

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.03.006

大容量断路器用灭弧喷口的烧蚀及材料性能研究

卫亚博^{1,2}, 孙珂珂^{2,3}, 段晓辉³, 姚灿江³

(1. 平顶山学院电气与机械工程学院, 河南 平顶山 467000; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049;
3. 河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467000)

摘要: 以大容量灭弧喷口为研究对象, 对不同氮化硼(BN)填充物含量的灭弧喷口进行开断烧蚀试验, 得到了BN填充物含量对喷口烧蚀量的影响规律。其次, 利用有限元对5% BN填充物含量的灭弧喷口进行温度场仿真计算, 研究烧结工艺对灭弧喷口物理和性能的影响, 并得到最优的烧结工艺曲线。利用最优烧结工艺制造不同BN填充物含量的灭弧喷口, 并对其拉伸强度、断裂伸长率、击穿强度等参数进行测试, 得到填料含量对灭弧喷口性能的影响规律。为后续大容量断路器用灭弧喷口配方选择提供了基础数据和理论支撑。

关键词: 灭弧喷口; 烧结工艺; 温度场仿真; BN填充物

Research on Ablation and Material Properties of Arc Extinguishing Nozzles for Large Capacity Circuit Breaker

WEI Yabo^{1,2}, SUN Keke^{2,3}, DUAN Xiaohui³, YAO Canjiang³

(1. School of Electrical and Mechanical Engineering, Pingdingshan University, Henan Pingdingshan 467000, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467000, China)

Abstract: The high-capacity arc extinguishing nozzle is taken as the research object, the breaking and ablation tests are firstly conducted on arc extinguishing nozzles with different boron nitride (BN) filling content, and the influence of BN filling content on the ablation amount of the nozzle is obtained. Then, the temperature field simulation calculation of the arc extinguishing nozzle with 5% BN filling content is conducted by using finite element method to study the influence of sintering process on the physical and performance of the arc extinguishing nozzle, and the optimal sintering process curve is obtained. The optimal sintering process is used to manufacture arc extinguishing nozzles with different BN filler contents, its such parameters as tensile strength, fracture elongation, breakdown strength are tested and the influence of filler content on the performance of arc extinguishing nozzles is obtained. This research has provided basic data and theoretical support for the selection of arc extinguishing nozzle recipe for subsequent high-capacity circuit breaker.

Key words: arc extinguishing nozzle; sintering process; temperature field simulation; BN filler

0 引言

随着中国经济的不断发展, 电网规模不断扩大, 容量不断攀升, 短路电流超标问题已成为制约中国电网发展的突出因素, 因此, 发展大容量断路器技术势在必行。

灭弧喷口作为高压开关3大绝缘件之一, 是高压开关设备灭弧装置中控制电弧、创造高速气吹条件的核心绝缘零部件, 在开断过程中起着极为重要的作用。灭弧喷口材料一般由聚四氟乙烯(PTFE)和无机填料复合而成。无机填料的添加使得喷口的耐烧蚀性、机械性能明显提高。由于不同开关产品

收稿日期: 2025-08-17; 修回日期: 2025-10-12

基金项目: 平顶山学院教学改革项目(2022-JY04); 河南省科技攻关项目(252102221011)。

Project Supported by Pingdingshan University Teaching Reform Project(2022-JY04), Henan Province Science and Technology Research Project(252102221011).

所用的喷口的填料、填料比例、运行工况均不同,喷口性能无法进行有效对比分析,尤其是在针对大容量开关设备,灭弧喷口在不同填料配方下,灭弧喷口的耐烧蚀性能、材料性能等基础数据缺失,导致在大容量新开关设备进行喷口选型时缺乏理论依据^[1-4]。

BN在通常情况下,是白色六方晶体,难溶于各种化学试剂,化学性能较稳定。采用一定比例的BN填充到聚PTFE中制作的灭弧喷口,具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损、抗烧蚀和高机械性能的优点。但填充BN的比例不同,会导致灭弧喷口耐烧蚀性能、机械性能存在很大差异^[5-7],因此,为解决大容量断路器用灭弧喷口选型设计的难题,设计相应的开断试验,进行不同填料比例下的灭弧喷口进行开断试验,并对不同配方及成型工艺的喷口开展强度性能试验。分析不同配方及成型工艺下灭弧喷口耐烧蚀性能及机械强度变化规律,掌握大容量灭弧喷口在不同填料配方下耐烧蚀性能、材料性能和机械性能之间的关系,为大容量断路器的研发设计提供理论基础。

1 灭弧喷口结构特点

灭弧喷口是由聚四氟乙烯悬浮粉料、无机粉体填充料组成的配方体系,通过专业的混合分散工艺,使填充料在聚四氟乙烯中均匀分散,采用特殊烧结工艺,形成密实、连续、透明的弹性体,从而得到聚四氟乙烯毛坯,最后通过机加工获得各种形状和尺寸的产品^[8-9]。含有BN填充物的灭弧喷口结构见图1。



图1 含有BN填充物的灭弧喷口结构图

Fig. 1 Structural diagram of arc extinguishing nozzle containing BN filler

2 灭弧喷口烧蚀量的研究分析

为了研究BN填充物含量对灭弧喷口烧蚀性能的影响,评估喷口的烧蚀程度,设计制造了BN填充物含量分别为3%、5%、8%、10%的灭弧喷口,灭弧喷

口外形结构尺寸一致,样机采用252 kV罐式断路器,开断电流50 kA,为了评估样品的烧蚀程度,必须使试验环境具有可重复性,即同一组试验,电弧电流、电压、弧长、燃弧时间保持不变,以保证不同试样的耐烧蚀性能有可比性;燃弧时间、弧长、电流值可调可控;电弧电压、电流可测可记录。在试验过程中,样机包括气压、速度和分闸时间相同^[10-11],为重点考虑对喷口的耐烧蚀性能,试验时仅开断不添加TRV(瞬时恢复电压),试验每次燃弧时间为10 ms,连续开断8次,累计燃弧时间80 ms左右。试验结束,回收SF₆气体,解体样机取出喷口,用干布擦除材料表面灰烬,利用LA(120S)系列分析天平(精度±0.1 mg)和千分尺(精度±0.01 mm)分别测量烧蚀后喷口的重量和喉部直径,试验状态见图2。测量试验前后不同比例BN填充物含量的灭弧喷口重量和喉部直径见表1、2,试验后灭弧喷口状态见图3。



