

[断路器]

72.5 kV GIS用SF₆断路器电弧特性仿真研究

文/鄂天龙 冯杨州 张子堂 刘文林
国网甘肃省电力公司建设分公司

以72.5 kV GIS用SF₆断路器为研究对象，建立燃弧过程多物理场耦合仿真计算模型，计算得到50 kA短路负载开断工况下，灭弧室内压强、温度和速度等压气特性参数的空间分布规律，采用多物理状态参数综合评判的方法，研究不同燃弧时间对断路器灭弧室压强分布、温度分布和气流速度的变化规律。根据分析结果，建议优化灭弧室和喷口结构设计，以更有效地控制高温区域，提高断路器的开断性能和可靠性。

电力工业作为国民经济的支柱产业，近年来发展迅猛。为满足持续稳步增长的电力需求，增大输电容，发展输变电系统以及相关的技术装备意义重大。高压断路器是电力系统高压设备中最重要、最复杂的一类开关电器，其开断性能是表征运行特性最重要、也是最基本的技术指标。断路器在工作过程中主要作用是控制与保护，能够迅速开断故障电流，熄灭电弧，保证电力系统稳定运行。电力系统发生短路故障后，断路器分闸开断短路电流，触头分离产生电弧，电弧电流过零瞬间，电弧熄灭，弧隙可能产生很高的瞬态恢复电压，使断路器发生弧后重击穿现象，导致断路器开断失败，造成严重事故^[1-2]。

断路器开断是否成功主要取决于燃弧和吹弧的竞争，在断路器强烈气吹作用下，增强电弧等离子体去游离和强迫冷却过程，并同时增加弧隙介质密度，加快弧后残余电荷与剩余能量的扩散，加速绝缘恢复。断路器开断工况不同，电弧熄灭难易程度也不同，电弧能量由弧隙电流值和燃弧时间来决定，电力系统短路故障工况下开断电流可达80 kA，断路器必须具备强烈的气吹条件及很高的分闸速度才能快速熄灭电弧^[3-5]。在断路器的开断过程中，电弧产生的高温和高压效应使得气体膨胀并产生强烈

的气流，这些气流的速度和方向变化会影响到灭弧室内部的压力分布，进一步影响弧区的冷却效果。温度的分布和变化则决定了弧区的能量耗散能力及断路器部件的烧蚀风险。

本文以72.5 kV SF₆断路器为研究对象，针对短路大电流开断工况，建立了断路器电弧能量和灭弧室内气流场耦合计算物理模型^[6-7]，重点关注不同燃弧时间（短燃弧、中燃弧和长燃弧）对断路器灭弧室内压强变化、温度衰减以及气流速度分布的影响。深入理解燃弧过程中的物理现象，分析燃弧时间对局部高压区域、气流冷却效果以及烧蚀风险的控制作用，为提升断路器性能和保障其长期安全运行提供了理论支持，并为断路器灭弧室结构的设计提供科学依据。

仿真模型的建立

1. 数学模型

SF₆断路器热态开断过程涉及电、温度及气流等多物理场耦合问题，电弧数学模型控制方程由以下方程构成。

(1) N-S方程

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial(t)} + \nabla \cdot (\rho\phi\mathbf{v}) + \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) = S_{\phi} \quad (1)$$

式中, ρ 为介质密度; ϕ 为因变量 (轴向、径向速度, 焓等); $\mathbf{v}$ 为速度矢量; Γ 为扩散系数; S_ϕ 为源项。

(2) 电流连续方程

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \\ \mathbf{J} = -\sigma \nabla \phi \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{J}$ 为电弧电流密度; σ 为电导率; ϕ 为电势。

(3) 气体状态方程

$$\rho = f(P, T) \quad (3)$$

式中, P 、 T 分别为 SF_6 气体压强、温度。

在流体动量方程引入洛伦兹力 $\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 源项来实现 MHD 耦合。湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 模型, 辐射则采用 NEC 净辐射模型。

2. 几何模型

本文基于 72.5 kV SF_6 断路器, 建立几何计算模型, 其灭弧室结构示意图如图 1 所示, 结构主要包含动弧触头、静弧触头及喷口等, 为轴对称单动结构, 断路器的触头材料采用铜、钨合金, 半径为 10 mm 的静弧触头, 以及六瓣形触指的动弧触头。

