

高压电防护机制及其防护装备的研究进展

范浩波¹ 陈美玉¹ 孙润军¹ 尤秀兰² 王秋实¹

1. 西安工程大学 纺织科学与工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 上海兰邦工业纤维有限公司, 上海 201600

摘要: 高压装置应用伴随的安全隐患对安全生产和国防安全提出了挑战。综述直流高压电、交流高压电及脉冲高压电的特点、伤害形式与防护策略, 分析它们在不同场景下对人体的潜在危害, 梳理现有高压电防护装备的研究进展, 探讨防护装备的材料构成、结构特点与性能要求, 指出高压电防护装备正朝着轻量化、舒适化及多功能一体化的方向发展, 而如何兼顾防护性能与穿着舒适性仍是今后面临的主要困难。研究成果可为电力与国防相关防护装备的研发提供一定的理论支撑与技术参考。

关键词: 高压电; 直流; 交流; 脉冲; 伤害形式; 防护机制; 防护装备

中图分类号: TS 941.73

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)03-0043-08

Research progress of high voltage current protection mechanism and its protective equipment

Fan Haobo¹, Chen Meiyu¹, Sun Runjun¹, You Xiulan², Wang Qiushi¹

1. School of Textile Science and Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

2. Labon Technical Textile Group Co., Ltd., Shanghai 201600, China

Abstract: The safety hazards associated with the application of high voltage equipment posed challenges to both industrial safety and national defense security. The characteristics, injury patterns, and protective strategies of direct current high voltage current, alternating current high voltage current, and pulsed high voltage current were reviewed. The potential hazards they imposed on the human body under different scenarios were analyzed, and the research progress of existing high voltage protective equipment was summarized. The material composition, structural features, and performance requirements of protective equipment were discussed. It was indicated that high voltage protective equipment had been evolving toward lightweighting, comfort enhancement, and multifunctional integration, while balancing protective performance with wearing comfort remained a major challenge to be addressed in the future. The findings can provide theoretical support and technical references for the development of protective equipment in the power and national defense sectors.

Keywords: high voltage current; direct current; alternating current; pulse; injury pattern;

基金项目: 陕西省科技厅青年基金项目(2024JC-YBQN-0423)

收稿日期: 2025-07-29

作者简介: 范浩波, 男, 2001 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为防电击织物, 2267022132@qq.com

通信作者: 王秋实, 副教授, 主要研究方向为功能性纺织复合材料, wangqiushi@xpu.edu.cn

protective mechanism; protective equipment

现代科技的高速发展推动了电力装置在工业、军事等领域的广泛应用。然而,高压输变电系统、高压脉冲武器等高压装置可能造成的电击伤害,给安全生产和国防安全带来了新挑战。高压电可以分为3种类型,直流高压电、交流高压电和脉冲高压电。其中,直流和交流高压电主要用于海底电缆、远距离输电线路和电网主体输电,脉冲高压电则广泛应用于电击武器、医疗器械和材料加工等领域。使用过程中,高压电可能对设备及人体造成严重伤害。例如,在高压输变电中,雷电过电压、操作过电压及电磁感应等都可能导致作业人员遭受电击,甚至引发设备故障和火灾事故^[1]。此外,高压电弧温度高达3 000~40 000 °C,人体若直接接触高压设备,电弧会对人体组织造成深度烧伤,以及引燃衣物导致复合烧伤,其严重程度远超普通热烧伤^[2]。

为此,本文针对不同类型的高压电,总结其特点、危害及防护机制,分析目前相关高压电防护装备的研究现状及可能存在的问题,并对未来高压电防护装备的发展趋势进行展望,以期对高压电防护装备的设计与开发提供参考。

1 高压电的特点、伤害形式及防护策略

1.1 直流高压电

直流高压电具有电压、电流恒定的特点,且没有集肤效应,即电流会均匀分布于导体截面,加之直流电无感抗和容抗,远距离输电时损耗低、电压分布稳定,因此主要应用于海底电缆和远距离大功率输电线路^[3]。

人体直接接触直流高压电时,肌肉会出现强直性收缩。当电流达到300 mA时,可引发心室颤动,造成致命伤害^[4]。此外,当电路触头间存在高电位差时,空气介质会被电离击穿,造成电弧放电。且直流电弧通常很难熄灭,持续高温可达4 000 °C,这不仅会造成人体灼伤,还会引发火灾或爆炸。

