第 52 卷 第 6 期：2493-2507 高电压技术 Vol.52, No.6: 2493-2507
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251570

我国套管关键制造技术研究现状及发展方向综述

王黎明[1]，罗子民[1]，吴光亚[2]，朱旭凯[1]，郑浩然[1]，曹　彬[1]
（1. 清华大学深圳国际研究生院，深圳 515100；2. 中国电力科学研究院有限公司，武汉 430074）

摘　要：套管作为高压输变电系统的核心绝缘与连接部件，其制造技术水平直接决定电网安全稳定性与能源传输效率，是支撑我国“西电东送”双碳目标推进的关键环节。为此针对油浸纸套管、SF_6气体套管、胶浸纸套管及胶浸纤维套管四类主流产品，从材料体系、结构设计、工艺控制 3 个维度，系统综述国内套管关键制造技术现状、行业痛点及发展方向。研究表明：油浸纸套管工艺成熟且 550 kV 及以下电压等级市场占有率超 56%，但油纸绝缘老化与密封渗漏问题突出；SF_6气体套管在特高压直流领域达国际领先，然其高成本与 SF_6温室效应制约环保适应性；胶浸纸套管安全系度较高，逐渐成为特高压工程及市场主流产品，但其依赖进口环氧树脂与皱纹纸，工艺复杂度高；胶浸纤维套管作为国产自主技术，逐渐应用于 550 kV 及以下交流等级工程，但直流领域空间电荷积聚问题待攻关。依托于国家战略发展，我国套管制造技术从“跟跑”进入“并跑、部分领跑”阶段。该文可为我国套管制造技术自主化及高端化发展提供系统性参考，助力特高压电网与新能源传输网络建设。

关键词：油纸套管；SF_6气体套管；胶浸纸套管；胶浸纤维套管；关键制造技术

Overview of Current Status and Development Direction of Bushing Manufacturing Technology in China

WANG Liming[1], LUO Zimin[1], WU Guangya[2], ZHU Xukai[1], ZHENG Haoran[1], CAO Bin[1]
(1. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 515100, China;
2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: As a critical insulating and connecting component in high-voltage power transmission and transformation systems, the manufacturing level of bushings directly impacts the safety and stability of the power grid as well as the efficiency of energy transmission,and represents a key technological link supporting dual-carbon goals through initiatives such as the West-to-East Power Transmission Project. This paper systematically reviews the current status and industrial challenges in the domestic manufacturing of four mainstream bushing products,namely, oil-impregnated paper bushing, SF_6 gas bushing, resin-impregnated paper bushing, and resin-impregnated fiber bushing, from following three perspectives: material systems, structural design and process control. The study reveals that oil-paper bushings feature mature technology and hold a market share of over 56% at voltage levels of 550 kV and below, yet they face challenges such as aging of oil-paper insulation and sealing leakage. SF_6 gas bushings lead internationally in ultra-high-voltage direct current(UHVDC) applications, though their high cost and the greenhouse effect of SF_6 limit environmental compatibility. Resin-impregnated paper bushings offer superior safety performance and are increasingly becoming the mainstream choice in ultra high voltage(UHV) projects and markets, yet they still rely on imported epoxy resin and crepe paper, with a relatively complex manufacturing process. Resin-impregnated fiber bushings, as a domestically developed technology, are gradually being applied in 550 kV and below AC projects, though the issue of space charge accumulation in DC applications remains unresolved. Driven by national strategic development, manufacturing technology of bushing has evolved from “catching up” to “running in parallel and leading in certain areas”. This study provides a systematic reference for the independent and high-end development of bushing manufacturing technology in China, supporting the construction of UHV power grids and new energy transmission networks.

Key words: oil-paper bushing; SF_6 gas bushing; resin-impregnated paper bushing; resin-impregnated fiber bushing; key manufacturing technology

基金资助项目：国家自然科学基金(52577170)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52577170).

0 引言

在现代电力系统中，套管作为高压输变电设备的核心连接与绝缘组件，承担着绝缘支撑与电流传输的双重关键职能[1-2]，既要实现高压导体与接地外壳之间的可靠绝缘，防止电场畸变引发局部放电或击穿故障；同时又须稳定传导额定电流，保障电力能量在变压器、电抗器、换流阀及气体绝缘开关设备等核心设备间的高效流转[3-4]。目前，套管不仅是常规交流变电站的标配部件，更是特高压直流输电工程及新型储能电站实现设备互联与安全运行的核心保障，已全面覆盖交流 12~1 200 kV、直流±50 kV 至±1 100 kV 全电压等级[5-6]。±1 100 kV 古泉换流站和 1 000 kV 福州—厦门等直流与交流特高压工程在套管的安全保障下不断推动我国水火风光电力资源优化调配，实现跨地域大电网互联互通[7]。

从国家能源发展战略视角看，套管的制造技术水平直接关联我国电网的安全稳定性、能源传输效率与“双碳”目标推进进程。在“西电东送”及“北电南供”等跨区域输电工程中，高压套管的可靠性决定了输电通道的连续运行能力[8]。以±1 100 kV 特高压直流穿墙套管为例，其主绝缘和载流连接部件长期服役在强电场应力、高温度应力以及大机械应力的严苛运行状态。任一套管故障均可能导致百万千瓦级输电通道中断，造成巨大经济损失[9]。

套管在实际运行条件下受到多种应力耦合作用[1]，换流变阀侧及穿墙套管作用在直流电压下承受复杂的直流叠加谐波、暂态过电压以及电极反转带来的电应力。安装在换流变网侧等位置的交流套管承受着交/直流复合电场、高次谐波分量和暂态过电压导致的电应力。复杂严苛的电应力负荷随着电压等级和容量的提高对套管的绝缘体系提出了越来越高的要求。套管中心载流导体承接的电流越大，其运行时带来的温升就会更加明显。环氧树脂较差的导热性能限制了其散热效率，导致套管内部长期维持 60~100 ℃的运行温度，部分热点温度甚至超过 120 ℃[10]。当套管的运行温度长期高于环氧树脂的玻璃化转变温度时，这种高温度应力会加速如环氧树脂分子链断裂，同时促进电荷迁移速率，大幅降低放电阈值，增大在套管内部隐蔽性放电的可能[11]。同时，高温度应力也会导致 SF_6气体黏度下降，出现油纸系统绝缘性能波动等问题，增大套管绝缘系统可靠运行的风险[12-13]。套管的安装和运行需要跨越换流站墙体或设备外壳，主绝缘与载流部件须长期承受外绝缘结构、内绝缘结构、导电芯体以及均压环等设备自重带来的机械应力，同时还需要承受运行过程中换流阀的振动、户外侧的风载荷、温度变化引发的热胀冷缩效应以及短路电流产生的电动力，会进一步加剧机械应力作用[14]。因此，国家能源安全稳定发展的需要和严苛的长期运行环境对套管的制造技术提出了非常高的要求[15]。

然而，我国受限于绝缘原材料生产、主绝缘配方开发、关键零部件制造以及生产自动化水平等核心技术，导致国外套管公司在过去几十年间持续处于领先地位。这导致我国在特高压输电网络早期建设中受制于人，付出了更大的经济和时间成本[16]。国外套管公司瞄准我国电网建设对特高压套管的急缺与国内生产制造技术不稳定的矛盾，不仅提高特高压套管的售价，而且利用特高压套管搭售出线装置、绝缘件甚至是变压器，导致我国变压器厂、电网公司在套管采购环节陷入被动，难以成为拥有自主选择权与议价话语权的甲方，显著增加了电力工程的建设成本。更严峻的是，套管运行故障时国外套管公司往往存在售后服务响应不及时、技术支持不充分的问题，既不主动袒露同结构在运设备的潜在风险，也未提供系统性的隐患排查方案，进一步加剧了电网运行的安全压力。2018 年 5 月某站阀厅 400 kV 直流穿墙套管发生对地短路故障，经分析判断为套管内部放电导致。生产厂家要求将套管返回德国原厂检查分析，历时 10 个月才完成对故障套管的组部件解体诊断、故障原因分析和后续整改措施及运维策略定制。套管故障分析诊断过程时间过长，导致同型号其他在运套管无法确保其安全运行的稳定性，需要加强检修和监测力度，甚至进行替换，大幅增加了变电站运行成本[17]。

制造技术的先进性和稳定性是衡量套管性能与可靠性的核心，也是保障我国能源结构调整和能源网络建设的重中之重[16]。当前，我国套管制造行业正处于“从跟跑到并跑、部分领跑”的关键阶段。目前国内套管的制造技术主要受到材料体系、结构设计、工艺控制和自动化水平的影响，部分关键技术仍然对国外厂家存在依赖。我国油纸套管采用的平板纸和铝箔，胶浸纸套管采用的环氧树脂、固化剂、皱纹纸和偶联剂仍然受到美国 Huntsman、美国 Westlake、瑞典 Skultuna Flexible AB 和瑞士 Weidmann Electrical Technology AG 等企业的限制。

电容式主绝缘电容分布结构、载流导杆的机械增强结构、油纸套管机械与密封结构等设计方法仍然依赖国外主流产品。工艺控制方法目前主要受限于大体积干式套管电容芯子的真空浸渍与固化技术[18]。自动化水平的高低限制了胶浸纤维套管和胶浸纸套管电容芯子的绕制技术，从而影响干式套管电容芯子的电场分布[19-20]。

为此，本文从材料开发、结构设计、工艺控制和自动化发展等方面详细综述了近年来我国套管的制造技术现状及发展方向。首先，介绍了我国套管的不同分类方法、不同主绝缘套管的特点和制造技术现状；其次，分别介绍了不同主绝缘套管材料开发现状、结构设计方法、工艺控制技术和自动化程度等方面的研究现状；最后，总结分析了我国套管制造技术存在的短板，重点讨论了套管制造行业未来的研究重点和发展方向，为我国套管制造技术的自主化与高端化发展提供参考。

