



弹用导电液溶胶毁伤材料性能研究

张之 , 王树山, 魏继锋

北京理工大学; 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

摘要 针对基于闪络毁伤机理的反电力系统弹药, 探讨了其装填物和毁伤元素: 导电液溶胶材料需具备的主要性能, 包括导电性能、抗清除性能、闪络性能、贮存性能和高低温性能 5 个方面; 提出了一种以改性丙烯酸树脂为基料的银包铜系导电液溶胶原理配方, 重点分析了导电粒子、稀释剂以及偶联剂含量等对导电性能的影响规律, 初步试制出了材料样品, 并对样品进行了综合性能测试。测试结果表明, 试制出的材料样品导电性能较高, 附着力强, 抗溶剂性能好, 高低温性能稳定, 综合性能良好。采用该材料样品进行了闪络毁伤试验, 对绝缘子的毁伤效果明显, 证明该种材料具有应用前景, 并为进一步的研究打下了重要基础。

关键词 电力系统; 闪络毁伤; 导电液溶胶; 导电性能

中图分类号 TJ410.1, TM85

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)24-0037-04

Properties of Conductive Fluid Sol Used in Blackout Ammunition

ZHANG Zhiwei, WANG Shushan, WEI Jifeng

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology;
Beijing Institute of Technology, 100081, China

Abstract An ammunition against power systems based on the mechanism of high-voltage flashover is proposed. The essential properties of the damaging elements (conductive fluid sol) are discussed, including electrical conductivity, anti-removal property, flashover property, long-term storage property and high/low temperature stability. The sample of conductive fluid sol is trial-manufactured with the modified acrylic resin as binder and silver-plating copper particles as conductive filler. The effects of the relative amounts of filler, thinner and coupling agents on the electrical conductivity are analyzed. In view of the physical and chemical properties, it is shown that the sample enjoys good performance. The simulation damage test shows that the sample has a good damage property against insulator and the conductive fluid sol has a promising prospect. The results lay a foundation for further researches.

Keywords power system; flashover damage; conductive fluid sol; electrical conductivity

0 引言

反电力系统弹药是非致命软杀伤武器的突出代表, 也是该技术领域的研究热点。电力系统的各种电气设备都要通过架空线路进行连接, 并通过架空线路实现电力的输送。架空线路之间以及线路与设备之间, 分别通过空气和绝缘子(包括支柱、套管等)实现绝缘, 破坏绝缘和使系统短路是反电力系统软杀伤武器最主要的毁伤途径。相对于导电纤维弹的引弧毁伤技术, 文献[1]提出了一种有前途的反电力系统毁伤新原理, 即以导电液溶胶介质为毁伤元素, 通过雾化分散使其附着于变电站、发电厂的高压外绝缘设备(绝缘子、套管、支柱等), 缩短爬电距离, 进而使得绝缘设备产生沿面放电和闪络现象, 最终造成系统短路, 并称之为绝缘子闪络毁伤技术。

导电液溶胶材料性能对弹药最终的毁伤效果具有决定性, 其中导电性能至为关键。现有的导电液溶胶材料主要应用于导电涂料行业, 由于使用目的不同, 不能达到该类弹药的应用要求。文献[2]针对此类弹药的应用目的, 配制出了一种改性导电涂料, 但从导电性能方面不能达到很好的效果, 也不能满足材料的军用标准。因此, 必须对导电液溶胶材料加以进一步的研究。本文首先从作为弹药装填物和毁伤元素的用途和功能出发, 探讨了导电液溶胶材料应具备的主要性能; 然后提出了一种以改性丙烯酸树脂为基料的银包铜系导电液溶胶原理配方, 在分析导电粒子、稀释剂以及偶联剂含量对导电性能影响的基础上, 初步试制出了弹用导电液溶胶材料样品; 最后对材料样品的各项性能进行了测试, 并进行了闪络毁伤模拟试验。通过测试与试验证明, 该材料综合性能良好, 并具有很好的毁伤效果。

收稿日期: 2009-09-15

基金项目: 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室基金项目(ZDKT 08-04)

作者简介: 张之, 博士研究生, 研究方向为新概念弹药与高效毁伤技术, 电子信箱: liverpool@sina.com; 王树山(通信作者), 教授, 研究方向为新概念弹药与高效毁伤技术、终点效应学, 电子信箱: wss2003@bit.edu.cn