直流高压电的防护通常需从绝缘防护和电弧防护两方面着手。绝缘防护需采用高介电强度的材料(如绝缘层、隔离屏障等)阻断电流通路,或通过接

地线将漏电导入大地。例如,作业时可使用绝缘手套/靴等防护装备保护人体,但需要注意的是装备耐压等级应高于工作电压。电弧防护通常采用耐高温材料以避免电弧灼伤,这种材料应具备阻燃、耐热和电绝缘等特性。当电弧发生爆炸时,防护材料能够快速形成致密碳化层,显著增加材料的厚度,从而建立有效的隔热屏障^[5-6]。

1.2 交流高压电

交流高压电的电压和电流方向会随时间按正弦规律变化,且有集肤效应,即电流趋于导体表面。由于存在相位和频率特性,交流高压电长距离传输时会因感抗和容抗产生能量损耗,故主要应用于中短距离的电力传输和配电系统。

交流高压电的使用同样伴随着风险。人体接触交流高压电会遭受电击伤害,导致肌肉强直与室颤,特别是50~60 Hz的交流高压电更易引发肌肉反复收缩,使人体无法脱离电源,心室颤动阈值更低(约50~100 mA),致死风险更高。交流高压电还会产生电弧,但交流电弧在电流过零点时可能自然熄灭,这降低了持续燃弧的风险^[7]。此外,在交流高压电产生的磁场作用下,人体会出现头晕、记忆力减退等症状^[8]。

交流高压电可以使用陶瓷、环氧树脂等高介电材料隔离,以阻断电流通路,或者将设备金属外壳接地,防止漏电触电。此外,还可以使用金属护套或屏蔽层减少电磁辐射。例如,在带电作业中,可以穿着由导电纤维与绝缘纤维交替编织制备的等电位屏蔽服,利用法拉第笼效应,保护穿着人员免受磁场影响^[9]。

1.3 脉冲高压电

脉冲高压电的电压和电流变化极快,其具有陡峭的上升沿,可以在微秒甚至毫秒级的极短时间内释放极高能量^[10],形式可以是雷电的单个脉冲,也可以是脉冲激光电源的重复性脉冲。脉冲高压电在工业、医疗、科研和军事等领域均有应用。例如:工业制造领域的电火花加工就是利用脉冲电流蚀刻金属或者通过脉冲磁场使金属产生塑性变形的。医疗领域的除颤器即通过短时高压脉冲恢复心脏节律。此外还有控制癫痫或疼痛的脉冲电刺激装置。在科

研和军事领域,有脉冲电场驱动带电粒子的粒子加速器,以及电磁脉冲武器、电击武器等装置。

脉冲高压电的危害通常包括以下 3 种形式:一是高能量脉冲会在接触瞬间造成组织深度烧伤;二是高频脉冲电流可能引发神经纤维异常放电,导致肌肉痉挛或心脏停搏;三是高频脉冲电流会击穿空气形成高温电弧,继而可能引燃易燃物或引发爆炸。

对于脉冲高压电,需重点防护电击伤害、电磁干扰及电弧灼伤。针对电击伤害,可通过在防护装备

中构建连续的导电层,为脉冲电流提供低阻抗通路,引导其绕行人体或回流至源端,从而避免电流流经体内^[11]。对于电磁干扰,可以利用金属屏蔽层反射或吸收电磁能量。对于电弧灼伤,与防护直流高压电弧类似,要求防护材料在电弧发生时快速形成保护层,减少人体皮肤因接触电弧而导致的热损伤。

1.4 小结

表 1 对 3 种类型的高压电的基本特点、伤害形式及防护策略进行了归纳。图 1 展示了部分高压电防护装备实物照片。

表 1 高压电的基本特点、伤害形式及防护策略

Tab. 1 Basic characteristics, damage forms, and protection strategies of high voltage current

类型	基本特点	伤害形式	防护策略
直流高压电	电压恒定;电流方向不变;无集肤效应;电弧难熄灭	持续电弧灼伤;电化学腐蚀;肌肉强直性收缩	隔热阻燃,在电弧产生时形成保护层;绝缘隔离
交流高压电	电压和电流周期性交替变化;有集肤效应;电弧易熄灭	心室颤动;周期性电弧灼伤;肌肉反复痉挛	电磁屏蔽,形成等电位层;隔热阻燃,形成保护层,防止电弧伤害
脉冲高压电	瞬时高能释放;峰值电流高,上升沿陡峭	瞬时爆裂性损伤,心脏骤停;电弧灼伤;剧烈疼痛,肌肉收缩	能量吸收;引导电流路径;电磁屏蔽