1 套管关键制造技术现状

复杂的服役条件带给套管强电场应力、高温度应力和大机械应力的工作环境，如图 1 所示。为了满足套管不同工作条件的需求，逐渐研发了液体、气体、固体以及混合绝缘介质的套管产品。按照主绝缘介质分类，套管主要可以分为油浸纸套管、SF_6气体套管、胶浸纤维套管和胶浸纸套管。不同绝缘介质的选择不仅决定了套管的电气性能，还直接影响其性能极限、运行寿命、环境适应能力及维护成本。绝缘介质的选择对保障输电系统的安全可靠运行，确定行业国产化进程具有重大意义。如图 2 所示，自 20 世纪 60 年代开始，我国套管行业逐渐开始发展。从 1958 年中国第 1 根 110 kV 油纸电容式套管的生产到如今实现特高压套管的成熟制造，我国历经 60 余年的发展，已经从套管的进口国转变为特高压套管的稳定出口国。国内高压套管主流生产厂家共有 14 家，其中油纸套管生产厂商 9 家、气体套管生产厂商 3 家、胶浸纸套管生产厂商 8 家、胶浸纤维套管生产厂商 7 家。

在国家战略发展规划的布局和大力推动下，伴随着特高压输电工程的建设，近几十年我国套管行业迎来快速发展。目前，各类套管在交流与直流系统中的最高电压等级应用已形成分层突破的格局，具体可见表 1。油浸纸套管在交流特高压领域应用成熟，但目前基本退出直流特高压领域的竞争。胶浸纸套管和 SF_6气体套管在特高压直流领域实现了工程应用，代表了中国套管技术的最高水平。胶浸纤维套管作为国产自主研发技术，在交流工程中展现了潜力，但直流领域的应用尚需时间进行技术积累和工程验证。

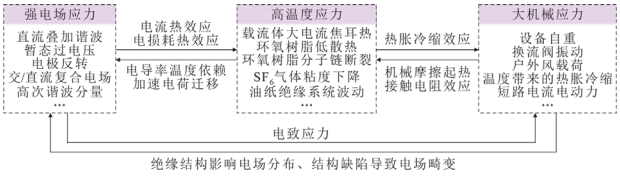


图 1 套管电-热-力应力作用及耦合关系示意图

Fig.1 Electro-thermal-mechanical stress effects and coupling relationships of bushing

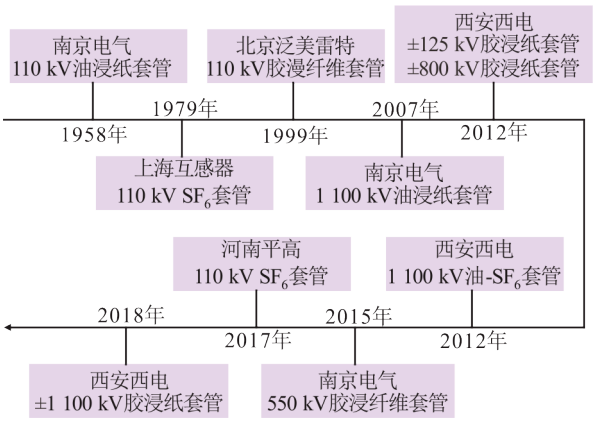


图 2 我国套管产品发展历史

Fig.2 Development history of busing in China

表 1 国内不同主绝缘套管应用及制造的最高电压等级

Table 1 Maximum voltage levels for application and manufacturing of different bushings in China

套管类型	工程应用最高电压等级/kV		试制样机最高电压等级/kV	
	交流工程	直流工程	交流工程	直流工程
油浸纸套管	1 000		1 000	
SF_6气体套管	750	±1 100	1 000	±1 100
胶浸纸套管	1 000	±1 100	1 000	±1 100
胶浸纤维套管	500	±200	1 200	±800

基于以上分析，为系统性梳理我国套管制造技术现状，本文将分别对油浸纸套管、SF_6气体套管、胶浸纤维套管和胶浸纸套管在材料、结构、工艺等制造技术进行详细说明。

2 油浸纸套管制造技术概况

2.1 浸纸套管发展概况及关键问题

油浸纸套管作为高压输变电系统中应用最早、

覆盖范围最广的绝缘套管，凭借其工艺成熟、成本低廉等优势，目前广泛应用于变压器、电抗器与换流阀等高压电力设备中[8,21]。欧美国家对油浸纸套管的研究起步较早，已形成了较为成熟的原料、制造与标准体系。我国在高压套管的研究虽起步较晚，但已取得了阶段性成果，市场占有率较高。目前，750 V 油浸纸套管国内市场占据几乎一半，550 kV 及以下电压等级油浸纸套管国内占据了约 56%的市场份额。

油浸纸套管主绝缘电容芯子由多层电工电缆纸绕卷在导体周围形成，并在真空干燥后以变压器绝缘油进行浸渍。电缆纸绕制过程中，在纸层间插入导电铝箔或金属化纸作为均压电极，从导体到法兰逐层形成电容分压结构，实现对电场的均匀梯度控制，其结构如图 3 所示。

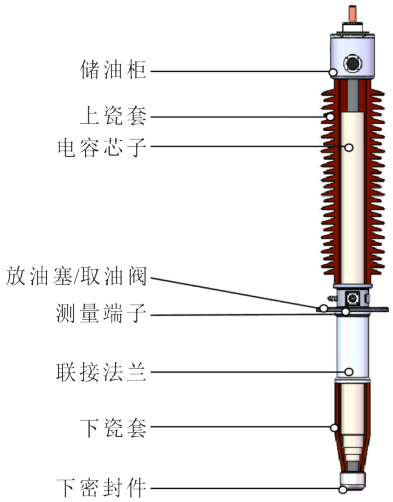


图 3 油浸纸套管结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of oil-impregnated paper bushing structure

油纸套管由于其固有的材料特性和结构设计使其在实际运行中仍存在一定的技术局限性和应用风险。主要可概括为性能易劣化、故障易燃爆与运维成本高这 3 点：1）材料性能易劣化。油纸套管的绝缘性能高度依赖于油-纸复合绝缘结构，其中绝缘油的质量直接影响整体绝缘强度。然而，绝缘油在长期运行过程中容易在电场作用下电离，或因密封失效而受潮从而劣化，导致其各类性能逐渐退化，增加套管发生局部放电和绝缘击穿的风险；2）故障易燃爆。油浸纸套管在内部故障导致电弧时，油的存在可能引发燃烧或爆炸，从而对周边设备造成严重的二次伤害；3）运维成本高。由于油纸绝缘劣化的影响因素较多，因此必须周期性对套管的绝缘油质量、密封性以及内部气泡等进行取样监测，根据油质变化情况决定是否进行维护或更换，在大规模输变电系统中增加额外的运行维护成本[22-24]。

2.2 平板纸与绝缘油的制造与改性研究现状

油浸纸套管的平板纸和绝缘油是其长期可靠运行的核心保障。然而，受材料性能与局放累积等因素影响，油纸绝缘在高电压条件下仍存在失效隐患[25]。近年来，多起典型事故凸显了这一问题。2008 年，广东某 220 kV 变电 2 号主变压器 U 相套管发生爆炸，事故原因系套管本体内部绝缘长期受电场作用逐层击穿，绝缘油急剧膨胀致使瓷套粉碎[26]。2019 年，巴西某水电站 460 kV 套管服役寿命后期因局部放电长期作用引发绝缘击穿，产生了自导杆到套管法兰的贯穿性放电，电弧的高温导致绝缘油迅速气化，产生的高温高压气体导致套管爆炸，电弧点燃气化的气体着火，如图 4 所示。油浸纸套管材料在服役期间易发生绝缘老化与局部放电，而故障时绝缘油的高温膨胀、燃烧还会进一步加剧事故后果。因此，须加强对油纸绝缘材料性能的研究，推动耐热性与介电性能更优的新型材料应用。



图 4 高压套管爆炸破裂示意图[16]

Fig.4 Schematic diagram of high-voltage bushing explosion and rupture[16]

目前，国内油浸纸绝缘用平板纸几乎完全依赖国外进口，主要由芬兰 Tervakoski OY、瑞典 Ahlstrom Sweden AB 等国外企业供应，国内产品替代能力较弱。传统的绝缘纸主要由纤维素、半纤维素与木质素构成[27]，成本低廉，但在电场、温度水分等作用下会发生老化分解，造成不可逆的性能下降[23]。目前用于油纸绝缘的平板纸改性方法主要包

含纳米材料掺杂、物理掺杂改性与纤维合成绝缘纸等技术手段[28]。

纳米粒子掺杂将影响绝缘纸极化电流和界面电荷积聚，进而改变油纸绝缘体系的介电性能[29]。如图 5 所示，莫洋等将质量分数为 2%的纳米 Al_2O_3 掺杂于绝缘纸中，通过 Al_2O_3的纳米量子效应降低了纤维素绝缘纸的相对介电常数，提升了体积电阻率，使其寿命指数提高约 20%[30]。物理掺杂改性方法是通过将功能性化合物或纤维直接引入绝缘纸，对纸张原有纤维结构影响较小，可在保持初始机械强度的同时，增强绝缘纸的耐热性和抗老化性能。廖瑞金等研究了胺类热稳定剂对绝缘纸的改性效果，胺类分子与水、酸反应活性高于纤维素，可优先与老化产物结合，从而提升绝缘纸的抗热老化性能[31]。纤维合成绝缘纸是利用新型纤维材料替代传统纸的改性方案，目前应用最广的替代材料是芳纶纸，其具有轻量化、耐温等级高、绝缘性能优异等突出优势[32]。BiH 等将芳纶绝缘纸应用并设计了一类 126 kV 油纸套管[25]，与传统纸套管相比，该套管电容芯体积减少 50%，电场分布更加均匀，局部放电起始电压显著提高。

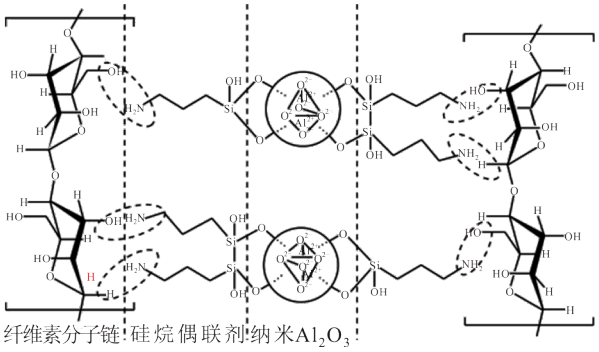


图 5 纳米 Al_2O_3 与纤维素链的界面连接结构[30]

