

地铁接触轨三元复合绝缘子的开发

周菁

(北京城建设计研究总院有限责任公司 100037)

摘要 分析北京地铁接触轨系统所采用的各种绝缘子的优缺点,提出在电气性能、机械性能不降低的前提下,采用成型快、成品一致性好、易回收、环保、价格低的热塑性复合材质的绝缘子。从材料特性、绝缘子结构和成型工艺等方面,详细阐述三元复合绝缘子的特点,并与北京地铁目前采用的各种绝缘子进行比较。

关键词 北京地铁 接触轨 三元复合绝缘子 复合材料 热塑性

中图分类号 U231⁺.8 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2010)01-0104-04

绝缘子是电气系统接触悬挂的主要部件之一,主要用来悬挂或支持带电体,将带电体与接地体隔离,起到绝缘作用。

在城市轨道交通接触轨系统中,绝缘子将接触轨与结构体绝缘,并对接触轨进行支撑和定位。绝缘子可以承受接触轨的自重和放在接触轨上 150 kg 的短时集中载荷,也可以承受接触轨在系统短路故障情况下的冲击载荷,因此它需要有较强的机械性能和电气性能。目前,北京地铁所采用绝缘子的基本性能要求为:额定电压 3 000 V,干弧电压 27 000 V,湿弧电压 20 000 V;抗弯性能不小于 20 kN。

1 不同材料绝缘子的技术特点

北京地铁所采用的绝缘子有一个发展过程,从最早的瓷质绝缘子到目前所采用的玻璃钢绝缘子。最早 1、2 号线及 13 号线采用的都是瓷质绝缘子,从八通线开始,修建的线路均采用复合材料的绝缘子。其中,八通线和 1、2 号线改造采用环氧树脂绝缘子,5 号线、10 号线、8 号线一期采用玻璃钢绝缘子,八通线车辆段试用过硅橡胶绝缘子。

收稿日期: 2009-06-08 修回日期: 2009-09-27

作者简介: 周菁,女,大学本科,高级工程师,从事轨道交通供电系统设计研究, zhoujing@buedri.com

1.1 瓷绝缘子的优缺点

瓷绝缘子由绝缘子上座、瓷件和下座 3 部分组成(见图 1)。瓷件表面砂厚为 1.5~2 mm,涂乳白釉;上座及下座均为灰铸铁 HT-15-33 与瓷件胶接。

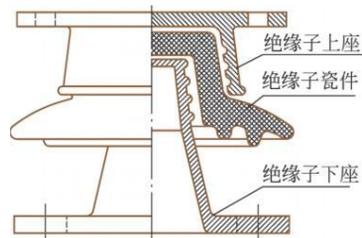


图 1 瓷绝缘子

瓷为无机绝缘材料,能耐受不利的大气环境和酸碱污秽等的长期作用而不受侵蚀,抗老化性能好,具有足够的电气和机械强度,憎水性也具有很大的优势。但瓷件为脆性材料,在运输、安装以及运营时受到硬物撞击较易损坏;普通上釉瓷件的抗拉强度只有 0.3 MPa 在地面温差较大时被拉裂的情况时有发生。北京地铁 1、2 号线在运营过程中平均每个月损坏几十个,13 号线最高时一个月损坏约 200 个。

1.2 复合绝缘子的优缺点

由于瓷绝缘子的损坏率高,而复合材料绝缘子具有较高的抗拉强度,所以逐渐取代了瓷绝缘子。自八通线后,北京地铁已经不再采用瓷绝缘子。为了找到一种适合北京地铁使用的绝缘子,先后试用过环氧树脂、硅橡胶和玻璃钢材质的绝缘子。环氧树脂和硅橡胶绝缘子的外形结构与瓷绝缘子一样,伞裙为绝缘材料,上、下座均为铸铁件,与伞裙为胶接;玻璃钢绝缘子的外形则完全不同(见图 2),其中绝缘子芯为 Q235A 材料,绝缘体为绝缘材料。

虽然环氧树脂固化物相对其他复合绝缘材料要脆、韧性差,在试用中偶有伞裙碎裂的情况发生,但环氧树脂绝缘子具有耐候性好、电绝缘性能优异、工艺性能好、价格便宜的特点,目前八通线和 1 号线、2 号线改造都采用这种绝缘子。

