引用格式:何亚文,李友才,李奇艳,等.防爆型高压电缆接头的泄能孔形状设计[J].电力科学与技术学报,2025,40(4):313-322.
Citation: HE Yawen, LI Youcai, LI Qiyan, et al. Shape design of energy leakage hole of explosion-proof high voltage cable joint[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(4):313-322.

防爆型高压电缆接头的泄能孔形状设计

何亚文,李友才,李奇艳,喻勇丽,蒋志松
(湖南五凌电力工程有限公司,湖南 长沙 410029)

摘　要:针对防爆型电缆接头泄能孔形状设计缺乏优化方法的问题,使用热场、流场和位移场相耦合的有限元计算方法对接头内部的爆炸过程进行仿真,提出防爆型电缆接头铜壳泄能孔形状优化的设计原则,提出以泄能孔溅射气流的收束角度正切值作为关键参数进行优化的方法。通过实例将3种典型泄能孔形状边缘处的气流速度分解成3个方向速度分量,并求出3个速度分量的最大值和平均值,计算不同开口形状的220 kV防爆电缆接头铜壳泄能孔处气体溅射的轨迹。按照泄能孔形状的设计方法,得到泄压孔形状为圆形时,涌出气体最收束,防爆效果最优。压防爆电缆接头泄能孔的优化设计提议的设计思路和重要参数具有导向作用。

关　键　词:高压电缆接头;泄能孔;形状设计;多物理场耦合;有限元仿真计算
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.04.028　　**中图分类号**:TM726.4　　**文章编号**:1673-9140(2025)04-0313-10

Shape design of energy leakage hole of explosion-proof high voltage cable joint

HE Yawen, LI Youcai, LI Qiyan, YU Yongli, JIANG Zhisong
(Hunan Wuling Electric Power Engineering Co., Ltd., Changsha 410029, China)

Abstract: In view of the lack of optimization method for the shape design of energy leakage hole of explosion-proof high voltage cable joint, this paper uses the finite element calculation method coupled with temperature field, fluid field, and displacement field to simulate the explosion process inside the joint, and puts forward the design principle of optimizing the shape of the energy leakage hole in the copper shell of explosion-proof cable joint. An optimization method that uses the tangent value of the convergence angle of the ejected airflow from the energy leakage hole as the key parameter is proposed. Through the examples, the airflow velocity at the edge of the three typical energy leakage hole shapes is decomposed into three directional velocity components, and the maximum and average values of the three velocity components are obtained. The trajectory of gas ejection of the energy leakage hole in the copper shell of a 220 kV explosion-proof high voltage cable joint with different opening shapes, is calculated. According to the design method of the shape of the energy leakage hole, it is obtained that when the shape of the energy leakage hole is circular, the gas ejection is the most restrained, and the explosion-proof effect is the best. The design ideas and important parameters according to the optimal design of the energy leakage hole of the explosion-proof high voltage cable joint can provide valuable guidance.

Key words: high voltage cable joint; energy leakage hole; shape design; multi-field coupling; finite element simulation calculation

高压电力电缆在输电与配电领域中被大量运用[1-2]。然而,随着电缆工程的快速发展,高压电缆经常发生故障,电网系统的安全受到严重影响[3-4]。最近几年发生的严重电网事故大都是电缆接头发生故障造成的,严重地危害了社会健康,使经济蒙受巨大损失[5-6]。根据调查,电缆故障中有70%以上的故障是接头故障,电缆接头是电力电缆使用中的短板[7-8]。因而,必须对现有的电缆接头进行改

收稿日期:2025-06-15;**修回日期**:2025-07-15
基金项目:国家自然科学基金(52177015)
通信作者:何亚文(1982—),男,高级工程师,主要从事电力系统自动化、电力系统人工智能与优化控制等方面的研究;E-mail:1094427783@qq.com

造，使之具备防爆功能[9-10]。

目前，国内外为使电缆接头短路击穿时能够有效防爆，大都采取加装保护壳或者防爆盒的形式[11-14]。保护装置的设计是该领域的研究重点[15-16]。文献[17]采用加装电缆接头防爆器的方法，防爆器由防爆器外壳和泄压孔组成，其计算并分析了电缆接头爆炸时对其内壁的应力，表明了该种形式可以承受电缆爆炸[17]。但该形式虽然能起到保护作用，但存在散热性能问题，当电缆温度超出允许值一定范围时，电缆寿命会下降，影响载流量。文献[18]设计了电缆接头保护壳的泄能孔尺寸，通过拟合保护装置内部最大压力和泄能孔尺寸变化曲线确定泄能孔尺寸。文献[19]针对防爆保护装置端头部位产生的应力畸变问题，设计出折线形和弧度型2种方法来减弱应力畸变问题。由研究现状可见，电缆接头保护装置的设计，包含了泄能孔大小，端部结构等方面，并且现有设计都是针对于保护壳，对于泄能孔的形状设计并未涉及。

在电缆接头加装防爆保护装置的基础上，本文提出对现有接头的铜壳结构进行改造，使电缆接头本身具备防爆功能。相比于传统的保护装置，采用防爆型铜壳的方式，具有造价低廉，占用面积小，提高接头散热，以及对电流载流量影响低，防爆效果好的特点[20-21]。

电缆接头短路时，爆炸冲击波和喷溅物从保护装置泄能孔喷出[22]。如果喷出的气流方向呈束状，则更有利于减少喷溅物对周围设施的伤害。仿真初步发现，泄能孔的形状对泄能时气流方向的约束效果具有一定的影响。而目前该领域的研究并未对泄能孔的开孔形状进行设计。

本文基于泄能孔形状设计判据，通过Comsol Multiphysics对220 kV高压电缆接头防爆铜壳的泄能孔开口形状进行设计。以对泄能孔喷出气流的约束程度为判据，确定铜壳上泄能孔的最佳形状。