Fig.5 Interfacial connection structure of Al_2O_3 between cellulose chains[30]

目前国内对于绝缘油的制造和开发技术完全实现自主，油浸纸套管的绝缘油完全实现国产化。酯基绝缘油因燃点一般超过 300 ℃、生物降解率可达 97%~99%以及具有良好的电气性能，被视为矿物油的理想替代物[33]。其种类主要包括天然酯和合成酯，天然酯来源于精炼植物油，合成酯则通过脂肪酸与多元醇酯化制备，具备更优的低温流动性和氧化稳定性。廖瑞金阐述了油纸绝缘系统中气体的生成、溶解与扩散机理[34]，如图 6 所示。绝缘油热解产生 H_2、CH_4、C_2H_6 等烃类气体；纤维素热解产生 CO、CO_2 及少量烃类；油纸绝缘发生放电故障产生的气体主要为 H_2、C_2H_2、CH_4、C_2H_4。气体在油纸绝缘系统中的溶解和扩散分别由亨利定律和 Fick 扩散定律梳理。尽管酯基绝缘油在高燃点、环保性和电气性能方面展现出明显优势，但其黏度偏高、氧化安定性较差的问题仍未完全解决[35]，还须作进一步深入研究。

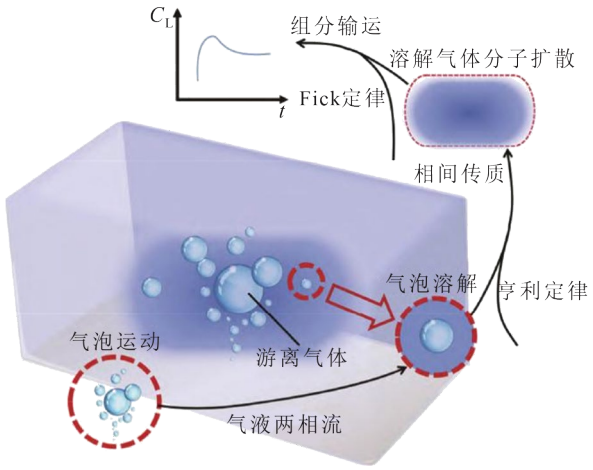


图 6 油中气体溶解和扩散过程[35]

Fig.6 Dissolution and diffusion process of gases in oil[35]

2.3 油浸纸套管绝缘结构及工艺改良技术现状

油浸纸套管的制造工艺流程如图 7 所示，主要包含以下步骤：1）电容芯子卷制，将电极和电缆纸卷绕成多层电容结构；2）电容芯子真空干燥，通过温控和高真空彻底脱除内部水分；3）装配，在高洁净度环境下密封组装部件；4）真空压力注油，利用真空和压力使绝缘油充分渗透。工艺的关键节点为电容芯子的真空干燥与真空压力浸油，分别决定套管绝缘的含水率与内部气隙量，直接影响套管的介电性能和长期运行可靠性，须在严格工艺条件下实施。

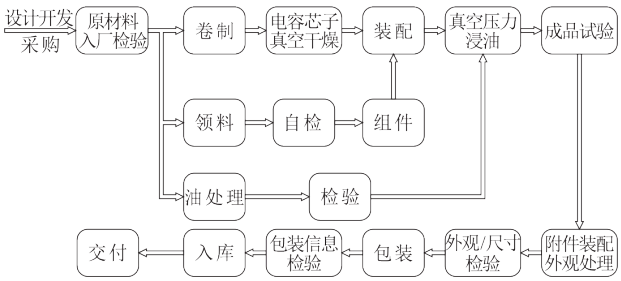


图 7 油浸纸套管生产工艺流程图

Fig.7 Production process flowchart of oil-impregnated paper bushing

油浸纸套管内绝缘为由绝缘油浸渍平板纸构

成的电容芯子，内绝缘电场的分布主要由电容芯子极板布局与绝缘层厚度进行调控，以实现轴向与径向电场的协调控制。随着运行年限增长，设计不合理的内绝缘结构将导致套管绝缘体系的老化，不当结构易诱发局部放电，最终造成故障。同时，油纸绝缘系统受到水分的影响较大，套管的密封结构是限制其长期稳定运行的重要部分。

早期设计采用等电容法，通过调整极板，使各层电容近似相等，实现轴向电压均分。该方法虽然简单易行，但难以控制径向电场强度，且端部易发生电场畸变，局放裕度偏低。20 世纪 80 年代提出了等厚度法，采用统一纸层厚度并优化箔极长度的策略，有利于缩小套管尺寸，但调节过程繁琐[8]。为进一步控制局部电场分布，提出了大小极板法，通过主副极板的交替组合减缓电场突变，但其设计调节复杂，工程上多依据经验进行[21]。

当油浸纸套管长期服役于湿度较大的环境中，存在着结构受潮、套管过热等安全隐患，对套管密封性能失效有着较大危害。根据国家电网 23 家省公司变压器类渗漏缺陷的统计数据，密封圈处渗漏油问题占比为 72.6%。若套管密封失效问题长时间未发现或未处理，会导致变压器表面积累油迹和油珠，导致变压器表面绝缘能力的大幅下降，影响变压器设备的安全运行。在潮湿环境中水分入侵进一步考验着变压器的绝缘性能，严重时甚至会引起变压器套管起火爆炸，套管起火后将会引起非常严重的后果。国网某公司分析了一起套管密封失效事故，运维人员发现某 220 kV 变电站的 3 号主变器 110 kV B 相套管端头处发生渗油，平均每分钟渗漏 5 滴，同时套管的油位显示在极限区。事故进行分析结果显示由于生产工艺问题造成套管端头和主变器的密封性不强，导致套管出现内渗漏油现象。如图 8 所示，套管密封圈长时间服役于套管高压力以及高温的运行环境，导致 O 形圈出现局部损坏现象，最终造成了套管密封失效以及渗漏油故障的产生。

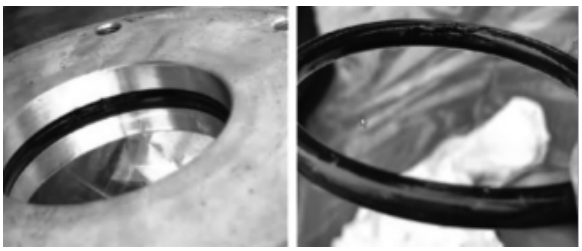


图 8 O 形圈局部损坏

Fig.8 Partial damage to the O-ring

3 SF_6 气体套管制造技术概况

3.1 SF_6 气体套管发展概况及关键问题

气体绝缘套管最先在国外被提出与发展，已被广泛应用于超、特高压输电系统。国外瑞士 ABB、法国 Alstom 与意大利 Passoni&Villa 等电力设备制造商在结构设计、材料、制造工艺以及应用领域均有深厚的经验积淀。国内气体绝缘套管的技术研发起步相对较晚，但随着特高压输电工程的持续推进，国内企业已逐步掌握了 SF_6 气体套管的核心制造工艺、气体密封技术、电场均匀化设计等关键技术，实现了从引进到自主创新再到赶超的发展模式。目前，平高电气在气体绝缘套管方面已达到国际先进水平，研制完成了±50 kV 至±1 100 kV 系列化直流穿墙套管，同时具备根据工程参数要求定制研发的能力。

如图 9 所示，SF_6 气体套管通常由导电杆、环氧树脂/陶瓷制成的中空绝缘支撑筒、套管法兰和外部绝缘子构成。导体为实心/中空的铜质导杆，贯穿整个套管。导体周围充满高纯度的 SF_6 气体，一般在数个大气压的压力下工作，以提高绝缘强度。SF_6 气体套管目前的不足与缺陷主要为制造与维护难度较大以及环保适应性差。

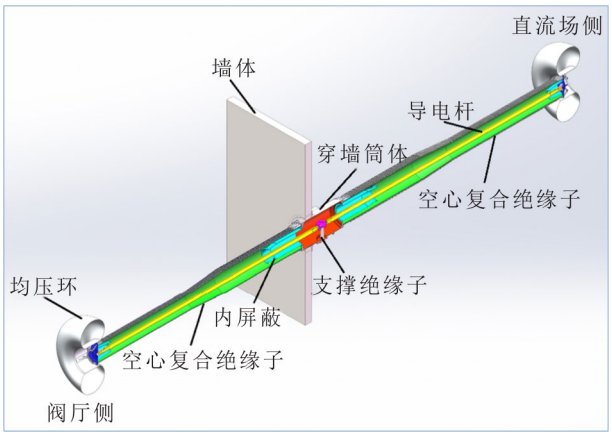


图 9 1 100 kV 直流穿墙套管结构示意图

Fig.9 Schematic diagram of 1 100 kV DC wall-through bushing structure

由于气体绝缘套管内部通常充填 SF_6 等绝缘气体，为保持优良的绝缘状态要求密封性非常严格，且其结构设计较为复杂，对材料、工艺和装配精度要求高，对生产以及应用后的监测提出了较高的要求[36]。由于以上多种因素，使得目前 SF_6 气体套管的生产成本远高于传统油浸纸套管。同时，SF_6 气体是一种强温室气体，其全球变暖潜力是二氧化碳

的 23 500 倍，且大气寿命超过 3 200 年，一旦释放到环境中，极难降解。

3.2 气体绝缘介质的物理及化学改性方法

气体套管主流采用的绝缘材料 SF_6 仍面临严重的环保性与低温运行适应性两方面难题。SF_6 气体的使用受到了国际环保法规的严格限制，多个国家和地区已开始逐步限制其应用。另一方面，SF_6 气体在低温下易发生液化，在高寒或高海拔地区运行时存在较大绝缘失效风险。2020 年内蒙古武川站 1 支 500 kV SF_6 瓷质套管内壁液化形成液膜，畸变原电场从而引发气体击穿，最终导致套管炸裂失效[37-38]。