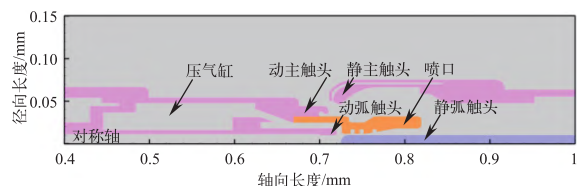


图1 断路器灭弧室结构示意图

断路器的行程为 170 mm, 超程为 24 mm, 其机械特性曲线如图 2 所示, 平均分闸速度为 5.31 m/s。灭弧室内气体初始速度为 0, 初始温度为 300 K, 初始充气压强为 0.6 MPa。

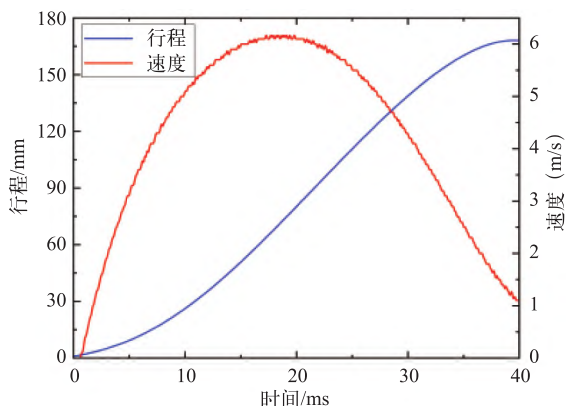


图2 断路器机械特性曲线

本文采用有限体积法求解 72.5 kV SF_6 断路器开断负载 50 kA 短路大电流下的电弧能量及气流动场, 由于断路器灭弧室内结构复杂, 网格剖分采用结构性与非结构性网格相结合的方式, 网格剖分效果如图 3 所示。本文采用动态层铺的动网格计算模型表征断路器压气缸及灭弧室的运动和压气物理过程, 针对计算模型分别设置对称轴、压力出口及固体壁面 3 种边界条件。

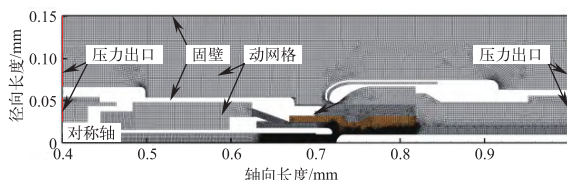


图3 断路器灭弧室剖分网格图

计算结果分析

1. 气压特性

图 4 与图 5 分别为中燃弧 7.5 ms 时开断过程中腔体内压强分布云图及变化曲线, 从空间角度展示了燃弧过程对腔体压强的影响, 描述了压强从燃弧初期至熄弧过程的动态变化趋势。

在燃弧初期, 电弧刚刚形成, 此时断路器整个灭弧室内的压强较为均匀且水平较低, 此时虽然电弧燃烧堵塞喷口, 但燃弧尚未对气体产生显著的热效应。由图 5 曲线可知, 在这一阶段, 随着断路器分闸, 压气缸压缩, 压强随时间缓慢上升, 同时电弧高温堵塞喷口, 逐渐加热气体并引发灭弧室压强显著增大。总体来看, 燃弧初期主要表现为能量缓慢释放阶段, 对腔体的影响较为有限。

随着燃弧的持续发展, 电弧释放的能量迅速增强, 压气缸内气体的局部膨胀显著加剧, 进入电弧稳定燃烧阶段。此时, 图 4b 中可清晰观察到电弧作用区域形成了显著的高压集中区, 压气缸及静弧触头内部内压强在局部区域迅速升高, 建立高压区域并向周围区域扩散。图 5 显示, 在燃弧达到电流峰值时刻时, 腔体压强达到峰值, 约为 1 480 000 Pa, 这是燃弧过程中能量释放最为剧烈的阶段。高压区域的形成与扩散反映了电弧的高温效应及其对压气缸气体的强烈作用, 是整个燃弧开断过程中能量释放和传递的核心环节。