1 防爆型高压电缆接头泄能孔形状设计原则

防爆型电缆接头摒弃了传统的保护壳装置，对电缆接头本体进行了优化设计，通过直接在电缆接头的铜壳上进行改造来达到防爆效果，相比传统的保护装置，其具有更经济、占用面积更小、对电缆接头本身影响较小的特点。

防爆型铜壳的设计关键在于铜壳上泄能孔设计，通过对泄能孔进行优化以达到防爆效果。项目组在前期工作中，发现泄能孔的开孔位置会直接影响爆炸波能的释放能力，电缆接头发生爆炸产生严重影响的主要路径有2条，分别位于两端应力锥处以及预制件与缆芯的接触面[23-24]，如图1所示。

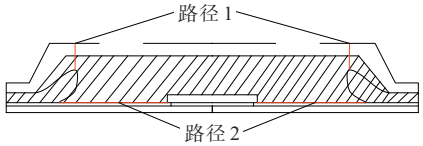

图1 电缆中间接头典型击穿路径

Figure 1 Typical breakdown path of intermediate cable joint

为使泄能效果达到最优，泄能孔开孔需要接近电弧短路的位置。因此，泄能孔的数量应为2个，并在距离高压电缆接头中轴线300 mm处开孔，如图2所示。

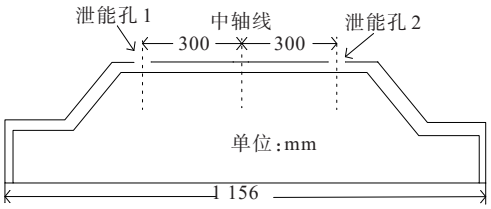

图2 泄能孔开孔示意

Figure 2 Schematic diagram of energy leakage hole opening

前期研究表明，通过对爆炸时220 kV高压电缆接头铜壳内壁气压分布计算，确定铜壳泄能孔开孔大小为80 mm时，达到最优的泄能效果。不同泄能孔形状会影响泄能孔中喷溅物的约束方式。溅射气流的约束形态如图3所示。

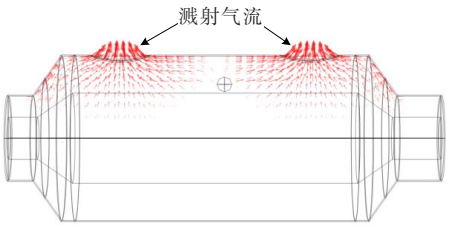

图3 泄能孔处溅射气流约束示意图

Figure 3 Schematic diagram of ejected airflow constraints from energy leakage hole

喷溅物飞出方向越集中，对巡线人员以及周围环境伤害越小。对防爆铜壳上泄能孔形状设计十分必要。因此，提出泄能孔形状设计的原则：不同泄能孔形状会使接头爆炸时产生的喷溅物溅出的速度和方向不同，应使喷出气流尽量收束，尽可能地减少对人的危害。

考虑在典型的泄能孔形状中选取一个最佳泄

能孔形状以满足上述原则。为得到最优化的泄能孔形状，要通过基于多物理场耦合形式、采用有限元计算方法，计算铜壳泄能孔处气流涌出角度，经过数学方法处理，最终确定防爆型铜壳最佳泄能孔形状。

2　基于多物理场耦合的防爆电缆铜壳仿真计算方法

2.1　电弧爆炸过程的多物理耦合方式

电缆接头短路时会产生电弧进而造成爆炸使温度上升，气体遇热后膨胀冲击铜壳使壳体上发生力的变化，且膨胀的气体通过泄能孔排出。因此，本文对爆炸过程进行仿真计算，基于多物理场的耦合，即热场、流场、位移场相互作用的耦合。电缆接头多物理场耦合关系如图 4 所示。

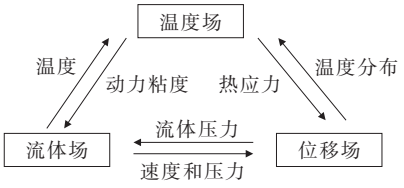

图 4　耦合作用形式

Figure 4　Diagram of coupling forms

2.2　电缆接头爆炸过程中的边界条件、控制方程、耦合方式

1）根据傅里叶传热定律得到热场的控制方程：

$$\rho C_P\frac{\partial T}{\partial t}+\rho C_P u\cdot\nabla T=\nabla\cdot(k\nabla T)+Q \quad (1)$$

式中，k 为导热系数；ρ 为材料密度；C_P 为常压热容；Q 为热源。热场边界条件为铜壳表层与外部发生对流交换。

2）根据纳维-斯托克斯方程得到流场控制方程：

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\cdot\nabla u\right)=$$

$$-\nabla p+\nabla\cdot\left(\mu\left(\nabla u+(\nabla u)^T\right)-\frac{2}{3}\mu(\nabla u\cdot)\boldsymbol{I}\right)F \quad (2)$$

式中，u 为流体速度；p 为流体压力；ρ 为流体密度；μ 为流体动力黏度；$\boldsymbol{I}$ 为单位向量；F 为体积力；T 为温度。流场边界条件为泄能孔设置为开放边界。

3）位移场的控制方程为

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}+\nabla\cdot\sigma=F_v \quad (3)$$

式中，F_v 为体积力。位移场的边界条件为铜壳表面，设置为壁[25]。

4）热-流-固多物理场耦合过程和耦合方程。

热场与位移场的耦合过程：温度产生变化从而使应力分布受到影响，使固体的结构改变，进而使温度场分布也受到影响[21-23]。这一过程的耦合方式为

$$\varepsilon_{\text{inel}}=\alpha_0(T-T_{\text{ref}}) \quad (4)$$

式中，ε 为弹性系数；α_0 为热膨胀系数

热场与流场的耦合过程：温度变化使流体场的材料参数发生改变，而材料参数的改变又影响温度的传递。

流场和位移场的耦合过程：流体场中的空气受热膨胀，进而对外壁造成压力，使外壁产生形变；外壁整体模型发生变化，进而又影响流体场中空气分布和流速，这一过程的耦合方程[26]为

$$\sigma_{\text{solid}}\cdot n=\sigma_{\text{fluid}}\cdot n \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{fluid}}=-\rho_{\text{fluid}}L+\mu[\nabla u_{\text{fluid}}+(\nabla u_{\text{fluid}})^{\text{T}}] \quad (6)$$

$$u_{\text{fluid}}=v_{\text{wall}},\ v_{\text{wall}}=\frac{\partial u_{\text{solid}}}{\partial t} \quad (7)$$

