第 50 卷 第 2 期：451-466 高电压技术 Vol.50, No.2: 451-466
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20232381

高电压等级真空断路器研究现状及展望

钟建英[1]，孙广雷[2]，杨葆鑫[3]，赵晓民[2]，李旭旭[2]，马朝阳[2]，贾　航[2]，张旭升[4]
（1. 中国电气装备集团科学技术研究院有限公司，上海 200040；2. 平高集团有限公司，平顶山 467001；
3. 河南省高压电器研究所有限公司，平顶山 467001；4. 沈阳工业大学电气工程学院，沈阳 110027）

摘　要：针对绿色电网发展需求，总结对比了现阶段 SF_6 完全替代技术和部分替代技术路线的特点及相关技术，指出真空开断技术是电网绿色低碳发展的有效手段。对比分析现阶段多断口真空断路器的技术特点及研究现状，认为单断口真空断路器在结构及可靠性方面具有显著优势。目前商业化单断口真空灭弧室已经发展到 145 kV/40 kA，综述了高电压大电流单断口真空灭弧室内外绝缘技术、电弧形态演变规律及分合闸控制、温升特性和真空灭弧室焊接质量稳定性的研究现状及未来发展趋势。结果表明：真空灭弧室内部真空间隙的均压设计及长真空间隙绝缘“饱和”问题是制约灭弧室电压等提升的关键因素；耐烧蚀触头材料的制备及磁场设计对触头表面阳极斑点的形成过程和真空断路器分合闸速度匹配至关重要；选取低回路电阻的触头结构、优化真空断路器散热结构能够有效提升真空灭弧室额定通流能力；此外，总结了真空灭弧室焊接质量和稳定性的影响因素，指出陶瓷金属化并选取合适的钎焊温度和焊料能够显著提升焊接强度；最后指出真空断路器趋向于大容量、小型化、智能化、低过电压、免维护、专用化和多功能化发展。

关键词：SF_6 替代技术；真空开断技术；单断口真空灭弧室；大容量；可靠性

Research Status and Prospect of High Voltage Vacuum Circuit Breaker

ZHONG Jianying[1], SUN Guanglei[2], YANG Baoxin[3], ZHAO Xiaomin[2], LI Xuxu[2], MA Chaoyang[2], JIA Hang[2], ZHANG Xusheng[4]
(1. China Electrical Equipment Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200040, China; 2. Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China; 3. Henan High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China; 4. School of Electical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110027, China)

Abstract：In view of the development needs of green power grid, the characteristics of SF_6 complete substitution technology and partial substitution technology route and related technologies are summarized and compared, and it is pointed out that vacuum interrupting technology is an effective means for green and low-carbon development of power grid. Comparing and analyzing the technical characteristics and research status of multi-break vacuum circuit breakers at this stage, we believe that single-break vacuum circuit breakers have significant advantages in terms of structure and reliability.At present, the commercial single-break vacuum interrupter has been developed to 145 kV/40 kA, and the research status and future development trend of high-voltage and high-current single-break vacuum interrupter indoor and outdoor insulation technology, arc morphological evolution law and opening and closing control, temperature rise characteristics and welding quality stability of vacuum interrupter are reviewed. The results show that the pressure equalization design of the vacuum gap inside the vacuum interrupter and the “saturation” of the insulation of the long vacuum gap are the key factors restricting the increase of the voltage of the interrupter; The preparation of the ablation-resistant contact material and the design of the magnetic field are very important for the formation process of anode spots on the contact surface and the matching of the opening and closing speed of the vacuum circuit breaker; Selecting the contact structure with low loop resistances and optimizing the heat dissipation structure of the vacuum circuit breaker can effectively improve the rated current capacity of the vacuum interrupter; In addition, the influencing factors of vacuum interrupter welding quality and stability are summarized, and it is pointed out that the ceramics metallization and selection of appropriate brazing temperature and solder can significantly improve the welding strength. Finally, it is pointed out that vacuum circuit breakers tend to develop with characteristics of large-capacity, miniaturization, intelligence, low-overvoltage, maintenance-free, specialization and multi-function.

Key words：SF_6 alternative technology; vacuum interrupting technology; single-break vacuum interrupter; large capacity; reliability

0 引言

随着工业化和城市化过程的发展，大气中二氧化碳等温室气体含量增加，对人类生产生活产生极大的负面影响。六氟化硫(SF_6)气体具有良好的热稳定性和理化性质，且绝缘和熄弧性能优异，自 20 世纪 50 年代起被广泛应用于高压和特高压开关设备中[1-2]。然而，《联合国气候变化框架公约京都议定书》中明确指出，SF_6 温室效应潜能值是 CO_2 的 23900 倍，大气寿命为 3200 年。通常，大气中的 SF_6 气体体积分数相对较低，约为 0.6×10^{-8}~1×10^{-8}，随着工业和电力系统中排放量的增加，大气中 SF_6 含量每年以约 8.7%的速度增长，并且占温室气体总排量的比例已超过 15%。据报道，电力行业年 SF_6 需求量约为 10 000 t，且呈增长趋势[3]。美国环境保护署最新研究数据表明，大气中 SF_6 浓度从 1995 年到 2021 年，由最初 3.5×10^3 mg/L 增加到 10.5×10^3 mg/L，增长了约 3 倍[4-5]。挪威 2021 年因设备泄漏的 SF_6 达 608 kg，相当于 13.376 kt 二氧化碳排放量。美国电网在 2020 年 SF_6 总排放量为 130 t，约为 330 万吨 CO_2 当量[6]。消除电力行业发展与大气环境保护之间的矛盾，限制甚至禁止 SF_6 气体的使用和排放，对降低温室效应具有重要意义。

为减少高压开关设备对 SF_6 气体的依赖性，全球主要经济体和相关组织制定相关政策和法规限制使用 SF_6。美国加州空气资源委员会制定 SF_6 气体绝缘设备淘汰时间表，如表 1 所示[7]。许多发达国家采取对 SF_6 气体征税的方式减少排放，西班牙政府自 2014 年开始对所有能够产生氟化温室气体的行业，每吨二氧化碳当量征收高达 17.6 美元的税率，加拿大魁北克对 SF_6 排放税调整为 239 美元/kg[8-9]。挪威对 SF_6 排放征收重税，相关电力公司通过提高开关设备维护次数和期限，降低 SF_6 气体排放量。以上措施都不能够从根本上解决 SF_6 气体的使用量。欧盟达成含氟气体法规协议，计划 2030 年将 SF_6 排放量降低 55%左右，2032 年前禁止 145 kV 电压等级使用全球变暖潜能值(global warming potential，GWP)≥1 的含氟气体，力争在 2050 年实现零排放[10]。据此发展，若有相关企业以非含氟气体作为绝缘或开断介质的开关设备投标，未来电力系统将进入绿色、清洁发展时代。2020 年 9 月，习近平总书记在第 75 届联合国大会上宣布，中国将采取更有力的政策和措施，力争 2030 年前达到 CO_2 排放峰值，争取在 2060 年前排放的 CO_2 气体被自然过程所吸收中和。随后，工业和信息化部等五部门联合印发加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划，指出要统筹发输配用电装备供给结构调整，构建新型电力系统，加速发展新型低温室效应的环保开关设备[11]。作为国内电力开关设备行业的排头兵，国家电网公司在《国家电网公司重点推广新技术目录(2017 版)》中强调在新建和改造项目中环保型 GIS 开关设备的应用量不低于新增总量的 90%，在大中城市负荷中心区和设备运行环境严苛地区，可适当提高应用比例；对于额定电流>630 A、开断电流>20 kA 的区域，应该优先选用环保气体金属封闭开关柜[12]。南方电网公司在《南方电网公司关于推动绿色低碳发展转型的意见》中指出，要全面实施绿色低碳电网建设和评价体系，推广应用绿色低碳技术装备，构建绿色低碳电网，预计 2025 年初步形成南方五省区绿色低碳循环发展的经济体系，2035 年全面建成安全、可靠、绿色的现代化南方电网[13]。

国际知名开关企业正加紧环保开关的研制。日立能源致力于研发无 SF_6 环保型变压器、环保型高压开关设备和断路器，最大限度提升产品全生命周期可持续性，并在 2022 年国际大电网会议上发布了全球首台 420 kV 环保型断路器。西门子能源推出系列化 Blue 环保型产品。与此同时，西门子、施耐德、明电舍、东芝等 10 余家制造商签署联合声明，承诺将开发无氟环保型输配电设备。由此可见，随着环保发展理念深入人心，含有 SF_6 的高压开关设备将会被逐渐限制并最终淘汰，SF_6 气体的完全替代将成为不可避免的趋势。

目前 SF_6 替代主要分部分替代和完全替代 2 种技术路线。在部分替代方面，通常采用 SF_6 与常规气体混合成二元或者多元混合气体(如：SF_6/N_2、SF_6/CO_2、SF_6/CF_4 等)，其根本方法是降低 SF_6 气体的使用量，从而将应用范围推广至高海拔寒冷地区，但在混合气体方案中，随着混合气体中 SF_6 气体含

表 1 SF_6 气体开关设备退出时间表

Table 1 SF_6 gas switchgear exit schedule

电压等级/kV	短路开断电流/kA	淘汰时间
(38, 145)范围内	<63	2025.1.1
	≥63	2028.1.1
(145, 245)范围内	<63	2027.1.1
	≥63	2031.1.1
>245	所有	2033.1.1

量的减少，其绝缘强度明显减弱，难以满足低温室气体使用需求。在 SF_6 完全替代方面，主要包括全氟酮类(c-C_4F_8、$C_6F_{12}O$、$C_5F_{10}O$)、全氟异丁腈(C_4F_7N)、CF_3I 等气体，上述气体虽然在绝缘性能上与 SF_6 气体相当，但其液化温度较高，使用时必须与 N_2、CO_2 或者干燥空气混合使用，以满足高压开关设备操作温度需求。以上 2 种方案虽然能够降低 SF_6 气体的使用量，但不能从根本上彻底替代 SF_6 气体的使用，并且含氟的 SF_6 替代气体存在温室效应高、自恢复性差、分解产物有毒等问题[14]。

真空开断技术和环保气体绝缘技术的快速发展为 SF_6 完全替代提供了新思路。现阶段高压真空断路器主要采用多断口和单断口 2 种技术方案(见图 1)，本文从多断口真空灭弧室的应用出发，综述了多断口真空断路器在断口均压和同步控制方面的发展概况，分析并归纳了单断口真空灭弧室在绝缘、开断、通流及焊接方面存在的难点及其影响因素。单断口真空灭弧室开断容量的不断提升也为更高电压等级双断口真空断路器的研制提供了可能，未来真空开关技术将朝向大容量、小型化、智能化发展。