1 弹用导电液溶胶材料的主要性能

从弹药应用和毁伤作用原理出发,结合液体弹药的特点,归纳出了导电液溶胶毁伤材料应具备的主要性能。

1.1 导电性能

导电性能通过电导率来体现,电导率越大则导电能力越强,反之越小。导电液溶胶的导电能力是影响毁伤效果的关键因素,电导率越大,闪络电压越低,越容易造成电力系统的闪络毁伤。因此,如何提高导电液溶胶材料的导电性能是重点研究的问题。

1.2 抗清除性能

附着在绝缘子表面的导电液溶胶涂层应具备抗清除的能力,不能被轻易清除掉。抗清除性能主要是与导电液溶胶的附着力、抗溶剂性能有关。

1) 附着力。附着力是指导电液溶胶涂层与绝缘子表面结合在一起的坚牢程度。这种结合力是由导电液溶胶涂层中聚合物的极性基团(如羟基或羧基)与绝缘子表面的极性基相互作用而形成的。

2) 抗溶剂性能。一般的导电涂料,均易溶于酒精、汽油、水等溶剂,可被较轻易地清除掉,因此导电液溶胶材料必须具有难溶于一般溶剂的性能。

1.3 闪络性能

导电液溶胶引起绝缘子闪络跳闸时,电力系统会启动自动保护装置,尝试重合闸,这就要求导电液溶胶涂层在一次闪络形成的高温电弧作用后,依然保持较好的表面状况,具有较高的导电性,重合闸后依然能够致使闪络发生。耐闪络性能主要是与导电液溶胶涂层的耐热性、高温减量、电导率变化量等有关,最终体现在绝缘子闪络电压变化量上。

1.4 贮存性能

若要满足装配弹头的需要,导电液溶胶材料需有足够长的贮存期,弹药的贮存期通常要10年以上。贮存性能是指战斗部中的导电液溶胶在正常贮存条件下,经过一定贮存期限后,物理或化学性能所能达到原规定使用要求的程度以及导电液溶胶与容器材料的相容性,反映导电液溶胶在长期存放后可能产生的异味、增稠、结皮、返粗、沉底、结块、干性减退、酸值升高等性能变化的程度。

1.5 高低温性能

为了满足战斗部的使用要求,应保证在-40~70℃保持导电液溶胶材料的上述性能都能满足要求^[3]。

2 导电液溶胶材料试制

2.1 原理配方设计

导电粒子采用镀银铜粒子复合导电材料,导电性好,价格较低,而且不易被氧化。粒子形貌为片状,与其他形貌的导电粒子相比,接触面积较大,接触机会和接触的层次较多,产生的电阻较小。理论上讲,导电粒子的粒径越小,平均粒径的分布越窄,导电性越高,黏度越大,表面能也越大,在贮存过程中可以防止其沉降。但粒径过小时,分散性较差,不容易在

基体树脂中分散均匀,而且十分易于氧化。考虑到实用性与经济性两方面,粒径范围定在200~400目之间^[4]。

基体聚合物采用水性丙烯酸改性树脂,对金属导电粒子的黏接性好,具有良好的附着力与化学稳定性。溶剂选用亲水性好的低温挥发温和溶剂,含有乙醇、乙酸乙酯和异丙醇,形成水基、溶剂混合型材料。偶联剂选用钛酸酯,能够改善导电粒子与基体树脂的相容性与化学反应性,充分分散导电粒子,形成立体导电网络。黏度剂采用羧甲基醋酸丁酸,在特定溶剂中具有一定的黏度,并具有触变性和流平功能,成膜时使片状导电粒子紧密排列,提高涂层的导电性。增稠剂采用碱流膨胀乳状增稠剂,使水性丙烯酸改性树脂具有一定高的黏度。pH值调节剂选用三乙胺调节pH值,使系统呈弱碱性状态,以有限调节黏度,并能减缓金属粒子的氧化。

2.2 导电性能影响分析

2.2.1 导电粒子含量

导电粒子含量与涂层的表面电阻率的关系如图1所示。由图1可见,随着导电粒子含量的增加,表面电阻率 ρ 首先呈逐渐下降的趋势,在导电粒子含量达到65%时,电阻率达到最低,随后继续增加导电粒子含量,电阻率反而会有所增高。