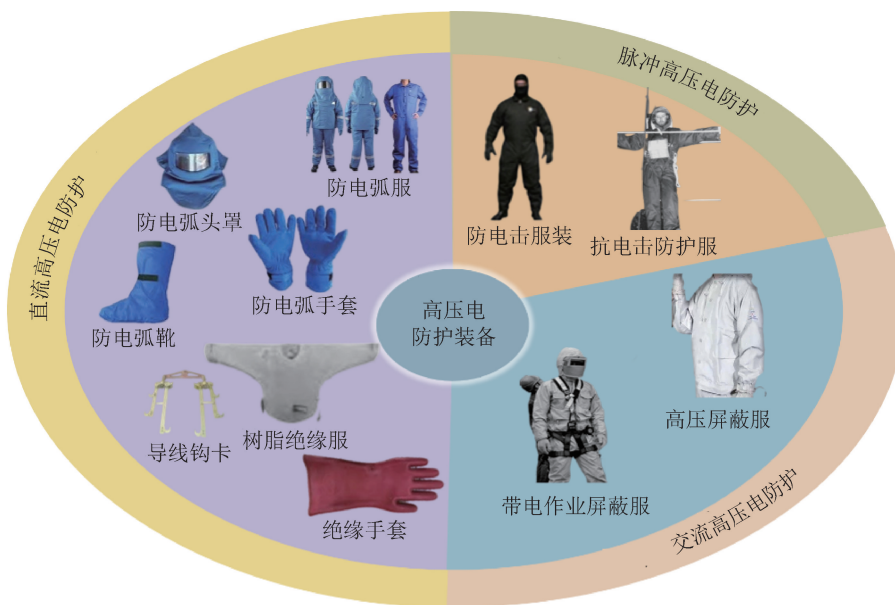


图 1 高压电防护装备照片

Fig. 1 Photographs of high voltage current protective equipment

2 高压防护装备的研究进展

2.1 直流高压电防护装备

直流高压电防护装备主要分为电弧防护和绝缘防护两大类。

2.1.1 电弧防护装备

电弧防护装备主要通过阻隔或削减电弧释放的热辐射,阻挡熔融飞溅物,从而保护使用人员免受电弧伤害。常见的电弧防护装备有防护服、绝缘手套、防护面罩和防护鞋等,它们均采用阻燃材料制成,可通过隔热阻燃实现人体防护。

下文针对最核心的防护装备——电弧防护服及其所用防电弧面料进行介绍。表 2 列出了不同

类型的电弧防护服的防护等级、性能要求及其使用场景^[12-13]。

表 2 电弧防护服防护等级及应用场景

Tab. 2 Protection level and application scenarios of arc protective clothing

级别	电弧热防护性能值/ (cal·cm ⁻²)	材料破裂阈能/ (cal·cm ⁻²)	服装描述	应用场景
I	[6,8)	[6,8)	阻燃衬衫和裤子;阻燃连体服	变电室与配电室作业人员、电工及维修工等工种用工作服
II	[8,25)	[8,25)	棉质内衣,阻燃上衣和裤子	电力、电网、变电站等工人用工作服
III	[25,40)	[25,40)	棉质内衣,阻燃上衣和裤子;棉质内衣,2件阻燃连体服	特殊或危险操作,配备高级别的岗位操作服
IV	[40,∞)	[40,∞)	棉质内衣,阻燃上衣,阻燃裤子,多层防电弧服	特殊或危险操作,配备高级别的岗位操作服

防电弧面料通常要求经纬纱线紧密交织,因此多采用平纹或斜纹组织,较少采用缎纹等其他组织。当面料遇到电弧热冲击时,首先受到冲击的是迎弧面凸起的组织点,因此面料表面受力点越多且纱线防电弧性能越好,则面料的电弧防护性能越好。材料方面,首先要求具备优良的阻燃性能,以确保面料不会因热效应而被点燃,其次是良好的隔热性能,以阻隔电弧热透过面料传递至人体,最后还应具备较高的断裂强度,以保证面料在热流冲击下不发生破裂^[14]。防电弧面料原料常采用间位芳纶、对位芳纶、阻燃腈氯纶、阻燃黏胶纤维等本质阻燃纤维^[15],其阻燃效果不会随穿着时间和洗涤次数的增加而下降。此外,添加吸光材料可显著提升面料的电弧防护性能^[16]。美国杜邦公司自 1986 年便开始推进电弧防护装备的研发计划,并于 1996 年发布了相关研究报告,确定了电弧防护装备的设计依据。20 世纪 60 年代,杜邦研制出兼具耐高温与阻燃性能的间位芳香族聚酰胺纤维,即芳纶 1313。随后,杜邦不断升级防电弧面料,开发出由质量分数分别为 93% 的芳纶 1313、5% 的芳纶 1414 和 2% 的抗静电纤维组成的 Nomex-III A 面料。该面料可形成稳定的惰性屏障,并能减少服装开裂。2006 年,杜邦研制出新一代电弧防护面料 ProteraTM,其由质量分数分别为 65% 的阻燃腈氯纶、28% 的芳纶 1313、5% 的芳纶 1414 和 2% 的导电纤维组成,防护效果优异,既能抵御高热和火焰,防止电弧爆炸导致的震裂,又能减少纤维摩擦产生的静电,降低起火风险。此外,ProteraTM 面料还具有良好的舒适性,被广泛应用于