1 多断口真空灭弧室研究现状

1.1 多断口均压分布

采用多断口真空灭弧室串联技术方案，在灭弧室均压一致的情况下，同等级真空灭弧室具有更小的开距，由于杂散电容的影响，多断口真空断路器的研制面临各断口动态均压和可靠性提升等技术挑战。19 世纪 60 年代英国中央电力局采用 8 个 12 kV 中压灭弧室串联，开发出 132 kV/2000 A 真空断路器，随后通用电气公司采用 45 kV 真空灭弧室串联组成额定电压为 145 kV 和 242 kV 电压等级的真空断路器，首次提出了多断口 800 kV 特高压真空开关的构想，但受制于多断口均压和同步控制等技术，未见其产品报道[15-17]。日本采用干燥空气作为外绝缘介质，开发出 168 kV 和 208 kV 多断口真空断路器。国内方面，舒胜文等采用 2 个 40.5 kV 真空灭弧室串联，分析讨论了燃弧时间对双断口真空断路器开断性能的影响[18]，综合考虑断口电压分布和弧后阴极表面场强分布的影响，建议均压电容值为 100 pF 时，最有利于双断口断路器的成功开断。廖敏夫等建立多断口真空灭弧室三维仿真结构，并采用 JPCG 算法，对真空灭弧室的电场和电容参数进行计算，采用不同触头灭弧室和均压电容配合试验，

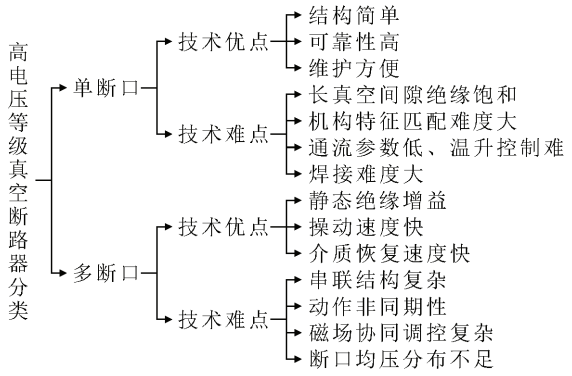


图 1 高电压等级真空断路器分类

Fig.1 Classification of high voltage vacuum circuit breakers

得到双断口真空断路器最佳开断组合方式以及有利于开断时的均压电容值[19]。程显设计出一种全环保多断口罐式真空断路器，并提出一体化自均压真空灭弧室结构，将灭弧室绝缘空间节省约 30%[20-21]。Betz 等人对双断口真空断路器有无均压电容时的开断能力进行试验研究[22]，发现均压电容的存在导致其真空断路器的开断能力出现降低的情况，这主要是由于双断口真空断路器非同期开断，导致后开极真空灭弧室内部开距较小，容易造成开断失败。

1.2 多断口协同控制

同步控制的本质是采用智能控制算法，使真空断路器在系统电压和电流最佳相角进行开断，从而降低电力系统瞬态过程，限制系统过电压。邹积岩等人基于模块串联的直流真空断路器，设计出同步控制系统——该系统采用真空换流开关，保证模块间的同步性，并采用智能算法动态补偿断口间分合闸动作时间带来的误差，以此为基础统计出 110 kV 真空断路器各断口分合闸动作时间[23]。曾祥浩等人采用永磁操动机构，综合考虑非同期性对动态电压分布和开断能力的影响，通过改变高压侧断口电容电压，将多断口真空断路器开断成功率提升至 84%[24]。谢久明分析了控制电压和环境温度对分合闸时间的影响，同时考虑预计穿时间和断路器零部件老化等因素，采用 L-M 算法预测真空断路器分合闸时间，并通过 BP 网络进行训练，将控制精度控制在 0.9 ms[25]。邱进等人将数字信号处理器(field programmable gate array，DSP)和可编程控制器(field programmable gate array，FPGA)相结合[26]，采用光纤通信技术检测电压和电流零点时刻，通过算法计算出各断路器模块动作需要的延时，从而实现各断口间同步控制。刘兆津采用永磁铁构成的双稳态永磁机构，分析系统控制电压和环境温度对分合闸时

间的影响规律[27]，采用 RFP 神经网络算法对断口时延进行预测和补偿，将断路器分合闸时间控制精度保持在 0.2 ms 以内。

2 单断口真空灭弧室研究现状

高电压等级单断口真空灭弧室存在以下挑战：1）如何解决长真空间隙下真空灭弧室绝缘饱和，提升真空灭弧室内部真空间隙绝缘水平；2）研究高电压大电流真空电弧阳极斑点形成规律，优化设计触头磁场结构并设计合理的分合闸速度实现真空电弧的有效控制；3）如何在保证开断能力的前提下，有效控制高电压等级真空灭弧室温升，提升真空灭弧室通流能力；4）分析影响真空灭弧室焊接质量因素，提升真空灭弧室焊接稳定性。

针对上述难点，国内外学者持续攻关，从真空灭弧室绝缘结构设计、触头材料选择以及真空灭弧室焊接工艺提升等多方面提出解决方案(如图 2 所示)。目前，商业应用的单断口真空断路器研制已经发展到 145 kV/40 kA 等级，有报道称国外企业推出了 175 kV/50 kA 和 245 kV/63 kA 单断口真空断路器概念样机，但未见其详细报道。

2.1 真空灭弧室绝缘

真空灭弧室绝缘能力是电力系统安全运行的前提。真空灭弧室绝缘包括：1）真空灭弧室触头间隙以及屏蔽间隙等内部真空复合间隙绝缘水平；2）真空灭弧室老炼工艺的研究；3）真空灭弧室氧化铝陶瓷表面闪络特性的研究等。

2.1.1 真空复合间隙击穿特性研究

灭弧室内部存在许多潜在击穿间隙，如：触头间隙、触头和灭弧室屏蔽罩间隙和屏蔽罩与屏蔽罩间隙等。随着电压等级提升，真空间隙场强存在差异，灭弧室内部各间隙类型如表 2 所示。

优化灭弧室内部屏蔽结构能够吸收开断过程中电弧能量，提高介质恢复强度，改善真空灭弧室内部绝缘水平。Okubo 在 2~40 mm 范围内研究了不同直径棒-板真空间隙耐压能力与触头开距的关系，得到的结论是：相同的触头间隙距离下端部半径大的棒与平板之间真空间隙的耐压能力比较高[28]。Miyazak 等研究了 5 和 10 mm 真空间隙冲击击穿特性[29]，指出对于 5 mm 触头间隙距离的棒-板真空间隙，经过老炼后的耐压能力排序为：不锈钢(SUS404)>铜铬合金>无氧铜。Sato 和 Koyama 研究分析不同电极开距(3~10 mm)、不同间隙类型(板-板、球-板、环-板)以及不同材料与触头表面粗糙度下间隙冲击耐压的关系[30-31]。发现对于 20 mm 以内的板-板间隙，当触头表面粗糙度从 0.03 μm 增加到 0.47 μm 时，击穿电压降低了 50%。Schümann U 等设置了不锈钢电极和屏蔽结构，分析环-环间隙下真空灭弧室内部电极材料、表面粗糙度和表面积等参数与击穿电压之间的关系[32]，指出电极表面粗糙度越小时击穿电压越高，同时当屏蔽电极两端环形半径为 5 mm 时电场最优。Schellekens 等对比不同屏蔽罩结构的真空灭弧室的耐压特性，提出了多重悬浮屏蔽真空灭弧室结构[33]，有效降低了接触面的有效面积，将真空断路器体积减少了 25%，具备 C2 级容性电流开合能力。

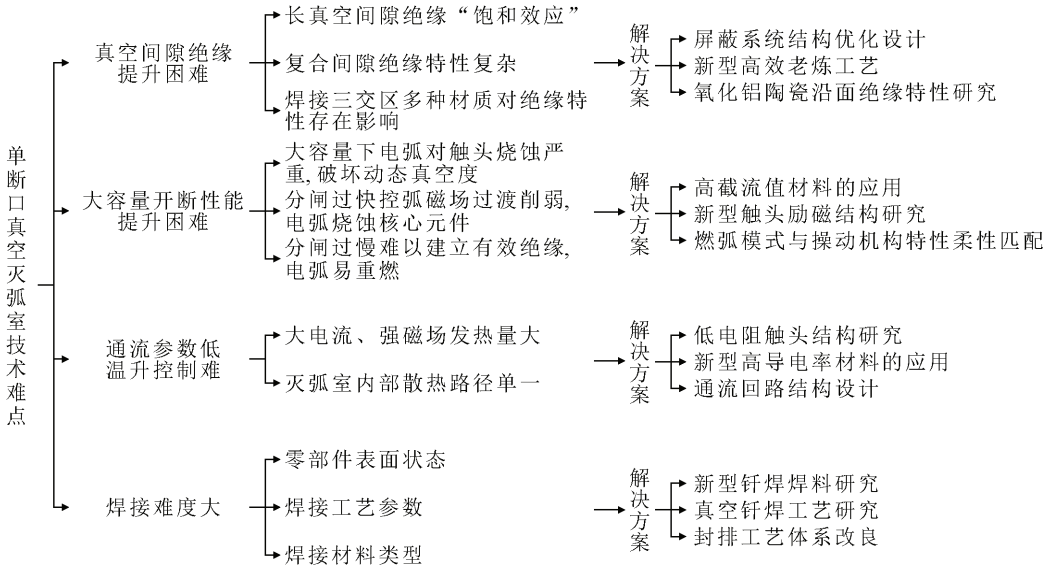


图 2 单断口真空灭弧室技术难点

Fig.2 Technical difficulties of single-break vacuum interrupter

表 2 真空灭弧室内部间隙

Table 2 Vacuum interrupter internal clearance

序号	位置	间隙类型
1	触头中心区域	板-板
3	静触头侧面与主屏蔽罩	棒-环
4	静端导体与主屏蔽罩	棒-环
5	连接屏蔽与主屏蔽罩	环-环
6	导杆与连接屏蔽	棒-环
7	连接屏蔽罩与端屏蔽罩	环-环
8	主屏蔽罩与波纹管	环-环
9	动侧屏蔽罩与端屏蔽罩	环-环
10	屏蔽罩与瓷壳之间	环-环