式(5)～(7)中，σ 为应力。

2.3　有限元仿真计算模型

本文研究对象为 220 kV 防爆型电缆接头，其构造基于普通 220 kV 电缆接头，以典型直通接头 JJTI2-127/220 kV 为例，其结构如图 5 所示。基于该电缆接头，将铜保护壳与整体预制橡胶绝缘件的间距加宽，并辅以合适的铜保护壳厚度，增开泄能孔，设计出 220 kV 防爆型电缆中间接头初步模型。

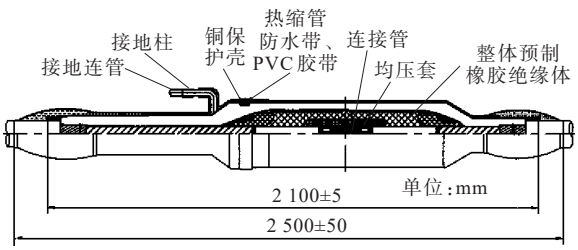

图 5　JJTI2-127/220 kV 直通接头模型

Figure 5　JJTI2-127/220 kV straight-through joint model

参考国内外的相关文献以及实际调研，发现影响其防爆效果的主要因素是预制件与铜壳之间的结构设计。因此，在有限元仿真计算模型中，仅将预制件、填充层及铜壳的简化结构作为整体，建立三维仿真模型。一般设计中填充层为 AB 胶，考虑到电弧爆炸的过程中 AB 胶会瞬间汽化，因此仿真模型中将填充层设计为气体层。设置模型长度为

1 156 mm,宽度为 449 mm,预制件与铜壳的间隙距离为 100 mm(考虑防爆设计的需要)。考虑实际开孔的工艺及铜壳结构的完整性,设置了 3 种典型的泄能孔形状,分别为圆形、方形和菱形。防爆电缆接头仿真三维立体图如图 6 所示。

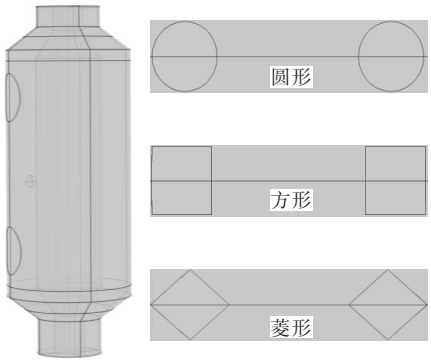

图 6 防爆电缆接头仿真三维立体图

Figure 6 Three-dimensional map of explosion-proof cable joint simulation

2.4 爆源设置方法

由于 220 kV 电缆接头爆炸波能大小无法直接测得,在项目组以往的研究中,通过试验与仿真相结合的方法,以试验时测得的泄能孔处爆炸波能的大小作为判据,反复调节模型中热源大小,最终通过仿真计算间接得出 220 kV 电缆接头的爆炸波能 E_a 为 4.5×10^5 J,能量释放时间 t 取继电器动作时间,为 130 ms,仿真热源设置为半径 r 为 30 mm 的球体,可以计算出热源的功率密度为

$$P=\frac{3E_a}{4\pi r^3 t} \tag{8}$$

代入式(8),计算得出等效热源的能量密度 $P=2.73\times10^{15}$ W/m^3。根据 220 kV 高压电缆接头故障数据统计其电弧放电路径主要发生在两侧应力锥处以及中间压接管处并考虑爆炸发展方向,拟确定 4 个放置等效热源的位置,如图 7 所示。

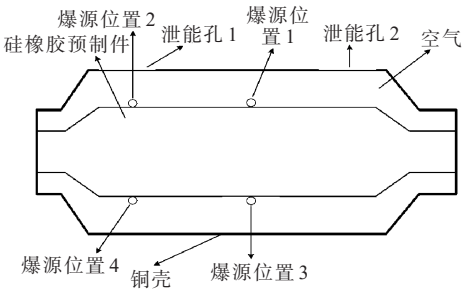

图 7 爆源位置示意

Figure 7 Schematic diagram of explosion source location

2.5 仿真计算流程

通过分析文 2.2 中高压电缆接头温度场、流体场和位移场相互之间的耦合机制,使用 Comsol Multiphysis 有限元仿真软件计算仿真模型,计算流程如图 8 所示。图 8 中时间完成指仿真具体设置时间。

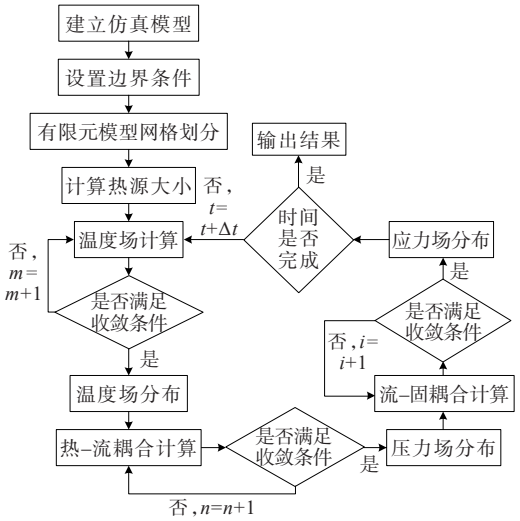

图 8 计算流程

Figure 8 Calculation flow chart

2.6 模型可靠性验证

为验证防爆电缆接头泄能孔形状模型的准确性,在之前电缆接头防爆的研究中,项目组在苏州电器科学研究院股份有限公司进行了试验。采用 12 kV、50 kA 的电源装置,模拟实际 220 kV 高压电缆接头电弧的爆炸过程,短路时间为 200 ms,泄能孔开口直径为 16 cm,装置壁厚为 8 mm。