阻燃和电弧防护领域,占据着行业高端市场。目前,我国电力行业使用的电弧防护服多采用杜邦公司生产的上述 2 款面料,且主要依赖进口,成本较高,不能满足中低端市场的需求^[17]。为此,国内学者在电弧防护领域的研究多聚焦在面料成分上。

我国纺织行业工作者通过长期的应用与研究发现,将芳纶 1313 与其他纤维混纺,所得面料的耐热性能与纯芳纶面料相比差异不大,但能显著降低成本。这种混纺方式不仅能够综合利用不同纤维的特性,弥补芳纶自身在某些方面的不足,还可以降低纯芳纶织物后整理工艺的难度。陕西纺织科学研究院张生辉等^[18]利用芳纶、阻燃腈氯纶、棉纤维和锦纶等开发了 3 种电弧防护面料。测试结果表明,阻燃腈氯纶/芳纶 1313/芳纶 1414 混纺面料的综合性能最佳;棉/锦纶后整理混纺面料的力学性能略差,但不会发生如其他面料所出现的阴燃现象。聚芳噁二唑(POD)纤维^[19]是我国成功研发的具有自主知识产权的耐热纤维,初始分解温度高于芳纶 1313,热收缩率小。江南大学李冻等^[20]在 Protera[®] 电弧防护面料的基础上,通过调整组分比例,制备了由阻燃腈氯纶、芳纶 1313、POD 纤维及芳纶 1414 组成的混纺织物。研究结果显示,与芳纶 1313 织物相比,引入 POD 纤维后的织物耐磨性、舒适性及热防护性能有所提升,其中耐磨性达到了芳纶 1313 织物的 2 倍,透湿性提高了 35%,热防护性能值也提升了 9.2%。

防电弧面料的后续研发需着力解决本质阻燃纤维初始模量大、吸湿性差等核心问题,开展防电弧面

料的协同增效研究,解决面料阻燃性、隔热性、力学性能、透湿性及亲肤性之间的矛盾,最终实现防护性能与着装舒适性的平衡。此外,应积极推进产品轻量化设计,引入人体工学评价方法,全面提升高等级电弧防护服的运动灵活性与长期穿着舒适性^[21]。

2.1.2 绝缘防护装备

直流高压电的绝缘防护装备常见的有橡胶手套、绝缘服等,其材料常涉及橡胶、环氧树脂、聚四氟乙烯及硅橡胶等。其中,树脂绝缘服是主要的绝缘防护装备,但其存在易受潮的缺陷。且绝缘服一旦受潮,其绝缘性能将显著下降,极端工况下可能引发电气击穿。目前,我国缺乏自主研发的绝缘服。在配电线路带电作业中,国内使用的绝缘服主要依赖进口产品,其价格昂贵,且设计存在一定的缺陷,如树脂绝缘服前襟位置未采用绝缘材料,存在安全隐患^[22]。为降低成本、提高产品安全性,研制适合我国带电作业的绝缘防护服十分必要。绝缘防护服的研发可以借鉴绝缘毯,它们的差异在于:绝缘毯用于覆盖、包裹设备,或作为工作人员的临时垫布,以防触电;而绝缘服穿着在人体身上,其通过形成一个绝缘屏障避免人体直接接触带电体。根据 DL/T 803—2015《带电作业用绝缘毯》标准对绝缘毯提出的防潮要求,研制防潮树脂绝缘毯应从原材料性能、表面涂层制作工艺等角度出发。目前,我国已研制出一款新型的橡胶绝缘毯,其各项指标均已达到标准要求,且浸水 16 h 后仍能通过交流耐压试验检测。此外,根据防潮树脂绝缘毯原理还制成了防潮绝缘服,并针对前襟位置未采用绝缘材料的缺陷,研制出了前襟全绝缘的防潮树脂绝缘服、绝缘披肩等产品^[23]。