图2 开断试验状态图

Fig. 2 Breaking test status diagram

表1 灭弧喷口试验前后重量对比表

Table 1 Comparison of weight before and after arc extinguishing nozzle test

BN填充物百分比/%	重量/g	
	试验前	试验后
3	617.9	598.6
5	618.0	601.5
8	618.1	603.3
10	618.1	605.4

表2 灭弧喷口喉部直径试验前后变化对比表

Table 2 Comparison of changes in throat diameter of arc extinguishing nozzle before and after the test

氮化硼(BN)填充物百分比/%	直径/mm	
	试验前	试验后
3	31.30	33.61
5	31.30	33.49
8	31.30	33.41
10	31.30	33.22

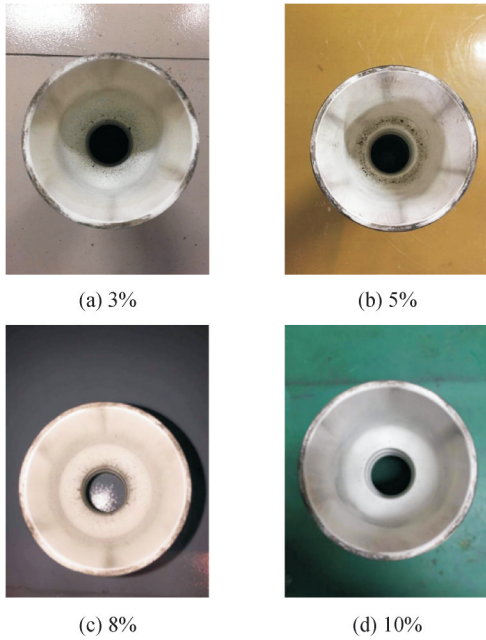


图3 不同BN填充量的灭弧喷口烧蚀状态图

Fig. 3 Ablation state diagram of arc extinguishing nozzles with different BN filler

试验前后不同BN填充物含量的灭弧喷口烧蚀量和喉部直径变化量见图4、5。

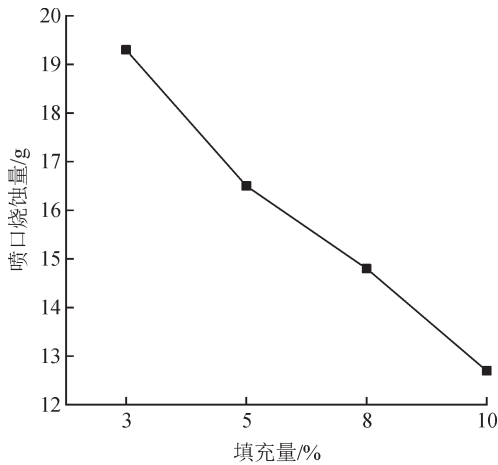


图4 不同BN填充量的灭弧喷口烧蚀量

Fig. 4 Ablation amount of arc extinguishing nozzle with different BN filler

由图4、5可知,当灭弧喷口BN填充物含量增加时,灭弧喷口烧蚀量逐渐减少,且灭弧喷口喉部直径变化量也越来越小。由图3可知,随着灭弧喷口BN填充物含量的增加,灭弧喷口烧蚀的程度越来越轻,说明了灭弧喷口BN填充物含量越大,灭弧喷口的耐烧蚀性能越强。

3 烧结工艺对灭弧喷口性能影响的研究

为了使灭弧喷口各项性能指标达到最优,在PTFE中混入一定比例的BN,通过混合、压制和烧结

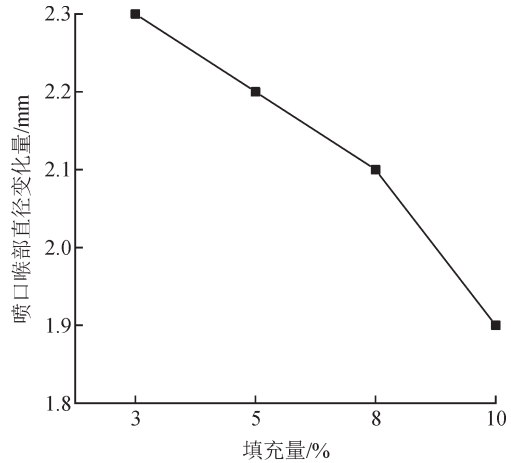


图5 不同BN填充量的灭弧喷口喉部直径变化量

Fig. 5 Changes in throat diameter of arc extinguishing nozzles with different BN filler

等技术工艺,使PTFE经过高温熔融,改变分子结构排列顺序,其中升温、保温及降温的时间将直接制约PTFE分子结构排列类型,导致灭弧喷口性能差异较大^[12-15]。因此,采用有限元仿真分析,研究烧结时间对灭弧喷口性能的影响,优化灭弧喷口烧结工艺。根据喷口毛坯的长度、壁厚确定5条烧结曲线,其中BN填充物含量均为5%。烧结曲线见图6。