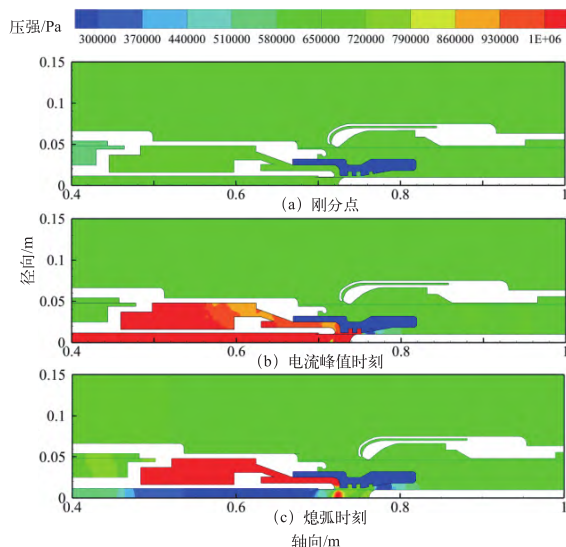


图4 0.6 MPa充气压强下中燃弧(7.5 ms)开断过程压强分布云图

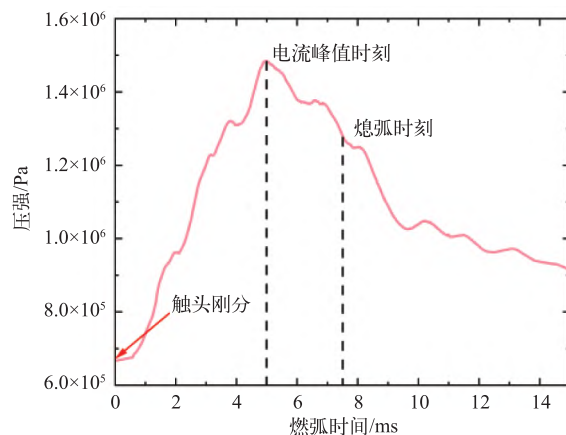


图5 0.6 MPa充气压强下中燃弧(7.5 ms)开断过程压气缸压强变化曲线

在燃弧熄灭后,腔体内的压强迅速下降,原本集中于电弧作用区域的高压逐渐扩散并均匀分布于整个腔体。由图4和图5可知,静弧触头高压区域的消失与压气缸整体均匀化趋势表明腔体逐渐从局部高能态过渡至均匀稳定状态,压气缸压强在电弧熄灭后急剧降低,显示出断路器灭弧室内部能量释放和恢复的快速过程,表明电弧燃烧对压气缸压强建立及吹弧的重要作用。

图6展示了不同燃弧时间(5 ms、7.5 ms、12.5 ms、15 ms和17.5 ms)在熄弧时刻的腔体压强分布特征,对比分析断路器灭弧室内能量释放及压强分布的影响规律。对于短燃弧(5 ms),腔体内的压强水平较低,分布较为均匀,说明此时电弧释放的能量较少,气体的膨胀作用有限,未形成显

著的局部高压区域。随着燃弧时间的延长(7.5 ms、12.5 ms),压气缸压强显著升高,局部高压区域更为明显,喷口下游打开的同时,压气缸未明显泄压,且喷口上游由于电弧堵塞作用,高压区域更为明显,表明电弧释放的热能积累效应增强,压气缸内气体的膨胀和压缩作用也更加剧烈。这一阶段的压强分布特征体现了电弧高温效应对腔体气体的显著影响。

对于长燃弧(15 ms、17.5 ms),尽管高压区域的范围继续扩大,但整体压强水平呈下降趋势,分布逐渐趋于均匀化。这表明,随着燃弧时间延长,腔体内气体膨胀趋于饱和,电弧后续释放的能量主要推动压强的扩散和平衡,而非进一步提升局部压强。总体来看,燃弧时间越长,腔体内能量累积越多,对压强分布的控制作用越显著。因此,合理控制燃弧时间对燃弧开断装置的性能优化至关重要。设计时需考虑燃弧时间对局部高压集中的驱动作用,以提升开断能力并保障装置的运行安全性。

