

电力用防火封堵材料发展现状

曾晓亮^{1,2}, 兰新生^{1,2}, 李文雄³, 郭德明³, 王燕^{1,2}, 赵海波³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 四川大学建筑与环境学院 环境与火安全高分子材料协同创新中心 高分子材料国家重点实验室 环保型高分子材料国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610064)

摘要:对电力系统中防火封堵材料的发展历程进行了系统性的回顾,并探讨其不同应用场景下的适用性及未来发展趋势。首先,对电力防火封堵材料进行了分类,并详细阐述了各类材料的特性及其单独或组合使用的优势;其次,通过具体案例分析,针对不同功能建筑、电力设施及封堵部位,探讨了适宜的封堵材料选择策略;最后,结合国家相关标准和近期研究进展,对电力防火封堵材料的未来发展方向进行了展望。

关键词:防火封堵材料; 类型演变; 场景适配

中图分类号:X 92 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2025)01-0072-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20250110

Development Status of Firestop Materials for Power System

ZENG Xiaoliang^{1,2}, LAN Xinsheng^{1,2}, LI Wenxiong³, GUO Deming³, WANG Yan^{1,2}, ZHAO Haibo³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Power Internet of Things Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. College of Architecture and Environment, The Collaborative Innovation Center for Eco-Friendly and Fire-Safety Polymeric Materials (MoE), State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, National Engineering Laboratory of Eco-Friendly Polymeric Materials (Sichuan), Sichuan University, Chengdu 610064, Sichuan, China)

Abstract: The development history of firestop materials in electrical systems is systematically reviewed, and their applicability in different scenarios as well as future trends are discussed. Firstly, firestop materials used in electrical systems are categorized, and the characteristics of each type of material and the advantages of their individual or combined use are described in detail. Secondly, through case analysis, the appropriate selection strategies of firestop materials for buildings with different functions, electrical facilities and sealing locations are discussed. Finally, the future development direction of firestop materials in electrical systems is prospected combined with national standards and recent research progress.

Key words: firestop materials; type evolution; scene adaptation

0 引言

电力是国家能源体系的重要支柱,发电厂、变电站等电力设施作为电力输送的核心枢纽点,对保障电力可靠供应和经济社会高质量发展至关重要。然而部分电力设备可能因过载、老化或故障而引发着火,甚至蔓延成灾。因电力设备设施火灾具有发展

速度快、破坏力大等特点,一旦发生,可能会造成严重的经济损失和不良社会影响。

为了预防电力系统火灾事故,阻断火势蔓延及其连锁反应,防火封堵材料等被动防火措施应运而生。它们可在火灾发生和蔓延过程中,利用材料或构筑物自身的阻燃性、分隔性、耐火性等特性,将火势控制在小范围内,使经济损失和不良影响降到最低^[1-4]。防火封堵材料广泛用于封堵各种贯穿孔,如穿墙套管、电缆穿过防火隔断、电缆进出等形成的

各种开口以及电缆桥架的防火分隔,以免火势通过这些开口及缝隙扩散。近年来,针对电力设备设施防火封堵需求,许多研究机构和生产企业在新材料研发、封堵构造优化、施工与工程应用等方面开展了诸多卓有成效的工作。

1 电力防火封堵材料的类型演变

1.1 同种防火封堵材料单独使用

20 世纪 70 年代,电力系统防火封堵才在国内得到重视,当时所用材料主要依赖进口^[2]。到了 20 世纪 80 年代,第一代无机防火封堵材料和有机防火封堵材料被四川和上海消防研究所成功研制^[3]。1989 年,国产阻燃包问世,并逐渐应用到电力电信、民用建筑等领域^[5],但此时的阻燃包在烟气密封、防潮耐久、绿色环保等方面存在严重问题,无法满足一些行业的特殊要求。1998 年,一种耐水耐油、施工简便、耐火隔热且可在不破坏的情况下重复拆卸使用的塑性防火封堵材料和防火枕研制成功,在天津市电话局、长信大厦以及百货大楼新厦的应用中效果良好^[3]。