仿真单元类型为三维热实体单元,具有8个节点,每个节点为一个温度自由度。剖分网格单元形状为四面体,采用自由划分方式。通过建立灭弧喷口仿真模型,灭弧喷口制品初始温度为20℃,与环境气体的换热系数为28 W/(m²·K),灭弧喷口的比热容为1.49 kJ/(kg·K),导热系数为0.289 2 W/(m·K),密度为2 150~2 210 kg/m³。分别仿真5种烧结曲线下升温阶段、保温阶段、降温阶段时刻的灭弧喷口瞬态温度分布状态,其中烧结曲线3和烧结曲线5温度分布状态见图7、8。

由图8可知,在升温阶段灭弧喷口热量由外向内逐渐传导,表面温度高,中间温度低;在降温阶段,灭弧喷口热量有内向外逐渐散热,中间温度高,表面温度低。通过截取5种烧结工艺沿灭弧喷口径向方向的中间位置温度情况见图9。

由图9可知,曲线3沿灭弧喷口径向方向温度差最大。不论是370℃时的升温阶段或者是335℃时的降温阶段,曲线5沿灭弧喷口径向方向温度差最小,温差小,灭弧喷口温度分布均匀产生的热应力相对较小。

按照5种烧结曲线制造5种灭弧喷口,每种烧结曲线制造3个试样,研究5种灭弧喷口的材料性能和电气性能,测试结果取平均值。研究结果见表3。

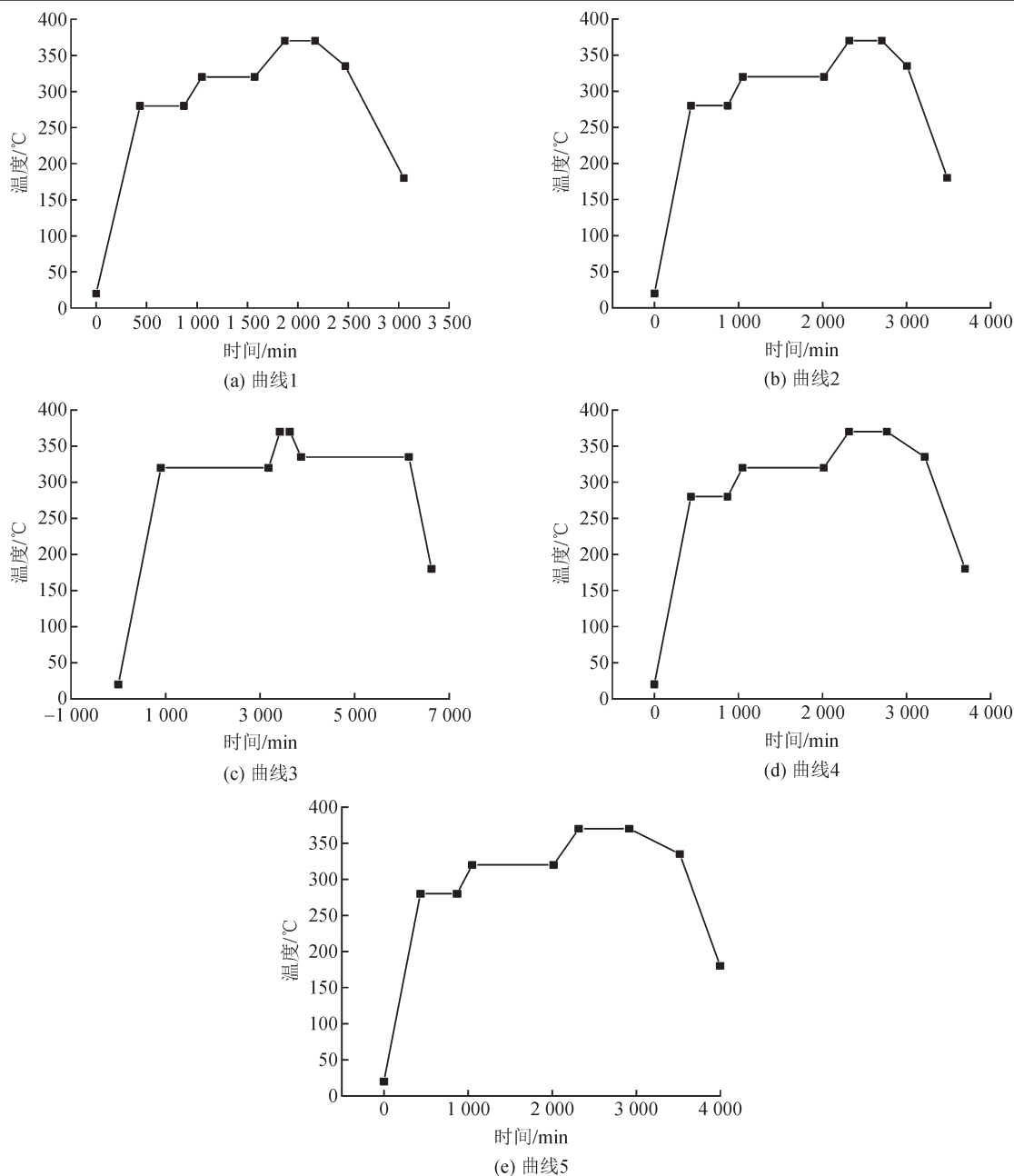


图6 灭弧喷嘴烧结工艺曲线

Fig. 6 Arc extinguishing nozzle sintering process curve

由表3可知,5种烧结曲线制造的灭弧喷嘴均满足要求,其中烧结曲线2制造的灭弧喷嘴密度和击穿强度最大,烧结曲线5制造灭弧喷嘴的毛坯,熔点、结晶焓、拉伸强度、断裂伸长率均最大。

综合图9、表3可得,最终确定烧结曲线5为最优曲线。

4 灭弧喷嘴性能评价方法研究

为了进一步研究不同BN填充物含量的灭弧喷嘴综合性能,建立灭弧喷嘴性能评价方法。根据不

同BN填充物含量灭弧喷嘴的烧蚀结果,与材料的拉伸强度、击穿强度、热导率及熔点^[16-19],建立对应关系,进而将耐烧蚀性的测试转化为材料的物理化学性能测试。研究不同BN填充物含量下灭弧喷嘴应用强度及耐烧蚀性能规律。