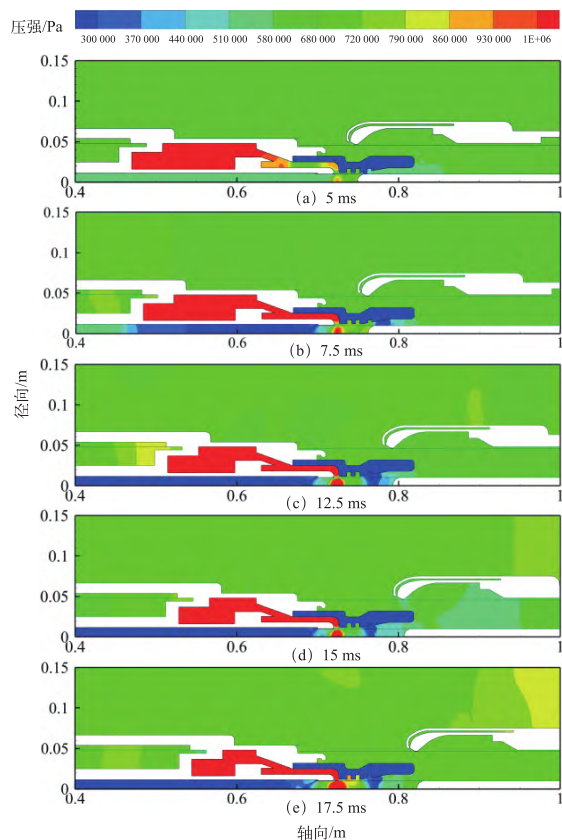


图6 不同燃弧时间熄弧时刻压强分布云图

2. 温度特性

电流零区电弧电导的变化是评估断路器热开断

能力的关键指标,而电弧等离子体的电导率受温度和压力的影响。因此,分析电流零区的温度特性至关重要。不同燃弧时间下,电流过零瞬间灭弧室内的温度分布如图7所示。在5 ms短燃弧的熄弧时刻,压气缸未能提供足够的吹弧压强,导致电弧轴向扩展速度极小,动弧触头喉部附近仍积聚大量高温气体,只有少量气体被吹送到喷口下游及空心弧触头内部。相比之下,7.5 ms中燃弧的熄弧时刻,喷口下游逐渐大范围打开,吹弧效果明显改善,大量高温气体被有效吹向空心弧触头和喷口下游,除弧心处区域温度下降明显,电弧热量被有效带走。而在12.5 ms和17.5 ms的中长燃弧的熄弧时刻,喷口完全打开,强烈的气流带走了大量高温气体,依靠下游的强气吹的强对流作用进行耗散电弧能量,导致电弧半径在动触头端部到喷口下游处剧烈收缩,由于长时间燃弧,动弧触头端部仍然聚集大量等离子体。

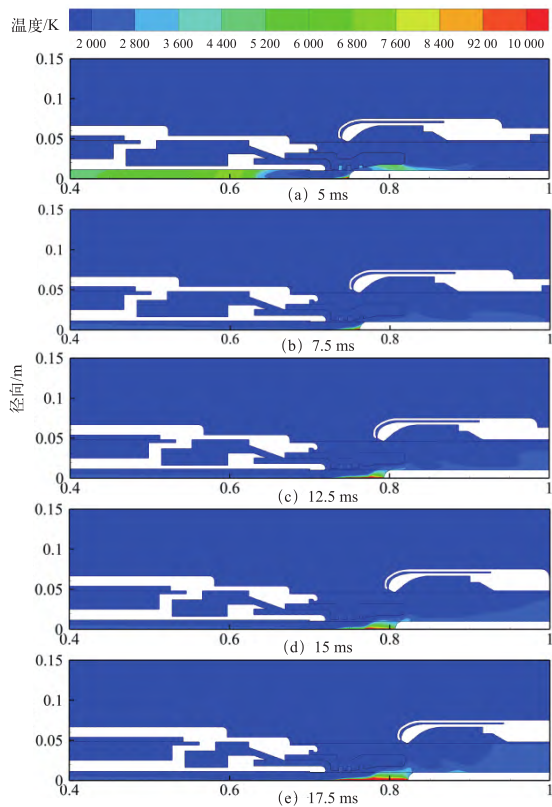


图7 不同燃弧时间熄弧时刻温度分布云图

图8和图9展示了不同燃弧时间(5 ms、7.5 ms、12.5 ms、15 ms和17.5 ms)在熄弧时刻的喷口上游及动触头前端的径向温度分布特征,对比分析断路