为对电弧爆炸产生的冲击波进行收集和计算,安装 3 个探头对冲击波超压测试,布置情况如图 9 所示。

图 9 引弧爆炸试验现场布置

Figure 9 Layout of test site of arc ignition explosion

对电弧爆炸时电弧爆炸波能进行了测试,探头 3 测出的冲击波超压波形如图 10 所示。由图 10 可知,其冲击波超压的峰值为 0.252 MPa。

使用Comsol Multiphysics有限元仿真软件对该试验中实际220 kV高压电缆接头保护装置建立三维仿真模型，如图11所示。

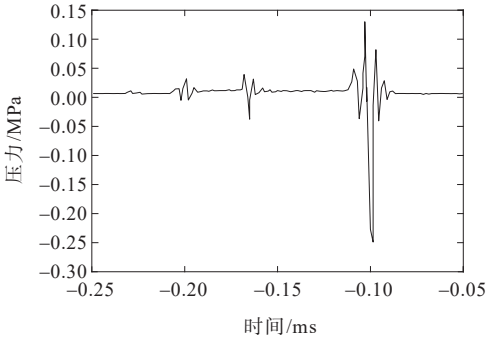

图10　探头3所测冲击波超压波形

Figure 10　Shock wave overpressure waveform measured by probe 3

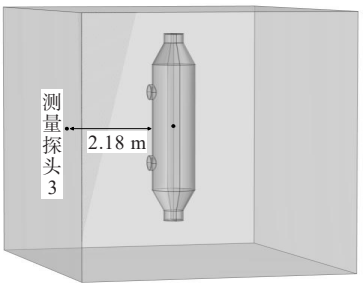

图11　模型验证仿真

Figure 11　Simulation diagram of model validation

仿真中模型数据大小与试验实物相同，爆源功率密度如式(8)所示，爆源为4.4 mm的圆球，位于保护装置的中心处，模拟220 kV高压电缆接头绝缘击穿所产生的电弧，热源的能量值为4.5×10^5 J，计算得到探头3处的冲击波压力值，得到仿真结果如图12所示。

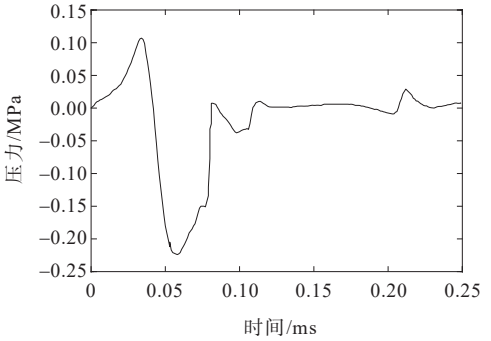

图12　仿真探头3压力变化

Figure 12　Diagram of pressure changes of probe 3 simulation

探头3的压力最大约为0.239 MPa，与文献[27]所做试验得到测量探头3数据(0.252 MPa)基本一致，说明模型可靠。

3　高压防爆电缆接头泄能孔开口形状仿真计算

3.1　泄能孔最佳开孔形状的确定方法

电缆中间接头发生爆炸时，电弧能量极大，泄能孔会有大量喷溅物喷出。不同形状的泄能孔处的气流流向不同，喷出的角度不同。因此，本文针对高压电缆中间接头防爆设计提出一种新的确定泄能孔形状的方法。

以爆源位于压接管处为例，测出爆源爆炸时，气流在泄能孔处的分布。在空间直角坐标系下将气流速度分解成x、y、z 3个方向的速度分量$\boldsymbol{u}$、$\boldsymbol{v}$、$\boldsymbol{w}$。

为了量化反应气流收束效果，将x、y方向的气流速度的平方和开根号，得到气流速度在zx平面速度投影的大小。用y轴方向的速度分量$\boldsymbol{v}$除以在zx平面投影得到的速度大小，得到速度分量$\boldsymbol{u}$与zx平面速度夹角的正切值，即收束角度θ的正切值。计算公式为

$$\tan\theta=\frac{|\boldsymbol{v}|}{\sqrt{|\boldsymbol{u}|^2+|\boldsymbol{w}|^2}} \tag{9}$$

对仿真结果进行提取时，取5 ms时间内，通过比较相同爆源位置时，不同形状的泄能孔边缘气流速度的最大值(线最大速度)的正切值和平均值(线平均速度)的正切值，以研究开口形状对泄能孔处气流收束情况的影响。

收束角度θ的正切值越小，速度分量$\boldsymbol{v}$与zx平面的夹角就越小，说明收束效果越好，反之亦然。

按照上述分析，得到最佳泄能孔开孔形状确定的方法如下：

1) 根据已有研究结果确定泄能孔的面积大小，按照等面积原则，得到其他典型泄能孔形状的尺寸。

2) 计算在不同爆源位置时，3种典型形状的泄能孔在相同时间的泄能孔边缘处的收束角度θ(定义为线最大速度值和线平均速度值)的正切值。

3) 分别绘制出3个泄能孔形状随着时间变化的收束角度θ(线最大速度值的正切值曲线和线平均速度值)的正切值曲线。

4) 根据曲线变化规律并结合实际情况，确定最优泄能孔形状。

结合实际情况，选择泄能孔形状分别为面积相同的正方形、圆形、菱形，其中圆形半径为80 mm，

对中间接头模型进行热-流-固耦合计算。爆源选取在如图5所示的不同位置，获取在5 ms内，泄能孔边缘的气流速度，通过比较5 ms内线最大速度值时的正切值之比以及线平均速度值的正切值之比，绘制比值与时间的曲线来判断收束效果。

3.2 220 kV高压电缆接头泄能孔形状设计的有限元仿真计算

3.2.1 爆源位于位置1时仿真计算

爆源位于位置1时，按开孔面积相等的方法，将泄能孔分别设计为圆形(半径设置为80 mm)、方形(边长为141.8 mm)和菱形(对角线长度均为200.53 mm)，采用文2.3的模型，按文2.4爆源能量进行施加，得到了泄能时从泄能孔喷出的气流云图，如图13～15所示。