4.1 灭弧喷嘴拉伸强度研究

依据国标 GB/T 1040.1—2025 的相关要求,利用烧结曲线5制造不同BN填充物含量的PTFE拉伸试品^[20],每种试品3个,利用拉伸试验机进行拉伸强度和断裂伸长率测试,试验状态见图10。

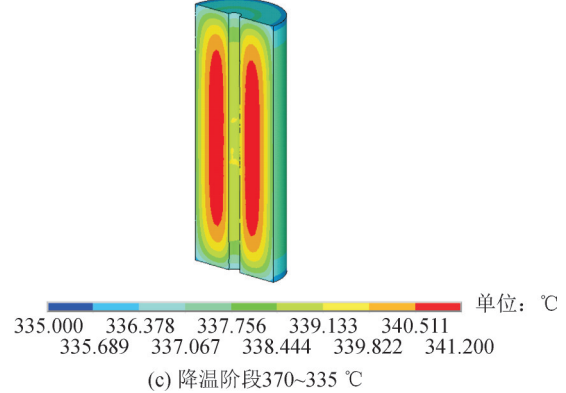
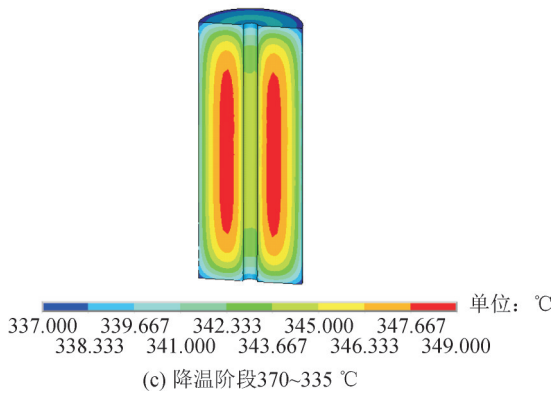
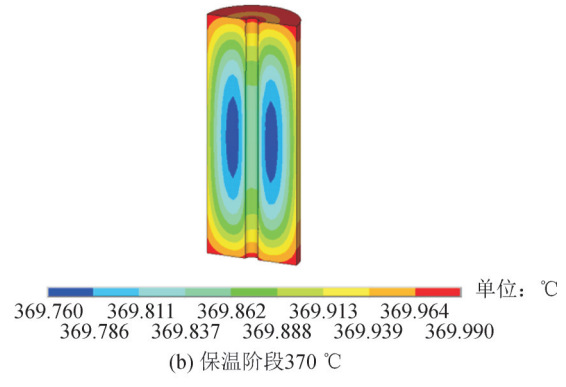
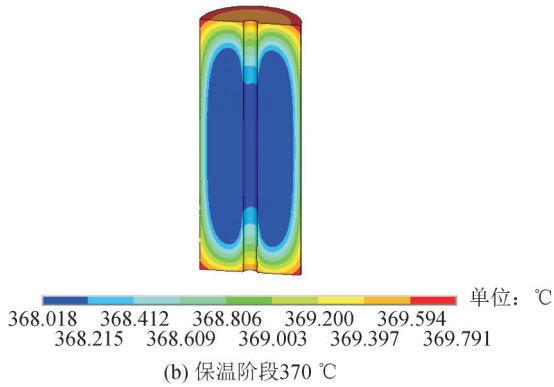
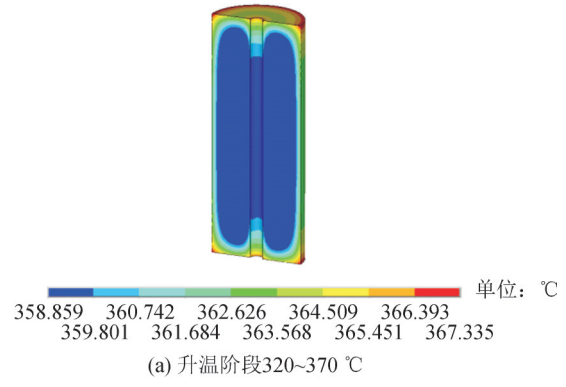
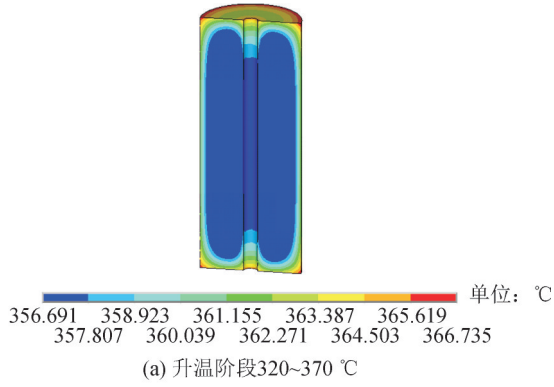


图7 在烧结曲线3条件下灭弧喷口3种阶段温度分布状态图

图8 在烧结曲线5条件下灭弧喷口3种阶段温度分布状态图

Fig. 7 Temperature distribution diagram of arc extinguishing nozzle at three stages under sintering curve No. 3 condition

Fig. 8 Temperature distribution diagram of three stages of arc extinguishing nozzle under sintering curve No. 5 condition