周巧芬^[24]设计了一种绝缘服面料并申请了发明专利。该面料共包含 7 层结构,其以丝绸为基布,先在其表面覆盖一层多孔薄膜(第一防水层),之后在其上附加绝缘层,层内气囊充满干燥空气形成空气气囊层,接着在绝缘层上方覆盖第二层多孔薄膜(第二防水层),然后覆以耐高温纤维制成的阻燃层,最外层为夜光材料层。该面料以干燥空气为绝缘介质,既实现了轻量化,又保障了绝缘性能,但干燥空气在实际应用中较难控制,这不利于产业化生产。杨绍远^[25]设计了另一种绝缘服面料及配套服装。该面料采用多层结构,即在轻薄布层上覆盖绝

缘层,再覆以轻薄布层和绝缘层,最后加设防水层。配套服装则包含连帽上衣和裤子,其前襟通过拉链闭合,拉链底端位于裤子上部,顶端延伸至帽子下方,从而将帽子、上衣与裤子紧密连接为一个整体,有效改善了进口绝缘服前襟绝缘性能不足的问题。然而,该服装也因密闭性较好,夏季穿着作业易导致作业人员体温调节失衡,引发中暑,而存在一定的安全隐患。

常用绝缘防护装备多为绝缘塑料或橡胶制品。该类材料在电场、时间、化学腐蚀及物理磨损等因素的作用下,易发生老化现象^[26],造成绝缘防护效能降低。虽然许多学者对此都提出了自己的设计思路和方案,且都取得了一定的成果,但尚未实现产业化生产和推广应用。因此,我国绝缘服的研制生产仍需继续推进。

2.2 交流高压电防护装备

交流高压电的危害主要包括电击伤害、电弧伤害及电磁辐射等^[27],其中针对交流高压电的防护更侧重对高压电场和强电流的防护。其防护体系主要围绕高压电场与强电流两类危害源展开,其中尤以电场防护为核心。除采用绝缘手套、防电弧服等防护强电流外,为满足高压电场电磁辐射防护需求,带电作业屏蔽服可实现等电位屏蔽,是交流高压电场中最核心的防护手段。

带电作业屏蔽服主要用于发电厂、输配电线路及变电设备等高压作业场所。带电作业屏蔽服所用面料目前主要由不锈钢金属短纤或金属微丝与柞蚕丝、腈氯纶、芳纶的混纺纱线织造而成。其防护原理是通过特殊的设计,使穿着屏蔽服的作业人员处于高压电场中或接触高压带电体时,身体表面形成完整的等电位屏蔽层,进而阻断危险电流流经人体,并消除高压电场及电磁辐射对人体的影响,保障作业人员的安全^[28-30]。

不锈钢纤维电导率高、成本低,且有适度的柔韧性,故在抗电击功能面料中被广泛用作导电组分。陶留海等^[31]以不锈钢纤维、柞蚕丝和金属微丝为原料,开发了带电作业屏蔽服,其屏蔽效率达 85 dB 以上,可满足 1 100 kV 带电作业防护需求。肖秋利^[32]先将以芳纶 1313、阻燃黏胶纤维和不锈钢纤维为原料纺制的纱线与单根直径为 0.03 mm 的金属长丝并捻,然后开发出一种屏蔽效率达 45 dB、电阻为

0.6 Ω 、熔断电流为 7.0 A 的织物,可满足 750 kV 带电作业防护需求。房戈等^[33]将不锈钢微丝、铜微丝、芳纶和阻燃黏胶纤维混纺制成不同线密度的纱线,并开发出电气性能优异的轻质屏蔽织物,可满足 1 000 kV 及以上电压等级的防护需求。