直到 21 世纪初,主流的电力防火封堵材料依旧为前述 3 类^[4,6-8]:1) 有机防火封堵材料、塑性防火封堵材料和防火泥,以有机合成树脂为粘接剂,加入防火剂和大量填料制得,特点是柔韧、可塑且施工方便;2) 无机防火封堵材料和速固防火封堵材料,以速干水泥为基料,加入防火剂和耐火填料制得,特点是耐火极限与机械强度较高;3) 阻燃包、防火包和耐火包,以不燃或阻燃的纤维布为包装材料,填入阻燃剂制得,特点是可以封堵较大的孔洞且拆换方便。

根据环保的大趋势以及“资源节约型、环境友好型和工业化”的功能要求,上述防火封堵材料在实际应用中均存在一定的局限性。基于热膨胀防火机制,上海消防所研发出两种环保型热膨胀防火封堵材料^[9]。一是无卤膨胀有机封堵材料。该材料具有一定的柔软性和弹性,在热流中体积可膨胀超过 3 倍,且生成的炭质隔热层强度较高,因此可以填充贯穿孔洞及狭小缝隙,阻止火势蔓延,抵挡一定压强的水压冲击,耐火极限大于 4 h。值得一提的是无卤膨胀有机封堵材料在高温下产生的有毒烟气较少,优于传统的有机封堵材料。二是复合膨胀防火板。该材料作为一种新型的防火封堵材料,在火焰作用下

可膨胀 10~20 倍,且膨胀层具有一定强度,耐火时间同样大于 4 h。复合膨胀防火板可任意切割,便于现场安装,且可重复使用。另外,环保型阻燃膨胀模块也值得关注,其在火场中可以快速膨胀形成具有优异隔热能力的膨胀体,其特点包括质轻环保、耐候耐久、有效期长、耐火时间长、防鼠咬等^[10]。

后来随着国家标准 GB 23864—2009《防火封堵材料》的颁布,防火封堵材料才逐渐演变成了目前常用的板材、泡沫、岩棉、阻燃模块、防火密封胶、柔性有机封堵材料、无机封堵材料、阻燃包等^[11]。其中,防火泡沫在高温环境可以迅速膨胀封堵孔口,自身柔韧性较好且质轻;防火密封胶可粘结多种建材,既能防火又能密封^[12]。

当然,还有一些特殊的电力防火封堵材料值得关注。其中,多电缆穿隔系统(multi-cable-transit, MCT)电缆密封装置是预制的标准组件,由金属框架和橡胶模块组成,内部的锁紧装置在电缆嵌入后可以改变内径大小,起到密封的作用,从而阻止火焰、烟气等通过,具有拆卸方便的特点^[13];防火密封板是一种硬质不燃板材,防火隔热性能好,承载能力强,方便切割和钻孔,适合封堵大型贯穿孔洞。电缆护套在发生火灾时极易软化熔融,可能引起短路或其他连锁反应,因此,一般将电缆放置在耐火的电缆桥架中。防火密封板在用作电缆桥架时具有抗爆性能好、强度高、耐高温、耐老化等优点,而传统的不燃无机复合板则不具备抗爆能力,温度较高时易炸裂^[14];美国 STI 特种技术有限公司开发出了多种兼具耐火和气密性且环保的防火封堵材料产品,包括同时具备隔热、阻烟以及隔音能力的 LC 防火密封胶和反复拉伸不脆化的 FPS162 防火涂层板等^[2]。

1.2 多种防火封堵材料组合使用

当前防火封堵材料种类繁多,在实际应用中,对于同一个贯穿孔口或电缆缝隙,一种防火封堵材料往往难以达到较高的防火封堵要求,需要多种防火封堵材料的组合使用^[15]。

1) 电缆穿楼板孔洞的防火封堵^[6]。对于这种较为规则的孔洞,首先,在楼板底部用防火隔板按照孔洞尺寸加工出对应的方形;然后,用有机防火封堵材料包裹住电缆周边,在楼板中间用防火包填满;最后,在楼板上平面用有机防火封堵材料密封填堵洞口,电缆和防火包之间的缝隙用有机封堵材料填堵,如图 1 所示。另外,预留孔洞用岩棉封堵,下部仍然