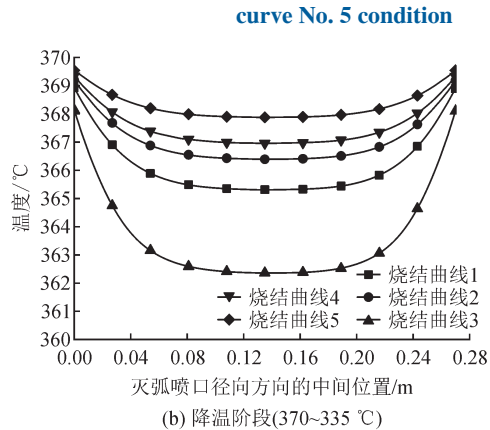
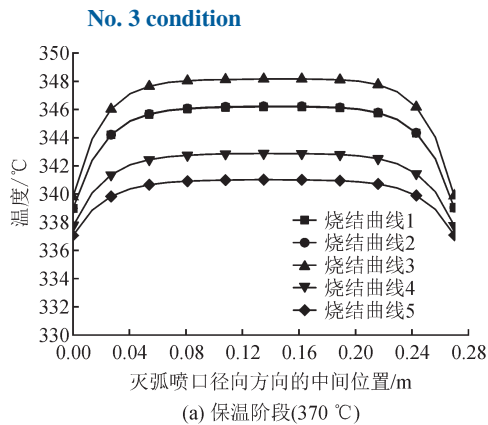


图9 5种烧结工艺条件下灭弧喷口径向方向的中间位置温度变化曲线

Fig. 9 Temperature variation curve at the middle position of the arc extinguishing nozzle in the direction under 5 sintering process conditions

表3 5种烧结曲线制造的灭弧喷嘴材料和电气性能统计表

Table 3 Statistical table of arc extinguishing nozzle materials and electrical performance for five types of sintering curve manufacturing

编号	密度/ (g·cm ⁻³)	熔点/ ℃	结晶焓/ (J·g ⁻¹)	平均拉伸 强度/MPa	平均断裂 伸长率/%	击穿强度/ (kV·mm ⁻¹)
曲线1	2.123	317.20	21.12	24.1	354.23	45
曲线2	2.215	319.40	21.44	24.6	340.45	47
曲线3	2.134	299.70	20.41	17.8	352.09	45
曲线4	2.162	331.62	21.32	24.0	442.51	46
曲线5	2.163	332.40	21.39	25.7	463.01	45
要求	2.100 ~ 2.300	(327.00±10.00)	21.00 ~ 35.00	≥18.0	≥200.00	—



图10 试品拉伸试验状态图

Fig. 10 Tensile test status diagram of the test specimen

通过对不同BN填充物含量的PTFE拉伸试品进行拉伸试验,每组拉伸3次,取平均值,得到不同BN填充物含量的试品的拉伸强度及平均断裂伸长率,其变化曲线见图11、12。

由图11、12可知,随着BN含量的增加,PTFE分子之间间隙逐渐增大,分子之间的作用力减小,造成复合材料的强度和柔韧性逐渐降低,致使试品的拉伸强度和平均断裂伸长率均随着BN含量的增加的而降低。

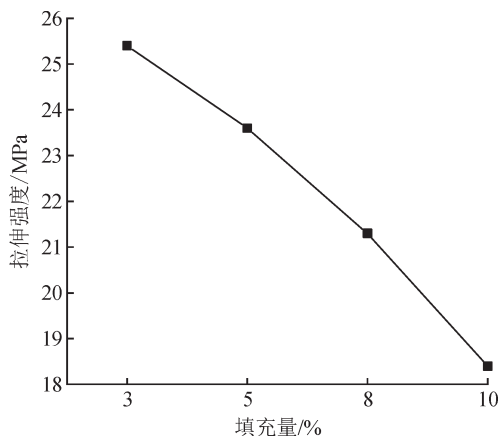


图11 不同BN填充量的试品拉伸强度变化曲线

Fig. 11 Tensile strength variation curve of specimens with different BN filler

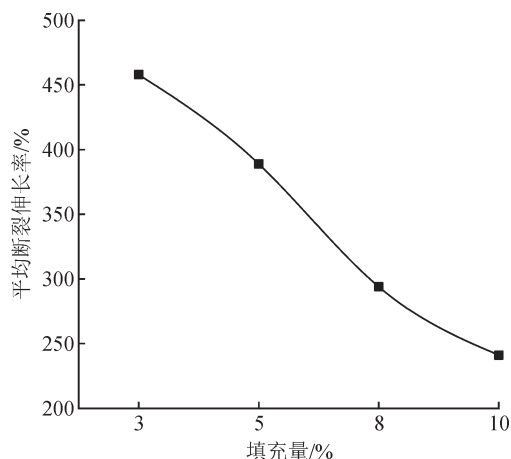


图12 不同BN填充量的试品平均断裂伸长率变化曲线

Fig. 12 Changes in average elongation at break of specimens with different BN filler

4.2 灭弧喷嘴击穿强度研究

不同BN填充物含量的PTFE测试试品厚度为1 mm,每种试品3个,依次放置在25号航空液压油中,电气强度按照GB/T 1408.1—2006《绝缘材料电气强度试验方法第1部分:工频下试验》要求在变压器油中进行测试,所用设备为营口特种试验变压器有限公司100 kV试验变压器。测试电极选用两个直径为20 mm的金属球,测试时电压从零开始以2 kV/s的速率匀速升压直至击穿^[21-22],试验3次,取击穿电压平均值。不同BN填充物含量的PTFE试品击穿强度变化趋势见图13。