在对液溶胶添加导电粒子时,随着用量的增加,导电性逐渐升高,并达到一个最大值,此时用量称之为“渗滤阈值”,继续加入导电粒子,超过此临界值之后,由于导电粒子之间难以实现良好的链状连接,会导致电阻率升高,而且过量的导电粒子会降低导电液溶胶的黏度。许多研究^[5-7]表明,绝大多数导电复合体系均会发生“渗滤现象”,而且不同体系具有不同的“渗滤阈值”。对于本体系,可认为65%为导电粒子渗滤值,在选取导电粒子含量时,应在此值的附近进行选取。

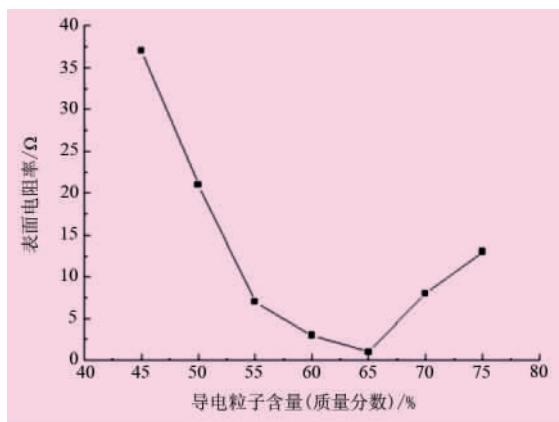


图1 表面电阻率与导电粒子含量的关系

Fig. 1 Relationship between the surface resistivity and the conductive particle content

2.2.2 稀释剂含量

在65%导电粒子含量下,考察稀释剂含量对涂层的表面电阻率的影响,其结果如图2所示。可以看出,稀释剂含量过多或过少时表面电阻率都较大,在15%~25%时,表面电阻率

最低。这主要是因为稀释剂含量过少时,树脂溶解不充分,且干燥过程中高聚物易于向填料表面析出,妨碍了导电粒子间的直接接触和干燥过程中涂层的收缩;稀释剂过多时,导电粒子间距大,难于因黏结剂收缩而聚集。进一步的研究证实,稀释剂过多或过少时,涂层的密度都较小,而在电阻率最小时,涂层的密度最大^[2]。

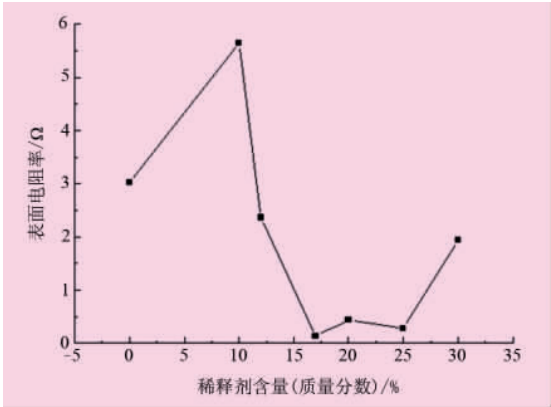


图 2 表面电阻率与稀释剂含量的关系
Fig. 2 Relationship between the surface resistivity and the thinner content

2.2.3 偶联剂含量

在 65%导电粒子含量下,考察偶联剂含量对涂层的表面电阻率的影响,其结果如图 3 所示。可以看出,随着偶联剂含量的增加,表面电阻率逐渐降低,在达到 3%含量时,电阻率达到最小值,随后又升高。

在未添加偶联剂时,导电粒子大部分未分散开,不能形成良好的导电网络,故此时涂层的电阻率较大。随着偶联剂含量的增加,导电粒子越来越分散开,整个涂层形成立体的导电网络,电子易通过导电网络和隧道效应自由移动,故此时涂层的电阻率降低。当偶联剂含量增加到一定程度后,导电网络已经形成,继续添加偶联剂反而会增大导电粒子表面有机层厚度,增加导电粒子间间距,阻碍导电通道的形成。