器强气吹下电弧径向温度分布规律。

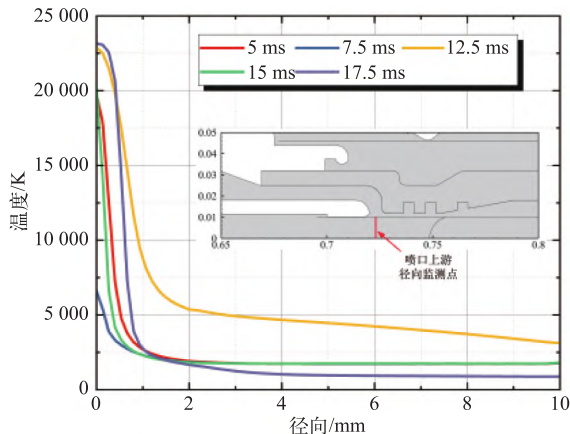


图8 熄弧时刻喷口上游径向温度分布

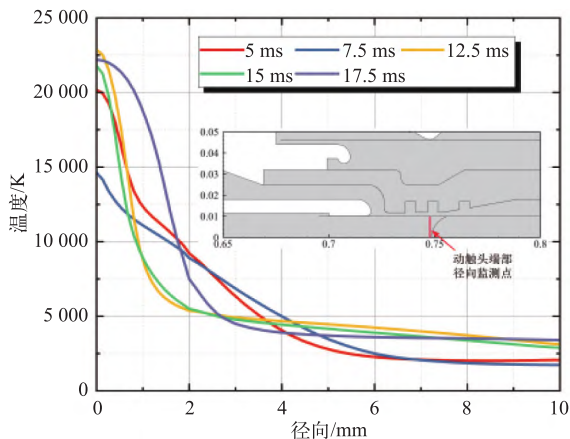


图9 熄弧时刻动触头端部径向温度分布

在短燃弧(如5 ms)时,喷口完全堵塞,气流未能有效进入电弧区域进行冷却,导致喷口上游的温度衰减速率非常陡峭,温度迅速下降。由于气流未能发挥作用,喷口高温区域迅速扩展并迅速冷却,且温度下降的速率较快。然而,动触头端部的温度衰减速率较慢,说明气流未能直接作用于该区域,温度维持在较高水平较长时间。尽管燃弧时间较短,电弧区域的高温暴露时间也较短,但动触头端部的高温状态仍然导致烧蚀风险相对较低。

中燃弧(7.5 ms、12.5 ms)时,喷口逐渐打开,气流开始进入电弧区域,冷却作用逐步显现。7.5 ms时,喷口部分打开,气流仍然较弱,温度衰减速率变得较为平缓,喷口上游区域的冷却效果尚未完全发挥。然而,动触头端部的温度衰减速率较快,表明气流逐渐开始作用于该区域,促进了温度的迅速下降。到了12.5 ms时,喷口完全打开,气流

充分冷却电弧区域，温度衰减速率进一步减缓，喷口上游的温度开始平稳下降，但动触头端部的温度衰减速率仍然较快，显示出气流对动触头的冷却作用逐步加强。尽管如此，由于中燃弧阶段气流的冷却作用尚未达到最大，高温区域的存在时间相对较长，烧蚀风险明显增大。

长燃弧（15 ms、17.5 ms）时，喷口完全打开，气流最大限度地覆盖电弧区域，冷却效果显著增强，喷口上游的温度衰减速率变得更为平缓。气流对电弧区域的冷却作用使得喷口上游的高温区域得到有效控制，温度下降过程较为缓慢。然而，动触头端部的温度衰减速率较为平稳，显示气流充分作用于该区域，帮助其温度快速下降。虽然喷口的冷却效果最强，但由于电弧燃烧时间较长，高温区域在电弧区域持续存在，特别是在动触头端部，温度维持在较高水平的时间延长，烧蚀风险仍然较大。长时间的高温暴露仍会导致烧蚀，尤其是在动触头区域，冷却效果虽然有所增强，但长时间的温度积累增加了烧蚀风险。

