

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.11.011

# 高压开关用功能梯度型灭弧喷嘴复合材料制备与性能

陈蕊,袁端鹏,王亚祥,郝留成,侯亚峰,王宁,赵晔,卢银花

(平高集团有限公司,河南平顶山 467001)

**摘要:**为满足断路器灭弧室安装、动作时对灭弧喷嘴不同部位的性能需求,提升灭弧喷嘴的综合性能,设计了两段式功能梯度型灭弧喷嘴,对该功能梯度型灭弧喷嘴的制造技术进行了系统的研究,并对其材料性能进行了验证。首先利用 Ansys 有限元分析软件,建立了两段式功能梯度型喷嘴毛坯模型,进行梯度喷嘴毛坯烧结过程仿真计算,从理论上优化了功能梯度喷嘴毛坯烧结工艺,获得了能够兼顾两种配方体系性能的烧结工艺;在成型工艺阶段,设计了专用平整工装,保证了功能梯度型喷嘴界面处的平整度;最终采用最优压制工艺和烧结曲线制备了功能梯度型毛坯并进行了力学、电、热等性能测试,测试结果表明所制备功能梯度喷嘴毛坯的 BN/聚四氟乙烯(PTFE)侧、MoS<sub>2</sub>/PTFE 侧和界面处的力学、电、热性能均满足断路器产品对喷嘴的技术要求,界面处的各项性能较优保证了喷嘴的基本性能,同时 BN/PTFE 侧具有较优的耐烧蚀性能,MoS<sub>2</sub>/PTFE 侧具有较优的力学性能,符合设计初衷。研究成果为大容量断路器的研发提供思路和技术支撑。

**关键词:** 功能梯度型;灭弧喷嘴;电气强度;界面;拉伸强度

**中图分类号:** TM206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)11-0079-06

## Preparation and properties of functionally graded arc extinguishing nozzle composites for high-voltage switches

CHEN Rui, YUAN Duanpeng, WANG Yaxiang, HAO Liucheng, HOU Yafeng, WANG Ning, ZHAO Ye, LU Yinghua

(State Grid Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China)

**Abstract :** In order to meet the performance requirements of different parts of the arc extinguishing nozzle during the installation and operation of the circuit breaker arc extinguishing chamber, and to improve the comprehensive performance of the arc extinguishing nozzle, a two-stage functional gradient arc extinguishing nozzle was designed. The manufacturing technology of this functional gradient arc extinguishing nozzle was systematically studied, and its material properties were verified. Firstly, using Ansys finite element analysis software, a two-stage functional gradient nozzle blank model was established, and the sintering process of the gradient nozzle blank was simulated and calculated. The sintering process of the functional gradient nozzle blank was theoretically optimized, and a sintering process that can balance the performance of both formulation systems was obtained. In the molding process stage, a dedicated leveling fixture was designed to ensure the flatness of the functional gradient nozzle interface. Finally, the functionally graded nozzle blank was prepared using the optimal pressing process and sintering curve, and mechanical, electrical, and thermal performance tests were conducted. The test results show that the mechanical, electrical, and thermal properties of the prepared functionally graded nozzle blank on the BN/PTFE side, MoS<sub>2</sub>/PTFE side, and interface all meet the technical requirements of the circuit breaker product for the nozzle. The excellent performance at the interface ensure the basic performance of the nozzle, while PTFE/BN side has excellent burn resistance, and PTFE/MoS<sub>2</sub> side has excellent mechanical properties, which are in line with the design intention. The research results provide ideas and technical support for the development of high-capacity circuit breakers.

**Keywords :** functional gradient type ; arc extinguishing nozzle ; electrical strength ; interface ; tensile strength

通信作者: 陈蕊, 研究生, 高级工程师, 研究方向为电工绝缘材料

收稿日期: 2024-08-28

引用格式: 陈蕊,袁端鹏,王亚祥,等. 高压开关用功能梯度型灭弧喷嘴复合材料制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(11): 79-84.

CHEN Rui, YUAN Duanpeng, WANG Yaxiang, et al. Preparation and properties of functionally graded arc extinguishing nozzle composites for high-voltage switches[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(11): 79-84.