2.1.2 单断口真空灭弧室老炼工艺

老炼具有二次冶金效果，能够细化电极表面晶格结构，祛除触头表面的气体以及微凸起，降低重击穿概率。根据放电形式分为电压老炼和电流老炼两种方式。电压老炼方面，何俊佳等人分析真空灭弧室绝缘击穿的物理过程，指出当放电能量为焦耳数量级(1~10 J)时，能够有效祛除触头表面的微粒，使材料充分排气，显著提升老炼效率[34]。王宝利详细分析了当额定电压为 10 kV、额定开断电流为 20 kA 时真空灭弧室工频电压下的击穿电流波形、触头开距和触头表面状态[35]，提出真空灭弧室需上百次老炼才能够提升耐压，同时增加并联电容器能够改善老炼时火花放电能量，增加单位时间内触头间隙放电次数，能够加快老炼过程。电流老炼方面，赵智忠指出先通过大电流老炼处理 72.5 kV 真空灭弧室触头表面状态，然后利用大电流老炼时触头表面的温度，加速触头内部金属气体的释放，最后利用变开距老炼增强老炼效果[36]。薛峰等人根据老炼能力、触头开距和放电电容的同步性研究了老炼次数对真空电弧在触头表面烧蚀的影响，指出电流老炼次数达到 12 次时能够实现触头表面老炼效果全覆盖，同时增加触头开距、改善触头表面平行度均能够改善老炼效果[37]。姚士彬分析了电压和电流老炼对真空灭弧室质量的影响，提出在“排气”过程中应选择工频电压老炼，在“一次封排”制造过程中应采用直流老炼，提升老炼效果[38]。翟小社等人通过直流加高压脉冲的双电源老炼技术方案，有效调控老炼过程中能量注入方式和程度，避免去老炼效应，将真空灭弧室雷电冲击电压水平提升 40%以上，静置 6 个月后，老炼前后真空灭弧室绝缘耐压水平基本不变[39]。

2.1.3 氧化铝陶瓷表面闪络特性研究

通常来讲，真空间隙耐压强度达 10^9 V/m，加入绝缘子后，电场强度会有所下降，此时绝缘子表面可能会发生沿面击穿的现象，严重影响真空灭弧室性能可靠性。以往真空灭弧室外壳多采用玻璃外壳，存在机械强度低、易破碎等缺点，氧化铝陶瓷外壳以其良好的电气和机械性能被广泛应用于高压真空灭弧室研制中，起到绝缘和支撑作用。程焰林等通过仿真和试验相结合的手段，分析了电极-陶瓷-真空复合间隙处电场增强的原因，指出弯曲的电极结构能够有效降低三交区的电场强度，并且相对于平板电极，其耐压强度提升了 45%左右[40]。田志英等结合实际工艺处理过程，研究了经过研磨加工、陶瓷表面施釉以及表面涂覆工艺处理后，氧化铝陶瓷表面状态对真空耐压性能的影响，并指出涂覆能够改善氧化铝陶瓷的耐压性能[41]。雷杨俊等指出 95 氧化铝陶瓷掺杂锰、铬元素后耐压能力明显得到提升[42]。Asari 等采用柱状氧化铝陶瓷，分析了金属化层对氧化铝陶瓷沿面闪络电压的影响规律[43]。Cheng 等通过改变电极形状和几何形状将真空沿面击穿电压较平板电极提升了 50%，击穿电压提升至 150 kV[44]。Sato 等以电阻率作为陶瓷表面金属蒸汽污染程度的判断标准，研究了圆盘状陶瓷表面金属蒸汽对其表面真空闪络电压的影响，指出瓷壳表面电阻率>10^{12} Ω 时，瓷壳表面具有良好的闪络性能[45]。

2.2 长间隙大电流真空电弧控制

真空灭弧室在开断大电流时容易产生集聚态电弧，触头表面更易产生阳极斑点，不利于真空电弧熄灭和开断容量的提升。研究长真空间隙、大电流耐烧蚀触头材料、优化触头磁场、把握真空电弧阳极过程，设计出满足开断需求的真空断路器分合闸速度，对真空灭弧室开断容量的提升具有重要意义。

2.2.1 触头材料研究

触头材料的开断能力、绝缘性能、截流水平、耐压强度、抗熔焊性能和抗电侵蚀性能等指标是衡量真空灭弧室性能的重要指标。中低压真空灭弧室主要采用 CuBi、CuTeSe 以及 CuW 合金材料等，CuCr 系触头材料因其开断能力强、耐压水平高等特点，适用于 10 kV 及以上大电流开断的真空灭弧室研制[46-47]。目前，学者进一步研究并改进 CuCr 材料，主要包括：1）改变 Cu 和 Cr 比例或添加其他元素；2）改进 CuCr 触头材料加工工艺。于力等人指出触头材料的硬度、抗拉强度、电导率和热导率

以及操动机构的机械特性等参数会影响触头熔焊性能，并且给出了定量判断触头动、静熔焊的理论依据和测量手段[48]。张颖瑶等人研究了一种新型触头材料，并与常规真空灭弧室触头材料绝缘性能进行对比[49]，如图 3 所示。可以看出，当触头开距在 2~10 mm 范围内，CuCr50 触头材料具有较高的 50%击穿电压(U_{50})。程礼椿等指出 CuCr 材料具有较高的开断能力和高而稳定的耐压能力的同时，其电弧侵蚀率和熔焊强度较低[50]，同时发现增加高蒸气压材料(Bi 和 Sb)能够有效降低截流水平，增加 Te 能够提高触头抗熔焊性能，增加 W、Mo、Si 和 Zr 等元素能够提高击穿电压，增大开断能力。Guan 等分析了 CuCr10、CuCr25、CuCr50 以及纯铜、纯烙触头烧蚀状态[51]，表明：CuCr50 触头材料烧蚀率比 Cu 触头材料降低了 27%左右，主要由于触头材料中 Cr 元素含量的增加，触头表面形成氧化烙层，触头表面放电均匀性得到改善。Lin 等在可拆卸的真空灭弧室中研究了 CuCr10、CuCr20、CuCr30、CuCr40、和 CuCr50 触头材料在 5、10 和 15 kA 下的触头烧蚀情况[52-53]，结果表明在纵向磁场作用下，阳极触头表面烧蚀面积随着 Cr 含量的增加而增大，并且烧蚀深度会降低，这主要是由于 Cu 导热性能优于 Cr，随着 Cr 含量的增大触头表面 Cu 被熔融的 Cr 覆盖，使得熔化金属运动困难，触头抗侵蚀性能变强。

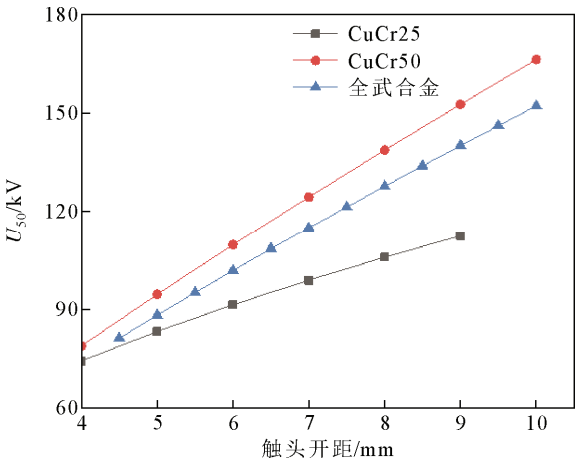


图 3 不同材料 U_{50} 与触头开距的关系

Fig.3 Relationship between U_{50} and contact opening distance of different materials

表 3 4 种不同制备工艺 CuCr 触头电气性能

Table 3 Electrical properties of CuCr contacts for four different preparation processes

制备方法	材质	介电强度	开断能力	截流值	导电率	耐烧蚀性能	抗熔焊性能
电弧熔炼	CuCr40	优	优	良	良	优	良
	CuCr50	优	良	良	中	优	良
真空熔铸	CuCr25	良	优	优	优	中	中
	CuCr30	良	优	良	良	中	中
	CuCr40	良	良	良	中	良	良
混粉烧结	CuCr25	中	中	良	良	差	优
	CuCr30	中	中	良	良	差	优
真空熔渗	CuCr50	良	良	中	差	优	良

将不同制备工艺下 CuCr 触头材料的耐压性能、开断能力和抗熔焊能力进行对比，如表 3 所示。可以看出，随着 Cr 含量的增加，触头耐烧蚀和熔焊性能得到改善，电弧熔炼 CuCr40 和 CuCr50 各方面性能最优，这主要是由于 Cr 含量的增加使得 CuCr 触头金相组织更加致密，触头耐烧蚀性能提升，更有利于长燃弧开断[54-55]。

2.2.2 触头磁场设计

根据真空灭弧室磁场与电弧弧柱方向的不同，灭弧室磁场分为横向磁场触头和纵向磁场触头。横向磁场触头结构磁场与电弧弧柱垂直，能够使电弧均匀分散在触头片表面，防止触头片表面局部严重熔化。常见的横向磁场触头结构有螺旋式触头、杯状横磁触头和万字形触头。纵向磁场触头结构磁场方向与弧柱电流方向平行，在开断大电流时能够限制电弧等离子体扩散，电弧阴极斑点分布均匀，提高灭弧室开断能力。常见的纵向磁场触头结构有杯状纵磁触头、线圈式触头以及马蹄铁型触头。修士新等仿真分析不同电弧位置和触头结构参数下直线缝隙螺旋槽、弧线缝隙螺旋槽以及杯状型触头间磁吹强度的大小，指出直线状缝隙结构触头磁吹力大，有利于电流开断，对于杯状横磁触头，其磁吹力与触头开槽倾斜角度和开槽数有关[56]。王毅仿真分析了横磁触头中电流密度、磁感应强度和弧柱受力情况，提出了一种铁芯式横磁触头结构，有效增强了触头间横向磁场强度[57]。王仲奕等人研究了线圈、杯状、两极、四极和双线圈这 5 种纵磁触头磁场强度分布和涡流分布情况[58]。庞磊等人分析研究了单极线圈式和杯状纵磁触头在大开距下的磁场特性，指出 1/2 匝线圈式触头结构更适应于高电压大电流真空灭弧室的开发[59]。易荣先等人设计出一种非对称双线圈两极式纵磁触头结构，该触头在电流峰值时，触头间隙磁场强度较大，且分布均匀；在电流过零时，剩余磁场和磁滞时间较小[60]。刘志远等人提出在铁芯式杯状纵磁触头中加入铁芯片能够提高

电流峰值时纵向磁场强度，并且铁芯数量、内径、厚度以及高度等参数对磁场强度和磁场滞后时间均有影响[61]。钱奇峰等结合横磁和纵磁的特点，设计出复合型触头结构[62]，研究表明，在稳态磁场下触头中心区域磁场强度均有所提升，当电流过零时，剩磁远小于杯状触头的值。

2.2.3 触头燃弧模式图

掌握真空电弧大开距下的燃弧模式演变规律对真空灭弧室的开断能力提升至关重要。对于极小触头开距情况，动静触头分离时触头间隙产生金属蒸汽形成桥柱状状态。当开断电流相对较小(<10 kA)时，触头间隙的等离子体进入扩散态，此时电弧电压相对较低，阳极表面无明显烧蚀，阴极表面出现大量明亮的阴极斑点，出现轻微烧蚀。随着开断电流增大，真空电弧从扩散态进入强电弧模式，此时电弧呈现集聚态，阴极射流与阳极射流贯穿整个触头间隙，真空电弧呈现出明亮的电弧弧柱，且有明显的边界，此时真空灭弧室阴极和阳极表面融化并蒸发出大量金属蒸汽，产生严重烧蚀现象，电弧电压相对较高，且弧压曲线上会出现轻微噪声。随着开距和开断电流进一步增大，纵向磁场失去对真空电弧的控制作用，真空电弧变得极度扭曲，电弧电压超过 80 V，并且出现巨大的噪声尖峰。此模式阳极表面材料的熔化和流动，并伴随阳极和阴极强烈的蒸发，导致开断的失败。