由图13可知,试品击穿强度随着BN填充量的增大呈现先增加后减小,并在BN填充量5%左右时,击穿强度值达到最大。

4.3 灭弧喷嘴热导率研究

采用热导率测试仪(LFA)分别不同BN填充物含量的PTFE测试试品,每种试品测试4个温度点,其热导率分布曲线见图14。

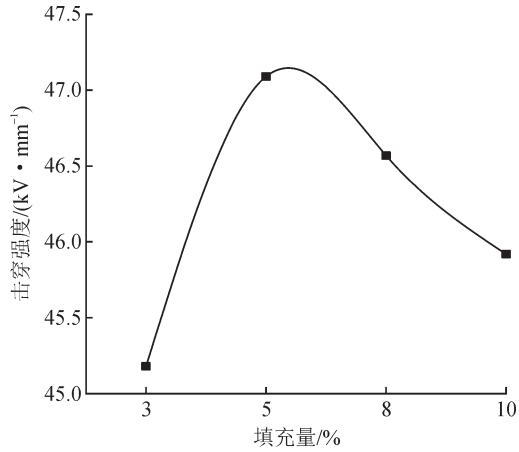


图 13 不同 BN 填充量的试品击穿强度变化曲线

Fig. 13 Change curve of breakdown strength of specimens

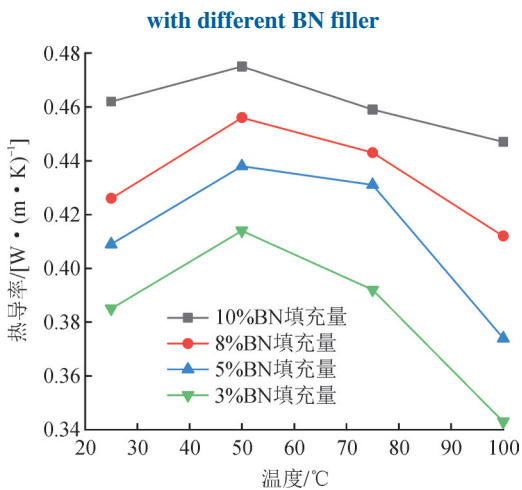


图 14 不同 BN 填充量的试品热导率随温度变化曲线

Fig. 14 Temperature dependent thermal conductivity curves of specimens with different BN filler

由图 14 可知,不同 BN 填充量的灭弧喷口试品热导率均随着温度的增加呈现先增大后减小的状态,并在 50 °C 时,热导率达到峰值。

4.4 灭弧喷口熔点和结晶焓研究

采用差示量热分析仪,分别测试不同 BN 填充量的试品,温度从 200 °C 开始,温度上升率按照 10 °C/min 进行升温,直至升温到 365 °C,在此温度下,保温 2 min,然后按照下降率为 10 °C/min 进行降温,直至下降到原始温度,对试样品的热流率,以此获得不同 BN 填充量的试品的熔点和结晶焓^[23-25]。不同 BN 填充量的试品测试得到的熔点和结晶焓见图 15、16。

由图 15、16 可知,PTFE 灭弧喷口试品熔点和结晶焓受 BN 填充量的影响较小,不同 BN 填充量灭弧喷口熔点基本稳定在 332 °C,结晶焓的数值为 21 J/g。经烧结后,结晶度应稳定在某一特定值附近,以保证制品稳定性。

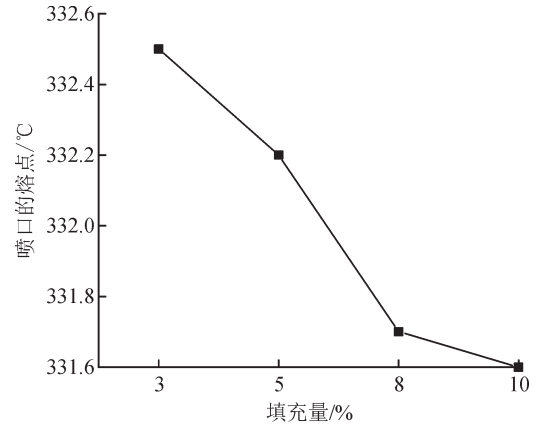


图 15 不同 BN 填充量的试品熔点变化曲线

Fig. 15 Melting point variation curve of specimens with different BN filler

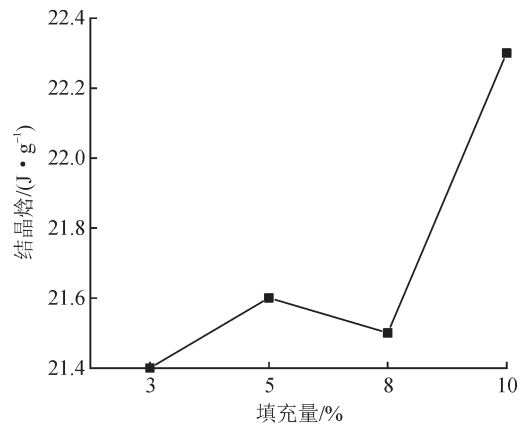


图 16 不同 BN 填充量的试品结晶焓变化曲线

Fig. 16 Changes in crystallization enthalpy of samples with different BN filler

通过研究不同 BN 填充含量对灭弧喷口材料性能的影响,对含量为 3%、5%、8%、10% 的灭弧喷口试品材料性能进行测试,结合不同 BN 填充含量灭弧喷口烧蚀试验可知,试品的拉伸强度、平均断裂伸长率、熔点和烧蚀量均随着 BN 含量的增加逐渐降低。因此在进行灭弧喷口填充量选型时要综合考虑喷口的实际应用环境。

5 结论

1)通过设计烧蚀试验样机和试验方案,对不同 BN 填充含量的灭弧喷口试品进行开断烧蚀试验,结果表明:随着 BN 填充物含量的增加,喷口烧蚀量呈显著降低趋势,验证了 BN 填料能有效提升喷口的耐电弧烧蚀性能。

2)基于有限元仿真分析 5 条烧结曲线,结合灭弧喷口的材料及电气性能测试数据,烧结曲线 5 在保证材料高热度和高熔点最优的前提下,使灭弧喷口具备最佳的综合性能。

3)对不同 BN 填充含量灭弧喷口试品的力学及

电气性能测试结果表明:BN填料含量的增加可提升喷口的拉伸强度和击穿强度,但会降低断裂伸长率,该影响规律为后续新产品灭弧喷口的配方优化提供了关键数据支撑。

参考文献:

