内延伸会造成绝缘子内、外表面电场强度的轻微上升,腔壁向内延伸到 10 mm 高压绝缘子内、外表面电场强度增加幅度约为 5%,而缩小支撑角会对高压绝缘子表面电场强度造成明显影响,支撑角从 45°缩小到 15°高压绝缘子表面电场强度增加了 35%,故优化开关结构主要通过增加壁厚进行。

(3) 外壳接地的同轴开关高压端电场可近似看作同轴电场来分析,在特定的绝缘子及外壳半径下,电极半径存在最优值使得电极表面电场强度最低。在 10 mm 壁厚下,将绝缘子底部电极半径缩小至 7.8 mm 时可近似实现此处电场强度的最大衰减。为保障电极头部的 Bruce 面型,将电极头部缩小到 9 mm 后,与原有开关结构相比,高压绝缘子内表面最高电场强度降低了 59.6%,外表面最高电场强度降低了 31%,虽然优化后电极间隙的电场不均匀度由 1.33 上升到 1.49,但仍属于稍不均匀场,可以满足工程需要。

本文仅考虑了高静压环境下开关结构加固及电场优化仿真,在实际的非常规页岩油层环境下,存在高静压的同时还存在超 120 °C 的高温,与地面环境的巨大温差使得绝缘子热膨胀造成电极间隙发生改变,进而影响开关的放电性能,下一步将研究适用于高温高压下低热膨胀系数的绝缘子,同时添加传热模型研究高温高压同时作用下对开关结构的影响。

参考文献:

- [1] 邱爱慈, 曾正中, 张乔根, 等. 中国电气工程大典第7篇: 脉冲功率技术基础 [M]. 北京: 电力出版社, 2009: 659-667.
- [2] 丛培天. 中国脉冲功率科技进展简述 [J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(2): 2-12.
CONG Peitian. Review of Chinese pulsed power science and technology [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(2): 2-12.
- [3] RASSWEILER J J, KNOLL T, KÖHRMANN K U, et al. Shock wave technology and application: an update [J]. European Urology, 2011, 59(5): 784-796.
- [4] 王一博. 水中等离子体声源的理论实验研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [5] JE G, MALKA D, KIM H, et al. A study on micro hydroforming using shock wave of 355nm UV-pulsed laser [J]. Applied Surface Science, 2017, 417: 244-249.
- [6] OYANE M, MASAKI S. Fundamental study on electrohydraulic forming [J]. Bulletin of JSME, 1964, 7(26): 474-480.
- [7] CHEN Wen, MAUREL O, REESS T, et al. Experimental study on an alternative oil stimulation technique for tight gas reservoirs based on dynamic shock waves generated by pulsed arc electrohydraulic discharges [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 88/89: 67-74.
- [8] 张永民, 邱爱慈, 汤俊萍, 等. 用于油气资源开发的可控冲击波新技术 [J]. 中国科技成果, 2017(14): 65-66.
ZHANG Yongmin, QIU Aici, TANG Junping, et al. New technology of controllable shock wave for oil and gas exploitation [J]. China Science and Technology Achievements, 2017(14): 65-66.
- [9] 张永民, 邱爱慈, 秦勇. 电脉冲可控冲击波煤储层增透原理与工程实践 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(9): 79-85.
ZHANG Yongmin, QIU Aici, QIN Yong. Principle and engineering practices on coal reservoir permeability improved with electric pulse controllable shock waves [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 79-85.
- [10] 赵树彬, 张命俊, 路远涛, 等. 可控冲击波增产技术在大庆油田的应用 [J]. 石油管材与仪器, 2022, 8(5): 76-80.
ZHAO Shubin, ZHANG Mingjun, LU Yuantao, et al. Application of controllable shock wave stimulation technology in Daqing oilfield [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2022, 8(5): 76-80.
- [11] 王宇, 姚伟博, 刘巧珏, 等. 不同电极面型的两间隙气体开关电场优化设计 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(14): 3066-3073.
WANG Yu, YAO Weibo, LIU Qiaojue, et al. Optimization design of two gap gas switch electric field with different electrode profiles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 3066-3073.
- [12] 吴佳玮, 丁卫东, 韩若愚, 等. 大电流条件下气体火花开关电极烧蚀的研究进展 [J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3367-3379.
WU Jiawei, DING Weidong, HAN Ruoyu, et al. Review of electrode erosion in a spark gap switch under large pulsed currents [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3367-3379.
- [13] 吴佳玮, 丁卫东, 韩若愚, 等. 密封腔体、大电流条件下重复频率长寿命气体开关的烧蚀特性 [J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3235-3242.
WU Jiawei, DING Weidong, HAN Ruoyu, et al. Electrode erosion of repetitive long-life gas spark switch with large current load in airtight chamber [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3235-3242.
- [14] 吴佳玮, 韩若愚, 丁卫东, 等. 长寿命铜钨合金气体开关电极的烧蚀形貌 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2465-2478.
WU Jiawei, HAN Ruoyu, DING Weidong, et al. Surface morphology of Cu-W alloy electrodes in a long lifetime gas spark switch [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2465-2478.
- [15] 吴佳玮, 韩若愚, 周海滨, 等. 大电流气体火花开关聚四氟乙烯绝缘子绝缘劣化产物分析 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 459-466.
WU Jiawei, HAN Ruoyu, ZHOU Haibin, et al. Insulation degradation products analysis of PTFE insulators in gas spark gap switch caused by high current and high energy arc influences [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 459-466.
- [16] 钟伟, 刘云龙, 徐翱, 等. 气体火花开关电极的溅射特性 [J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1996-2004.
ZHONG Wei, LIU Yunlong, XU Ao, et al. Electrode sputtering characteristic in gas spark gap [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1996-2004.
- [17] 王虎, 危瑾, 常家森, 等. 场畸变气体开关寿命预测 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 153-159.
WANG Hu, WEI Jin, CHANG Jiasen, et al. Lifetime prediction of field-distortion gas switch [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 153-159.
- [18] 刘志刚, 曾江涛, 孙凤举, 等. ± 100 kV 气体轨道开关击穿特性 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 765-770.