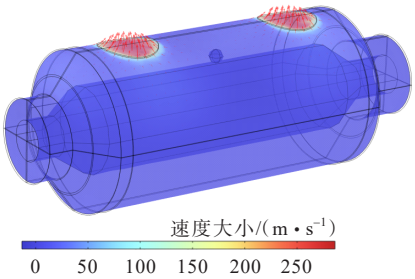

图13 泄能孔为圆形时气流涌出图

Figure 13 Airflow ejection diagram with circular energy leakage hole

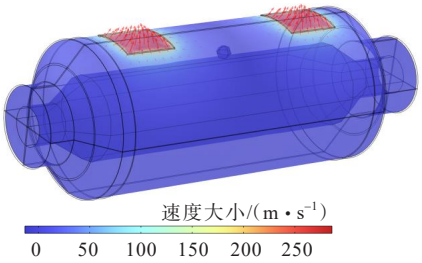

图14 泄能孔为方形时气流涌出图

Figure 14 Airflow ejection diagram with square energy leakage hole

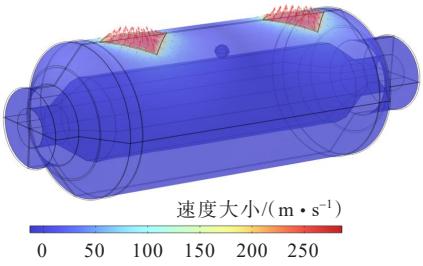

图15 泄能孔为圆形时气流涌出图

Figure 15 Airflow ejection diagram with circular energy leakage hole

此时，得到5 ms内气体在泄能孔边缘喷出时x、y、z这3个方向上的最大速度和平均速度，以5 ms时为例，此时泄能孔边缘处喷出的最大气流速度如表1所示。5 ms时，泄能孔边缘处喷出的平均气流速度如表2所示。

表1 5 ms时3种典型泄能孔边缘处喷出气流速度最大值

Table 1 Maximum velocity of gas flow at the edge of three typical energy leakage holes during 5 ms

不同形状泄能孔边缘	速度分量	最大气流速度/(m·s⁻¹)
圆形泄能孔速度分量	u	143.86
	v	250.12
	w	110.94
方形泄能孔速度分量	u	155.97
	v	307.96
	w	91.89
菱形泄能孔速度分量	u	116.98
	v	275.16
	w	71.93

表2 5 ms时3种典型泄能孔边缘处喷出气流速度平均值

Table 2 Average velocity of gas flow at the edge of three typical energy leakage holes during 5 ms

不同形状泄能孔边缘	速度分量	最大气流速度/(m·s⁻¹)
圆形泄能孔速度分量	u	2.29
	v	2.12
	w	0.09
方形泄能孔速度分量	u	0.71
	v	0.83
	w	1.19
菱形泄能孔速度分量	u	2.40
	v	2.79
	w	0.96

根据式(9)，结合表1、2数据，求出3种泄能孔形状5 ms时线最大速度的正切值和线平均速度的正切值，如表3、4所示。

整合并绘制5 ms内3种泄能孔形状的线最大速度值的正切值曲线和线平均速度值的正切值曲

表3 5 ms时3种典型泄能孔形状的线最大速度正切值

Table 3 Maximum velocity tangent values of three typical energy leakage hole shapes during 5 ms

泄能孔形状	线最大速度正切值
圆形	1.38
方形	1.70
菱形	2.00

表 4　5 ms时3种典型泄能孔形状的线平均速度正切值

Table 4　Average velocity tangent values of three typical energy leakage hole shapes during 5 ms

泄能孔形状	线最大速度正切值
圆形	0.93
方形	0.98
菱形	1.08

线，如图 16、17 所示。

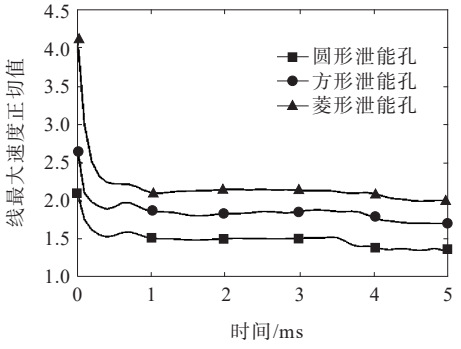

图 16　爆源位于位置 1 时线最大速度正切值

Figure 16　Maximum velocity tangent value diagram with explosion source located at position 1

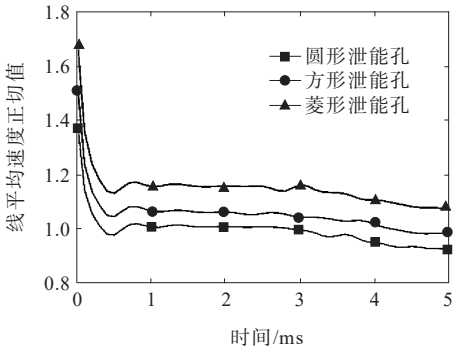

图 17　爆源位于位置 1 时线平均速度正切值

Figure 17　Average velocity tangent value diagram with explosion source located at position 1

由图 16、17 的计算结果可知，线最大速度正切值和线平均速正切值，都在爆炸发生后的 1.2 ms后而趋于稳定；爆炸发生后的 1.2 ms时，圆形、方形、菱形泄能孔线的最大速度正切值分别为 1.50、1.85、2.1，圆形泄能孔的最大速度正切值最小，比方形低 18.96%，比菱形低 40.37%；爆炸发生后的 1.2 ms 时，圆形、方形、菱形泄能孔线的平均速度正切值分别为 1.01，1.06、1.16，圆形泄能孔的最大速度正切值最小，比方形低 5.45%，比菱形低 13.05%。