针对上述问题，近年来围绕 SF_6 气体介质的优化替代方法，主要提出 3 类可行方案：1）天然气体替代，主要包含 CO_2、N_2 与空气等；2）SF_6 混合气体替代，将 CO_2、N_2 与 SF_6 气体按比例混配；3）新型强电负性气体替代，现以性能较优的 C_4F_7N 为代表[39]。郭晓雪等对 CO_2 及其与 O_2 混合气体的绝缘性能进行探究[40]，发现高温条件下 O_2 含量增加且其电子吸附截面远大于 CO_2，即适当比例混合可显著改善天然气体的绝缘性能。通过 CO_2、N_2 改善单一 SF_6 低温液化问题，同时可保持较高绝缘性能并减少 SF_6 用量。柳玉洁对比了 SF_6-N_2 混合气体与纯 SF_6 的局部放电特性[41]。SF_6-N_2 在沿面、悬浮和尖端放电缺陷下的放电起始电压分别降至纯 SF_6 的 50%、48%与 82%，且其放电图谱与统计特征存在显著差异。近年来，以 C_4F_7N 为代表的新型强电负性气体凭借其优异的绝缘性能与环保优势受到广泛关注。该气体于 2016 年由 Kieffel Y 等首次提出[42]，其 GWP 仅为 2 090，绝缘性能约为 SF_6 气体的 2 倍，但其常温常压下液化温度为−4.7 ℃，需要与天然气体混合使用。

综上所述，目前针对 SF_6 气体替代研究虽取得一定进展，但各类替代方案均存在一定的缺陷。同时，现阶段新型气体开发多基于经验和试错方法，尚缺乏对分子结构与绝缘性能关系的深入机理解析[43-44]。

3.3 气体套管内绝缘结构优化

SF_6 气体套管的工艺流程如图 10 所示，其主要步骤为：1）空心复合绝缘子制造；2）载流导电杆加工，对大长度导体进行定位焊接并检测；3）屏蔽筒及均压环加工，采用碱洗等工序，控制壁厚、粗糙度及机械强度；4）装配，利用离子风吹拂与高压水洗祛除异物，在超净车间内进行总装；5）气体处理与充气，通过多级真空抽干除去水分与空气杂质，充注高纯度 SF_6 气体。

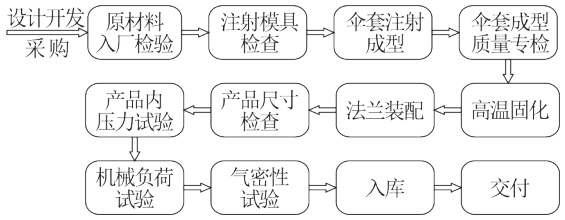


图 10 SF_6 气体套管生产工艺流程图

Fig.10 Production process flowchart of SF_6 gas bushing

由于 SF_6 气体不具备机械承载能力，气体套管内部须设置固体绝缘子以支撑中央导体，提升其机械强度。目前，SF_6 气体套管在结构设计上仍然存在两方面问题：1）电场整体调控能力不足，存在局部高场强区域；2）支撑绝缘子存在较高的沿面闪络风险。

SF_6 气体套管主要依赖内部屏蔽电极和支撑绝缘件来约束，调控能力有限，且中心导体、内屏蔽电极与伞裙边缘等表面易形成高场区，增大局放风险[14,16]。现有研究普遍聚焦于内屏蔽结构优化，通过改进电极形状与参数配置来缓解高场强集中与电场畸变，呈现出由局部构型改良向参数化、智能化演进的趋势。李乃一等进一步对双层屏蔽结构参数对电极表面场强及局放起始场强的影响开展研究，指出边缘半径增加 4 倍可使边缘场强降低 35%，并提出边缘外形与电极尺寸分离设计原则，以提升电场均匀性和局放裕度[6]。张宏亮等则进一步引入智能算法，结合进化策略与有限元法对 1 100 kV 套管双层屏蔽结构开展多目标优化，构造基于内绝缘电场的多目标评价函数，为各参数设计提供可选最优空间[45]。

直流电压长期作用会使电荷在支撑绝缘子的法向电场分量影响下发生积聚，且套管在制造或运行中产生的金属颗粒会进一步附着在其表面，从而畸变沿面电场并诱发闪络[46-47]。现阶段的研究主要关注绝缘子形态结构改良与支撑改造。如图 11 所示，刘杉等[7]基于±800 kV 特高压直流气体穿墙套管故障分析，发现法兰上部垂直绝缘子因金属颗粒积聚易闪络，提出取消该绝缘子并保留底侧斜撑，同时将滑动触头移至低场强独立腔体，如图 12 所示，改进结构已稳定应用于±800 kV 气体套管。

内屏蔽结构优化已成为改善 SF_6 气体套管电场分布的核心手段，研究已由构型改良发展至智能优化，关键部位场强裕度提升显著。但支撑绝缘子结

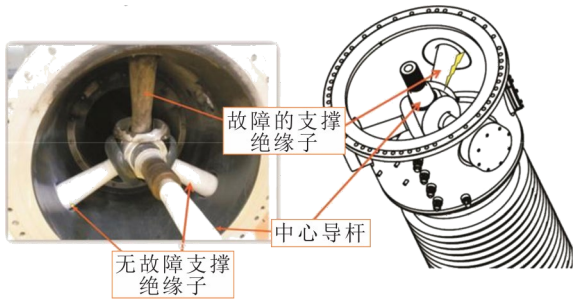
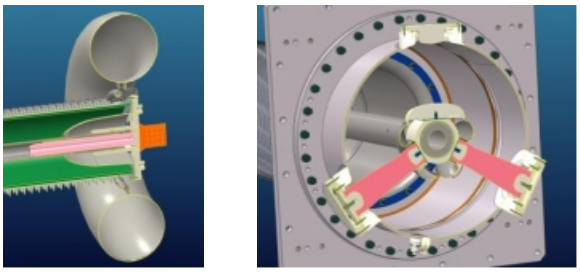


图 11 气体套管中闪络发生位于上部支撑绝缘子[7]

Fig.11 Flashover occurs at the upper support insulator[7]



(a) 新热致补偿装置 (b) 新支撑绝缘子结构

图 12 气体套管支撑绝缘子新结构[7]

Fig.12 New structure of supported insulator with gas bushing[7]

构优化多基于气体绝缘开关设备或输电线路[48]，尚缺乏面向套管工况的系统化研究。

4 胶浸纸套管制造技术概况

4.1 胶浸纸套管发展概况及关键问题

1971 年 Isogai 等首次提出将皱纹纸与环氧树脂相结合的绝缘材料并应用于套管制造，凭借其无油环保、尺寸小、可靠性高与易于维护等优良特性，广泛用于各类电力设备出线、GIS 变电站与特高压直流工程[49]。在欧美部分国家中，胶浸纸套管已经逐步取代了传统油浸纸套管成为市场主导。国内于 19 世纪 70 年代大力发展胶浸纸绝缘套管的研究，目前已经具备全电压级的制造能力，并大量出口到欧洲、北美及东南亚等地区。

胶浸皱纹纸电容式套管的结构如图 13 所示，核心组成部分包括电容芯子、导电杆、空心绝缘子、法兰以及端部均压装置等。电容芯子由多层金属电极箔与皱纹纸交替卷绕，并在真空下浸渍环氧树脂后固化而成。为满足特高压应用需求，部分胶浸纸套管还设计为填充复合型结构，进一步提升沿面绝缘性能并降低局部场强。常见的填充介质包括 SF_6 气体、类聚氨酯泡沫或特种液态胶等[50-51]。

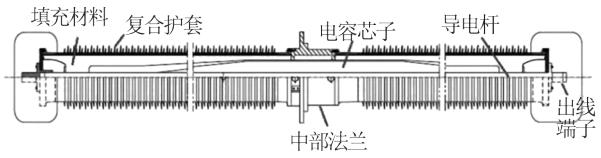


图 13 胶浸皱纹纸套管结构示意图[45]

Fig.13 Schematic diagram of resin-impregnated paper bushing structure[45]

目前，胶浸纸套管仍然存在成本高、工艺周期长、芯体易受潮发热和电场分布不均等问题：1）胶浸纸套管电容芯子的主要原材料来源于进口，且套管前期投入固定资产的成本较高；2）胶浸纸套管采用真空环氧树脂浸渍工艺，原材料脱气、电容芯子干燥、浇注、固化周期达到 10~70 d；3）胶浸纸套管电容芯子固化完成后需要进行机加工，机加工后纸纤维易吸潮，在大电流作用下产生高温积聚；4）胶浸纸套管多绝缘结构配合带来电场分布不均，同时热不平衡引起的芯体介电参数分布同样加剧了电场集中。

4.2 胶浸纸套管绝缘材料国产化发展现状

国内胶浸纸套管关键原材料对外依赖性强，其中构成套管主绝缘的电容芯子的环氧树脂与皱纹纸材料几乎完全依赖进口。目前，国内部分厂家可以实现交流 220 kV 基础环氧树脂原材料和配方工艺的自主可控，也可以实现直流 500 kV 级别套管的配方工艺可控。然而，高电压等级以及直流系统套管用的基础原材料开发技术、配方开发技术以及固化工艺技术仍待进一步突破。

皱纹纸生产所用原料一般为针叶木纤维[52]。不同于传统油纸套管直接采用的平板绝缘纸，皱纹纸在制备过程中须做起皱处理。如图 14 所示，通过在纸板层间加入波状压花芯形成凹凸表面，增大纸张的孔隙率与柔韧性，使得树脂能够更充分地浸润纤维间隙，形成致密的无气隙芯子结构[53]。尽管我国

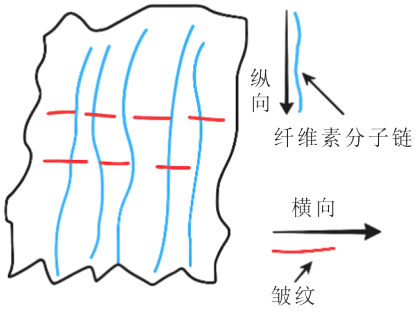


图 14 绝缘纸起皱示意图[53]

Fig.14 Schematic diagram of wrinkled insulation paper[53]

环氧树脂总产量位居全球前列，但用于胶浸纸套管的高性能环氧体系仍依赖进口，环氧树脂与固化剂等关键材料长期被美国 Huntsman 与美国 Westlake 等国外企业所垄断。国产原材料在纯度与基础性能等方面的研发积累薄弱，尚缺乏成熟配方与系统化验证。