为提高真空灭弧室大电流开断能力，学者们针对触头横向磁场和纵向磁场开展大量研究。张洁敏指出横向磁场触头结构在开断大电流时，触头表面电侵蚀率十分严重，触头间介质恢复速度被严重制约，限制了开断能力的提升，并且触头外形尺寸相对较大[63]。Gentsch 等采用高速摄像研究不同开断电流下纵磁触头和横磁触头电弧演变规律，指出大电流开断时，两者触头表面熔化深度相差不大，纵向磁场对粒子的束缚能力增强，从而能够使电弧更加均匀地分布在触头表面，避免触头材料的蒸发，从而降低大电流时电弧电压，提高开断能力[64]。王季梅等研究发现，纵向磁场对电弧电压的控制存在最优值，当纵向磁场强度低于最优值时，真空电弧失稳进入扩散模式，电弧电压迅速增大，反之，纵向磁场强度大于最优值时，真空电弧能够继续保持扩散形态，电弧电压相差不大[65]。Yanabu 等把纵向磁场的作用划分为 4 个显著的区域，证明当纵向磁场强度提高到一定程度后，触头表面不会出现熔化现象，对真空电弧控制更加有利[66]。程少勇通过研究杯状纵磁触头和 1/2 匝线圈纵磁触头在大开距下(≥40 mm)条件下的纵向磁场特性、电弧形态和电弧电压特性，指出 2 种触头结构均能够满足 45 kA 开断需求[67]。毕迎华等采用拉弧试验的方法对 3/4 匝线圈型纵磁触头在大电流下电弧持续时间和电弧形态进行试验研究，并优选出触头方案应用于 126 kV 电压等级真空灭弧室的开发中[68]。

2.2.4 分合闸特性匹配技术

真空断路器合闸速度的选取有利于控制触头弹跳、减少触头预计穿时间从而降低触头磨损量，研究表明，合闸速度在 0.6~1.6 m/s 范围内能够满足要求。断路器分闸过程包括燃弧区和非燃弧区两部分，如图 4 所示。在燃弧区间内，真空电弧完全被纵向磁场控制，无不可控电弧模式的出现，非燃弧区间仅为了满足高电压等级绝缘强度。真空电弧需在非燃弧区间前熄灭，所对应的临界开距为最长燃弧距离。韩桂全等研究杯状纵磁触头强电弧模式转变为扩散态对应触头磁场强度和持续时间与分闸速度的关系[69]，指出当开断电流为 31.5 kA 时，刚分点后的分闸速度应高于 3.15 m/s(临界触头开距为 12.5 mm)，并且较高的分闸速度更有利于电弧从模式转变，从而避免阳极斑点的形成。马飞越等设计出一种可拆卸的试验装置，指出对于 2/3 匝纵磁触头触头 1/3 开距时的初始速度为 3.5 m/s，对于点状斑点放电模式中对应的临界触头开距(2/3 开距)，平均速度为 3.0 m/s，并利用 126 kV 单断口真空断路器验证其分闸速度的合理性[70]。

如何根据触头燃弧规律实现操动机构的柔性匹配是高电压真空断路器的核心问题。传统操动机

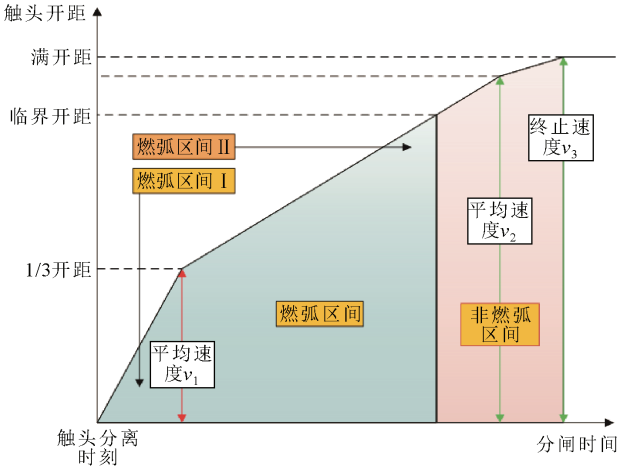


图 4 真空灭弧室燃弧区间

Fig.4 Arcing interval of vacuum interrupter

构分为弹簧操动机构和永磁操动机构等，具体对比如表 4 所示。刘超等人针对真空断路器在不同区间内速度的不同，采用 Adams 与 MATLAB 的联合仿真，优化分合闸弹簧出力和缓冲位置及强度，得到 72.5 kV 真空断路器不同燃弧区间内的最佳分合闸速度[71]。田佳采用带有减力机构的滚动摩擦扣结方式的脱扣结构，并增加棘爪数量，调整棘爪爪尖的间距和空程角度，利用空气作为缓冲介质研制出 12 kV 真空断路器机构[72]。许家源等通过改变辅助永磁体排列方式，增大分闸位置时的磁场密度从而增大合闸保持力，并计算得到最优的线圈和电容参数，将磁力机构初始分闸速度提升至 4.2 m/s[73]。孙丽琼等将驱动磁路和保持磁路分离，分析了磁力机构静态和动态特性，并在 126 kV 真空断路器中实测刚分后速度为 2.8 m/s(6 mm 平均值)，平均分闸速度为 2.9 m/s(12 mm 平均值)，满足开断需求[74]。

2.3 大电流真空灭弧室温升控制

真空灭弧室内部真空度优于 10^{-4} Pa，真空环境无法进行热对流散热，其内部主要散热类型为传导散热和辐射散热。灭弧室内部热量由内部触头开始沿导电杆向两端散热器传递，并通过散热辐射方式散失部分热量，最终到达端部散热器通过与空气对流散热。近年来，随着真空灭弧室电压等级和通流能力的提升，灭弧室内部产热密度增大，过高的热量将导致与空气接触部位金属零部件氧化加速，影响开关设备的可靠性。

为降低真空灭弧室温升，可以从热量产生以及散热方式两个方面进行研究。真空灭弧室热量产生于触头区域，马朝阳等对 4 种不同纵磁触头的 126 kV 真空灭弧室在 2500 A 下的通流能力和 3150 A 下的温升表现进行仿真计算[75]，发现开槽马蹄铁型纵磁触头在 4 种触头结构中具有最好的温升表现，并且 3150 A 通流条件下温升特性符合国标要求。余小玲等研究发现，散热表面的对流换热系数、触头接触点半径和位置以及导电杆半径对温升有显著的影响，指出散热器表面热辐射不能够忽略，增大导电杆直径后，温升变化会趋于饱和[76]。董华军等研究发现，增大真空灭弧室动静触头片接触直径、触头开槽长度和厚度以及导电杆尺寸等参数对真空灭弧室温升有明显改善，CuCr10 触头片材料温升远低于 CuCr50 触头片温升[77]。对于真空灭弧室外部散热方面，陈剑光等分析了断路器导电回路材料、断路器相间距离以及安装工艺等 3 个方面对大电流真空断路器温升的影响，提出了降低温升的有效措施[78]。刘爱华从实际设计经验出发，指出合理布置大电流真空开关柜元器件以及通风道，设计采用非导磁性材料增加磁阻，降低损耗从而减少发热[79]。Matsukawa 等研制了一种非对称型水冷式真空断路器，在线圈内部形成水冷通道，通过仿真和实验验证其温升特性，通流能力得到了提高[80]。Yamano 等在真空断路器的固定导电杆中加入热管，在 2000 A 电流 120 min 的测试中，最高温度由未安装热管的 185 ℃降低到安装了热管的 130 ℃[81]。

2.4 真空灭弧室焊接稳定性提升

真空灭弧室的焊接质量对开关设备的性能、寿命、成本控制以及电力系统的安全运行意义重大。真空灭弧室焊接质量与焊接工艺参数、零部件表面状态、焊接材料、焊接设备状态密切相关。真空灭弧室内部各部位焊接类型如表 5 所示。

目前，对于 Al_2O_3 陶瓷及其金属焊接方法主要包括真空钎焊、固相扩散、瞬间液相焊机及激光焊接等。由于 Al_2O_3 陶瓷与其他材料的热膨胀系数和杨氏模量不同，因此 Al_2O_3 陶瓷和其他材料的焊接相对困难，最有效的解决办法是采用真空钎焊。真空钎焊技术不仅能够消除焊接过程中的零部件氧化和其他污染物的影响，而且能够保证焊接位置的质量和可靠性。Jin 等人研究指出 Al_2O_3 陶瓷与 Cu 采用 Ag-26.7Cu-4.5Ti 进行焊接，加入 W 或 Ta 元素能

表 4 真空断路器用不同操动机构对比

Table 4 Comparison of different operating mechanisms for vacuum circuit breakers

机构类型	优点	缺点
弹簧操动机构	价格低、能够实现快速重合闸	零件数量多、传动结构复杂、缓冲要求高
永磁机构	高可靠性、动作迅速、控制精度高	成本较高，对控制系统要求也较高
电磁操动机构	机构简单、稳定	分合闸瞬时能量大

表 5 真空灭弧室焊接位置及焊接类型

Table 5 Welding positions and types of vacuum interrupter

序号	位置	焊接类型
1	瓷壳与屏蔽	陶瓷-不锈钢/铜
2	波纹管屏蔽与导电杆	不锈钢-无氧铜
3	导电杆与端盖板	无氧铜-不锈钢
4	端盖板与端屏蔽	不锈钢-无氧铜
5	波纹管与波纹管屏蔽	不锈钢-不锈钢
6	导电杆与触头	无氧铜-无氧铜

够改变焊接部位的应力分布，降低应力集中现象，从而提升焊接机械强度[82]。Li 等人研究表明：Al_2O_3 陶瓷焊接质量与 Ti 元素的添加和钎焊温度、压力和保温时间有关，并分析了 Al_2O_3 陶瓷与铝合金、铌合金、Kovar 合金、钛合金、不锈钢和铜合金真空钎焊的存在的问题和局限性，指出采用超声波钎焊工艺较传统钎焊工艺能够提升焊接强度[83]。王险峰研究不同比例 Cu-Ti 系活性钎料对 $A1_2O_3$ 陶瓷和 Cu 接头焊接强度的影响，指出当 Ti 质量分数<20%时，钎料完全不能润湿 Al_2O_3 陶瓷，从而影响了焊接强度[84]。贾佳对 Al_2O_3 陶瓷与不锈钢焊接结构进行研究，结果表明无氧铜等金属材料作为 $A1_2O_3$ 陶瓷和不锈钢之间的过渡层能够减小封接应力，对于不锈钢和无氧铜材料而言，采用对封结构陶瓷筒壁上封接应力低于平封结构[85]。此外，有学者提出对 $A1_2O_3$ 陶瓷焊接表面进行改性，然后再进行钎焊能够有效提升焊接强度。Nascimento 等指出陶瓷-金属真空钎焊主要依赖于对陶瓷进行钼-锰金属化，并通过改进机械金属化和等离子体金属化方法能够降低应用成本和材料残余应力[86]。Liu 等人采用钼锰烧结对 $A1_2O_3$ 陶瓷表面金属化，然后采用 AgCu28 焊料真空钎焊 $A1_2O_3$ 陶瓷与不锈钢接头，试验验证 Ni 涂层的添加能够显著提高接头焊接强度，最大强度可达 110 MPa[87]。