基于材料和制备工艺的优化,防护服的电气性能和导电性能等在逐步提升,但也存在一些问题,其中透气性和舒适性不佳较为常见。四川大学贾利川等^[34]将镓铟合金(镓和铟的质量比 75:25)与聚氨酯复合,通过滴涂-压缩工艺在氨纶/涤纶基底上构建了柔性导电网络,并以此替代传统的金属纤维。所制材料电导率达 26 023 S/m,电磁屏蔽效能达 86 dB,拉伸 30%后电磁屏蔽效能仍可达到 68 dB。但该材料也存在局限性,主要体现在液态金属成本较高,以及长期使用中可能因氧化而发生泄漏等问题。Cheng 等^[35]利用溶剂型聚四氟乙烯薄膜、棉织物和导电银浆,开发出含有银网格的电磁屏蔽层压织物,降低了成本。高明乾^[36]开发了一款多层带电作业屏蔽服,其由基材层(柞蚕丝层和脱脂羊毛层)、导电层(不锈钢纤维层和蒙乃尔合金丝层)和耐磨层(聚丙烯纤维层和聚酰胺纤维层)通过热熔胶黏合而成,耐磨性与导电性优异,但也存在覆膜层压织物布面偏硬,灵活性欠佳,透气性差,易形成闷热感等不足。Herzberg 等^[37]报道了一种新型的抗电击功能防护套装,其服装、手套和袜子皆为 3 层结构,即外层为阻燃、抗撕裂织物,中层为连续金属化的导电层,由铜或银制备,里层为可以吸汗的纯棉针织物。穿着时,手部、脚部及全身被屏蔽材料覆盖,若再增加头部防护,其屏蔽效率可达 48 dB。但需注意的是,抗电击功能防护套装不可避免会有接缝,为确保整套防护服的载流能力和屏蔽效应,接缝处需采用高导电性的缝纫线进行缝纫,这不可避免地会影响到其舒适性。陕西元丰蔡普宁等^[38]基于不锈钢纤维、芳纶及锦纶构建了兼具导电、阻燃与耐磨特性的协同复合结构面料。这种结构能在人体与外部高压电场间形成稳定的等电位屏蔽层,从而有效阻止电荷积累。制备的面料面电阻小于 300 Ω ,耐受 1 000 kV 交流高压电场,屏蔽效率>33 dB。但该面料也存在一些不足,如:较高的金属纤维含量会导致织物透气性下降,穿着舒适性受影响;长期使用后,金属纤维可能因氧化而导致导电网络稳定性降

低,导电性能衰减。

此外,研究人员还尝试通过改变织物结构和材料来实现防护服透气性与舒适性的提升。Lai 等^[39]以高收缩聚酯(HS-PET)长丝、316L 不锈钢线和竹炭粗纱制备针织屏蔽材料,发现其具有更大的透气率。姜淑媛等^[40]将柞蚕丝和不锈钢纤维混纺,开发出夏、春秋及冬季用屏蔽绸。且经测试发现,其电气性能和服用性能均满足标准要求,可长期用于 500 kV 及以下等级的带电作业服中。

当前,带电作业屏蔽服的研发已取得显著进展,但装备整体偏重、透湿性能较差,织物在轻质化、透气性和舒适性等方面仍无法满足带电作业防护的多元需求。

2.3 脉冲高压电防护装备

脉冲高压电防护主要针对的是电流造成的伤害。脉冲电流典型的表现形式包括雷击电流和电击武器释放电流等。其防护按作用机制可分为 3 类:导电屏蔽型、绝缘阻隔型和复合耗散型。其中,复合耗散型防护材料已广泛应用于脉冲电流防护领域,其防护机制的核心是多层结构的协同作用。

现有一种雷击防护膜由导电层、隔离层和绝缘层组成,其基本原理是:在结构外表面构建一条安全的导电路径,将大部分雷击电流限制于材料表面并快速地传导,同时隔离层起阻燃隔热的作用,以有效保护目标免遭雷击的影响和伤害^[41-42]。宁波诺丁汉大学益小苏等^[43]设计了一种集导电、雷击防护、电磁屏蔽于一体的复合材料,其采用多层结构,具体由导电增强体、表面防护层和树脂基体组成。其中,导电增强体为导电织物,由导电纬纱和碳纤维经纱编织而成;表面防护层与导电增强体通过树脂基体结合。电流流经导电增强体时,通过自身耗散以达到保护的目的。还有一种名叫“雷神盾”的纺织品,专门用于应对电击武器。该纺织品主要由聚酯纤维基底与复合导电材料构成,其防护机制为,当遭遇电击武器攻击时,面料形成的导电层能够将脉冲电流从接触点迅速导出,通过构建外部通路使电流回流至源端,从而有效阻断电流向人体内部的传导,令电击武器失效^[44]。Xia 等^[45]利用热压工艺将银改性碳纳米管纸(SMBP)-碳纤维/酚醛(CF/PF)复合材料添加到碳纤维增强基体表面,制作了一种由导电层和散热层组成的双层材料,散热性能更优,可以减

少热效应带来的损伤。

现阶段,国内外关于脉冲高压电防护装备的研究成果相对较少。基于现有产品的设计思路,可设计多层防护结构以实现脉冲高压电的有效防护,例如通过设置导电层来保护目标体,引导电流流向地面或回流到源端,避免流经目标体,同时辅以绝缘层或隔热层防止或减少电流热效应造成的损伤。