用防火隔板隔断。

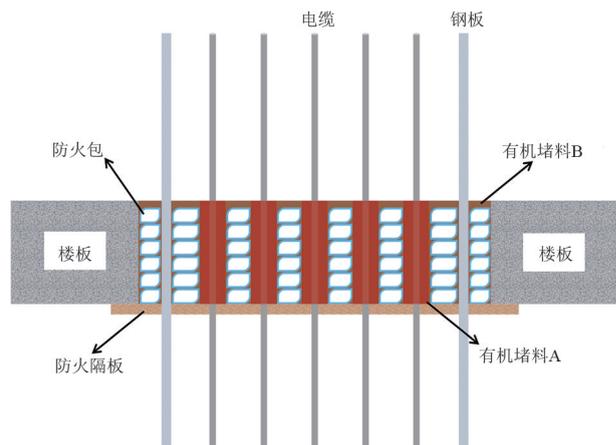


图 1 电缆穿楼板孔防火封堵

2) 电缆沟的防火封堵^[16]。如图 2 所示,可以采用设置阻火墙的方式对电缆沟进行封堵,阻火墙由防火隔板、防火包、无机防火砖和有机封堵材料筑成。首先,安置防火隔板;然后,砌入无机防火砖;接着,用有机封堵材料均匀包裹电缆,在其余空隙位置堆入防火包,再用有机封堵材料填补所有缝隙;最后,对阻火墙两侧的电缆刷涂防火涂料。

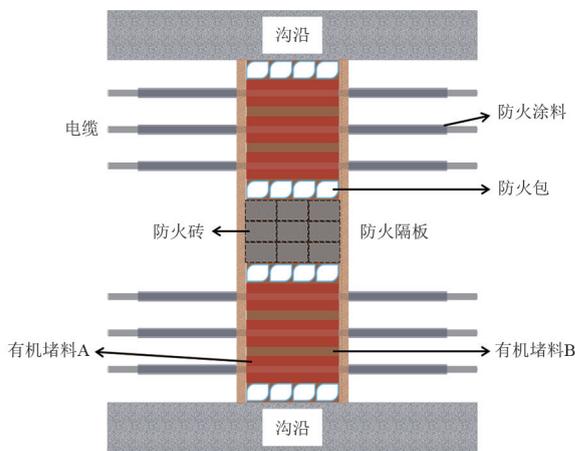


图 2 电缆沟阻火墙

2 电力防火封堵材料的场景适配

防火封堵材料的选择以及构造形式需与实际电力工程场景匹配,才能充分发挥防火封堵措施的最大效能,电力系统不同封堵场景的分类如图 3 所示。

2.1 不同功能建筑

电力系统中存在不同类型的发电站,比如水力发电站、火力发电站和核电站等。其中,水电站内油泵房、油库区等火灾风险较大场所的电缆应穿管敷设,管口应进行防火封堵,电缆桥架上应设置阻火

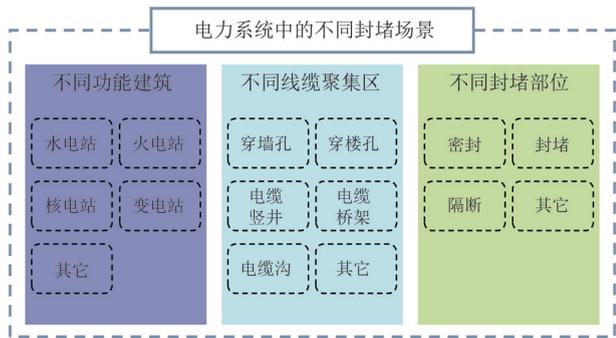


图 3 电力系统防火封堵场景分类

网。电缆沟应采用阻火墙设置防火分隔点,电缆穿孔、电缆桥架穿孔等孔洞封堵方式与普通穿墙孔封堵方式类似^[17]。

火电站一般选用常规防火封堵材料,包括无机封堵材料、有机封堵材料、阻火包和阻火模块等,其中阻火模块的主要成分为无机膨胀材料,其特点是具备凹凸自锁功能,机械性能好,不易变形坍塌,一般用来封堵大型孔洞。在施工过程中,通常采用与水电站相似的施工方式。