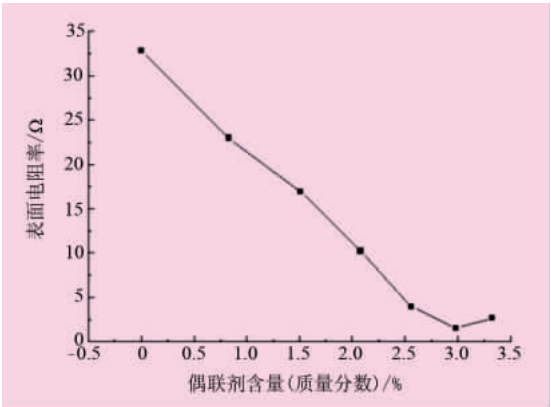


图 3 表面电阻率与偶联剂含量的关系
Fig. 3 Relationship between the surface resistivity and the coupling agent content

2.3 样品的试制与综合性能测试

在以上论证和分析的基础上,试制了导电液溶胶毁伤材料样品,其中导电粒子含量为 65%、基体树脂含量 12%、溶剂含量 15%、偶联剂含量 3%、其他调节剂含量 5%。

对制得的导电液溶胶样品按相应国家标准进行了部分性能参数的测试,结果如表 1 所示。从测试结果来看,该导电液溶胶材料导电性能较高,附着力强,抗溶剂性能高,高低温性能稳定,综合性能良好。

表 1 导电液溶胶性能参数 Table 1 Properties of conductive fluid sol		
测试项目	测试结	测试方法和标准
表面电导率/S	16.67	
表面电阻率 ρ/Ω	0.06	
导电粒子形状	片状	
导电粒子半径/ μm	78	
密度/ $(\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	1.24	GB/T 1713-89
pH 值	5.58	GB/T 1717-86
附着力/级	1 级	GB/T 9286-88
耐盐水性	优	GB/T 1763-89
耐有机溶剂性	优	GB/T 1734-93
耐高温性	$\rho\leq 0.1\ \Omega$	70℃, 1 000 h
耐低温性	$\rho\leq 0.1\ \Omega$	-40℃, 96 h
热冲击试验	$\rho\leq 0.1\ \Omega$	(-40±2)℃/1 h $\Rightarrow$ (70±2)℃/1 h, 15 循环
热循环试验	$\rho\leq 0.1\ \Omega$	(-40±2)℃/2 h $\Rightarrow$ (25±2)℃/0.5 h $\Rightarrow$ (70±2)℃/2 h, 20 循环

3 绝缘子闪络毁伤模拟试验

利用制得的导电液溶胶材料样品,涂覆在耐受电压为 90 kV 的 XP-40C 型单个绝缘子部分表面,进行了闪络毁伤模拟试验,并在绝缘子发生一次闪络后,再次合闸进行二次闪络对比试验^[8]。闪络前后绝缘子表面涂层状况的对比如图 4 所示。图 5 为绝缘子的闪络全过程。



图 4 闪络前后绝缘子表面涂层状况
Fig. 4 Comparison of insulator surfaces before and after flashover

从图 4 可以看出,除了具有部分黑色烧灼痕迹外,绝缘子表面涂层上并没有出现脱落、起皮等不良现象。两次试验的

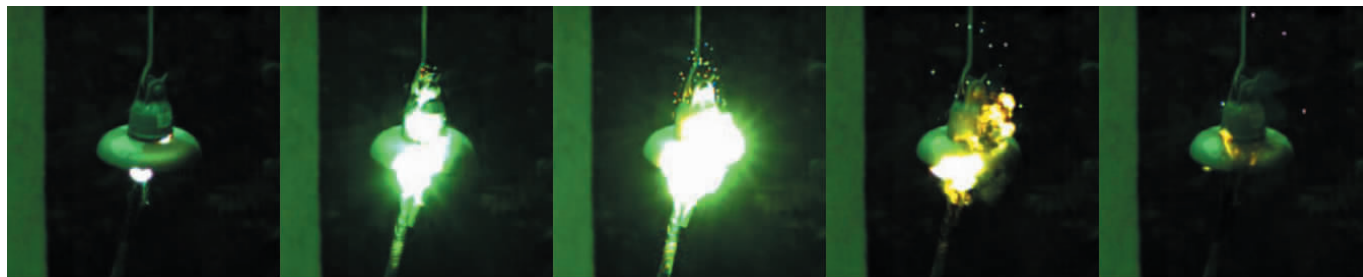


图5 绝缘子闪络过程
Fig. 5 Process of insulator flashover

闪络电压均较绝缘子额定耐受电压有大幅降低, 达 50% 以上。闪络前后涂层质量大约减少了 14%, 但减少的大多是易于挥发的溶剂材料, 对涂层的表面电导率影响不大, 因此二次闪络电压与一次闪络电压也没有明显变化。