1127-1131.

LIU Zhigang, ZENG Jiangtao, SUN Fengju, et al. Breakdown properties of rail gap switch with voltage of ± 100 kV [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(4): 1127-1131.

[19] 谢昌明, 谈效华, 杜涛, 等. 气体火花开关电极烧蚀研究 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 248-255.

XIE Changming, TAN Xiaohua, DU Tao, et al. Electrode erosion research of gas spark gap [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1): 248-255.

[20] 张恺焯. 小型场畸变气体开关的击穿抖动特性研究 [D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2018.

[21] 吴佳玮. 大电流钨镍铁合金两电极气体火花开关烧蚀特性研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2018.

[22] HUSAIN M, YU Jun, WU Jun. Comparisons of different approaches of modeling prestress in concrete members using LS-DYNA and its applications [C]//Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete-Innovations in Materials, Design and Structures. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete, 2019: 812-819.

[23] 孟龙, 黄瑞源, 王金相, 等. 小当量梯恩梯水下爆炸气泡脉动的数值模拟 [J]. 兵工学报, 2020, 41(S1): 64-71.

MENG Long, HUANG Ruiyuan, WANG Jinxiang, et al. Numerical simulation of bubble pulsation of small-scaled TNT in underwater explosion [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(S1): 64-71.

[24] 袁训锋, 王笑, 王小蝶, 等. 不同介电系数下同轴线电场分布的计算方法 [J]. 高师理科学刊, 2017, 37(11): 34-37.

YUAN Xunfeng, WANG Xiao, WANG Xiaodie, et al. The calculation method of electric field distribution for coaxial line under different dielectric coefficient [J]. Journal of Science of Teachers' College and University, 2017, 37(11): 34-37.

[25] 陈重, 崔正勤. 电磁场理论基础 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003.

(编辑 武红江)