灭弧喷口作为高压开关设备灭弧装置中的核心绝缘部件,对于高压开关设备实现其灭弧功能、保持开断能力有至关重要的作用<sup>[1-2]</sup>,灭弧喷口材料一般由聚四氟乙烯(PTFE)和无机填料组成。对灭弧喷口运行工况及断路器开断过程进行分析可知,喷口在断路器关合过程中需要承受较高的温度、极快的速度和高压力的SF<sub>6</sub>气体作用,经历过开断操作的灭弧喷口,其内表面喉部燃弧位置分布着大量均匀的烧蚀凹坑,该区域的PTFE被高温分解<sup>[3]</sup>。随着高压开关朝高电压、大容量和小型化方向的发展,对喷口电气性能、耐烧蚀性能、力学性能的要求也越来越高<sup>[4-8]</sup>。

以自能式断路器用灭弧喷口为例,除对喷口的绝缘性能有一定要求外,其喉部位置易被电弧烧蚀故要求该部位耐烧蚀;而喷口与其他零件的连接位置又要求力学强度高,但喷口复合材料的力学性能与其电气性能、耐烧蚀性能并不能同时兼得,电气性能、耐烧蚀性能的提升往往伴随着力学性能的降低<sup>[9-15]</sup>。目前,传统灭弧喷口的制备均采用单一配方的PTFE复合材料,耐烧蚀性能和高力学强度无法同时保证,基于此,设计功能梯度型灭弧喷口,如图1所示,在喉部的灭弧区域采用耐烧蚀性能强的PTFE复合材料,在高压区端部安装位置采用力学性能好的PTFE复合材料,以满足灭弧喷口不同位置的工况要求。BN/PTFE复合喷口的耐烧蚀性能较优,MoS<sub>2</sub>喷口的力学性能较好,故笔者针对BN/MoS<sub>2</sub>两段式灭弧喷口的制造技术开展研究。

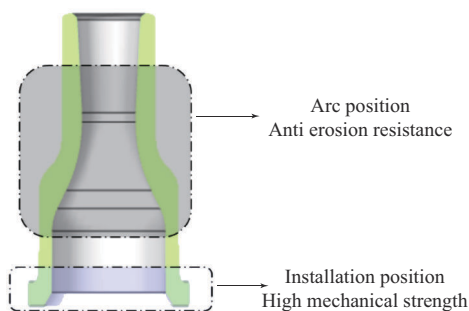


图1 喷口不同位置的需求示意图

Fig. 1 Schematic diagram of requirements for different positions of nozzle

针对两种配方体系成型工艺、烧结特性不同的问题<sup>[16-17]</sup>,开展喷口毛坯制造过程的系统研究,获得结合界面综合性能较优的压制方法、兼顾两种配方体系性能的烧结工艺曲线,并分析了不同PTFE复合材料界面结合处的力学性能、电性能等,为功能梯度型灭弧喷口的应用提供保障。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

PTFE:M-18F,日本大金公司;

氮化硼粉末:BNHA,粒径8~14 μm,丹东市化工研究所有限公司;

二硫化钼粉料:粒径2.5~4 μm,上海华谊集团华原化工有限公司。

### 1.2 仪器及设备

V型混料机:自制;

电子压力机:DDL1500,长春机械科学研究院有限公司;

高温烧结炉:GWSX-012,无锡汉迪环保材料有限公司;

电子拉力机:Test Pilot-E10c,深圳万测试验设备有限公司;

高压试验操作台:DSC-Ⅲ,武汉市泛科变电检修设备制造公司。

电流烧蚀试验平台:自制。

### 1.3 试样制备

在PTFE粉料中添加10%的BN,按一定比例称量后,利用V型混料机进行混合,将混合料经60目(250 μm)筛网过筛后倒入料筒备用。按照该方法制备出添加质量分数0.5% MoS<sub>2</sub>的PTFE混合料,装入料筒备用。成型时按照分次压制的方法进行,首先加入PTFE/BN混合料,称取一定量的混合料装入模具,利用专用工装进行捣料并对界面进行整平操作,而后再装入一定量的PTFE/MoS<sub>2</sub>混合料,采用模压成型制备毛坯,压制压力为230 kN,保压时间为5 min,毛坯尺寸为外径115 mm、内径20 mm、高度200 mm。然后按照一定的烧结工艺进行烧结,获得样棒,机加工后可获得所需测试试样,喷口的制造流程如图2所示。