真空灭弧室内部金属钎焊主要包括：无氧铜与镀镍不锈钢、无氧与无氧铜、不锈钢与不锈钢这 3 种方式的焊接。刘骏等人采用 Au-Cu-Ni 焊料分析并讨论 TU1 无氧铜及其焊接接头的形貌[88]，研究表明采用 78.25%(Au)、17.78%(Cu)和 3.97%(Ni)比例的焊料具有较好的润湿性和流动性，能够改善焊接位置的钎焊效果，减少焊接缺陷从而提升焊接强度。李春香通过分析动触头与动导电杆脱焊的现象，指出触头与导电杆采用机械铆接加钎焊的连接方式，将导电杆钎焊部位局部镀镍并且钎焊间隙保持在 0.05~0.2 mm 之间，同时将温度提高至 818 ℃，能够降低焊料表面张力、提高焊料流散性从而提升封排灭弧室焊接质量[89]。王国建对 Ga 基系列钎料对 TU1 无氧铜的封接效果进行分析，得到高真空度下焊接温度、保温时间等焊接工艺参数[90]。林茂广等对铜和不锈钢焊接容易产生裂纹和气孔等缺陷进行分析，指出采用 BAg72Cu 共晶钎料并选择合适的钎焊温度和保温时间能够使焊缝与基材实现良好的冶金结合作用[91]。刘师田等人研究了镍基焊料钎焊不锈钢保温时间和钎焊温度对焊接强度的影响，指出选择合适的钎焊温度和保温时间有利于钎料与 304 不锈钢母材之间的扩散，从而提升焊接强度[92]。

3 高压真空断路器开发和应用现状

国内外学者长期致力于高电压等级真空断路器研究，高电压等级单断口真空断路器的商业化水平已达 145 kV，额定开断电流为 40 kA，真空灭弧室参数如表 6 所示。Simens 公司采用干燥空气作为外绝缘介质研制出 72.5 kV 真空柱式断路器，并在法国、丹麦等欧洲地区投入使用，随后推出 72.5 kV Blue GIS(8VM1)，其额定电流为 1250 A，额定开断电流为 31.5 kA，据统计，该款 GIS 已有 2000 多个间隔，在全世界顺利投运 600 余个间隔。后续 Siemens 公司又开发出了 145 kV/40 kA 瓷柱式真空断路器和 145 kV/40 kA Blue GIS(8VN1)，并在挪威、德国等多个国家应用，截止目前已收到订单达 500 多个间隔。其中，中国首台 8VM1 型 GIS 在广东省 8MW 风机中投入使用，如图 5 所示。国内首批 8VN1 型 145 kV Blue GIS 在国网江苏省建设的首座 110 kV 零碳变电站(清舒站)成功投运，如图 6 所示。日立公司采用干燥空气作为外绝缘，采用真空灭弧技术研制出 72.5 kV GCB 罐式断路器。明电舍公司引用美国通用真空灭弧技术，基于干燥空气研制出 145 kV/40 kA 柱式断路器，其额定电流为 2000 A，在全球范围内供货 190 余个间隔，2020 年开发出 145 kV/40 kA 罐式断路器，应用于美国阿拉斯加州费尔班克斯。

国内高电压等级真空断路器的研制起步相对较晚，但在电压等级和通流能力方面不断突破。沈阳华德海泰公司采用干燥空气作为绝缘介质，研制

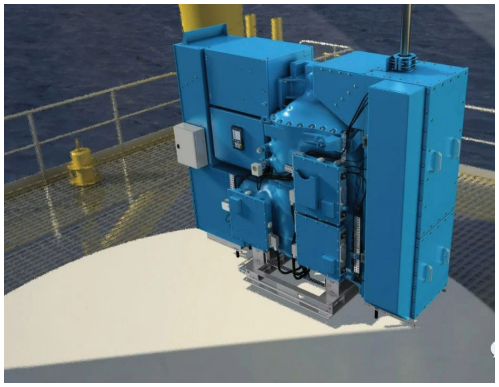


图 5 临港工业园 8 MW 风机用 72.5 kV Blue GIS

Fig.5 72.5 kV Blue GIS for 8 MW wind turbine in Lingang Industrial Park



图 6 无锡清舒变电站运行的 145 kV Blue GIS

Fig.6 145 kV Blue GIS in operation at Wuxi Qingshu substation

表 6 高压真空灭弧室参数对比

Table 6 Comparison of parameters of high-pressure vacuum interrupters

厂商	额定电压/kV	额定电流/A	工频/雷电电压/kV	开断电流/kA
宝光	72.5	2500	202/410	31.5
	126.0	2000	303/653	40.0
	145.0	2500	303/653	40.0
旭光	72.5	2500	140/325	31.5
	126.0	3150		40.0
京东方	72.5	2000	182/385	31.5
	126.0	3000	230/550	31.5
平高	126.0	2500	303/653	40.0
	145.0	3150	315/750	40.0
Simens	72.5	1250	140/325	31.5
	145	3150	275/650	40.0
Meidensha	72.5	2000	140/325	31.5
	145.0	2000		40.0
Toshiba	72.5~126.0	1250~2500		20~40

出全球首台 72.5 kV H-GIS 开关设备，并于 2015 年在内蒙阿龙山变电站环境温度−50~30 ℃中安全可靠运行，如图 7 所示。2010 年由西安高压电器研究院有限责任公司牵头开发 126 kV/2000 A~40 kA 户外高压真空断路器，将真空灭弧室研制发展到 126 kV 电压等级，如图 8 所示。2013 年西安交通大学成功研制了 126 kV/2500 A/40 kA 单断口真空断路器，将真空灭弧室额定通流能力提升至 2500 A，如图 9 所示。

平高集团有限公司在真空断路器的研制方面处于国内领先水平。自 2018 年以来先后自主研制 72.5 kV/126 kV/145 kV 系列化真空开关设备产品并挂网运行。其中，126 kV 真空断路器在河南平顶山龙泉变安全运行至今；145 kV 真空断路器已在南方

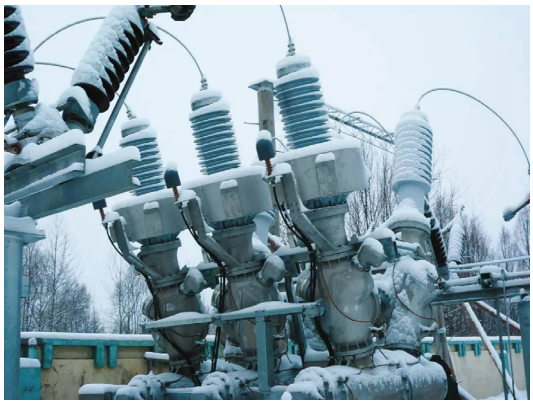


图 7 沈阳华德海泰 72.5 kV H-GIS

Fig.7 Shenyang Huade Haitai 72.5 kV H-GIS



图 8 西开有限 126 kV 真空断路器

Fig.8 XD 126 kV vacuum circuit breaker



图 9 西安交通大学 126 kV 真空断路器

Fig.9 126 kV vacuum circuit breaker of Xi'an Jiaotong University

电网公司广东肇庆变成功挂网运行并获得欧洲市场认证，拉开了国内环保开关进驻海外市场的序幕，如图 10 所示。126 kV 无氟环保型 GIS 先后被纳入国家绿色产品发展目录和能源领域首台(套)重大技术装备项目清单，并在鹤壁思德变顺利投运，应用湖州安吉城北变等多项工程(见图 11)，是国内首台工程应用的输电等级环保开关设备。此后，国内企



图 10　平高 126 kV/145 kV 真空断路器

Fig.10　Pinggao Group's 126 kV/145 kV vacuum circuit breaker



图 11　平高 126 kV 无氟环保型 GIS

Fig.11　Pinggao Group's 126 kV fluorine-free and environmentally friendly GIS

业不断在高压真空开关设备研制中发力，2021 年西开有限成功研制了 126 kV/40 kA/3150 A 环保型单断口真空断路器，实现了 40 kA 短路电流开断和容性系数为 1.4 的容性电流开合能力。2022 年旭光电子研制出 126 kV/3150 A/40 kA 真空灭弧室和 126 kV/50 kA 大容量真空灭弧室。

4　真空开关设备发展趋势

国内外企业和学者在真空灭弧室额定电压和电流提升方面取得一系列成果。国内平高、宝光、旭光等企业已具备 126 kV 单断口真空灭弧室生产制造能力，126 kV 真空断路器已经进入商业化运营阶段，国外西门子研制出系列化真空产品。真空断路器正趋向于高电压、大容量、智能化、低过电压、免维护、专用化和多功能化发展。

4.1　高电压大电流单断口真空断路器研制

据报道，Siemens 和 ILJIN Electric 联合开发出 170 kV/50 kA 环保 GIS，并通过型式试验，但是尚未推向商业市场，同时 Siemens 公司 170 kV/50 kA 和 245 kV/4000 A/63 kA 的单断口真空灭弧室正在开发中，并在 2018 年在 CIGRE 会议上展示了原型。值得注意的是，Siemens 公司 245 kV 单断口真空灭弧室绝缘和开断试验已经取得满意的结果，采用双断口的 420 kV 真空灭弧室也在研制中，根据研发计划，西门子能源公司计划 2030 年前完成 550 kV 及以下的全系列真空产品的研发。国内方面，平高集团 252 kV 柱式真空断路器已完成全套型式试验验证，252 kV 真空 GIS 预计 2024 年底完成研制。西电集团于 2022 年完成 252 kV/50 kA 单断口真空灭弧室测试样管模型的试制，已进入研究性试验阶段。有报道称，旭光电子和思源电气也在加紧研制 126 kV 及以上电压等级真空灭弧室和真空断路器产品。

4.2　快速真空开断技术

Basu 和 Srivastava 首次提出电磁斥力机构理念，并应用于开关领域。采用真空开断技术结合电磁斥力机构能够大大缩减断路器动作时间，有效降低真空断路器全开断时间。目前，快速真空开关设备因其开断容量大、运行损耗低等特点，已被广泛应用于各种电力设备中。如将其应用于直流断路器中能够快速开断换流支路中的故障电流，同时能够抑制内部过电压的升高；在超高压电网中，快速真空开关和电抗器配合使用能够抑制短路电流超标的情况，起到故障限流器的作用；在对电能质量要求高的场合，快速真空开关能够有效保证电压稳定性，提升电能质量；采用多真空快速开关组成的发电机断路器能够实现高额定电流的有效开断。快速真空开关能够有效降低故障电流开断时间，降低开断过程中电弧能量和电力设备的暂态电磁冲击，提高设备短路电流耐受能力，但需要进一步研究准确的相控控制策略。