因此，当爆源位于位置 1 时，由 5 ms 内泄能孔处气流收束程度比较可知，泄能孔形状为圆形时防爆效果最好。

3.2.2　爆源位于位置 2 时仿真计算

当爆源位于位置 2，对泄能孔边缘处气流喷出速度进行记录并通过数值计算和后处理，得到气体喷出时 3 种典型泄能孔形状边缘气流的线最大速度正切值曲线和线平均速度正切值曲线分别如图 18、19 所示。

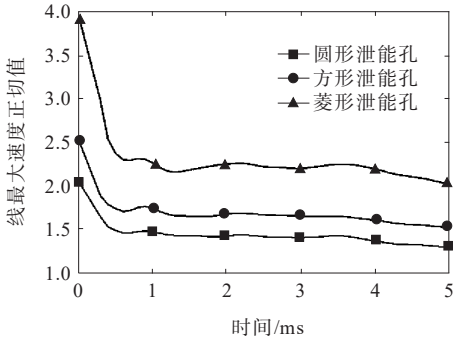

图 18　爆源位于位置 2 时线最大速度正切值

Figure 18　Maximum velocity tangent value diagram with explosion source located at position 2

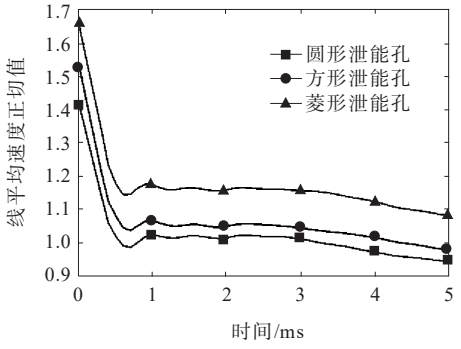

图 19　爆源位于位置 2 时线平均速度正切值

Figure 19　Average velocity tangent value diagram with explosion source located at position 1

由图 18、19 的计算结果可知，线最大速度正切值和线平均速度正切值，都在爆炸发生后的 1.3 ms 后而趋于稳定；爆炸发生后的 1.3 ms 时，圆形、方形、菱形泄能孔线的最大速度正切值分别为 1.44、1.67、2.16，圆形泄能孔的最大速度正切值最小，比方形低 13.59%，比菱形低 33.51%；爆炸发生后的 1.2 ms时，圆形、方形、菱形泄能孔线的平均速度正切值分别为 1.02，1.05、1.16，圆形泄能孔的最大速度正切值最小，比方形低 3.40%，比菱形低 12.58%。

因此，当爆源位于位置 2 时，由 5 ms 内泄能孔处气流收束程度比较可知，泄能孔形状为圆形时防爆效果最好。

3.2.3　爆源位于位置 3 时仿真计算

当爆源位于位置 3，对泄能孔边缘处气流喷出

速度进行记录并通过数值计算和后处理，得到气体喷出时3种典型泄能孔形状边缘气流的线最大速度正切值曲线和线平均速度正切值曲线分别如图20、21所示。

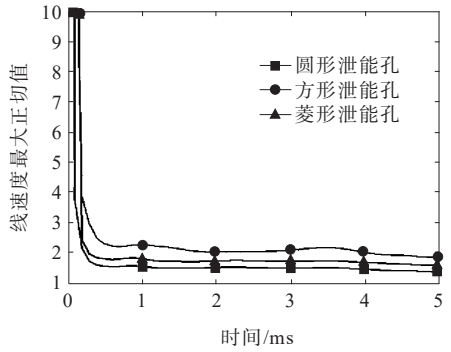

图20 爆源位于位置3时线最大速度正切值

Figure 20 Maximum velocity tangent value diagram with explosion source located at position 3

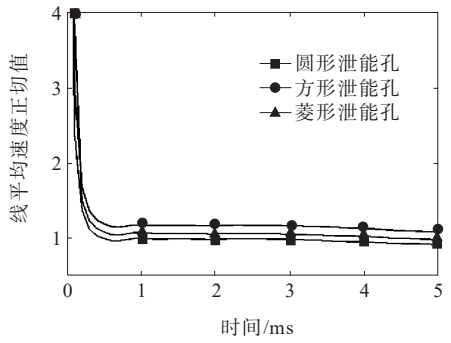

图21 爆源位于位置3时线平均速度正切值

Figure 21 Average velocity tangent value diagram with explosion source located at position 3

由图20、21的计算结果可知，线最大速度正切值和线平均速度正切值，都在爆炸发生后的0.8 ms后而趋于稳定；爆炸发生后的0.8 ms时，圆形、方形、菱形泄能孔线的最大速度正切值分别为1.35，1.56和2.32，圆形泄能孔的最大速度正切值最小，比方形低15.20%，比菱形低41.53%；爆炸发生后的1.2 ms时，圆形、方形、菱形泄能孔线的平均速度正切值分别为0.91，0.98和1.08，圆形泄能孔的最大速度正切值最小，比方形低7.37%，比菱形低15.61%。

因此，当爆源位于位置3时，由5 ms内泄能孔处气流收束程度比较可知，泄能孔形状为圆形时防爆效果最好。

3.2.4 爆源位于位置4时仿真计算

当爆源位于位置4，对泄能孔边缘处气流喷出速度进行记录并通过数值计算和后处理，得到气体喷出时3种典型泄能孔形状边缘气流的线最大速度正切值曲线和线平均速度正切值曲线分别如图22、23所示。

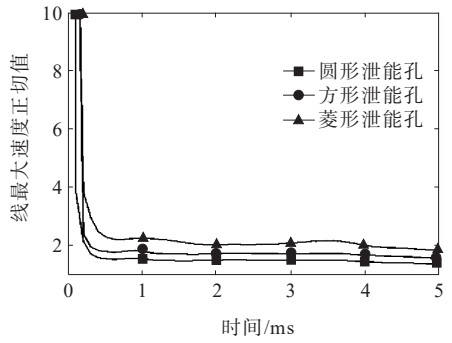

图22 爆源位于位置4时线最大速度正切值

Figure 22 Maximum velocity tangent value diagram with explosion source located at position 4