- [1] 朱琦琦,陈蕊,郝留成,等. 高压开关断路器用灭弧喷口材料电气强度测试条件研究[J]. 绝缘材料,2022,55(7):99-103.
ZHU Qiqi, CHEN Rui, HAO Liucheng, et al. Research on test conditions of electric strength of arc-extinguishing nozzle materials for high voltage switch circuit breaker[J]. Insulating Materials, 2022, 55(7):99-103.
- [2] 罗军,袁端鹏,韩丽娟,等. 微纳米氮化硼改性聚四氟乙烯喷口材料耐烧蚀性能试验研究[J]. 绝缘材料,2017,50(5):21-25.
LUO Jun, YUAN Duanpeng, HAN Lijuan, et al. Experimental study on ablation resistance of PTFE nozzle materials modified by micro/Nano-BN[J]. Insulating Materials, 2017, 50(5):21-25.
- [3] 袁端鹏,罗军,林生军,等. 基于BN填料的高压开关用灭弧喷口材料性能研究[J]. 绝缘材料,2017,50(3):32-36.
YUAN Duanpeng, LUO Jun, LIN Shengjun, et al. Study on properties of quenching nozzle material with BN filler for high voltage switchgear[J]. Insulating Materials, 2017, 50(3):32-36.
- [4] 杨保利,吴明清,张佩,等. 烧结工艺对聚四氟乙烯喷口制品性能的影响[J]. 绝缘材料,2018,51(10):45-49.
YANG Baoli, WU Mingqing, ZHANG Pei, et al. Influence of sintering process on properties of polytetrafluoroethylene nozzle[J]. Insulating Materials, 2018, 51(10):45-49.
- [5] 杨保利,吴明清,王晶,等. 内孔形式对聚四氟乙烯灭弧喷口烧结过程的影响[J]. 绝缘材料,2018,51(9):21-24.
YANG Baoli, WU Mingqing, WANG Jing, et al. Influence of inner hole form on sintering process of PTFE quenching nozzle[J]. Insulating Materials, 2018, 51(9):21-24.
- [6] 张乔,杨晓红,刘北阳,等. 特高压系统用电容器组开关弧触头失效分析[J]. 高压电器,2016,52(7):27-32.
ZHANG Qiao, YANG Xiaohong, LIU Beiyang, et al. Failure analysis of capacitor bank switch arcing contact for ultra-high voltage system[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7):27-32.
- [7] 夏谷林,邓军,丁卫东,等. 电弧作用下SF₆分解固体产物的实验研究[J]. 高压电器,2018,54(6):223-228.
XIA Gulin, DENG Jun, DING Weidong, et al. Experimental study on decomposition solid products by SF₆ under arc action[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6):223-228.
- [8] 季严松,王承玉,杨韧,等. SF₆气体分解产物检测技术及其在GIS设备故障诊断中的应用[J]. 高压电器,2011,47(2):100-103.
JI Yansong, WANG Chengyu, YANG Ren, et al. Measuring technique of SF₆ decomposition products and its application to fault diagnosis of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2):100-103.
- [9] 陈名,徐敏,黎小林,等. 高压直流断路器开断试验方法综述[J]. 高压电器,2018,54(7):37-43.
CHEN Ming, XU Min, LI Xiaolin, et al. Review of HVDC circuit breaker breaking test method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7):37-43.
- [10] 李兴文,吕启深,田甜,等. 直流空气电弧作用下触头烧蚀特性[J]. 高电压技术,2020,46(6):1970-1977.
LI Xingwen, LYU Qishen, TIAN Tian, et al. Contact erosion characteristics under direct current air arc[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6):1970-1977.
- [11] 李卫国,焦彦俊. 大容量断路器喷口材料烧蚀性能的试验研究[J]. 绝缘材料,2016,49(3):64-67.
LI Weigu, JIAO Yanjun. Test research on ablation resistance of large capacity circuit breaker nozzle material[J]. Insulating Materials, 2016, 49(3):64-67.
- [12] 邢照亮,焦彦俊,张翀,等. 断路器喷口材料PTFE耐烧蚀性能的研究[J]. 高压电器,2017,53(2):154-158.
XING Zhaoliang, JIAO Yanjun, ZHANG Chong, et al. Research on ablation resistance of circuit breaker nozzle material PTFE[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2):154-158.
- [13] 袁端鹏,罗军,郝留成,等. 基于AlN填料的SF₆断路器用耐烧蚀灭弧喷口材料性能研究[J]. 绝缘材料,2019,52(9):30-35.
YUAN Duanpeng, LUO Jun, HAO Liucheng, et al. Properties of ablation resistance quenching nozzle based on aluminum nitride filler for SF₆ circuit breaker[J]. Insulating Materials, 2019, 52(9):30-35.
- [14] 焦彦俊. 断路器喷口复合PTFE耐电弧烧蚀性能研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.
JIAO Yanjun. Research on the ablation resistance character of composite PTFE using in circuit breaker nozzle[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [15] 焦彦俊,邢照亮,李卫国,等. 断路器喷口材料PTFE研究现状及发展方向[J]. 绝缘材料,2016,49(1):7-10.
JIAO Yanjun, XING Zhaoliang, LI Weigu, et al. Research status and development direction of PTFE nozzle material for circuit breaker[J]. Insulating Materials, 2016, 49(1):7-10.
- [16] 李仰平,张建宏,刘泽响,等. 高压SF₆断路器喷口烧蚀特性的模拟研究[J]. 西安交通大学学报,2002,36(8):785-788.
LI Yangping, ZHANG Jianhong, LIU Zexiang, et al. Simulative study of the nozzle ablation characteristics in high-voltage SF₆ circuit breaker[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(8):785-788.
- [17] 刘阳. 高压断路器喷口结构优化设计的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2009.
LIU Yang. Research on nozzle optimization of high voltage circuit breaker[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009.
- [18] 赵云学. 800 kV超高压SF₆断路器绝缘特性计算与喷口研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2007.
ZHAO Yunxue. Computation of insulation performance and study of nozzle for 800 kV extra high voltage SF₆ circuit breaker[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007.
- [19] 李仰平,周庆,刘翔. 复合聚四氟乙烯耐电弧烧蚀及其介电性能的试验研究[J]. 绝缘材料,2006,39(2):36-38.
LI Yangping, ZHOU Qing, LIU Xiang. Experimental study on arc ablation resistance and dielectric property of PTFE composites[J]. Insulating Materials, 2006, 39(2):36-38.