4.3　开发低过电压产品

真空断路器在开断电抗器和电动机等感性负载时，由于开断电流较小，电弧容易熄灭甚至出现截流现象，从而产生过电压，威胁电网安全运行。以往抑制过电压普遍采用的方法是加装过电压吸收装置(如 RC 回路、ZnO 避雷器)，这样不仅使真空断路器结构复杂化，同时增加了成本和安全隐患。近年来日本几家公司采用高导电金属与难熔金属形成的复合材料，增强金属蒸发从而降低触头截流值，相关技术走在前列，如：富士公司开发了 CuCr 添加高蒸汽材料，三菱公司开发了 CuCrBiα 多元触头

材料，东芝公司开发了新型 AgWC 触头材料，日立公司开发出 CoAgSe 触头材料。实践证明采用低过电压触头材料能够降低过电压水平，满足使用需要。国内在低过电压触头材料的研究方面相对较少，需要持续研究攻关，提升产品市场竞争力，并助力真空灭弧室向大容量、小型化发展。

4.4 专用真空灭弧室研制

为了应对不同工况下的开断需求，需要设计满足实际工况需求专用断路器。如用于发电机保护断路器的大容量真空断路器(短路开断电流超过 63 kA)，标准型真空断路器(短路开断电流为 25~50 kA)，经济型真空断路器(短路开断电流为 16~25 kA)；应用于电弧炉、炼钢以及投切电容器组需要频繁操作场合的频繁型真空断路器(机械寿命为5~6万次)，超频繁型真空断路器(机械寿命为 10~15 万次)。西门子公司的 3AH 系列断路器按使用场合划分为 5 种型号，其中 3AH1 和 3AH3 型为标准型，操作 1 万次；3AH47 型为频繁型，操作 6 万次；3AH4 为超频繁型，操作 12 万次；3AH5 型为经济型，价格便宜。ABB 在原有基础上设计出新一代 VD4G 发电机断路器，最高参数达 15 kV/4000 A/63 kA，能够适用于发电机容量为 100 MW 及以下场合。西安高压研究所成功研制出 15 kV/120 kA 发电机用真空断路器并投入工业运行。京东方自主研发的 12 kV/5000 A/50 kA 发电机出口断路器，可广泛应用于热电厂、水电站等多种工况。

4.5 智能型真空断路器

真空断路器在运行过程中会遭受多种不确定因素导致其绝缘性能降低，影响其运行安全。随着智能传感技术和电力电子等技术的发展，推动信息技术与高压开关设备的深度融合，以数字化、智能化支撑新型电力系统建设受到越来越多的关注。采用数字化技术和新型智能传感技术，能够自动识别并对真空断路器内部气压、电压、电流等状态参数进行动态监测，实现真空开关设备触头电寿命在线评估，促进高压开关设备由“计划检修”向“状态检修”转变。同时，基于智能传感技术，实时采集真空灭弧室状态信息，分析真空灭弧室内部真空度，实现真空度在线监测对提高电力系统运行的可靠性和安全性至关重要。

5 结论

真空开断技术绿色环保，是目前电力开关行业完全替代 SF_6 气体的最佳方案之一，本文总结了现阶段 SF_6 替代技术路线及特点，归纳了多断口及单断口高压真空开断技术的研究现状，梳理了单断口高压真空断路器关键技术及发展趋势。

1）实现电网绿色、低碳发展。真空开断技术开断能力强、具有更好的环保性能，是现阶段高压开关设备完全替代 SF_6 气体的最有效手段之一，符合电网绿色低碳发展要求。

2）助力高电压等级单断口真空灭弧室发展。目前商用单断口真空灭弧室已经发展到 145 kV/40 kA，随着电压等级和通流能力的提升，将加速高压开关环保化进程。灭弧室内绝缘和大电流条件下分合闸匹配技术及温升控制技术的突破，不仅能够为高电压等级真空灭弧室的研制奠定坚实的基础，更能够加速推进高压开关产品无氟化进程。

3）拓展真空开断技术，提升电网运行可靠性。随着数字技术、真空开断技术的发展，研制长寿命、大容量，适用于不同工况开断需求的专用化、智能化真空灭弧室成为未来发展方向。基于真空灭弧室触头材料的深入研究以及永磁技术和真空开断技术的不断融合融合，开发低过电压、快速真空开关能够有效抑制电力系统过电压的升高，并降低短路电流超标的概率。真空开断技术的快速发展正在改变电力系统的发展方向。

参考文献 References

[1] 任利海. 六氟化硫：最可怕的温室气体[J]. 生态经济，2020，36(3)：5-8.
REN Lihai. Sulfur hexafluoride: the most terrible greenhouse gas[J]. Ecological Economy, 2020, 36(3): 5-8.

[2] 张 咪，高克利，侯 华，等. SF_6 替代绝缘气体的虚拟筛选与分子设计综述[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2816-2830.
ZHANG Mi, GAO Keli, HOU Hua, et al. Review on computational screening and molecular design of replacement gases for SF_6[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2816-2830.

[3] 李德军，沈 威，KUSCHEL M，等. 一种采用洁净空气绝缘和真空灭弧技术的环境友好型 GIS 的研究和应用[J]. 高压电器，2019，55(2)：21-30.
LI Dejun, SHEN Wei, KUSCHEL M, et al. Development and application of environment-friendly GIS combined clean air and vacuum interruption technology[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 21-30.

[4] RUNDE M, ISTAD M. SF_6 emissions from a national population of high-voltage switchgear[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2023, 39(6): 16-22.

[5] 贾申利，贾荣照，朱 璐. 真空开断型环保 GIS 发展现状及趋势[J]. 高压电器，2022，58(9)：1-12.
JIA Shenli, JIA Rongzhao, ZHU Lu. Advances in the development of vacuum-based eco-friendly GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022,

58(9): 1-12.

[6] ISTAD M. Hva er SF_6-gass?-#SINTEFblogg[EB/OL]. (2023-11-09)[2023-12-24]. https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/SF_6-gassregnskap/.

[7] SIDDIQUI N, WEEKS C, ROGERS J. Advancements in clean air insulation technologies for switchgear and circuit breakers[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2022, 20(2): 132-138.

[8] 李书林，董战峰，龙　凤. 国际碳税政策实践发展与经验借鉴[J]. 中国环境管理，2023，15(4)：35-43.
LI Shulin, DONG Zhanfeng, LONG Feng. The updated international practice progress of carbon tax policy and references for China[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2023, 15(4): 35-43.

[9] 肖　淞，石生尧，林婧桐，等. “碳达峰、碳中和”目标下高压电气设备中强温室绝缘气体 SF_6 控制策略分析[J]. 中国电机工程学报，2023，43(1)：339-358.
XIAO Song, SHI Shengyao, LIN Jingtong, et al. Analysis on the control strategy of strong greenhouse insulating gas SF_6 in high-voltage electrical equipment under the goal of "emission peak and carbon neutrality"[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 339-358.

[10] EICKHOUT B. Review of EU rules on fluorinated greenhouse gases[EB/OL]. (2022-04-05)[2023-12-24]. https: //www. europarl. europa. eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-review-of-eu-rules-on-fluorinated-greenhouse-gases.

[11] 工业和信息化部等五部门联合印发加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划的通知[EB/OL]. (2022-08-29)[2023-12-24]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/zbes/wjfb/art/2022/art_8ae56b9599f64796a050d8480b9142d9. html.
The Ministry of Industry and Information Technology and other five departments jointly issued a notice on accelerating the green and low-carbon innovation and development action plan for power equipment[EB/OL]. (2022-08-29)[2023-12-24]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/zbes/wjfb/art/2022/art_8ae56b9599f64796a050d8480b9142d9. html.

[12] 配电与用电国网公司重点推广新技术目录[EB/OL]. (2017-08-23)[2023-12-24]. https://news.bjx.com.cn/html/20170823/845187-1. shtml.
The State Grid Corporation of Power Distribution and Electricity Consumption focuses on promoting the catalogue of new technologies [EB/OL]. (2017-08-23)[2023-12-24]. https://news.bjx.com.cn/html/20170823/845187-1. shtml.

[13] 南方电网公司关于推动绿色低碳发展转型的意见[EB/OL]. (2021-09-16)[2023-12-24]. https://news.bjx.com.cn/html/20210916/1177069. shtml.
China Southern Power Grid Corporation's opinions on promoting green and low-carbon development and transformation[EB/OL]. (2021-09-16)[2023-12-24]. https://news.bjx.com.cn/html/20210916/1177069. shtml.

[14] 李　祎，张晓星，陈　琪，等. 气体绝缘介质 C_4F_7N 的急性吸入毒性试验[J]. 高电压技术，2019，45(1)：109-116.
LI Yi, ZHANG Xiaoxing, CHEN Qi, et al. Acute inhalation toxicity studies of gas insulating medium C_4F_7N[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 109-116.

[15] 王建华，耿英三，刘志远. 输电等级单断口真空断路器理论及其技术[M]. 北京：机械工业出版社，2017.
WANG Jianhua, GENG Yingsan, LIU Zhiyuan. The theory and technology on electrical transmission voltage level single break vacuum interrupter[M]. Beijing, China: China Machine Press, 2017.

[16] FALKINGHAM L T, WALDRON M. Vacuum for HV applications-Perhaps not so new? - Thirty years service experience of 132 kV vacuum circuit breaker[C]// 2006 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Matsue, Japan: IEEE, 2006: 200-203.

[17] 勝又清仁，塩崎光康，長竹和浩. 120~204 kV タンク形真空遮断器(VCB)の製品化[J]. 明電時報，2013，3：44-47.
KIYOHITO KATSUMATA, MITSUYASU SHIOZAKI, KAZUHIRO NAGATAKE. 120~204 kV tank type vacuum circuit breaker (VCB)[J]. Meiden Times, 2013, 3: 44-47.

[18] 舒胜文，阮江军，黄道春，等. 双断口真空断路器开断特性的试验与仿真研究[J]. 高电压技术，2014，40(8)：2381-2388.
SHU Shengwen, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Experimental and simulation research on breaking property of double-break vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2381-2388.

[19] 廖敏夫，段雄英，邹积岩，等. 基于 JPCG 算法的真空灭弧室三维电场有限元计算[J]. 中国电机工程学报，2004，24(4)：108-111.
LIAO Minfu, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan, et al. Application of JPCG algorithm in the three dimensional electric field calculation of vacuum interrupters[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 108-111.