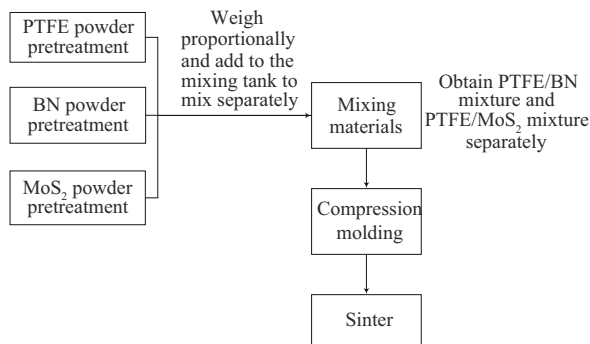


图2 喷口制造流程

Fig. 2 Manufacturing process of nozzle

## 1.4 测试与表征

### 1.4.1 电气强度

依据 GB/T 1408.1-2006,以变压器油为试验介质,采用球形电极进行电气强度测试,试样尺寸为直径 100 mm、厚度 1 mm<sup>[18]</sup>。每组测试 5 个试样,取平均值。电气强度的计算见公式(1)。

$$E = \frac{U}{t} \quad (1)$$

式中: $E$ 为电气强度,kV/mm; $U$ 为试样击穿时的电压,kV; $t$ 为试样厚度,mm。

### 1.4.2 拉伸强度及断裂伸长率

拉伸性能试验方法依据 GB/T1040-2006 中规定,测试速度采用 100 mm/min,试样尺寸采用 HG/T 2903-1997 中所给出的试样标准。每组测试 5 个试样,取平均值。

### 1.4.3 耐电弧烧蚀性能

采用自制的电流烧蚀试验平台进行耐烧蚀性能测试<sup>[12-14]</sup>。试样尺寸为  $\varnothing 20 \text{ mm} \times \varnothing 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ;试验条件为燃弧电流 21 A、电压 45 V,燃弧间距 6 mm,燃弧时间 5 s,计算试样电弧烧蚀前后的质量损失百分比。

## 2 结果与讨论

### 2.1 成型工艺

喷嘴制品制造过程复杂,PTFE 既不溶解于溶剂,也对黏接剂免疫,烧结温度还高达 370 °C,通过黏接的方式把各组分组合到一起不可行,只能通过一次压制成型来实现。

为保证 PTFE/BN 与 PTFE/MoS<sub>2</sub> 两种配方的结合界面平整,利用专用平整工装(如图 3 所示),引入捣料系数对压制成型中界面平整时的力度进行了量化。

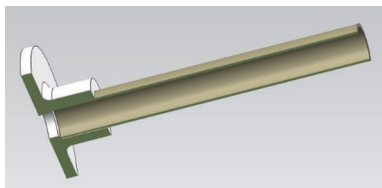


图3 梯度喷嘴压制专用工装

Fig. 3 Special tooling for gradient nozzle pressing

捣料系数( $C_c$ )定义为装料时最先加入的单配方体系粉料原始高度( $h_0$ )与捣料后的高度( $h_1$ )差与  $h_0$  的比值。

$$C_c = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \quad (2)$$

根据捣料难易程度,设计了三个捣料系数(0.23, 0.35 和 0.43)进行验证。毛坯经过压制及烧结后,对毛坯进行 X 光探伤测试,并在界面位置取样进行拉伸强度测试以验证界面位置的性能情况。

毛坯 X 光探伤结果如图 4 所示,界面位置未发现裂纹等缺陷,表明不同捣料系数对界面状态影响不大。所制备毛坯界面处的拉伸试样如图 5 所示,不同捣料系数对应的毛坯界面拉伸性能见表 1。

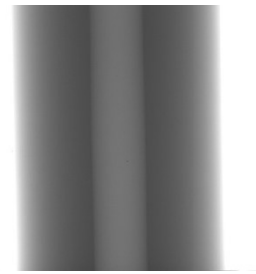


图4 X光探伤测试结果

Fig. 4 Test results of X-ray flaw detection

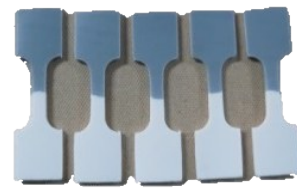


图5 界面处所制备拉伸试样

Fig. 5 Tensile specimens prepared at interface

表1 不同捣料系数下界面位置拉伸性能测试结果

Tab. 1 Test results of tensile properties at interface positions under different compaction coefficients

| Compaction coefficient | $\sigma$ /MPa | $\delta$ /%  |
|------------------------|---------------|--------------|
| 0.23                   | 17.06±0.4     | 263.55±44.4  |
| 0.35                   | 17.98±0.25    | 322.76±68.89 |
| 0.43                   | 16.24±1.19    | 311.94±59.71 |

Notes:  $\sigma$  is tensile strength;  $\delta$  is elongation at break.