尽管皱纹纸在干式套管中的关键作用已得到广泛认可，但针对其性能提升与材料替代的研究仍相对有限。目前已有研究主要聚焦于对皱纹纸理化特性分析、分子改性与替代材料探索。许天蕾等则尝试以纯化处理的竹纤维纸替代皱纹纸，所制环氧-竹浆纸复合材料在介电性能、击穿强度与热稳定性方面接近甚至优于传统结构[54]。周海滨等通过国内外厂家皱纹纸性能对比试验筛选出影响皱纹纸介电、热力性能的关键理化参数，并采用接枝改性手段向纤维素中引入 3 类典型官能团[55]。结果表明，苯环接枝显著提高材料热稳定性且有助于增强材料的力学性能，亚甲基长链可有效提升其介电强度与绝缘性能，为皱纹纸的靶向分子改性提供了理论基础。

目前针对环氧树脂复合物的改性及高性能配方的开发主要集中在低黏度、高耐热、高韧性和优秀绝缘性能的提升。固化过程中的体积收缩以及固化后高度交联的三维交联网络，导致环氧复合物的韧性不足[56]。然而环氧复合物的增韧方法常以复合物耐热性能的下降和刚性的缺失为代价，导致环氧复合物耐热与韧性无法协同提升，如图 15 所示。针对上述难题，赵玉顺等采用复配固化剂与 2-甲苯缩水甘油醚对双酚 A 型环氧树脂韧性与耐热性能协同提升[57]。当 2-甲苯缩水甘油醚添加质量分数为 15% 时，复合材料的冲击强度提升 123.03%、弯曲强度提升 61.71%、拉伸强度提升 5.31%，在未降低热性能的前提下实现了刚性与韧性的协同提升。通过设计非线性均压材料可以有效调控胶浸纸套管的绝缘强度。Shini lshibe 等学者考虑人工控制 ZnO 压敏微球在聚合物内的分布以形成笔直的导电通道,更有利于对于复合物非线性的控制[58]。环氧复合物表现出典型的非线性介电特性。

皱纹纸与环氧树脂的相关研究虽已取得一定进展，但面向胶浸纸套管应用的材料体系仍缺乏针对性攻关，关键技术短板未能有效突破。当前皱纹纸相关研究较少，缺乏针对其浸渍性、延伸性及与环氧界面适配等关键问题的系统研究。环氧树脂方面，现有研发多聚焦于纯树脂体系的性能优化，缺

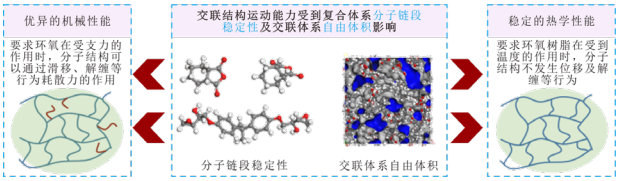


图 15 环氧复合物的机械性能及热学性能的竞争关系

Fig.15 Competitive relationship between the mechanical and thermal properties of epoxy composites

少与皱纹纸协同匹配的配方设计，难以满足套管应用需求。

4.3 胶浸纸套管内绝缘结构优化

胶浸纸套管的工艺流程如图 16 所示，主要包含以下步骤：1）电容芯子绕制，将电极与皱纹纸交替绕制；2）电容芯子干燥脱气，通过逐级升温和高真空脱去水分和挥发物；3）真空浸渍固化，在加压真空下使环氧树脂混合物充分渗透纸层并使树脂交联形成致密绝缘芯子；4）机加工与总装，对电容芯子进行修整加工，与其余部件完成总装。工艺的关键节点为电容芯子的真空浸渍固化，其决定绝缘介质的致密性与内部气隙量，若浸渍不均或固化不充分，将形成局部电场集中、残余应力和树脂裂纹，显著增加局部放电风险并降低耐热等级。

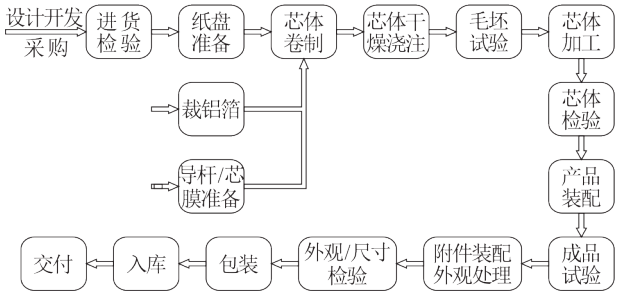


图 16 胶浸纸套管生产工艺流程图

Fig.16 Production process flowchart of resin-impregnated paper bushing

胶浸纸套管在运行中需要传导数千安的大电流，套管内部的微小缺陷都会导致电阻增强和局部过热现象。表带触指及引线接头等电连接部位最容易发生过热故障。2016 年 10 月某站套管阀厅侧本体表面不均匀发热，最高温度为 34.6 ℃，最低温度为 22.1 ℃，表面温差为 12.5 ℃，如图 17 所示。将套管解体发现铜铝对接位置表带触指有黑色烧蚀痕迹。分析认为套管铜铝对接位置表带触指受力不均，载流接触面未镀银，内部摩擦磕碰产生金属粉末等因素导致该处接触电阻增大引起过热现象。通过对

该结构分析计算表明，内部铜铝对接位置接触电阻增大约 80 倍时，铜铝对接位置热点温度上升到 210 ℃，套管外护套处温差达到 11 ℃。

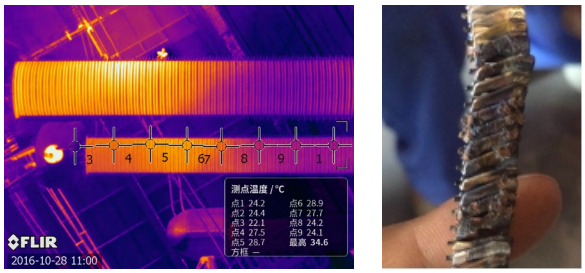


图 17 某站套管阀厅侧本体表面不均匀发热及其表带触指烧蚀痕迹

Fig.17 Uneven heating on the surface of the casing valve hall side at a certain station and burnt marks on its surface straps from touch

在热场优化设计上，当前胶浸纸套管的研究主要从内部结构改良与外部冷却强化两方面展开。谢更生等提出引入衬管结构并增大导体直径的方案，以此降低套管热点温度，使套管载流能力提升至 6 736 A[59]。刘杉等提出了基于强制空气冷却的散热方案，在套管外部设置集中式风冷系统以增强中心导体与电容芯体的散热能力[60]。结果显示，风冷系统使套管散热能力提升 5 倍，通流能力提高 45%。史石峰等则引入水冷结构来提升套管散热性能，使套管温度分布趋于均匀，整体最高温下降 22.1 ℃[61]。

现有研究针对胶浸纸套管结构已围绕电场分布与热效应积聚 2 大问题提出了多种优化方案。但多数优化方案仍停留在仿真分析或小规模试验阶段，工程应用验证不足。引入热管与外部散热系统的方案对套管本体结构改动较大，制造与维护成本较高，仍须考察长期运行可靠性与环境适应性。

5 胶浸纤维套管制造技术概况

5.1 胶浸纤维套管发展概况及关键问题

胶浸纤维套管是我国自主研发的新型干式无纸套管，其生产原料、设备等均可实现完全国产化，具有打破国外垄断、支撑特高压自主发展的重要意义。相比前 3 类套管，其不仅具备无油防爆的特性，还具备更优异的防潮性和力学强度。我国于 2001 年首次实现胶浸纤维套管的工程化应用，并在 2008 年将其正式纳入国家标准 GB/T 4109—2008，命名为“胶浸纤维套管”。目前国内生产厂家众多，可覆盖 15~550 kV 交流电压等级，但在直流方面使用受限，仍需进一步攻关。

胶浸纤维套管也为干式电容结构，如图 18 所示，其核心组件包括玻璃钢电容芯子、均压球与瓷/复合空心绝缘子等。主绝缘电容芯子则由玻璃纤维增强环氧树脂构成，内部为金属电极与绝缘介质交替叠加形成的轴向分布电容结构，目前主要有真空浸渍绕制与预浸纤维连续绕制 2 种成型方式。相比胶浸纸套管，其芯子完全取消了纸介质，从源头上避免了绝缘纸吸湿、老化、热稳定性差等问题。

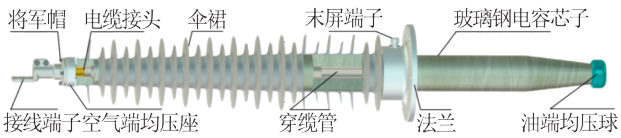


图 18 胶浸纤维套管结构示意图

Fig.18 Schematic diagram of resin-impregnated fiber bushing structure

然而，胶浸纤维套管的缺点也非常明显。胶浸纤维套管是在非真空条件下缠绕固化而成，在现有工艺条件下，与油浸纸套管、胶浸纸套管相比合格率较低。同时，由于胶浸纤维套管材料本身的绝缘性能偏低，造成与油浸纸套管、胶浸纸套管相比尺寸偏大，设计时须留有足够的裕度，在现有的工艺条件下，限制了高电压等级产品的生产。

5.2 胶浸纸套管内绝缘结构优化

不同于胶浸纸套管，胶浸纤维套管用的环氧树脂已基本实现自主化生产。胶浸纤维材料由玻璃纤维增强相与环氧树脂基体构成，玻璃纤维凭借高强度和高模量承担主要机械载荷，环氧树脂形成连续相结构，不仅实现纤维间的有效黏结，还承担载荷传递和防护作用[62]。环氧-玻纤界面则为载荷传递的关键通道，其结合质量直接决定了复合材料的整体性能[63]。然而，由于玻璃纤维表面光滑且含氧极性基团较少，其与环氧树脂的机械嵌合和化学相容受限，从而使界面结合力较弱。当复合材料承受非均匀或冲击载荷时，该界面缺陷将削弱载荷在环氧树脂与玻纤间的有效传递，造成局部应力集中，并促使纤维逐渐拔出、裂纹沿层间扩展，最终引发力学及绝缘性能的劣化。