[20] 程　显，田小倩，葛国伟，等. 环保型罐式多断口真空断路器电场分析与优化[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3200-3207.
CHENG Xian, TIAN Xiaoqian, GE Guowei, et al. Electric field analysis and optimization of 126 kV environmental protection gas insulated tank circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3200-3207.

[21] 程　显，李　鑫，葛国伟，等. 串联用一体化自均压真空灭弧室绝缘配置与优化[J]. 高电压技术，2022，48(3)：820-828.
CHENG Xian, LI Xin, GE Guowei, et al. Insulation configuration and optimization of integrated voltage self-sharing interrupter for series connection[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 820-828.

[22] BETZ T, KONING D. Influence of grading capacitors on the breaking capacity of two vacuum interrupters in series[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 1999, 6(4): 405-409.

[23] 邹积岩，梁德世，黄翀阳，等. 110 kV 直流真空断路器模块串联开断的同步控制[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2627-2634.
ZOU Jiyan, LIANG Deshi, HUANG Chongyang, et al. Synchronous control of module series connection interruption in 110 kV DC vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2627-2634.

[24] 曾祥浩，张海传，廖敏夫，等. 模块化串联多断口真空断路器有限异步开断策略研究[J]. 高压电器，2021，57(2)：1-6.
ZENG Xianghao, ZHANG Haichuan, LIAO Minfu, et al. Restrictive asynchronous breaking strategy of multi-break VCB with fiber controlled module[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 1-6.

[25] 谢久明. 126 kV 高压真空断路器的机械特性及同步控制研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2017.
XIE Jiuming. Research on mechanical properties and synchronous control for 126 kV high voltage vacuum circuit breaker[D]. Qinhuangdao, China: Yanshan University, 2017.

[26] 邱　进，陈轩恕，陈江波，等. 多断口光控真空断路器的同步控制系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备，2012，32(11)：150-154.
QIU Jin, CHEN Xuanshu, CHEN Jiangbo, et al. Design and implementation of synchronization control system for multi-break vacuum circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 150-154.

[27] 刘兆津. 多断口真空开关同步控制系统的研究和设计[D]. 大连：大连工业大学，2017.
LIU Zhaojin. Research and design of multi-break vacuum circuit breaker synchronous control system[D]. Dalian, China: Dalian Polytechnic University, 2017.

[28] OKUBO H. Development of electrical insulation techniques in vacu-

um for higher voltage vacuum interrupters[C]//2006 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Matsue, Japan: IEEE, 2006: 7-12.

[29] MIYAZAKI F, INAGAWA Y, KATO K, et al. Electrode conditioning characteristics in vacuum under impulse voltage application in non-uniform electric field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(1): 17-23.

[30] SATO S, KOYAMA K. Effect of mechanical polish of electrode on several breakdown characteristics of vacuum gap[C]// 20th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Tours, France: IEEE, 2002: 427-430.

[31] SATO S, KOYAMA K. Relationship between electrode surface roughness and impulse breakdown voltage in vacuum gap of Cu and Cu-Cr electrodes[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(4): 576-582.

[32] SCHUMANN U, GIERE S, KURRAT M. Breakdown voltage of electrode arrangements in vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(4): 557-562.

[33] SCHELLEKENS H, GAUDART G. Compact high-voltage vacuum circuit breaker, a feasibility study[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(3): 613-619.

[34] 何俊佳，邹积岩，张汉明，等. 真空灭弧室耐压水平的改进和提高[J]. 高电压技术，1996，22(2)：50-53.
HE Junjia, ZOU Jiyan, ZHANG Hanming, et al. Improvement of voltage withstand level of vacuum interrupters[J]. High Voltage Engineering, 1996, 22(2): 50-53.

[35] 王宝利. 真空灭弧室工频老炼试验的研究[D]. 西安：西安交通大学，1998.
WANG Baoli. Research on the power frequency aging test of vacuum interrupter[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 1998.

[36] 赵智忠. 高压真空灭弧室结构与工艺的设计与实验研究[D]. 大连：大连理工大学，2006.
ZHAO Zhizhong. Design and experimental researches on the structure and processes of high voltage interrupters[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2006.

[37] 薛 峰，李 敏，林亮伟，等. 电流老炼工艺参数对真空灭弧室触头老炼效果的影响[J]. 电器与能效管理技术，2022(10)：44-47，73.
XUE Feng, LI Min, LIN Liangwei, et al. Influence of current conditioning process parameters on contact surface morphology in vacuum interrupter[J]. Electrical and Energy Management Technology, 2022(10): 44-47, 73.

[38] 姚士彬. 电压和电流老炼对真空灭弧室质量的影响[J]. 高压电器，2000(6)：52-55.
YAO Shibin. Effect of voltage and current refining on the quality of vacuum interrupter[J]. High Voltage Apparatus, 2000(6): 52-55.

[39] 翟小社，彭朝政，高泽熙，等. 直流叠加高压脉冲的真空灭弧室老炼技术[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3793-3800.
ZHAI Xiaoshe, PENG Chaozheng, GAO Zexi, et al. Conditioning technology of vacuum interrupter with high voltage pulse superimposed on DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3793-3800.

[40] 程焰林，向 伟，雷杨俊，等. 弯曲电极结构对真空中氧化铝陶瓷沿面闪络耐压的影响[J]. 绝缘材料，2008，41(1)：49-52.
CHENG Yanlin, XIANG Wei, LEI Yangjun, et al. Curving electrode's effect on surface flashover hold-off voltage of alumina ceramics in vacuum[J]. Insulating Materials, 2008, 41(1): 49-52.

[41] 田志英，尚阿曼，张巨先. 氧化铝陶瓷表面状态对其真空耐压性能的影响[J]. 真空科学与技术学报，2015，35(10)：1169-1173.
TIAN Zhiying, SHANG Aman, ZHANG Juxian. Enhancement of surface flashover performance of alumina in vacuum by surface modification[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(10): 1169-1173.

[42] 雷杨俊，肖定全. 真空中氧化铝陶瓷表面耐压试验研究[J]. 绝缘材料，2004，37(3)：29-31，35.
LEI Yangjun, XIAO Dingquan. Study on surface hold-off voltage test of alumina ceramics in vacuum[J]. Insulating Materials, 2004, 37(3): 29-31, 35.

[43] ASARI N, KYOSU R, YAMANO Y. Vacuum surface flashover characteristics of an alumina insulator with a metalized layer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(5): 1527-1531.

[44] CHENG Y L, XU A, XIANG W, et, al. Surface flashover of alumina ceramic insulators in vacuum[C]// Proceedings of the 2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Greifswald, Germany: IEEE, 2018: 111-114.

[45] SATO S, KOGA H. Flashover voltage of alumina ceramic contaminated by metal vapor in vacuum interrupters[C]// XXIst International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Yalta, Ukraine: IEEE, 2004: 126-129.

[46] 李震彪，程礼椿，邹积岩，等. 真空开关截流机理及其影响因素[J]. 低压电器，1997(1)：12-19.
LI Zhenbiao, CHENG Lichun, ZOU Jiyan, et al. Mechanism and influencing factors of current chopping in vacuum circuit breaker[J]. Low Voltage Apparatus, 1997(1): 12-19.

[47] 王季梅. 真空灭弧室触头材料的发展动向[J]. 上海电器技术，1993(4)：16-22.
WANG Jimei. Development trend of vacuum interrupter contact material[J]. Shanghai Electric Technology, 1993(4): 16-22.

[48] 于 力，刘志远，王 东，等. 真空断路器触头熔焊性能的研究综述[J]. 高压电器，2008，44(1)：64-68.
YU Li, LIU Zhiyuan, WANG Dong, et al. Review of welding phenomena of vacuum circuit breaker contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 64-68.

[49] 张颖瑶，刘志远，耿英三，等. 采用全武合金触头材料真空断路器灭弧室的绝缘特性[J]. 高电压技术，2009，35(8)：1914-1919.
ZHANG Yingyao, LIU Zhiyuan, GENG Yingsan, et al. Dielectric performances of vacuum interrupter using a new contact Material-Quanwu alloy[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1914-1919.

[50] 程礼椿，李震彪，邹积岩，等. CuCr 真空触头材料的运行特性与机理[J]. 高压电器，1993(3)：33-40.
CHENG Lichun, LI Zhenbiao, ZOU Jiyan, et al. Characteristics and principles of the operation of CuCr vacuum contact material[J]. High Voltage Apparatus, 1993(3): 33-40.

[51] GUAN Weimian, YUAN Jie, LÜ Hao, et al. Homogeneous arc ablation behaviors of CuCr cathodes improved by chromic oxide[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 81(22): 1-12.

[52] LIN R J, WANG L J, MA J W, et al. Experiment investigation on vacuum arc of AMF contacts under different materials[J]. AIP ADVANCES, 2018, 8(9): 095110.

[53] LIN R J, WANG L J, SHI W X, et al. Experimental investigation on triggered vacuum arc and erosion behavior under different contact materials[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(8): 3047-3056.

[54] 刘 凯，王小军，张石松，等. 真空灭弧室用 CuCr 触头材料制备方法及其应用[J]. 真空电子技术，2019(5)：33-37.
LIU Kai, WANG Xiaojun, ZHANG Shisong, et al. The application and preparation methods of CuCr contact material in vacuum interrupt-

ers[J]. Vacuum Electronics, 2019(5): 33-37.

[55] 费　翔，张国跃，马明乐，等. 大容量发电机出口真空灭弧室研制[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4488-4496.
FEI Xiang, ZHANG Guoyue, MA Mingle, et al. Development of outlet vacuum interrupter for large capacity generator[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4488-4496.

[56] 修士新，庞先海，张　敏. 真空灭弧室横向磁场触头间磁吹力的计算分析[J]. 真空电子技术，2007(5)：19-22.
XIU Shixin, PANG Xianhai, ZHANG Min. Computation and analysis of magnetic blowout forces in transverse magnetic field contacts of vacuum interrupter[J]. Vacuum Electronics, 2007(5): 19-22.

[57] 王　毅. 杯状横磁触头间磁场特性仿真和真空电弧特性实验研究[D]. 西安：西安交通大学，2017.
WANG Yi. Simulation of magnetic field characteristics and experimental study on vacuum arc characteristics between cup-shaped transverse magnetic contacts[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2017.

[58] 王仲奕，刘志远，张　炫，等. 五种纵向磁场真空灭弧室触头磁场特性分析比较[J]. 电工电能新技术，2006，25(1)：21-25，67.
WANG Zhongyi, LIU Zhiyuan, ZHANG Xuan, et al. Comparison of axial magnetic field characteristics of 5 axial magnetic field vacuum interrupter contacts[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25(1): 21-25, 67.

[59] 庞　磊，修士新，王季梅，等. 大开距纵磁结构触头磁场特性的数值分析[J]. 电网技术，2007，31(1)：65-70.
PANG Lei, XIU Shixin, WANG Jimei, et al. Numerical analysis on magnetic field characteristic of axial magnetic field contacts under long break distance[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 65-70.