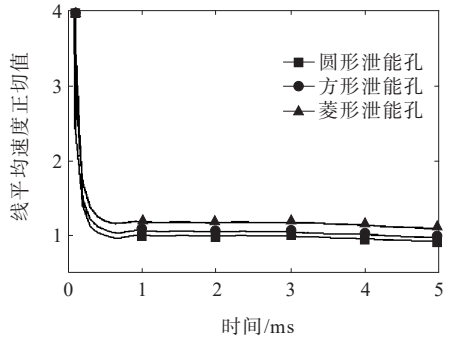

图23 爆源位于位置4时线平均速度正切值

Figure 23 Average velocity tangent value diagram with explosion source located at position 4

由图22、23的计算结果可知，线最大速度正切值和线平均速度正切值，都在爆炸发生后的0.8 ms后而趋于稳定；爆炸发生后的0.8 ms时，圆形、方形、菱形泄能孔线的最大速度正切值分别为1.39、1.66、2.74，圆形泄能孔的最大速度正切值最小，比方形低16.29%，比菱形低49.37%；爆炸发生后的0.8 ms时，圆形、方形、菱形泄能孔线的平均速度正切值分别为1.00，1.07和1.19，圆形泄能孔的最大速度正切值最小，比方形低5.76%，比菱形低15.69%。

因此，当爆源位于位置4时，由5 ms内泄能孔处气流收束程度比较可知，泄能孔形状为圆形时防爆效果最好。

综合上述爆源位置，泄能孔形状为圆形时，对喷溅气流的收束效果最好，最利于防爆。

4 结语

本文提出了高压电缆防爆接头铜壳泄能孔形状优化设计的原则和方法，建立了220 kV防爆型高

压电缆接头多形状泄能孔模型，并对不同泄能孔形状的性能进行了仿真计算，最终确定了泄能孔最优形状参数。主要结论如下：

1）提出了以喷溅气流约束程度为原则的高压电缆接头防爆铜壳泄能孔形状的设计方法，给出了气流约束程度的量化计算公式，得到了形状设计的具体流程；

2）利用多物理场耦合有限元计算方法，结合三层迭代算法，系统分析了不同爆源位置时泄能孔形状（圆形、方形、菱形）对气流约束程度的影响，并重点计算了各工况下泄能孔处气流速度最大值和平均值的正切值；

3）通过分析比较，确定泄能孔形状为半径 80 mm 的圆形时，泄能孔处气流速度最大值的正切值平均值的正切值均最小，气流约束程度优异，结构可靠性最高。本文提出的泄能孔形状优化设计方法对提升高压电缆接头的防爆性能具有指导意义。

参考文献：

[1] 刘永莉，熊豪文，肖衡林，等．基于有限元的综合管廊电缆温度场分布研究[J]．电力科学与技术学报，2022，37(6)：82-90.
LIU Yongli，XIONG Haowen，XIAO Henglin，et al. Study on temperature field distribution of pipe gallery cable based on finite element method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2022，37(6)：82-90.

[2] 茅大钧，肖礼，刘国建．基于有限元分析的埋地电缆温升影响因素研究[J]．电力科学与技术学报，2016，31(4)：136-142.
MAO Dajun，XIAO Li，LIU Guojian. Study on the influence factors of temperature rise in underground cable based on finite element analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2016，31(4)：136-142.

[3] 杨鑫，钟淼龙，孙浩天，等．弹簧收缩泄能方式的 220 kV 电缆接头保护装置的防爆设计和测试[J]．高压电器，2023，59(1)：86-94.
YANG Xin，ZHONG Miaolong，SUN Haotian，et al. Explosion-proof design and test of 220 kV cable joint protection device with spring contraction energy release mode[J].High Voltage Apparatus，2023，59(1)：86-94.

[4] 陶贻青．高压电缆中间接头防爆盒短路燃弧热力仿真及结构优化[D]．福州：福州大学，2022.
TAO Yiqing. Thermal simulation and structural optimization of short-circuit arcing of explosion-proof box in middle joint of high-voltage cable[D]. Fuzhou：Fuzhou University，2022.

[5] 徐研，王鹏宇，刘毅刚，等．玻璃钢保护壳对电缆接头热场影响的实验分析[J]．广东电力，2016，29(9)：78-83.
XU Yan，WANG Pengyu，LIU Yigang，et al. Experiment analysis on influence of glass fiber reinforced plastic protection shell on thermal field of cable joint[J]. Guangdong Electric Power，2016，29(9)：78-83.

[6] 夏向阳，贺运九，唐洁，等．电缆接头局部放电在线监测方法[J]．电力科学与技术学报，2016，31(4)：143-148+167.
XIA Xiangyang，HE Yunjiu，TANG Jie，et al. Research on on-line monitoring of partial discharge for distribution underground cable joint[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2016，31(4)：143-148+167.

[7] 曹俊平，孙兴涛，王少华，等．基于涡流技术的高压电缆铅封裂纹缺陷检测研究[J]．高压电器，2020，56(8)：168-175.
CAO Junping，SUN Xingtao，WANG Shaohua，et al. Research on crack detection of high voltage cable lead sealing based on eddy current technology[J]. High Voltage Apparatus，2020，56(8)：168-175.

[8] 张丹丹，苏小婷，景晓东，等．基于阻抗谱的同轴电缆故障及中间接头定位实验研究[J]．高压电器，2021，57(7)：92-97+104.
ZHANG Dandan，SU Xiaoting，JING Xiaodong，et al. Experimental study on coaxial cable faults and intermediate joints location based on impedance spectrum[J]. High Voltage Apparatus，2021，57(7)：92-97+104.

[9] 韩军林，何小军，李义仓，等．电缆隧道内电缆接头温度监测及防火预警的研究[J]．自动化与仪器仪表，2018(7)：82-84+88.
HAN Junlin，HE Xiaojun，LI Yicang，et al. Study on the temperature monitoring and fire prevention of the cable joints in the cable tunnel[J]. Automation & Instrumentation，2018(7)：82-84+88.