针对上述问题，当前研究主要从表面处理、偶联剂改性与纤维材料替代等路径开展起绝缘性能优化的研究。通过调控纤维表面形貌与组成、构建界面化学桥梁以及引入耐热新型纤维等方式，提升胶

浸纤维材料力学、热学与绝缘特性。王立汉等在硅烷偶联剂改性玻璃纤维的基础上，采用真空空气等离子体进一步处理，发现其可在纤维表面引入更多—OH、—C═O 等活性基团[64]。在联合处理 1 h 后，胶浸纤维材料的界面结合更为紧密，拉伸、弯曲和冲击强度分别提升 40.1%、3.02%和 143.4%，玻璃化转变温度亦明显上升。王春雷等比较了有机硅偶联剂 KH550 与 KH560 的预处理法和基体添加法对胶浸纤维材料吸湿与力学性能的影响[65]。结果表明：预处理法可降低材料前期吸湿速率，添加法则可提高干态剪切强度。

5.3 胶浸纤维套管结构设计及制造技术

胶浸纤维套管的制造工艺流程见图 19，主要步骤为：1）芯体绕制，恒温下将连续纤维与环氧体系缠绕成型；2）芯体高温固化，依据厚度设计固化曲线，使树脂充分交联；3）芯体机加工，精控车削参数并完成尺寸修整；4）总装与伞裙安装，完成法兰灌封与紧固，装配伞裙与端部件并进行密封试验。工艺中的关键控制环节为芯体绕制与高温固化，前者直接影响纤维排布的致密性与树脂浸润的充分性，若张力或角度控制不当，易形成干纱区或夹杂气隙；后者则决定树脂的交联程度，若热场分布不均或固化曲线设计不合理，将导致内应力集聚与树脂裂纹隐患，进而影响套管的绝缘强度与运行寿命。

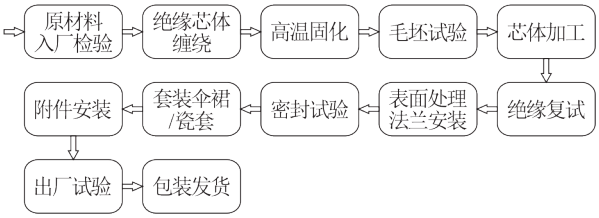


图 19 胶浸纤维套管制造流程图

Fig.19 Flowchart for the manufacturing of epoxy-impregnated fiber bushing

武汉南瑞集团宋友等成功研制出首支 1 200 kV 胶浸纤维穿墙套管[66]，且已稳定投运。该套管采用胶浸纤维复合材料绝缘层与半导体适形材料电容屏交替间隔绕制成阶梯状电容芯体，依据径向场强相等原则设计其参数，结合工艺优化，解决了超长芯体中易出现的气泡、分层与开裂问题。同时南瑞集团与南京电气已联合开发出±400 kV 胶浸纤维穿墙套管[67]，围绕直流环境下的空间电荷积累、电场畸变与机械性能控制等问题，设计了胶浸纤维-SF_6 复合绝缘结构，并通过电场分布轴对称相等法与径向极板平衡法实现电容屏结构优化。所产套管电场无尖端场畸变，具备良好的电气安全裕度与机械可靠性。

6 套管制造技术现存问题总结

本文从材料开发、结构设计、工艺控制等角度对我国套管制造技术的发展现状进行了总结。将不同套管产品现阶段不足之处对比总结如表 2 所示。

表 2 不同主绝缘套管现阶段的不足之处汇总表

Table 2 Summary of current shortcomings of different main insulation bushings

套管类型	材料体系	结构设计	工艺控制
油浸纸套管	1)高性能平板纸依赖进口，国内替代能力较弱； 2）油纸复合绝缘在电、热、水分综合作用下性能易劣化，绝缘油易受潮、电离； 3）矿物绝缘油燃点低，故障时易燃爆； 4)环保性不及新型酯类绝缘油	1）电场分布优化复杂，端部易发生电场畸变； 2）密封结构可靠性不足，导致渗漏油故障频发	干燥要求严格，水分和气泡直接影响绝缘寿命
SF_6 气体套管	1)SF_6气体环保性差，使用受国际法规的限制； 2）SF_6气体低温适应性差，高寒地区运行有绝缘失效风险； 3)替代环保替代气体生产技术仍不成熟	1）中心导体、屏蔽电极边缘易形成高场强区； 2）支撑绝缘子表面易积聚金属颗粒，诱发沿面闪络； 2）内部结构复杂，电场调控和机械配合设计难度大	密封要求极高，对焊接、密封及装配工艺的洁净度要求极严
胶浸纸套管	1）高性能皱纹纸、环氧树脂等关键原材料严重依赖进口； 2)国产皱纹纸关键性能上与国际先进水平仍有差距	1）表带触指等连接件易成为过热点，带来过热故障； 2）特高压等级套管大尺寸电容芯子内部电场均匀化和无缺陷固化难度极高	1）工艺周期长，生产效率低； 2）超大体积芯体对基础原材料和固化工艺要求高； 3）固化后的机加工易带来后处理受潮，影响绝缘性能
胶浸纤维套管	玻璃纤维表面光滑，与环氧树脂基体界面粘结点易成为性能薄弱环节	因材料本身绝缘强度受限，为提升绝缘裕度，导致其尺寸较大	1）常压环境下缠绕固化，易引入气泡、产生分层，产品合格率相对较低； 2）大型玻纤增强芯体固化过程中产生的内应力较大，易导致开裂

7 结论与展望

基于上述内容的介绍与分析，本文总结了针对国内套管未来发展的展望如下所述。

1）关键原材料的研发。在现有环氧树脂配方

基础上，开发常温介电损耗低的产品，进一步研发适配不同电压等级的配方料及基础原料。开展高耐热、高韧性、低黏度环氧树脂材料配方开发，同步实现固化速率可控，以缩短试验周期、提升生产效率。对标进口皱纹纸的电气、机械及工艺性能，明确国产皱纹纸的套管适配性指标，开展其在交流胶浸纸套管中的应用设计与制造技术研究。研究不同规格皱纹纸的透气度、抗拉性能与介损值差异，针对性设计干燥工艺、卷绕张力参数，确保各规格皱纹纸最终含水量满足内控要求。

2）关键生产工艺的攻关。攻克不同技术路线特高压交直流套管的成套设计技术，开展多物理场耦合仿真、大型芯体结构设计与成型、超大芯体装配等核心技术研究，提升产品绝缘裕度以弥补工艺不足导致的性能分散性。开展油浸纸套管阻燃抗爆技术攻关、环保型植物油在套管中的应用可行性研究、胶浸纸套管生产工艺优化、胶浸纤维电容芯子缠绕车间环境优化及真空胶浸纤维套管生产工艺研究。提升在线监测技术水平，研发智能自感知套管与数字孪生技术；推进各类型套管尺寸标准化，通过统一规格减少产品品类、提升互换性。

3）制造设备和软件协同优化。为提升套管产业链自主可控水平，须在生产设备与设计软件方面协同推进国产化替代。加强与机床领域企业的技术协同，开展针对 12 m 及 15 m 等长尺度卷绕机开发技术的研究。通过校企合作开展同工况产品仿真分析，结合实际验证数据修正国产软件的计算逻辑与程序，提升仿真分析准确性。

4）套管制造关键问题攻关。针对当前电力套管生产过程中存在的关键技术瓶颈与性能风险，聚焦材料界面、电气性能、环境适应性及工艺可靠性等重点问题，开展系统性技术攻关。重点关注界面与密封性能优化、长期服役与可靠性验证、特殊运行条件适应性提升、新型环保与自动化工艺开发和材料国产化研发等方面的研究。

参考文献 References

[1] 吴广宁，史志鹏，林牧，等. 特高压直流套管电热特性及电接触系统失效机理研究综述[J]. 高电压技术，2025，51(8)：4130-4145.
WU Guangning, SHI Zhipeng, LIN Mu, et al. Research review on electro-thermal coupling properties and failure mechanisms of electrical contact systems in ultra-high voltage DC bushings[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 4130-4145.

[2] 刘云鹏，杨瑞，郑林，等. 特高压换流站阀厅状态监测与智能运维研究综述[J]. 高电压技术，2025，51(8)：4285-4299.
LIU Yunpeng, YANG Rui, ZHENG Lin, et al. Review of ultra-high voltage converter station valve hall status monitoring and intelligent operation and maintenance[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 4285-4299.

[3] 刘轩东，李敏洁，史万豪，等. 胶浸纸干式套管气-固界面绝缘研究综述[J]. 高电压技术，2025，52(5)：2039-2051.
LIU Xuandong, LI Minjie, SHI Wanhao, et al. Review of research on gas-solid interface insulation of dry-type epoxy resin impregnated paper bushing[J]. High Voltage Engineering, 2025, 52(5): 2039-2051.

[4] 张施令，彭宗仁，宁鑫，等. ±400 kV 换流变压器阀侧套管绝缘结构设计[J]. 电力自动化设备，2021，41(6)：199-206.
ZHANG Shiling, PENG Zongren, NING Xin, et al. Insulation structure design of valve side bushing of ±400 kV converter transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 199-206.

[5] 张锐，全姗姗，周婧. 我国高压套管标准现状分析[J]. 中国标准化，2025(17)：53-62.
ZHANG Rui, QUAN Shanshan, ZHOU Jing. Status and analysis of standards for high-voltage bushings in China[J]. China Standardization, 2025(17): 53-62.

[6] 李乃一，彭宗仁，刘鹏. 特高压 SF_6 气体绝缘套管内屏蔽结构研究[J]. 高电压技术，2015，41(11)：3737-3745.
LI Naiyi, PENG Zongren, LIU Peng. Investigation of inner shielding structure for ultra-high voltage SF_6 gas-insulated bushing[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3737-3745.

[7] 刘杉，宋胜利，卢理成，等. ±800 kV 特高压直流穿墙套管故障分析及设计改进[J]. 高电压技术，2019，45(9)：2928-2935.
LIU Shan, SONG Shengli, LU Licheng, et al. Failure analysis and design improvement of ±800 kV HUVDC wall bushings[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2928-2935.

[8] 张施令，彭宗仁. 高压换流变压器套管内绝缘性能研究现状综述[J]. 电瓷避雷器，2021(2)：15-25.
ZHANG Shiling, PENG Zongren. Research status of inner insulation performance of high voltage converter transformer bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 15-25.