从表 1 可以看出,随着捣料系数的增大,拉伸强度值呈现先增大后降低,拉伸强度值的分散性(偏差值)呈先降后增趋势。当捣料系数是 0.35 时,拉伸强度值最大、分散性最小,故捣料系数采用 0.35。

### 2.2 烧结工艺及其仿真计算

不同喷嘴配方体系烧结特点差异较大,PTFE/BN 配方体系 BN 传热慢,烧结时间长;PTFE/MoS<sub>2</sub> 配方体系,MoS<sub>2</sub> 添加量少,烧结传热快,烧结时间短。两种配方体系对应性能也不尽相同,烧结过度 and 烧结不足,均会降低材料性能。功能梯度喷嘴毛坯含有两种配方体系,且各配方体系性能均不能有所降低,基于此开展了烧结工艺研究。首先针对烧

结过程建模进行仿真计算,筛选出较优烧结工艺。

喷嘴烧结过程中烘箱内的温度场计算主要考虑气体的热传导、对流换热和辐射。结合喷嘴烧结特点,在烧结炉中,因高温气体与喷嘴制品发生热交换,实现制品的加热和冷却过程,该过程属于热对流过程。

因喷嘴制品体积相对于加热炉而言较小,忽略喷嘴制品的热辐射,忽略炉体外环境、托盘与喷嘴制品的热传导作用,即炉体显示的烧结温度,与制品表面附近气体温度一致,此时,热对流过程用牛顿冷却方程描述见式(3)。

$$q = hA(T_s - T_B) \quad (3)$$

式中: $q$ 为热量; $h$ 为对流换热系数; $T_s$ 为制品表面的温度; $T_B$ 为周围流体的温度; $A$ 为传热面积。

在瞬态传热过程中的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有明显变化。根据能量守恒原理,瞬态热平衡以矩阵形式表示为式(4)。

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (4)$$

式中: $[K]$ 为传导矩阵,包含导热系数、对流系数; $[C]$ 为比热矩阵,考虑系统内能的增加; $\{T\}$ 为节点温度向量; $\{\dot{T}\}$ 为温度对时间的导数; $\{Q\}$ 为节点热流向量,包含热生成。

采用ansys有限元分析软件,建立两段式梯度毛坯模型,开展梯度毛坯烧结过程仿真。按照喷嘴制品结构和喷嘴材料特性(见表2),直接建立喷嘴制品对称模型(如图6所示)。选择的热场分析单元为三维8节点的实体单元,该单元每个节点只有一个温度自由度,剖分网格单元形状为四面体,直接采用自由网格划分,得到喷嘴制品有限元模型。按照PTFE+BN烧结工艺参数(如图7所示)进行仿真计算;烧结时间为3 970 min。

表2 喷嘴不同配方体系材料特性表

Tab. 2 List of material characteristics of nozzles with different formulation systems

| Item                                                  | PTFE/BN | PTFE/MoS <sub>2</sub> |
|-------------------------------------------------------|---------|-----------------------|
| $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$                  | 2 240   | 2 240                 |
| $\lambda/[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{C})^{-1}]$ | 0.25    | 0.255                 |
| $C[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{C})^{-1}]$       | 1 400   | 1 400                 |
| $h/[\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}]$     | 25      | 25.5                  |

Notes: $\rho$  is density;  $\lambda$  is thermal conductivity;  $C$  is specific heat;  $h$  is heat transfer coefficient.