[10] 徐伟强，魏云冰，路光辉．电力电缆及隧道在线监测与移动巡检协同策略探讨[J]．电测与仪表，2019，56(19)：121-125.
XU Weiqiang，WEI Yunbing，LU Guanghui. Discussion on the coordination strategy between online monitoring and mobile inspection of power cables and tunnels[J]. Electrical Measurement & Instrumentation，2019，56(19)：121-125.

[11] 王馥珏，周平，韩宇泽．基于耦合场计算的击穿电弧对电缆温度及应力影响研究[J]．供用电，2019，36(7)：83-90.
WANG Fujue，ZHOU Ping，HAN Yuze. Study on influence of insulation breakdown arc on thermal-stress characteristics of cable joints based on coupled field calculation[J]. Distribution & Utilization，2019，36(7)：83-90.

[12] 高云鹏，谭甜源，刘开培，等．电缆接头温度反演及故障诊断研究[J]．高电压技术，2016，42(2)：535-542.
GAO Yunpeng，TAN Tianyuan，LIU Kaipei，et al. Research

on temperature retrieval and fault diagnosis of cable joint [J].High Voltage Engineering,2016,42(2):535-542.

[13] 陶贻青,舒胜文,董懿飞,等.基于多物理场的防爆盒对10kV三芯电缆中间接头温升影响研究[J].高压电器,2023,59(9):268-275+285.
TAO Yiqing,SHU Shengwen,DONG Yifei,et al.Study on the influence of explosion-proof box on temperature rise of middle joint of 10 kV three-core cable based on multi-physical field[J].High Voltage Apparatus,2023,59(9):268-275+285.

[14] 钱健,陶贻青,张明龙,等.基于响应曲面法的10kV电缆中间接头防爆盒结构优化研究[J].高压电器,2023,59(10):162-169+178.
QIAN Jian, TAO Yiqing, ZHANG Minglong, et al. Study on structure optimization for explosion-proof box of 10 kV cable intermediate joint based on response surface method[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 162-169+178.

[15] 丁亮,邓显波,应辉,等.高压电缆接头保护盒结构设计与性能验证[J].电工技术,2020(4):91-93+97.
DING Liang, DENG Xianbo, YING Hui, et al. Structure design and performance verification of high voltage cable joint protection box[J]. Electric Engineering, 2020(4):91-93+97.

[16] 肖健健,张珏,包淑珍,等.加装保护盒的高压电缆接头散热措施[J].广东电力,2021,34(7):120-126.
XIAO Jianjian, ZHANG Jue, BAO Shuzhen, et al. Heat dissipation measures of high voltage cable joint with protective box[J].Guangdong Electric Power,2021,34(7):120-126.

[17] 卞斌,宿文波,朱占巍,等.110 kV交联聚乙烯电缆接头防爆技术及其温升特性研究[J].电力学报,2018,33(4):278-286.
BIAN Bin, SU Wenbo, ZHU Zhanwei, et al. Study on explosion-proof technology and temperature rise characteristics of 110 kV XLPE cable joint[J].Journal of Electric Power,2018,33(4):278-286.

[18] 仇炜,刘真,钟淼龙,等.220 kV金属型高压电缆接头保护装置的泄能孔和壁厚设计[J].高压电器,2022,58(1):190-198.
QIU Wei, LIU Zhen, ZHONG Miaolong, et al. Design of energy discharge hole and wall thickness for metal type protection device of 220 kV high voltage cable joint[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(1):190-198.

[19] 崔江静,刘真,仇炜,等.220 kV高压电缆接头保护装置端头部位的折线形设计与测试[J].电力科学与技术学报,2021,36(6):94-103.
CUI Jiangjing, LIU Zhen, QIU Wei, et al. Folding line design and test for the front part of joint metal protective device on 220 kV high-voltage cable[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(6): 94-103.

[20] QIU W, LI C, HUANG Y H, et al. The shape design of energy leakage hole of 220kV high voltage cable explosion-proof joint[C]//2023 8th International Conference on Control,Robotics and Cybernetics (CRC). Changsha,China.IEEE,2024:172-176.

[21] Haoqi Y, Yang X, Yangning C, et al. High voltage cable explosion-proof joint leakage hole size design[C]//2024 6th International Conference on New Energy System and Electrical Engineering (CRC),China,2024.

[22] 熊佳明,李黎,戴宏宇,等.基于爆炸波及能量平衡理论的大电流冲击电弧的冲击波超压作用分析[J].中国电机工程学报,2018,38(22):6746-6753.
XIONG Jiaming, LI Li, DAI Hongyu, et al. Analysis of shock wave overpressure effect of high current impulse arcs based on the explosive wave and energy balance theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6746-6753.

[23] 仇炜,崔江静,黄顺涛,等.高压电缆接头放电电弧特性的有限元仿真[J].电气应用,2019,38(12):62-68.
QIU Wei, CUI Jiangjing, HUANG Shuntao, et al. Finite element simulation of discharge arc characteristics of high voltage cable joints based on magneto-hydrodynamics[J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(12):62-68.

[24] 谢良.交联聚乙烯电力电缆连接头温度在线监测技术应用研究[D].重庆:重庆大学,2004.
XIE Liang. Study on application of on-line temperature monitoring technology for XLPE power cable connector [D].Chongqing:Chongqing University,2004.

[25] HOAD R, CARTER N J, HERKE D, et al. Trends in EM susceptibility of IT equipment[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2004,46(3):390-395.

[26] RADASKY W A, BAUM C E, WIK M W. Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI) [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2004,46(3):314-321.

[27] 杨鑫,孙浩天,刘真,等.220 kV高压电缆接头短路电弧爆炸波能的测试及计算[J].高压电器,2021,57(10):44-49.
YANG Xin, SUN Haotian, LIU Zhen, et al. Test and calculation of short-circuit arc explosion wave energy of 220 kV high voltage cable joint[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(10):44-49.