4 结论

1) 提出了导电液溶胶毁伤材料应具备的主要性能, 包括导电性能、抗清除性能、耐闪络性能、贮存性能和耐高温性能 5 个方面。

2) 在试制的样品体系中导电粒子含量 (质量分数) 在 65% 左右时导电性能最佳, 稀释剂用量应控制在 15%~25%, 偶联剂含量 (质量分数) 应控制在 3% 左右。

3) 制得的导电液溶胶样品具有良好的导电性能, 附着力和抗溶解性强, 不易被清除, 且耐高温使用性能稳定, 绝缘子闪络试验表明, 该样品具有较好的毁伤效果。

参考文献 (References)

- [1] 张之, 王树山, 魏继锋, 等. 绝缘子闪络毁伤特性试验研究 [J]. 北京理工大学学报, 待发表.
Zhang Zhiwei, Wang Shushan, Wei Jifeng, et al. *Journal of Beijing Institute of Technology*, accepted.
- [2] 丛晓民. 电力设施绝缘干扰剂研究 [D]. 北京: 北京理工大学宇航科学技术学院, 2004.
Cong Xiaomin. Research on disrupter against electric power system

insulatibity [D]. Beijing: School of Aerospace Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, 2004.

- [3] 王伯羲. 软杀伤弹用胶粘剂的性能表征 [J]. 兵工学报, 1998, 19(3): 284-286.
Wang Boxi. *Acta Aeronautica*, 1998, 19(3): 284-286.
- [4] 杜仕国, 闫军, 张同来, 等. 醇酸树脂铜粉复合导电涂料的研制 [J]. 涂料工业, 2004, 34(11): 19-21.
Du Shiguo, Yan Jun, Zhang Tonglai, et al. *Paint & Coatings Industry*, 2004, 34(11): 19-21.
- [5] 丛晓民, 王鹏, 杜志明. 水性丙烯酸/石墨导电涂料[J]. 涂料工业, 2004, 34(6): 20-23.
Cong Xiaomin, Wang Peng, Du Zhiming. *Paint & Coatings Industry*, 2004, 34(6): 20-23.
- [6] 张柏生. 关于导电涂料导电性能的讨论[J]. 涂料工业, 1996, 26(1): 31-36.
Zhang Bosheng. *Paint & Coatings Industry*, 1996, 26(1): 31-36.
- [7] 邓安平, 杜恒清, 陈世山, 等. 导电涂料性能的研究 [J]. 青岛海洋大学学报, 1999(增刊): 225-228.
Deng Anping, Du Hengqing, Chen Shishan, et al. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1999(Suppl): 225-228.
- [8] 郝沁宇. 绝缘子闪络毁伤效应模拟试验研究 [D]. 北京: 北京理工大学宇航科学技术学院, 2008.
Gao Qinyu. Simulative experimental study on damage effect of the insulator flashover [D]. Beijing: School of Aerospace Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, 2008.

(责任编辑 吴晓丽)

·学术动态·

“2010 年冬虫夏草国际会议”征文

由农业部草原监理中心、世界自然基金会(WWF)主办, 国际应用生物科学研究中心(CABI)、中国农业科学院草原研究所、中国农业科学院农业资源和农业区划研究所协办的“2010 年冬虫夏草国际会议”将于 2010 年 6 月 8-10 日在青海省西宁市举行。

会议议题: 冬虫夏草资源管理、贸易的政策法规; 冬虫夏草资源与环境; 冬虫夏草科学研究进展; 冬虫夏草采集、包装、产品开发等技术和应用; 冬虫夏草资源与产地经济发展及农牧民收入; 冬虫夏草的国际贸易秩序。

本次会议面向相关科技工作人员征集论文, 届时将编辑出版《中国草地学报》中英文特刊。全文截稿日期为 2010 年 3 月 1 日, 论文录用通知日期为 2010 年 4 月 1 日。

会议网站: <http://www.grassland.gov.cn>; 联系人: 刘启正; 联系电话: 010-59194717; 电子信箱: liuqizheng@agri.gov.cn。