核电站因其功能特殊性,在电力火灾发生时,不仅可能导致区域性停电,还可能造成放射性物质泄漏,从而引起环境污染和人员伤亡。其主要采用的防火封堵材料包括防火水泥、硅橡胶或泡沫、MCT 水密阻火模块^[18]等,其中含铅硅泡沫用于对存在放射性位置的封堵。核电站的防火封堵施工方式需要结合现场电缆的敷设情况进行改进,工艺更为复杂。另外,核电站的封堵要求更为苛刻,除了需要达到一般的电缆防火封堵标准以外,生物屏蔽能力也作为一项重要指标^[19]。

在变电站(换流站)的防火封堵施工中,换流站阀厅穿墙套管防火封堵要求最为特殊。目前国内换流变压器均与阀厅毗邻布置,换流变压器阀侧套管/升高座贯穿防火墙进入阀厅内,贯穿处产生洞口,待换流变压器安装完毕之后需对该洞口实施防火封堵,不仅需满足结构抗爆需求,还应具有较高的耐火极限^[20]。此外,电力电缆通道、信息机房、配电房等典型电力场所均存在防火封堵需求,且对防火封堵材料耐候性等较高要求。

2.2 不同电力设施

同一类型建筑物内不同电力设施选用的防火封堵材料不同^[21-22]。

对于换流站阀厅穿墙套管的防火抗爆封堵,通常采用 5 层孔洞封堵结构材料,典型的由内而外分

别为不锈钢面硅酸铝复合防火板、镁质防火板、不锈钢龙骨、不锈钢面硅酸铝复合防火板以及镁质防火板^[23],或者岩棉板、纤维抗爆板、不锈钢龙骨、纤维抗爆板以及岩棉板,后者同时具有优异的抗爆能力^[24]。

对于电缆穿墙孔洞封堵,若孔洞较小,可直接使用有机封堵材料进行封堵。对于穿楼孔洞、电缆竖井等孔洞封堵,一般是将防火隔板、阻火包、有机封堵材料和无机封堵材料组合使用,还应确保电缆通过部位的厚度和强度要满足要求。对于电缆保护管,孔壁和保护管之间的缝隙以及保护管和两端电缆之间的缝隙均采用柔性有机封堵材料封堵,必要时在保护管两端使用阻火圈。对于电缆沟,主体封堵材料可选用防火板、耐水无机封堵材料或防火包,其中防火板中间夹不燃纤维,底部安装排水管,缝隙采用柔性有机封堵材料,耐水无机封堵材料与防火包类似,但防火包不适用于存在积水的电缆沟。对于电气盘柜底部,主要使用防火板、硅橡胶防火封堵材料进行封堵。

2.3 不同封堵部位

1) 选用耐火材料构造封闭空间对目标电缆进行密封保护。其中,典型的密封场景为电缆桥架中电缆的防火封堵。当线缆完全被密封结构包裹后,由于密封材料自身的耐火以及受热膨胀特性,即便被包裹电缆发生故障而起火,也会因为环境氧浓度过低而熄灭,不仅如此,外部火势也难以突破难燃或不燃的密封结构,从而保障了内部电缆的安全运行。

2) 选用无机封堵材料、有机封堵材料或防火包等对线缆穿墙或穿楼孔洞进行封堵。如果空隙较小,可选用有机封堵材料进行封堵,若较大,则可选无机封堵材料或防火包。其中,有机封堵材料在遭遇高热火焰时,会生成硬质膨胀炭层,起到较好的阻燃、隔烟以及隔热作用。

3) 选用防火隔板等对电缆通道中的大型孔洞进行隔断分区。利用防火板热膨胀后形成的硬质层进行隔断,可以借此在电缆竖井、电缆沟等适当位置设置防火段,从而将较大的孔洞通路进行封闭和隔断^[14]。