[9] 陕华平，吴天博，陈晓东. 换流变压器网侧 550 kV 环氧树脂浸纸套管绝缘结构设计与校核[J]. 电瓷避雷器，2023(4)：165-172，180.
SHAN Huaping, WU Tianbo, CHEN Xiaodong. Insulation structure design and check of 550 kV epoxy resin impregnated paper bushing at grid side of converter transformer[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(4): 165-172, 180.

[10] 李敏洁，刘轩东，商高屹. 基于毛细芯热管的换流变阀侧套管电-热-流场优化研究[J]. 电机与控制学报，2024，28(9)：1-10.
LI Minjie, LIU Xuandong, SHANG Gaoyi. Optimization of electric thermal flow field in valve-side bushing of converter transformer based on capillary wick heat pipe[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(9): 1-10.

[11] 李进，王雨帆，杜伯学，等. 高压电工装备用环氧树脂绝缘材料改性研究进展[J]. 广东电力，2019，32(12)：3-11.
LI Jin, WANG Yufan, DU Boxue, et al. Modification research progress of epoxy resin insulation materials for high voltage electrical apparatus[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(12): 3-11.

[12] 周安春，高理迎，冀肖彤，等. 干式 SF_6 气体绝缘换流变压器阀侧套管电流致热型放电故障分析及现场修复[J]. 电网技术，2018，42(5)：1401-1409.
ZHOU Anchun, GAO Liying, JI Xiaotong, et al. Analysis and field-repair of current overheating faults on dry type SF_6 gas-insulated valve side bushing in converter transformer[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1401-1409.

[13] 刘睿，张宗喜，聂鸿宇，等. 矿物油与植物油对绝缘纸热老化特性

的影响研究[J]. 绝缘材料，2020，53(6)：65-69.
LIU Rui, ZHANG Zongxi, NIE Hongyu, et al. Effect of mineral oil and vegetable oil on thermal ageing characteristics of insulating paper[J]. Insulating Materials, 2020, 53(6): 65-69.

[14] 李乃一，彭宗仁，许佐明. 特高压直流 SF_6 气体绝缘穿墙套管绝缘结构设计研究进展[J]. 绝缘材料，2019，52(5)：6-16.
LI Naiyi, PENG Zongren, XU Zuoming. Research progress in insulation structure design of UHVDC SF_6 gas-insulated wall bushing[J]. Insulating Materials, 2019, 52(5): 6-16.

[15] 杨艳，李广. 油纸绝缘电容套管局部放电引发变压器燃烧原因浅析[J]. 变压器，2021，58(6)：85-87.
YANG Yan, LI Guang. Analysis of a transformer burning caused by PD of oil-paper-insulated capacitive bushing[J]. Transformer, 2021, 58(6): 85-87.

[16] 兰贞波，宋友，邓建钢，等. 我国特高压交直流套管研究现状[J]. 电瓷避雷器，2021(2)：1-6，14.
LAN Zhenbo, SONG You, DENG Jiangang, et al. Status and application of UHV AC/DC bushing in China[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 1-6, 14.

[17] 金立军，郭裕，薛义飞，等. 高压绝缘套管电场分析及结构优化[J]. 高压电器，2015，51(4)：7-12，18.
JIN Lijun, GUO Yu, XUE Yifei, et al. Electric field analysis and structure optimization for high voltage insulation bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 7-12, 18.

[18] 赵玉顺，赵延宁，卢泰森，等. 干式套管电容芯体浸渍过程的多变量动力学模型构建[J/OL]. 中国电机工程学报，2025：1-12[2025-05-17]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee. 251262.
ZHAO Yushun, ZHAO Yanning, LU Taisen, et al. Construction of multivariate dynamic model for the impregnation process of dry-type bushing capacitor core[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025: 1-12 [2025-05-17]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee. 251262.

[19] 谢志成，许佐明，刘泰蔚，等. 典型缺陷条件下环氧胶浸纸套管绝缘特性分析[J]. 南方电网技术，2021，15(12)：66-71，101.
XIE Zhicheng, XU Zuoming, LIU Taiwei, et al. Insulation characteristics analysis of epoxy resin impregnated paper bushing with typical defects[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(12): 66-71, 101.

[20] HESAMZADEH M R, HOSSEINZADEH N, WOLFS P. An advanced optimal approach for high voltage AC bushing design[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 461-466.

[21] 赵子玉，彭宗仁，谢恒堃，等. 高压油纸电容式套管电容芯子大小极板设计方法[J]. 电瓷避雷器，1996(5)：3-7，12.
ZHAO Ziyu, PENG Zongren, XIE Hengkun, et al. Design method of large and small plates for capacitor core of high voltage oil-paper capacitor bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 1996(5): 3-7, 12.

[22] 杨雁，袁磊，王谦，等. 不同复合热稳定剂对矿物油-改性纸绝缘系统热老化特性的影响[J]. 高电压技术，2013，39(5)：1121-1127.
YANG Yan, YUAN Lei, WANG Qian, et al. Influence of different compound thermal stabilizers on aging characteristics of mineral oil-modified paper insulation system[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1121-1127.

[23] 廖瑞金，杨丽君，郑含博，等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报，2012，27(5)：1-12.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.

[24] 戴佺民，齐波，卓然，等. 油浸纸套管电容芯子极板边缘电场分布的仿真及优化方法[J]. 电网技术，2017，41(5)：1683-1688.
DAI Quanmin, QI Bo, ZHUO Ran, et al. Electric field simulation and optimization methods of capacitor core foil edge of oil-impregnated paper bushing[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1683-1688.

[25] BI H W, FAN X Z, XIAO H, et al. Design scheme and experimental research on the main insulation structure of 126 kV OIP bushing based on a new-type aramid insulation paper[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2025, 40(1): 423-433.

[26] 陈杰华，林春耀，姚森敬，等. 某 220 kV 变压器高压套管爆炸故障原因分析[J]. 广东电力，2009，22(5)：70-72.
CHEN Jiehua, LIN Chunyao, YAO Senjing, et al. Reason analysis of HV bushing explosion of a 220 kV transformer[J]. Guangdong Electric Power, 2009, 22(5): 70-72.

[27] 廖瑞金，王季宇，袁媛，等. 换流变压器下新型纤维素绝缘纸特性综述[J]. 电工技术学报，2016，31(10)：1-15.
LIAO Ruijin, WANG Jiyu, YUAN Yuan, et al. Review on the characteristic of new cellulose insulation paper used in the converter transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 1-15.

[28] 马婕，黄猛，苏妍箫，等. 电工绝缘纸电气性能的调控方法研究进展[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8)：3086-3097.
MA Jie, HUANG Meng, SU Yanxiao, et al. Research progress on control methods of electrical properties of electrical insulating paper[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 3086-3097.

[29] 应宇鹏，黄猛，吕玉珍，等. TiO_2 纳米粒子浓度对油纸复合绝缘击穿特性和界面电荷的影响[J]. 中国电机工程学报，2019，39(增刊1)：249-257.
YING Yupeng, HUANG Meng, LÜ Yuzhen, et al. Influence of TiO_2 nanoparticles concentration on breakdown characteristic and interface charge of oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(Supplement 1): 249-257.

[30] 莫洋，杨丽君，鄢水强，等. 掺杂纳米 Al_2O_3 对纤维绝缘纸电寿命的影响及机理[J]. 电工技术学报，2018，33(19)：4618-4626.
MO Yang, YANG Lijun, YAN Shuiqiang, et al. Influence and mechanism of doped nano-Al_2O_3 on electrical life of cellulose insulating paper[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(19): 4618-4626.

[31] 廖瑞金，吴伟强，张福州，等. 复合胺类化合物对油纸系统中绝缘纸热老化特性的影响[J]. 高电压技术，2015，41(6)：1891-1897.
LIAO Ruijin, WU Weiqiang, ZHANG Fuzhou, et al. Influence of composite amines on the paper of oil-paper insulation system during thermal aging process[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1891-1897.

[32] 张美云，杨斌，宋顺喜，等. 先进芳纶绝缘纸基材料研究进展及展望[J]. 中国造纸，2022，41(11)：1-10.
ZHANG Meiyun, YANG Bin, SONG Shunxi, et al. Progress and prospect of advanced aramid insulating paper-based materials[J]. China Pulp & Paper, 2022, 41(11): 1-10.

[33] 李剑，姚舒瀚，杜斌，等. 植物绝缘油及其应用研究关键问题分析与展望[J]. 高电压技术，2015，41(2)：353-363.
LI Jian, YAO Shuhan, DU Bin, et al. Analysis to principle problems and future prospect of research on vegetable insulating oils and their applications[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 353-363.

[34] 廖瑞金，李博凡，成立，等. 油纸绝缘中气体输运机理的数值模拟与试验研究综述[J]. 高电压技术，2025，51(8)：3940-3957.
LIAO Ruijin, LI Bofan, CHENG Li, et al. Review on numerical simulation and experimental study of gas transport mechanisms in oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 3940-3957.

[35] 王飞鹏，李博君，延思晨. 酯基绝缘油：研究进展与未来趋势[J]. 广东电力，2024，37(9)：36-44.
WANG Feipeng, LI Bojun, YAN Sichen. Ester-based insulating oils:

research progress and future trends[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(9): 36-44.

[36] 王流火，陶雄武，周俊宏，等. 550 kV/8 000 A 大容量 SF_6 充气式套管温升特性的仿真研究[J]. 高电压技术，2024，50(3)：986-993.
WANG Liuhuo, TAO Xiongwu, ZHOU Junhong, et al. Simulation research on temperature rise characteristics of 550 kV/8 000 A large capacity SF_6 inflatable bushing[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 986-993.

[37] 姚树华，岳永刚，张叔禹，等. 500 kVSF_6断路器瓷质套管爆炸原因深度分析及防范措施研究[R]. 内蒙古：内蒙古电力科学研究院，2019.
YAO Shuhua, YUE Yonggang, ZHNAG Shuyu, et al. In-depth analysis on explosion cause and prevention measures of 500 kV SF_6 circuit breaker porcelain bushing[R]. Inner Mongolia, China: Inner Mongolia Electric Power Research Institute, 2019.