总体来说，随着燃弧时间的延长，气流对电弧区域的冷却作用逐渐增强，喷口上游和动触头端部的温度衰减速率出现明显的差异。在短燃弧阶段，由于喷口未打开，气流未能有效作用于电弧区域，导致喷口上游温度迅速衰减，而动触头端部的温度衰减较慢。进入中燃弧时，气流逐步作用于电弧区域，喷口上游和动触头端部的温度衰减速率均有所改善。尤其在长燃弧阶段，喷口和动触头的冷却效果达到最大，喷口上游的温度衰减变得平缓，动触头端部的温度衰减速率也逐渐加快。尽管如此，长燃弧的长时间高温暴露会大大增加喷口烧蚀风险。

3. 气流特性

图10和图11为不同燃弧时间（5 ms、7.5 ms、12.5 ms、15 ms和17.5 ms）在熄弧时刻的喷口上游及动触头前端的径向速度分布特征，以全面理解不同燃弧时间下断路器灭弧室内介质流动规律与冷却特性，为断路器开断过程的优化提供重要依据。

短燃弧（5 ms）时，由于喷口未完全打开，吹弧气流受限，压强不足以驱动有效的气流进入电弧区域。此时，喷口上游的径向速度分布较为平缓，整体流速偏低，动触头端部区域的气流更为微弱，导致喷口上游区域的高温气体无法有效耗散，高温

区呈现集中状态。图8显示，喷口上游的温度衰减速率较为陡峭，说明尽管短时间内喷口上游温度迅速下降，但由于气流未能深入作用，高温气体的冷却效果较差。虽然短燃弧阶段的烧蚀风险较低，但无法有效消散高温区域，可能对后续的灭弧过程产生不利影响。

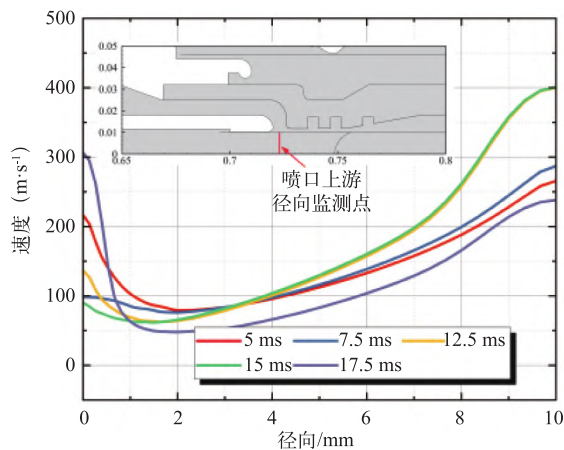


图10 熄弧时刻喷口上游径向速度分布

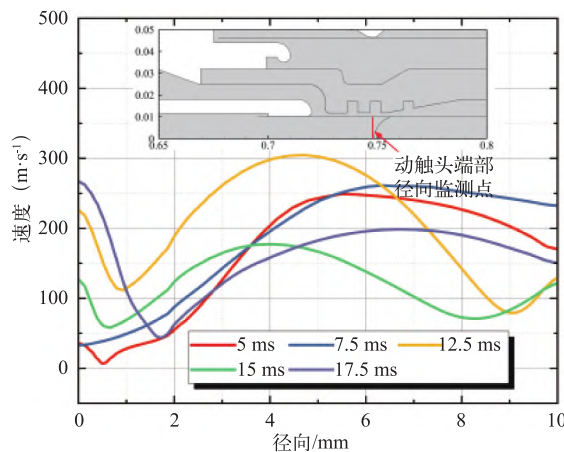


图11 熄弧时刻动触头端部径向速度分布

中燃弧（7.5 ms、12.5 ms）时，喷口逐渐打开，压强显著提升，气流驱动力增强。特别是在7.5 ms燃弧时，喷口下游的通道部分打开，形成更强的气流，喷口上游和动触头端部的径向速度均显著提升，动触头端部区域的速度分布开始出现峰值，表明气流逐步深入高温区域，冷却效果逐渐显现。由图8和图9可知，此时喷口上游区域的温度衰减速率趋于平缓，高温气体更有效地吹散，喷口下游的冷却效

果开始显现；动触头端部的温度也快速下降，说明气流逐渐作用于该区域并改善了冷却性能。压强分布的增加与气流速度的增强相结合，使得高温区域的热量得以有效带走，为后续熄弧提供了良好的能量耗散能力。