3 电力防火封堵材料的未来趋势

最新国家标准 GB/T 51410—2020《建筑防火封

堵应用技术标准》^[25]中对“电气线路贯穿孔口的封堵”的规定有:对于高压电缆,应采用具有弹性的防火封堵材料;使用时存在振动的场所或者高压电缆槽盒,应采用具有弹性的防火封堵材料封堵。此外,电缆通道一般为高湿高热环境,对防火封堵材料的耐候耐久性要求较高。传统的柔性有机封堵材料在封堵面积较大时封堵不易垮塌^[26],力学性能较差易变形,在高温环境下容易抽丝滴流、风干易开裂,而在低温环境下容易脱落而失效^[27],耐老化能力较差,需要经常更换^[28]。实地调研有机封堵材料封堵情况的现场照片如图 4 所示,足以说明其难以满足上述要求和规定。因此,具有优异回弹性能的有机硅弹性体材料用于防火封堵受到越来越多的关注^[29]。有机硅弹性体作为一种柔弹性有机防火封堵材料,具备绝缘抗震、耐高低温、疏水防潮、防污耐候等先天优势^[30],与现役柔性有机封堵材料防火泥有着本质不同,因其一体成型、弹性优异、水密气密性更好,便于施工以及更换,并且其热稳定性优异、阻燃耐火、使用期限长,可替代传统的柔性有机封堵材料用于贯穿孔口的防火封堵。



图 4 某变电站内有机封堵材料的现场照片

文献[31]报道了一种硅酮防火封堵材料,通过模拟试验发现其耐火隔热性和完整性均较优,能达到 2 h 的耐火极限。目前,在中广核“华龙一号”核电站已经使用多种有机硅弹性体作为电缆的防火封堵材料,包括低密度 RTV-2 硅橡胶泡沫、中高密度 RTV-2 硅橡胶、高密度柔性 RTV-2 硅橡胶、硅橡胶防火布和 RTV-1 防火密封胶,并正在尝试推广^[32-33]。不仅是核电站,还包括火电站、海上发电平台^[12]、变电站^[34]以及换流站^[35]等场所均可采用有机硅弹性体材料对孔洞进行封堵。区别在于,核电厂更为特殊,普通防火封堵可以选用低密度有机硅泡沫柔性防火封堵材料,如果是有生物屏蔽防护要求的防火封堵,则须采用高密度有机硅橡胶进行封堵。