3 结论与展望

本文分析了直流、交流和脉冲 3 种高压电的特点及其防护机制,介绍了相关防护装备的研究进展,指出不同高压电有不同的特征:直流高压电无感抗、容抗,电压恒定,人体直接接触后易导致肌肉强直性收缩,且产生的电弧难熄灭;交流高压电电压与电流方向呈周期性变化,其电弧虽易在过零点熄灭,但在高电压下易发生重燃,且易产生磁场干扰人体;脉冲高压电具有瞬时能量高、上升沿陡峭等特点,可能引发电击损伤、神经反射异常等问题。研究表明,3 类高压电因电气特性差异而致伤机制各异,直流电防护需侧重绝缘隔离与隔热阻燃,交流电防护需兼顾电磁屏蔽与电弧伤害,脉冲电防护则需聚焦能量引导与多层复合屏蔽。在装备层面,基于本质阻燃纤维的电弧防护服已实现良好的热防护性能,但阻燃性、隔热性与透湿性、亲肤性间的矛盾尚未根本解决;绝缘防护装备虽在防潮材料研发上取得进展,但国产化与产业化进程仍显迟缓,产品长期依赖进口;带电作业屏蔽服以不锈钢纤维为核心虽可实现优异的电气性能,但高金属含量导致的透气性差与穿着舒适性不佳等问题亟待突破;脉冲防护装备的多层复合结构已成为主流技术路线,但针对电击武器等特定脉冲源的专用防护装备研究仍较薄弱,系统性设计理论与评价体系尚待建立。综上,高压电防护装备正从单一功能防护向多功能一体化演进,但如何平衡防护性能与穿着舒适性,兼顾导电效率与长期稳定性,仍是当前研究面临的核心难题。

未来,高压电防护装备的研发将从材料创新、结构优化、智能化集成等多维度协同推进。如材料层面,聚焦高牢度导电涂层的开发,通过纤维表面预处理、复合掺杂及封装技术,提高涂层与基底的结合强度,以及耐环境稳定性;结构层面,探索导电网络与

透气通道的设计,借助 3D 间隔编织、中空纤维等结构创新技术,实现导电性与舒适性的协同调控;智能化层面,将柔性传感元件与防护面料一体化,实现对电场强度与穿戴者生理状态的实时监测及风险预警,推动防护装备从被动防护向主动预警跨越。同时,探索绿色制备工艺与废弃材料回收技术,以满足日益严格的环保要求。相信,随着上述研究的持续推进,高压电防护装备有望在保障作业安全的同时进一步实现轻量化、舒适化与智能化,为电力安全与国防防护提供更为可靠的技术支撑。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 徐硕,王炜,王树军,等. 输电线路带电作业安全防护的研究[J]. 电气时代, 2018(10): 70-71.
- [2] 张晓玲. 医疗设备漏电致电击伤及其防护[J]. 实用医药杂志, 2009, 26(6): 73.
- [3] 程江. 高压直流输电技术的特点及其在我国的发展前景[J]. 江西电力职业技术学院学报, 2005, 18(2): 24-25.
- [4] 张福海. 关于医疗器械介入患者体内的安全供电问题的想法[J]. 科技风, 2013(2): 260.
- [5] 陈小芳. 防电弧服的产品设计与开发研究[J]. 纺织导报, 2024(5): 46-49.
- [6] 石生智. 交流特高压输电线路带电作业工器具及作业方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [7] 施金武. 交流框架式低压断路器灭弧系统研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2005.
- [8] 杨志良, 邓荣杰. 电气设备对环境的影响及防护措施[J]. 科技创新与应用, 2014, 4(13): 73-74.
- [9] 刘琳, 李世雄, 肖秋利, 等. 我国电力行业安全防护服的现状及发展[J]. 棉纺织技术, 2015, 43(4): 79-82.
- [10] 刘博亚. 基于开关电源模块的 EMI 建模仿真及干扰特征分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [11] 荀国立, 信泽坤. 飞机雷击防护材料研究进展[J]. 稀有金属, 2025, 49(10): 1605-1619.
- [12] 刘慧慧, 唐孔科, 韩玉洁, 等. 防电弧服产品认证概述及建议[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(1): 49-53.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会.