基于降低烧结过程中的温度差所引起的内应力,经反复多次调整烧结参数并计算毛坯内部温度场分布,最终确定了一个较优的烧结工艺曲线,在

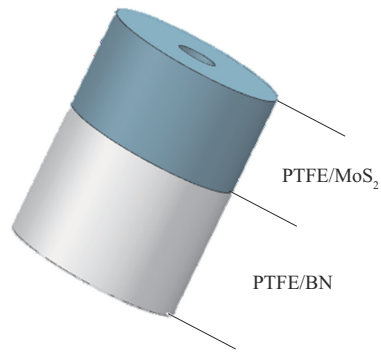


图6 两段式梯度毛坯模型

Fig. 6 Two stage gradient blank model

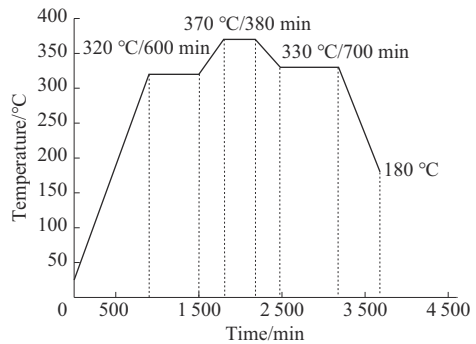


图7 两段式梯度毛坯烧结仿真工艺参数

Fig. 7 Simulation process parameters for two-stage gradient sintering of raw materials

图7的工艺曲线基础上,将烧结曲线的升温阶段增加280℃保温阶段,升温速率保持不变,同时拆分335~180℃为两段降温。

采用优化后工艺,对梯度毛坯进行烧结仿真计算的结果如图8所示。

从仿真结果可以看出,在第一升温阶段喷嘴毛坯同一时刻最大温度与最小温度之差较大,高达23℃;但从280℃保温阶段至335℃保温阶段过程中的温度差均较小,在8℃以下;在335℃保温结束至260℃过程中,温度差在10℃,降低毛坯内的热应力,达到了优化工艺的目的。

### 3 梯度喷嘴毛坯性能测试

采用最优压制工艺进行毛坯压制,按照优化烧结曲线进行烧结,对烧结成型的功能梯度毛坯进行性能测试,开展包括拉伸强度、断裂伸长率、熔点、电气强度、烧蚀性能测试,测试结果见表3。