长燃弧（15 ms、17.5 ms）时，喷口完全打开，压强达到最大值，气流驱动力最强，径向速度在喷口上游和动触头端部区域均表现出显著的增强特征。特别是动触头端部区域的气流速度分布更加剧烈，表明强气吹已经覆盖电弧区域的各个部分。喷口上游区域的温度衰减速率进一步趋于平缓，显示出冷却效果的显著增强，高温区域被有效控制。然而，由于长时间燃弧，动触头端部的高温气体聚集更加明显，尽管冷却速度较快，但由于电弧能量积累的时间较长，高温状态的持续时间显著延长。这种高温的长时间暴露增加了喷口和动触头的烧蚀风险，特别是在动触头端部，尽管冷却效果较强，但烧蚀风险仍然较高。

结束语

1) 在燃弧初期，断路器灭弧室内压强较为均匀且水平较低，电弧释放的能量较少，对气体膨胀的影响有限。然而，随着燃弧时间的延长，气体膨胀加剧，局部高压区域形成并扩展。为了提升断路器的开断能力，设计时应优化灭弧室结构，调整喷口尺寸及其开角，以确保气体在电弧燃烧过程中能够有效扩散，避免局部过高的压力集中，确保断路器能够适应不同燃弧时间下的压强变化。

2) 在短燃弧阶段，喷口未完全打开，气流未能有效冷却电弧区域，导致喷口上游区域温度迅速下降。然而，在长燃弧阶段，喷口完全打开，气流加强冷却作用，使得喷口上游区域温度衰减较为平缓，电弧热量被有效带走。设计时需要确保喷口的设计能够根据燃弧时间变化调整气流路径，增强短燃弧阶段的冷却效果，并充分利用长燃弧阶段的气流增强冷却能力，减轻烧蚀风险。

3) 随着燃弧时间的延长，气流驱动力增强，气流能够有效带走电弧区域的热量，改善温度衰减速度。在7.5 ms及以上的中长燃弧阶段，气流逐步作用于电弧区域，喷口上游和动触头端部的温度衰减速率明显减缓。为了最大化冷却效果，断路器设计

应确保气流路径畅通，优化喷口设计，确保气流可以有效覆盖电弧区域并促进温度的迅速降低，避免局部高温对设备造成长期损害。

4) 短燃弧阶段虽然高温暴露时间较短，但由于冷却不足，烧蚀风险较低。长燃弧阶段虽然能通过气流提供较强冷却，但电弧燃烧时间较长，导致烧蚀风险增大。设计时应根据燃弧时间长短来平衡冷却效果和烧蚀风险，优化气流和喷口设计，以实现最佳的冷却效能，并尽量减少电弧区域的高温暴露时间，确保设备的安全性与长寿命。EA

(收稿日期：2024-12-23)

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交流输电系统过电压与绝缘配合[M]. 北京：中国电力出版社，2008：33-37.
- [2] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 2版. 北京：机械工业出版社，2006：323-334.
- [3] 王瑞雪，海彬，田思理，等. 绝缘材料表面电荷测量优化及等离子体处理对其表面电特性的影响[J]. 高电压技术，2017，43(6)：1808-1815.
- [4] 王伟宗，荣命哲，YAN J D，等. 高压断路器SF₆电弧电流零区动态特征和衰减行为的研究综述[J]. 中国电机工程学报，2015，35(8)：2059-2072.
- [5] 林莘，王飞鸣，刘卫东，等. 高压SF₆断路器关合预击穿特性计算与试验研究[J]. 中国电机工程学报，2016，36(5)：1445-1452.
- [6] FROST L S, LIEBERMANN R W. Composition and transport properties of SF₆ and their use in a simplified enthalpy flow arc model[J]. Proceedings of the IEEE, 1971, 59(4): 474-485.
- [7] CHERVY B. Thermodynamic properties and transport coefficients in SF₆-Cu mixtures at temperatures of 300-3000K and pressures of 0.1-1MPa[J]. J.phys.d Appl.phys, 1994, 27(6): 1193-1206(14).
- [8] 王飞鸣，林莘，徐建源. 高压SF₆断路器非平衡态等离子体电弧的熄弧特性[J]. 高电压技术，2014，40(10)：3073-3084.