(下转第60页)

- 分析的柴油机振动信号去噪方法[J]. 内燃机工程, 2019, 40(2): 76-81.
- REN Gang, JIA Jide, MEI Jianmin, et al. Vibration signal denoising method of diesel engines based on VMD and DFA[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2019, 40(2): 76-81.
- [32] 宗琳, 周晓华, 罗文广, 等. 蜣螂算法优化概率神经网络的变压器故障诊断[J]. 智慧电力, 2024, 52(5): 98-104.
- ZONG Lin, ZHOU Xiaohua, LUO Wenguang, et al. Transformer fault diagnosis based on probabilistic neural network optimized by dung beetle optimizer[J]. Smart Power, 2024, 52(5): 98-104.
- [33] 李永康, 张丙旭, 杜振斌, 等. 一起低端换流变压器油中缓慢产生乙炔故障分析[J]. 变压器, 2024, 61(2): 74-76.
- LI Yongkang, ZHANG Bingxu, DU Zhenbin, et al. Analysis of acetylene fault in oil of a low - end converter transformer[J]. Transformer, 2024, 61(2): 74-76.
- [34] 刘道生, 华叙云, 王仕会, 等. 变压器油流带电影响因素及其抑制方法[J]. 变压器, 2024, 61(7): 1-12.
- LIU Daosheng, HUA Xuyun, WANG Shihui, et al. Factors influencing electrification of oil flow in transformer and its suppression method[J]. Transformer, 2024, 61(7): 1-12.
- [35] 连鸿松, 刘慧鑫, 黄锦, 等. 变压器油多参量一体化分析平台[J]. 变压器, 2025, 62(4): 53-61.
- LIAN Hongsong, LIU Huixin, HUANG Jin, et al. Transformer oil multi-parameter integrated analysis platform[J]. Transformer, 2025, 62(4): 53-61.
- [36] 刘建锋, 李志远, 周亚茹. 基于漏磁场和ICOA-ResNet的变压器绕组早期故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 99-110.
- LIU Jianfeng, LI Zhiyuan, ZHOU Yaru. Transformer windings based on leakage field and ICOA-ResNet early fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 99-110.
- [37] 杨金鑫, 廖才波, 胡雄, 等. 基于DGA与TPE-LightGBM的变压器故障诊断[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 70-77.
- YANG Jinxin, LIAO Caibo, HU Xiong, et al. Transformer fault diagnosis based on DGA and TPE-LightGBM[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 70-77.
- 代浩(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力设备状态监测与故障诊断(E-mail: 344159070@qq.com)。
- 谭为民(1974—), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为计算机辅助测试与信号处理、电力设备状态监测与故障诊断(通信作者)(E-mail: 391904395@qq.com)。

(上接第46页)

- Insulating Materials, 2006, 39(2): 36-38.
- [20] 张俊民, 徐国政, 王其平. PTFE蒸气对电弧特性影响的数值分析[J]. 高压电器, 2002, 38(4): 12-15.
- ZHANG Junmin, XU Guozheng, WANG Qiping. Numerical analysis of the influence of PTFE vapour on the characteristics of nozzle arc[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(4): 12-15.
- [21] 杨涌, 王其平. SF₆断路器喷口电弧熄灭过程的数字模拟[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 9-13.
- YANG Yong, WANG Qiping. Computer aided numerical analysis of arcing processes in SF₆ circuit breaker nozzle[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 9-13.
- [22] 李仰平, 张建宏, 彭宗仁, 等. 高压断路器喷口材料的试验研究[J]. 高压电器, 2002, 38(4): 19-21.
- LI Yangping, ZHANG Jianhong, PENG Zongren, et al. Experimental study on nozzle materials of high - voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(4): 19-21.
- [23] 李仰平, 耿波, 刘泽响, 等. SF₆断路器喷口用复合PTFE电气性能的研究[J]. 高压电器, 2006, 42(2): 122-124.
- LI Yangping, GENG Bo, LIU Zexiang, et al. Research on the electric properties of PTFE composite used in nozzle of SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(2): 122-124.
- [24] 刘先兰. 聚四氟乙烯(PTFE)制品的成型工艺及质量分析[J]. 现代机械, 2003(3): 77-78.
- LIU Xianlan. Moulding techniques and quality analysis of the products of poly tetra fluoro ethylene[J]. Modern Machinery, 2003 (3): 77-78.
- [25] 张俊民, 徐国政. SF₆自能膨胀式断路器喷口烧蚀的数学模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(9): 1172-1175.
- ZHANG Junmin, XU Guozheng. Mathematical model of nozzle ablation in an SF₆ auto - expansion circuit breaker[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2002, 42(9): 1172-1175.
- 卫亚博(1984—), 女, 讲师, 博士, 研究方向为高压电器与测量技术(E-mail: woshiyabo1020@163.com)。
- 孙珂珂(1982—), 男, 正高级工程师, 博士, 研究方向为高压电器与系统仿真(通信作者)(E-mail: sunkeke2010@163.com)。