根据电力行业标准T/CEC 189-2018中4.3对喷嘴复合材料的性能要求,自能式灭弧喷嘴的性能要求相对较高,对喷嘴复合材料的技术要求见表3。

从测试结果可以看出,各配方体系及界面处的力学性能、电气性能等均满足技术要求。在力学性

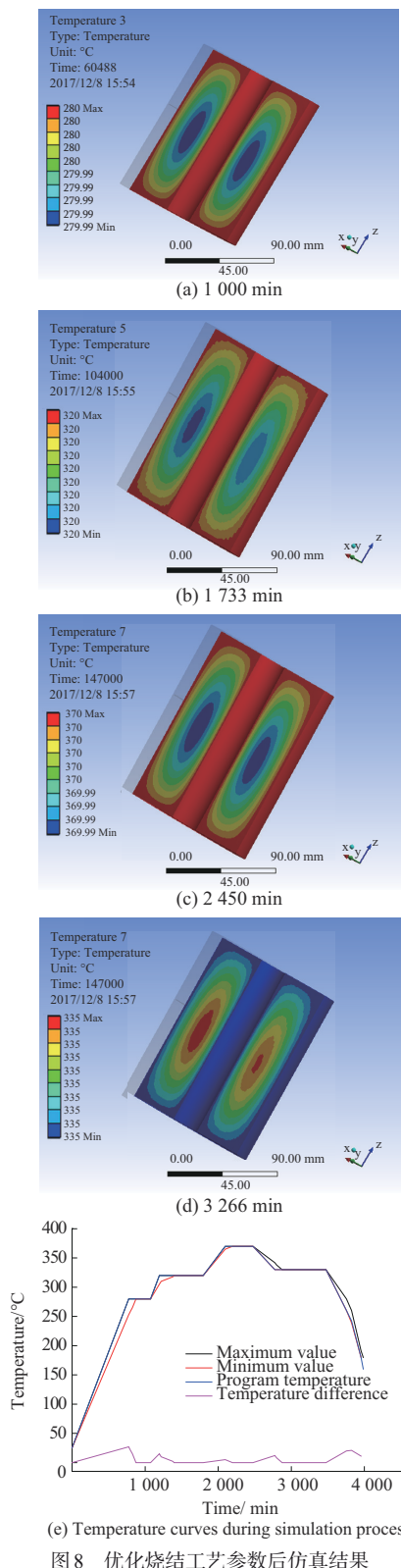


Fig. 8 Simulation results after optimizing sintering process parameters

能方面,各配方体系及界面处在横向(CD)上的拉伸强度最小值为24.19 MPa,高于标准值27%~52%,断裂伸长率最小值为559.99%,远高于技术要求;在纵

表3 各配方体系及界面性能测试结果

Tab. 3 Test results of various formula systems and interface performance

| Item                        |    | PTFE/BN    | Interface  | PTFE/MoS <sub>2</sub> | Technical requirement |
|-----------------------------|----|------------|------------|-----------------------|-----------------------|
| $\sigma$ /MPa               | CD | 24.19±2.5  | 26.51±2.2  | 28.97±1.5             | ≥19 MPa               |
|                             | MD | 19.8±1.6   | 20.25±1.36 | 25.48±1.1             | ≥15 MPa               |
| $\delta$ /%                 | CD | 559.99±100 | 633.97±110 | 647.39±100            | ≥250%                 |
|                             | MD | 360.36±50  | 427.86±70  | 563.59±100            | ≥300%                 |
| $T_m$ /°C                   |    | 332±5      | 332±5      | 335±5                 | 327±10                |
| $E$ /(kV·mm <sup>-1</sup> ) |    | 45±3       | 39±3.3     | 39±2.9                | ≥30                   |
| $\Delta_m$ /%               |    | 4          | 4.8        | 6.15                  | /                     |

Notes: MD is compression direction for compression molding; CD is direction perpendicular to MD direction;  $\sigma$  is tensile strength;  $\delta$  is elongation at break;  $T_m$  is melting point;  $E$  is electrical strength;  $\Delta_m$  is erosion weight loss.

向(MD)上的拉伸强度最小值为19.8 MPa,高于标准值32%~69%,断裂伸长率最小值为360.36%,远高于技术要求。界面位置纵向拉伸强度的断裂位置在PTFE/BN侧(如图9所示),而非界面位置,说明界面位置结合牢靠,拉伸断裂发生在力学性能较弱的一侧。

表3的测试结果也表明,梯度喷嘴各部位的性能满足最初的设计,即PTFE/BN配方端具有较优的耐烧蚀性能,PTFE/MoS<sub>2</sub>配方端具有较优的力学性能,同时喷嘴的各部位的电气性能、力学性能均满足技术要求。

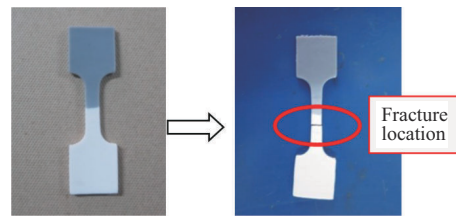


图9 拉伸强度测试前后的试样状态

Fig. 9 State of specimen before and after tensile strength test

图10为功能梯度喷嘴毛坯界面的微观形貌图。从图10可以看到,PTFE/BN侧和PTFE/MoS<sub>2</sub>侧两部分泾渭分明,没有出现因烧结渗透而形成的中间过渡层,这样可以避免对各区域的性能造成影响。因两种配方的基体材料均为PTFE,这样可以提供连接的接触点,使得两种配方的界面连接更加紧密,从而拥有更高的结合强度。由此可知,高温烧结后,梯度喷嘴材料的两种配方基体并不会在界面处出现相互渗透,也不会形成过渡层,因而并不会对两梯度层的性能产生明显的影响。

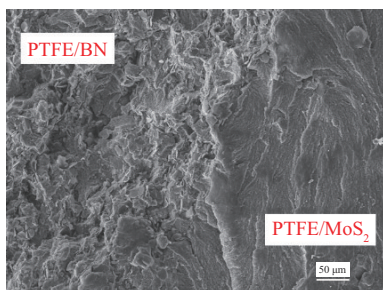


图10 喷口毛坯界面处的微观形貌图

Fig. 10 Microscopic morphology of nozzle blank interface

#### 4 结论

(1)采用专用平整工装,捣料系数为0.35时,所压制梯度喷口材料界面处平整且综合性能较优。

(2)对单一烧结工艺进行改良,升温阶段增加280℃保温阶段、降温阶段拆分335~180℃为两段降温,可兼顾两种配方的烧结,所得各层材料及界面结合处的力学性能均能达到使用要求。