[60] 易荣先，郭建炎，杨长洲. 真空灭弧室非对称两极式线圈纵磁触头结构仿真[J]. 高压电器，2017，53(3)：101-105.
YI Rongxian, GUO Jianyan, YANG Changzhou. Structure simulation of asymmetric bipolar contact with axial magnetic field coil for vacuum arcing chamber[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 101-105.

[61] 刘志远，胡亚平，王季梅，等. 铁心式杯状纵磁真空灭弧室触头磁场特性[J]. 电工技术学报，2006，21(7)：81-88，98.
LIU Zhiyuan, HU Yaping, WANG Jimei, et al. Axial magnetic field of a new cup type axial magnetic field vacuum interrupter contact with iron plates[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(7): 81-88, 98.

[62] 钱奇锋，刘晓明，陈　海，等. 嵌合型杯状横-纵磁触头结构磁场分析[J]. 真空科学与技术学报，2016，36(11)：1254-1259.
QIAN Qifeng, LIU Xiaoming, CHEN Hai, et al. Simulation of magnetic field distributions in novel cup-shaped axial/transversal magnetic field contacts of vacuum circuit breaker[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(11): 1254-1259.

[63] 张洁敏. 一种具有铁芯的杯状纵磁真空灭弧室的研制[D]. 成都：电子科技大学，2006.
ZHANG Jiemin. Development of a cup-shaped longitudinal magnetic vacuum interrupter with iron core[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2006.

[64] GENTSCH D, SHANG W. High-speed observations of arc modes and material erosion on RMF- and AMF-contact electrodes[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(5): 1605-1610.

[65] 王季梅，钱忠厚. 具有纵向磁场结构真空灭弧室的研究[J]. 西安交通大学学报，1986(1)：33-39.
WANG Jimei, QIAN Zhonghou. Study of vacuum interrupters with longitudinal magnetic field structures[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1986(1): 33-39.

[66] YANABU S, KANEKO E, KOIKE H, et al. The applications of axial magnetic field electrodes to vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(5): 1395-1402.

[67] 程少勇. 大开距纵磁触头真空电弧特性的研究[D]. 西安：西安交通大学，2008.
CHENG Shaoyong. Research on the vacuum arc characteristics of longitudinal magnetic contacts with large open distance[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2008.

[68] 毕迎华，李昊旻，韩桂全，等. 126 kV 真空灭弧室 3/4 匝线圈型纵磁触头大电流电弧特性研究[J]. 高压电器，2017，53(3)：35-40.
BI Yinghua, LI Haomin, HAN Guiquan, et al. Study on the characteristics of high current arc of 3/4 turn coil-type AMF contact in 126 kV vacuum interrupter[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 35-40.

[69] 韩桂全，姚晓飞，张超军，等. 基于阳极放电模式的杯状纵磁触头真空灭弧室分闸速度设计[J]. 中国电机工程学报，2018，38(4)：1264-1272.
HAN Guiquan, YAO Xiaofei, ZHANG Chaojun, et al. Design of opening velocity for a vacuum interrupter with a cup-type axial magnetic field contact based on vacuum arc anode discharge mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1264-1272.

[70] 马飞越，姚晓飞，刘志远，等. 2/3 匝线圈式纵磁触头大开距真空断路器分闸速度设计[J/OL]. 电工技术学报，2023：1-13 [2023-12-23]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230608.
MA Feiyue, YAO Xiaofei, LIU Zhiyuan, et al. 2/3-turn coil longitudinal magnetic contact large opening distance vacuum circuit breaker opening speed design[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023: 1-13[2023-12-23]. https: //doi. org/10.19595/j. cnki. 1000-6753. tces. 230608.

[71] 刘　超，赵伟涛，张　强，等. 真空断路器弹簧操动机构机械特性的仿真与优化[J]. 高压电器，2019，55(8)：65-71.
LIU Chao, ZHAO Weitao, ZHANG Qiang, et al. Simulation and optimization for mechanical characteristics of spring operating mechanism in vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 65-71.

[72] 田　佳. 真空断路器弹簧操动机构的分析与设计[D]. 北京：清华大学，2004.
TIAN Jia. Analysis and design of spring operating mechanism of vacuum circuit breaker[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2004.

[73] 许家源，张　鹏，晁雪薇，等. 126 kV 真空断路器新型磁力操动机构研究与设计[J]. 高压电器，2017，53(3)：211-216.
XU Jiayuan, ZHANG Peng, CHAO Xuewei, et al. Research and design of a new magnetic operating device for 126 kV vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 211-216.

[74] 孙丽琼，王振兴，何塞楠，等. 126 kV 真空断路器分离磁路式永磁操动机构[J]. 电工技术学报，2015，30(20)：49-56.
SUN Liqiong, WANG Zhenxing, HE Sainan, et al. A permanent magnetic actuator with separated magnetic circuit for 126 kV vacuum circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 49-56.

[75] 马朝阳，孙广雷，刘劭玮，等. 采用 4 种不同纵磁触头结构的 126 kV 单断口真空断路器温升性能对比研究[J]. 高压电器，2021，57(6)：64-71.
MA Chaoyang, SUN Guanglei, LIU Shaowei, et al. Comparison study on temperature-rise performance of 126 kV single-break vacuum circuit breakers with 4 types of AMF contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 64-71.

[76] 余小玲，魏义江，刘志远，等. 高电压真空断路器温升影响因素的仿真研究[J]. 高压电器，2007，43(3)：179-182.
YU Xiaoling, WEI Yijiang, LIU Zhiyuan, et al. Simulation researches

on influence factors of temperature rise in high voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(3): 179-182.

[77] 董华军，赵一鉴，时　佳，等. 真空灭弧室温升特性仿真分析[J]. 大连交通大学学报，2023，44(2)：61-64.
DONG Huajun, ZHAO Yijian, SHI Jia, et al. Simulation analysis of room temperature rise characteristics of vacuum arc extinguishing[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2023, 44(2): 61-64.

[78] 陈剑光，柳春芳，郭福明. 大电流真空断路器温升与过热影响因素的探讨[J]. 高电压技术，2002，28(6)：25-26.
CHEN Jianguang, LIU Chunfang, GUO Fuming. Temperature rise and overheating of high current vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6): 25-26.

[79] 刘爱华. 高开断大电流开关柜温升的试验研究[J]. 河北电力技术，2001，20(3)：38-40.
LIU Aihua. Temperature-rise test of high interrupting and rated current switchgear cabinets[J]. Hebei Electric Power, 2001, 20(3): 38-40.

[80] MATSUKAWA M, MIURA Y, KIMURA T, et al. Design and model test of a water-cooled VCB for superconducting magnet power supplies[J]. Fusion Technology, 1998, 34(3P2): 684-688.

[81] YAMANO Y, KOBAYASHI S, MATSUKAWA M. Measurements and analysis of temperature rise at electrodes of a vacuum interrupter for high current applications[C]//Proceedings of the 20th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Tours, France: IEEE, 2002: 419-422.

[82] JIN B X, HUANG X, ZOU M Q, et al. Joining of Al_2O_3 ceramic to Cu using refractory metal foil[J]. Ceramics International, 2022, 48(3): 3455-3463.

[83] LI Y X, CHEN C, YI R X, et al. The brazing of Al_2O_3 ceramic and other materials[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(1/2): 59-84.

[84] 王险峰. Cu-Ti 系活性钎料钎焊高纯 Al_2O_3 陶瓷/无氧铜的研究[D]. 长沙：中南大学，2015.
WANG Xianfeng. Study on brazing high-purity Al_2O_3 ceramic/oxygen-free copper with Cu-Ti activated brazing metal[D]. Changsha, China: Central South University, 2015.

[85] 贾　佳. 陶瓷—不锈钢封接研究[D]. 成都：电子科技大学，2006.
JIA Jia. Research on ceramic-stainless steel sealing[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2006.

[86] DO NASCIMENTO R M, MARTINELLI A E, BUSCHINELLI A J A. Review article: recent advances in metal-ceramic brazing Artigo Revisão: avanços recentes em brasagem metal-cerâmica[J]. Cerâmica, 2003, 49(312): 178-198.

[87] LIU G W, QIAO G J, WANG H J, et al. Bonding mechanisms and shear properties of alumina ceramic/stainless steel brazed joint[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20(9): 1563-1568.

[88] 刘　骏，赵　磊，王刘成. Au-Cu-Ni 焊料真空钎焊 TU1 无氧铜及其焊接接头形貌分析[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术，2021(8)：344-346.
LIU Jun, ZHAO Lei, WANG Liucheng. Morphological analysis of Au-Cu-Ni solder vacuum brazing TU1 oxygen-free copper and its welded joints[J]. Chinese Science and Technology Journal Database (Full Text Edition) Engineering Technology, 2021(8): 344-346.

[89] 李春香. 横磁电极封排灭弧室动触头焊接可靠性研究[J]. 机电信息，2015(15)：82，84.
LI Chunxiang. Research on welding reliability of moving contacts in transverse magnetic electrode sealing and arc extinguishing chamber[J]. Mechanical and Electrical Information, 2015(15): 82, 84.

[90] 王国建，许　芳，孙　东，等. 无氧铜真空钎焊密封技术研究[J]. 焊接，2010(9)：33-35.
WANG Guojian, XU Fang, SUN Dong, et al. Vacuum brazing technology on sealing non-oxygenic copper[J]. Welding & Joining, 2010(9): 33-35.

[91] 林茂广，王海龙. 奥氏体不锈钢与纯铜的真空钎焊工艺研究[J]. 热加工艺，2013，42(9)：176-178.
LIN Maoguang, WANG Hailong. Study on vacuum brazing process of austenitic stainless steel and copper[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(9): 176-178.

[92] 刘师田，杨凯珍. 保温时间和钎焊温度对真空钎焊 304 不锈钢接头性能的影响[J]. 热加工工艺，2011，40(5)：172-174.
LIU Shitian, YANG Kaizhen. Effect of holding time and brazing temperature on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel brazed joints[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(5): 172-174.



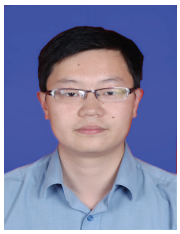
钟建英
1975—，女，博士，教授级高工，博导
主要研究方向为交直流开关设备、综合能源及能源互联网等
E-mail: 447114672@qq.com

ZHONG Jianying
Ph.D., Professor



孙广雷
1992—，男，硕士，工程师
主要从事高电压等级真空断路器的研究
E-mail: 979607621@qq.com

SUN Guanglei



赵晓民(通信作者)
1984—，男，教授级高工
主要研究方向为高压电器设备研制、电力电子与直流配网设备研制等
E-mail: pgzhaoxm@163.com

ZHAO Xiaomin
Professor
Corresponding author

收稿日期　2023-12-27　修回日期　2024-02-08　　编辑　曾文君