- 防护服装 防电弧服: GB 8965.4—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [14] 唐虹, 沈钰茜. 国内外防电弧服开发及性能评价体系研究[J]. 纺织导报, 2024(5): 41-45.
- [15] 周永洪. 电力行业个体防护装备配备需求分析[J]. 中国个体防护装备, 2023(4): 42-44.
- [16] 汤晓兰, 钱俊, 丁致家, 等. 面料颜色对电弧防护面料性能的影响[J]. 产业用纺织品, 2020, 38(5): 32-36.
- [17] 唐昕. 国内防电弧服的技术要求及面料研究进展[J]. 化纤与纺织技术, 2020, 49(9): 9-10.
- [18] 张生辉, 樊争科, 肖秋利, 等. 防电弧面料的开发与研究[J]. 中国个体防护装备, 2015(6): 5-8.
- [19] 毛宁, 牛荟蓉, 柳静献. 聚芳恶二唑纤维耐酸特性的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 719-725.
- [20] 李冻, 周晨宇, 傅佳佳, 等. 聚芳噁二唑纤维在防电弧混纺纱中的应用[J]. 上海纺织科技, 2018, 46(12): 59-61.
- [21] 王辰明, 王云仪, 李小辉. 电弧防护服装的研究现状及进展[C]//中国纺织工程学会服装服饰专业委员会 2014 学术报告会论文集, 2014:334-338.
- [22] 葛昭, 孙瑜择, 叶青. 配电网带电作业中优化设计的绝缘遮蔽用具应用分析[J]. 通讯世界, 2017, 24(19): 215-216.
- [23] 郝旭东, 梁东, 高校维, 等. 带电作业绝缘防护用品的研究[J]. 电力安全技术, 2011, 13(7): 41-42.
- [24] 周巧芬. 绝缘服布料: CN201310586487.1[P]. 2014-04-23.
- [25] 杨绍远. 一种电力检修安全防护装置: CN201821846017.9[P]. 2019-08-06.
- [26] 刘金, 袁晓松, 任兴忠, 等. 绝缘手套工频耐压试验仿真及其试验周期改进研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(6): 804-811.
- [27] 梁曦东, 仵超, 左周, 等. 高电压有机外绝缘发展综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7412-7425.
- [28] 陈美玉, 李伟萍, 王秋实, 等. 抗电击功能防护服的研究进展[J]. 纺织高校基础科学学报, 2024, 37(2): 14-23.
- [29] 侯琳, 徐炎炎, 樊争科, 等. 带电作业屏蔽服织物的发展现状与趋势[J]. 合成纤维, 2022, 51(3): 29-34.
- [30] 汪洋幸, 李陆通, 李文辉, 等. 交流高压静电防护服装标准的解读[J]. 棉纺织技术, 2024, 52(1): 69-73.
- [31] 陶留海, 彭勇, 刘红伟, 等. ± 1 100 kV 带电作业用屏蔽服装的研制[J]. 机电信息, 2018(27): 17, 19.
- [32] 肖秋利. 芳纶混纺带电作业屏蔽服织物的开发要点[J]. 棉纺织技术, 2013, 41(5): 52-54.
- [33] 房戈, 张艳梅, 刘艳霞, 等. 一种带电作业屏蔽服及带电作业屏蔽服面料: CN201821779305.7[P]. 2019-11-19.
- [34] 贾利川, 汪梦灵, 段秋雨, 等. 一种高压静电防护服导电织物的制备方法: CN202211458555.1[P]. 2023-01-31.
- [35] CHENG H C, CHEN C R, HSU S H, et al. The electromagnetic shielding effectiveness of laminated fabrics using electronic printing [J]. Polymer Composites, 2020, 41(7): 2568-2577.
- [36] 高明乾. 一种带电作业屏蔽服: CN202021896501.X[P]. 2021-06-15.
- [37] HERZBERG C, RÖDEL H, ENGELMANN E. New shielding protective equipment for live working [J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2001, 13(3/4): 301-308.
- [38] 蔡普宁, 刘琳, 张小民, 等. 一种高压静电防护面料及其制造工艺: CN201610693499.8[P]. 2018-06-29.
- [39] LAI M F, LOU C W, LIN T A, et al. High-strength conductive yarns and fabrics: mechanical properties, electromagnetic interference shielding effectiveness, and manufacturing techniques[J]. The Journal of the Textile Institute, 2021, 112(3): 347-357.
- [40] 姜淑媛, 高冬敖, 华美丹. 带电作业织物屏蔽绸的设计与织造[J]. 上海纺织科技, 2002, 30(4): 31-32.
- [41] 孙田培, 赵大方, 李建恒, 等. 新型雷击防护膜 90°剥离强度的性能影响研究[J]. 中国胶粘剂, 2025, 34(5): 55-64.
- [42] GAGNÉ M, THERRIault D. Lightning strike protection of composites[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 64: 1-16.
- [43] 益小苏, 蒋民强, 刘晓玲, 等. 一种导电、雷击防护、电磁屏蔽一体化复合材料及其制备方法: CN202311560471.3[P]. 2024-02-27.
- [44] 刘恒之. 警用电击武器简介[J]. 现代世界警察, 2019(3): 36-51.
- [45] XIA Q S, ZHANG Z C, MEI H, et al. A double-layered composite for lightning strike protection via conductive and thermal protection [J]. Composites Communications, 2020, 21: 100403.