(3)功能梯度型喷口毛坯的两种配方在其界面结合处桥接,并未形成渗透层或过渡层,保证了两侧材料的性能。

#### 参考文献

- [1] 黎斌. SF<sub>6</sub>高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003(1): 5-11, 82-88.  
LI Bin. Design of SF<sub>6</sub> high voltage electrical appliances[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2003(1): 5-11, 82-88.
- [2] 韩书谟, 徐国政, 唐冬之, 等. 自能式SF<sub>6</sub>断路器开断过程的分析[J]. 清华大学学报, 2000, 40(7): 8-11.  
HAN Shumo, XU Guozheng, TANG Dongzhi, et al. Interruption process analyses of a self extinguishing type SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. Tsinghua Science and Technology, 2000, 40(7): 8-11.
- [3] 杨韧, 张晓, 彭雅楠, 等. SF<sub>6</sub>断路器开关过程中固体分解产物研究[J]. 高压电器, 2022, 58(12): 21-27, 36.  
YANG Ren, ZHANG Xiao, PENG Yanan, et al. Study of solid decomposition products during interruption period of SF<sub>6</sub> Circuit Breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 21-27, 36.
- [4] 钟建英, 陈刚, 谭盛武, 等. 高压开关设备关键技术及发展趋势[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2769-2782.  
ZHONG Jianying, CHEN Gang, TAN Shengwu, et al. Key technology and development trend of high-voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2769-2782.
- [5] 焦彦俊, 邢照亮, 李卫国, 等. 断路器喷口材料PTFE研究现状及发展方法[J]. 绝缘材料, 2016(1): 7-10.  
JIAO Yanjun, XING Zhaoliang, LI Weiguo, et al. Research status and development direction of PTFE nozzle material for circuit breaker[J]. Insulating Materials, 2016(1): 7-10.
- [6] 张涛峰, 陈东, 张克选, 等. 自能灭弧室用喷口性能的改进方法[J]. 理化检验(物理分册), 2023, 59(6): 36-40, 65.  
ZHANG Taofeng, CHEN Dong, ZHANG Kexuan, et al. Performance improvement method of nozzle for self-energy arc extinguishing chamber[J]. PTCA(PART A: PHYS TEST), 2023, 59(6): 36-40, 65.
- [7] 许红春, 陈琬琪. 灭弧室喷口的材料选用及装配方法的探讨[J]. 高压电器, 2003, 39(2): 63-65.  
XU Hongchun, CHEN Wanqi. Discussion on material selection and mounting method for nozzle in arc-quenching chamber[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(2): 63-65.
- [8] 潘世岩, 马明. 高压断路器恢复电压下喷口表面电场状态分析[J]. 上海电气技术, 2023, 16(1): 48-54.  
PAN Shiyan, MA Ming. The analysis of the surface electric field state of the nozzle under the recovery voltage of high-voltage circuit breakers[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2023, 16(1): 48-54.
- [9] 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 Weiguo, JIAO Yanjun. Test research on ablation resistance of large capacity circuit breaker nozzle material[J]. Insulating Materials, 2016, 49(3): 64-67.
- [10] 王宁, 张娜娜, 侯亚峰, 等. BN/PTFE喷口复合材料力学性能及失效机理研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2021, 19(4): 46-50.  
WANG Ning, ZHANG Nana, HOU Yafeng, et al. Study on mechanical performance and failure mechanism of BN/PTFE nozzle composites[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2021, 19(4): 46-50.
- [11] 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(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(3): 32-36.
- [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 status and development direction of PTFE nozzle material for circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 154-158.
- [13] 赵训君. 纳米改性喷口材料PTFE耐烧蚀性能的研究[J]. 绝缘材料, 2016(10): 60-64.  
ZHAO Xunjun. Research on ablation resistance of nano modified nozzle material PTFE[J]. Insulating Materials, 2016(10): 60-64.
- [14] 袁端鹏, 罗军, 郝留成, 等. 基于AlN填料的高压开关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 SF<sub>6</sub> circuit breaker[J]. Insulating Materials, 2019, 52(9): 30-35.
- [15] 张耀东, 李程, 姬瑞磊, 等. PTFE复合体系电弧作用机理探讨及电气性能研究[J]. 湖北电力, 2018(5): 29-33.  
ZHANG Yaodong, LI Cheng, JI Ruilei, et al. Study on arc action mechanism and electrical properties of PTFE composite system[J]. Hubei Electric Power, 2018(5): 29-33.

(下转第104页)