[38] 王琼，温冰，赵建利，等. 一起 500 kV SF_6断路器瓷套管爆裂事故的推断和分析[J]. 电瓷避雷器，2016(6)：45-49.
WANG Qiong, WEN Bing, ZHAO Jianli, et al. Inference and analysis of a porcelain bushing burst accident of 500 kV SF_6 circuit breaker[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(6): 45-49.

[39] 高克利，杨圆，周文俊，等. SF_6 替代型环保绝缘气体：研究、应用和展望[J]. 中国电机工程学报，2024，44(18)：7395-7411.
GAO Keli, YANG Yuan, ZHOU Wenjun, et al. SF_6 alternative environmentally friendly insulating gas: research, application and outlook[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7395-7411.

[40] 郭晓雪，赵虎，李兴文. 热态 CO_2 及其与 O_2 混合气体热动属性及电击穿特性的计算分析[J]. 高电压技术，2014，40(10)：3085-3090.
GUO Xiaoxue, ZHAO Hu, LI Xingwen. Calculation and characteristic analysis of thermodynamic properties and dielectric breakdown properties of CO_2 and its mixture with O_2[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3085-3090.

[41] 柳玉洁，任明，王凯，等. SF_6/N_2 混合气体与纯 SF_6 气体局部放电统计特性差异对比分析[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1206-1219.
LIU Yujie, REN Ming, WANG Kai, et al. Comparative analysis of the difference in partial discharge statistical characteristics between SF_6/N_2 gas mixture and pure SF_6 gas[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1206-1219.

[42] KIEFFEL Y. Characteristics of g^3-an alternative to SF_6[C]//2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD). Montpellier, France: IEEE, 2016: 880-884.

[43] 李祎，张晓星，傅明利，等. 环保绝缘气体 C_4F_7N 研究及应用进展 I：绝缘及电、热分解特性[J]. 电工技术学报，2021，36(17)：3535-3552.
LI Yi, ZHANG Xiaoxing, FU Mingli, et al. Research and application progress of eco-friendly gas insulating medium C_4F_7N, partI: insulation and electrical, thermal decomposition properties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(17): 3535-3552.

[44] 周文俊，郑宇，高克利，等. 环保型绝缘气体电气特性研究进展[J]. 高电压技术，2018，44(10)：3114-3124.
ZHOU Wenjun, ZHENG Yu, GAO Keli, et al. Progress in researching electrical characteristics of environment-friendly insulating gases[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3114-3124.

[45] 张宏亮，刘鹏，冯骅，等. 进化策略在 1 100 kV 气体绝缘开关设备出线套管内绝缘结构多目标优化中的应用[J]. 高电压技术，2016，42(2)：581-588.
ZHANG Hongliang, LIU Peng, FENG Hua, et al. Application of evolution strategy in multi-objective optimization of internal insulation structure of 1 100 kV GIS outlet bushing[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 581-588.

[46] 汪泓，方志，邱毓昌. 高压直流 GIS 中绝缘子的表面电荷积聚的研究[J]. 中国电机工程学报，2005，25(3)：105-109.
WANG Feng, FANG Zhi, QIU Yuchang. Study of charge accumulation on insulator surface in HVDC gas-insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 105-109.

[47] 刘鹏，吴泽华，朱思佳，等. 缺陷对交流 1 100 kV GIL 三支柱绝缘子电场分布影响的仿真[J]. 电工技术学报，2022，37(2)：469-478.
LIU Peng, WU Zehua, ZHU Sijia, et al. Simulation on electric field distribution of 1 100 kV AC tri-post insulator influenced by defects[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 469-478.

[48] 陈静，臧春艳，龚禹璐，等. 超特高压 GIL 三支柱绝缘子研究述评[J]. 高压电器，2024，60(2)：143-155.
CHEN Jing, ZANG Chunyan, GONG Yulu, et al. Research review on tri-post insulator for EHV/UHV GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 143-155.

[49] ISOGAI T, IKEMOTO N, INOUE T. An epoxy resin impregnated paper insulation system for ultra high voltage applications[C]//1971 EIC 10th Electrical Insulation Conference. Chicago, USA: IEEE, 1971: 313-318.

[50] 徐海军，陕华平，王庆，等. 特高压换流变压器网侧高压套管胶浸纸技术应用研究[J]. 高压电器，2020，56(5)：182-187.
XU Haijun, SHAN Huaping, WANG Qing, et al. Research on the application of resin impregnated paper technology to net-side bushing of UHVDC converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 182-187.

[51] 孙夏青，赵林杰，罗雨，等. ±350 kV 柔性直流系统穿墙套管设计选型[J]. 南方电网技术，2016，10(7)：62-68.
SUN Xiaqing, ZHAO Linjie, LUO Yu, et al. Design and type selection of ± 350 kV VSC-HVDC wall bushing[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 62-68.

[52] KUMAR V. Role of accelerator in curing of epoxy-anhydride pressure impregnant[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 968-972.

[53] 臧梦涵. 电工绝缘皱纹纸理化特性试验及性能调控分子动力学分析[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2024.
ZANG Menghan. Physicochemical test and molecular dynamics analysis of insulating crepe paper for performance modification[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2024.

[54] 许天蕾，王青于，宋顺喜，等. 竹纤维绝缘纸/环氧复合材料的制备与性能分析[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4535-4546.
XU Tianlei, WANG Qingyu, SONG Shunxi, et al. Preparation and performance analysis of bamboo insulating paper/epoxy composites[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4535-4546.

[55] 周海滨，谢志成，潘志城，等. 电力设备用皱纹纸理化特性分析及模拟改性研究[J]. 绝缘材料，2025，58(1)：29-37.
ZHOU Haibin, XIE Zhicheng, PAN Zhicheng, et al. Study on physicochemical properties and simulation modification of crepe paper for power equipments[J]. Insulating Materials, 2025, 58(1): 29-37.

[56] LUO Z M, WANG L M, CAO B, et al. Synergistic enhancement of heat resistance and mechanical performance of epoxy resin by introducing entanglement effect[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2026, 203: 109581.

[57] 罗子民，赵玉顺，李雪萍，等. 2-甲苯缩水甘油醚协同提升环氧复合物韧性及刚性研究[J]. 中国电机工程学报，2024，44(6)：2485-2495.
LUO Zimin, ZHAO Yushun, LI Xueping, et al. Synergistic enhancement of toughness and rigidity of epoxy composites by 2-toluene glycidyl ether[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2485-2495.

[58] ISHIBE S, MORI M, KOZAKO M, et al. A new concept varistor with

epoxy/microvaristor composite[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 677-682.

[59] 谢更生，史石峰，王琪林，等. ±800 kV 换流变阀侧套管温度场仿真与大电流温升试验分析[J]. 高电压技术，2024，50(3)：994-1002.
XIE Gengsheng, SHI Shifeng, WANG Qilin, et al. Simulation and experimental analysis of ±800 kV converter transformer valve-side bushing under high current[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 994-1002.

[60] 刘杉，侯俊义，周建辉，等. 基于强制空气冷却的换流变阀侧套管设计及特性[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4478-4487.
LIU Shan, HOU Junyi, ZHOU Jianhui, et al. Design and characteristics of side bushing of converter valve based on forced air cooling technology[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4478-4487.

[61] 史石峰，刘杉，谢更生，等. 换流变阀侧套管水冷散热设计与优化分析[J]. 中国电机工程学报，2023，43(12)：4861-4870.
SHI Shifeng, LIU Shan, XIE Gengsheng, et al. Design and optimization analysis of water cooling heat dissipation for the valve-side bushing of converter transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4861-4870.

[62] 郝震，江长明，李欢，等. 基于变压器套管升高座处电流互感器的高频局部放电监测技术[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1126-1134.
HAO Zhen, JIANG Changming, LI Huan, et al. High-frequency partial discharge monitoring technology based on TAs in transformer bushing risers[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1126-1134.

[63] 周远翔，杜世玮，白正，等. 缩比套管芯体及环氧玻璃筒表面电荷演化特性[J]. 高电压技术，2025，51(9)：4674-4685.
ZHOU Yuanxiang, DU Shiwei, BAI Zheng, et al. Surface charge evolution characteristics on the scaling bushing core and epoxy glass tube[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(9): 4674-4685.

[64] 王立汉，陈子睿，王良清，等. 真空等离子体对改性玻璃纤维及环氧树脂复材的影响[J]. 粘接，2025，52(3)：104-107.
WANG Lihan, CHEN Zirui, WANG Liangqing, et al. Effect of vacuum plasma modified glass fiber and epoxy resin composites[J]. Adhesion, 2025, 52(3): 104-107.

[65] 王春雷，王春齐，江大志. 偶联剂对玻璃纤维增强环氧复合材料吸湿及力学性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料，2010(4)：49-52.
WANG Chunlei, WANG Chunqi, JIANG Dazhi. Effects of coupling agents on water absorption and mechanical properties of glass fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2010(4): 49-52.

[66] 宋友，徐卓林，兰贞波，等. 1 200 kV 特高压交流胶浸纤维穿墙套管技术应用研究[J]. 电瓷避雷器，2021(2)：41-46.
SONG You, XU Zhuolin, LAN Zhenbo, et al. Application of 1 200 kV UHV AC resin impregnated fiber wall bushing technology[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 41-46.

[67] 柯磊，王龙华，张东辉，等. ±400 kV 电容式胶浸纤维穿墙套管的设计[J]. 高压电器，2015，51(12)：136-141.
KE Lei, WANG Longhua, ZHANG Donghui, et al. Design of ±400 kV capacitive resin impregnated fiber wall bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 136-141.



王黎明
1963—，男，博士，教授，博导
研究方向为高电压与绝缘技术、输变电设备电晕及电磁环境
E-mail: wanglm@sz.tsinghua.edu.cn

WANG Liming
Ph.D., Professor



曹　彬(通信作者)
1993—，男，博士，助理教授，博导
主要从事高压外绝缘与输变电设备状态监测等领域的研究工作
E-mail: cao.bin@sz.tsinghua.edu.cn

CAO Bin
Ph.D.
Corresponding author

收稿日期　2025-11-03　在线出版日期　2026-02-02　　编辑　曾文君