参考文献

- [1] 汪立锋,陈庆吟,蔡新华,等. ± 800 kV 架空地线断股分析研究[J].浙江电力,2017,36(1):11-13.
- [2] 陈桂阳.关于深圳电网 500 kV 鹏深甲线多处地线金具发热的原因分析及控制措施探讨[J].电子测试,2014(7):102-103.
- [3] 麦俊佳.一起 220 kV 架空线路地线金具发热分析及对策探讨[J].广东电力,2018,31(7):135-139.
- [4] 李燕军,孟令增,王东育,等.750 kV 双回输电线路架空地线接地方式分析研究[J].电气技术,2015(5):82-84.
- [5] 肖明伟.一起 220 kV 线路避雷线金具发热的原因分析及处理[J].华电技术,2017,39(7):52-53.
- [6] 汪立锋,谈佳栋,陈庆吟,等.220 kV 地线连接金具断裂事故分析[J].浙江电力,2019,38(6):101-105.
- [7] 应函霖,黄旭骏,方琪.架空地线连接金具熔断掉落事故的预防[J].浙江电力,2013,32(9):16-18.
- [8] 叶建锋,周学明,沈祎依.某输电线路地线金具断裂分析[J].湖北电力,2021,45(3):43-48.
- [9] 王祥祥,谭永殿,龙振海,等.500 kV 输电线路架空地线直接接地挂点金具发热磨损原因分析[J].红水河,2020,39(6):86-90.
- [10] 黄巍,程泳,董建新,等.500 kV 架空地线金具发热的分析与对策[J].浙江电力,2013,32(11):36-39.
- [11] 王孝波,曾昌军,邓春林,等.接地电阻随季节及天气过程变化规律分析[J].气象科学,2013,33(6):648-652.
- 作者简介:**
 吕品雷(1993),男,博士,工程师,从事输电线路方面工作;
 赵福平(1993),男,硕士,工程师,从事输电线路方面工作;
 郭利瑞(1980),男,硕士,高级工程师,从事输电线路方面工作;
 卢金奎(1981),男,硕士,高级工程师,从事输电线路方面工作;
 陈俊(1973),男,硕士,高级工程师,从事输电线路方面工作;
 邱中华(1986),男,硕士,高级工程师,从事输电线路运行方面工作;
 张宗喜(1984),男,硕士,高级工程师,从事输电线路方面工作;
 朱轲(1978),男,硕士,高级工程师,从事输电线路方面工作。
- (收稿日期:2024-04-19)
- (上接第 76 页)
- [21] 李云浩,沈金波.我国电线电缆防火封堵现状[J].消防技术与产品信息,2011(5):51-53.
- [22] 夏超.变配电所内电缆防火阻燃设计要点[J].一重技术,2022(2):69-72.
- [23] 潘志城,邓军,张良,等.换流变压器阀厅防火墙孔洞封堵结构材料耐火极限研究[J].粘接,2022,49(11):72-77.
- [24] 钟波,张佳庆,刘晓圣,等.特高压换流站阀厅防火封堵系统防火与抗爆性能分析[J].安全与环境学报,2022,22(1):161-166.
- [25] 应急管理部天津消防研究所.建筑防火封堵应用技术标准:GB/T 51410—2020[S].北京:中国计划出版社,2020.
- [26] 陈金平,何潇,夏水英,等.浅析变电站封堵存在的问题及优化措施[J].中国新技术新产品,2014(24):181.
- [27] 朱俊.综述高层建筑缆线的电气防火封堵[J].科技与企业,2014(13):281.
- [28] 杨佳庆.有机防火封堵材料使用寿命研究[J].消防科学与技术,2013,32(7):774-777.
- [29] 张俊,祁祺.硅酮防火封堵材料对电缆载流量的影响分析[J].工程建设与设计,2017(6):57-58.
- [30] 李文雄,汪秀丽,赵海波,等.层状双氢氧化物对有机硅泡沫高温陶瓷化演变的影响研究[J].高分子学报,2023,54(3):381-389.
- [31] 闫照健,胡海涛,高立堂.某新型电缆井防火封堵材料的试验研究[J].工程建设,2013,45(6):15-18.
- [32] 袁炜,邵江,段佳巍,等.硅橡胶防火封堵材料在核电领域的应用[J].有机硅材料,2020,34(1):59-63.
- [33] 付明星,克磊,于海燕,等.中广核“华龙一号”核岛电气防火封堵有机硅材料应用要求[J].有机硅材料,2022,36(4):37-42.
- [34] 王猛,谭明甜,王彪.一种用于变电站的新型高分子防火封堵材料的研制[J].电工技术,2020(8):128-129.
- [35] 刘晓圣,姬军,张彩有,等.换流变阀侧套管封堵结构耐火极限研究[J].消防科学与技术,2020,39(10):1415-1417.
- [36] 余立平,车晓涛,白云,等.金属及软性阻燃硅橡胶材料在电力电缆孔洞防火、防水封堵中的应用[J].低碳世界,2017,(18):84-85.
- 作者简介:**
 曾晓亮(1991),男,博士,高级工程师,主要从事六氟化硫气体分析检测和电网消防检测工作;
 兰新生(1979),男,硕士,教授级高级工程师,从事电网环境保护和化学专业技术及管理工作;
 李文雄(1994),男,博士研究生,主要研究方向为高性能防火封堵新材料的研制及机理分析。
- (收稿日期:2024-03-27)

有机硅弹性体自身的阻燃抑烟以及耐火性能并不佳,在电气火灾发生时,有机硅弹性体将被点燃,在持续的高温火焰灼烧后,仅留下疏松脆弱易坍塌的二氧化硅残余物,无法抵御高温热流的冲刷。为提升其防火性能,文献[34]已经开发出一种用于变电站的阻燃有机硅橡胶防火封堵材料,通过向硅橡胶中加入三聚氰胺和氢氧化铝获得了良好的阻燃效果,具有方便施工、封堵效果好等特点。文献[36]采用34%甲基乙烯基硅橡胶、35%阻燃剂、12%陶瓷微粉、10%白炭黑、7%硼纤维、2%树木灰烬以及微量硫化剂和羟基硅油制备出一种阻燃硅橡胶材料,通过结构设计与金属材料结合应用于电力电缆孔洞防火、防水封堵,拥有较高的阻燃性。四川大学、应急管理部四川消防研究所等单位基于陶瓷化阻燃硅橡胶,开展了大量研究工作,制备出了低烟低毒的防火封堵材料,耐火极限达到2 h以上,但在模块化封堵构造和封堵系统综合性能提升上有待进一步研究。

4 结 论

1)在电力系统中,防火封堵材料的性能不仅取决于其固有特性,还受到其结构形式、施工技术、环境适应性以及防爆性能等因素的影响。因此,在对不同电力场所和设施进行防火封堵时,必须全面考虑这些因素,以确保防火封堵的有效性。

2)目前防火封堵材料研究多聚焦于材料合成制备与应用、产品设计与性能升级等方面,较少剖析原料组分对耐火性能及其他各项性能的作用规律与影响机制、电力火灾等特殊升温条件下防火封堵材料耐火性能演变规律等,有必要全面探索相关演变规律,进一步指导防火封堵材料的研发和制备,满足相关场景应用需求。

3)目前对于防火封堵材料在不同服役环境下的长效服役安全性研究较少,尤其缺少针对电力领域典型服役环境下的防火封堵材料老化的研究,例如换流站、变电站、电缆沟道等典型场景。需进一步研究高耐候性防火封堵材料,提升其耐湿热性能、耐紫外辐照性能、耐高低温性能等。

参考文献

- [1] IRCLAND B. The fires within: Firestop systems education for electrical engineers and contractors [J]. *Electrical Construction and Maintenance*, 2013, 112(5):18-23.
- [2] 雷蕾, 严恩泽, 杨卫国, 等. 电气线路贯穿孔口防火封堵应用现状研究[J]. *安全*, 2020, 41(2):17-26.
- [3] 韩伟平, 郝凤朝, 徐桦. 防火封堵材料[J]. *天津科技*, 1998(4):40.
- [4] 李富强, 殷友好, 姚斌. 防火封堵材料在电缆竖井封堵中的应用[J]. *安徽消防*, 2000(12):31.
- [5] 于忠伟. 国内外电缆防火材料施工工艺比较[J]. *吉林电力*, 2007, 35(4):42-43.
- [6] 朱保汉, 李晖. 电缆防火封堵设计[J]. *建筑电气*, 2007, 26(9):61-64.
- [7] 罗勇. 防火封堵材料在电缆竖井封堵中的重要性及其应用[J]. *广西民族大学学报(自然科学版)*, 2007, 13(增刊1):13-14.
- [8] 杜竹青. 电缆竖井封堵中防火封堵材料的重要作用分析[J]. *江西建材*, 2014(3):229.
- [9] 陈栋梁, 边福利. 热膨胀型电缆防火封堵材料研究[J]. *消防技术与产品信息*, 2003(3):25-26.
- [10] 张茜茹. 环保型电缆防火材料在变电站中的应用[J]. *科技情报开发与经济*, 2010, 20(32):168-170.
- [11] 全国消防标准化技术委员会第七分技术委员会. 防火封堵材料: GB 23864—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [12] 罗琼瑶, 甘子琼, 彭波. 高层建筑防火封堵研究综述[C]//2021年中国消防协会科学技术年会论文集. 北京: 中国消防协会, 2021:493-496.
- [13] 肖立娟. 海上发电平台电缆防火封堵研究[J]. *建筑经济*, 2020, 41(增刊2):328-330.
- [14] SUN Zhuo-er, ZHOU Yang. Discussion on fire-proof sealing technology and product [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 135:644-648.
- [15] 徐志明. 高层建筑的电气专业防火封堵探讨[J]. *工程技术研究*, 2016(7):242-243.
- [16] 邵珠芬, 姜如洋. 仙居抽水蓄能电站电缆防火封堵探究[J]. *工程技术研究*, 2019(22):161-162.
- [17] 陈婷. 浅谈水电站电缆防火及封堵设施设计[J]. *水电站设计*, 2002, 18(1):46-47.
- [18] 李海青, 王金栋, 丁云, 等. 高温气冷堆核岛电缆孔洞封堵方案研究[J]. *消防科学与技术*, 2023, 42(8):1063-1066.
- [19] 潘鹏. 浅析核岛电缆防火封堵设计与火电站差异[J]. *科技创新与应用*, 2016(26):174.
- [20] 钟波, 蒋亚强, 张佳庆, 等. 特高压换流站阀厅新型防火防爆封堵系统研究[J]. *消防科学与技术*, 2021, 40(2):231-234.