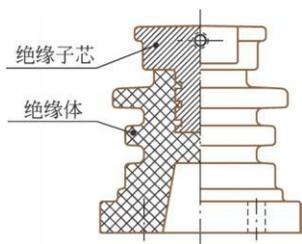


图 2 玻璃钢绝缘子

硅橡胶绝缘子的伞裙为硅橡胶整体注射制成,具有重量轻、强度高、憎水性好、耐污闪能力强、无零值、制造工艺简单、运行维护方便等优点^[1]。但由于伞裙轻软,在地铁线路安装、使用的环境下容易损坏,故北京地铁基本未采用。

玻璃钢材质的绝缘子由 SMC 经过高温高压后成型,是一种热固性玻璃钢。SMC 是由不饱和聚酯树脂、增强材料、引发剂、填料、添加剂和增稠剂等混合而成的一种片材,目前地铁接触轨系统中的绝缘支架、绝缘支座通常采用这种材料。玻璃钢材质具有很高的抗张强度,良好的减振性、抗蠕变性、抗疲劳断裂性,和优良的电气性能,但憎水性没有瓷和硅橡胶好^[2]。除此以外,热固性玻璃钢绝缘子还存在另外一些问题,如生产周期长、成型过程中材料分布不均匀,易产生局部缺陷;特别是回收再利用难、不利于环保等,不符合目前国家的可持续发展要求。

目前,科技发展日新月异,新材料的发现和运用也愈加广泛。热塑性复合材料由于具有许多优点,如密度小、强度高,性能设计自由度大,成型加工效率高、成本低,质量一致性好,可重复使用等,近年来发展很快,使用前景极为广阔^[3]。本文即介绍采用以热塑性高分子材料成型的三元复合绝缘子。

2 三元复合绝缘子的材料分析

高分子材料可采用的基体材料很多,如世界五大通用工程塑料,以及聚苯硫醚(PPS)和聚醚醚酮(PEEK)等。但有些热塑性材料价格昂贵,如聚醚醚酮(PEEK)每吨价格可达 20 万元,虽然材料性能好,但性价比低。考虑到接触轨绝缘子的特性要求、使用环境以及价格要求等因素,最后选定 PC、PPS 和 PA66 三种材料为基体加以改性,作为三元复合绝缘子的材料。

2.1 PC

聚碳酸酯(PC)是指分子链中含有碳酸酯的一类化合物,是世界五大通用工程塑料之一,其产量和消费量仅次于尼龙(PA),居世界第二位^[4]。

PC 的突出性能是:冲击强度高、抗蠕变性和尺寸稳定性好、耐热、透明、吸水性低、无毒、介电性优良、良好的耐气候性等。PC 的不足之处是:加工流动性差、易应力开裂、对缺口敏感、易磨损等。一般采用与其他聚合物共混对 PC 进行改性,可克服上述缺点。改性 PC 包括增强 PC 和 PC 合金两大类,其中合金化是 PC 改性的重要途径。

2.2 PPS

聚苯硫醚(PPS),全称为聚亚苯基硫醚。PPS 的分子结构比较简单,分子主链由苯环和硫原子交替排列,大量的苯环赋予 PPS 以刚性,大量的硫醚键又提供柔顺性。分子结构对称,易于结晶,无极性,电性能好,不吸水。PPS 的突出性能是:良好的耐热性能,可在 180~220℃ 温度范围内使用,耐腐蚀性接近聚四氟乙烯,电性能、机械性能优异,阻燃性能好,耐老化性能好。PPS 的不足之处是:价格高,韧性差、性脆,中粘度不稳定。纯 PPS 因性能脆而很少单独使用,应用的 PPS 多为其改性能品种。

2.3 PA

聚酰胺(PA),俗称尼龙,是工程塑料中历史最悠久、综合性能较优异、产量最大、应用最广泛的非金属材料^[3]。PA 品种繁多,其中 PA6 和 PA66 占主导地位。PA66 的特点是:疲劳强度和刚性较高,耐热性较好,摩擦系数低,耐磨性好。PA66 的不足之处是:吸湿性大,尺寸稳定性差。一般需对其进行增强改性,以提高力学强度,同时减小尺寸收缩率,降低吸水率。

2.4 改性高分子材料

工程塑料的特性就是可对其改性,去芜存菁,使之成为制造高性能绝缘子的新材料。PPS/PA 合金为改性聚苯硫醚,其抗拉强度可达到 238 MPa 以上,冲击强度可达到 16 kJ/m²。PPS/PA 合金在盐雾、湿热及温度冲击条件下,有良好的环境适应性。采用热空气老化试验,拉伸强度寿命为 85 年,冲击强度寿命期限最短为 31 年。太阳辐射试验表明,材料力学性能变化不大,具有一定的光老化稳定性。

从表 1 可以看出,热塑性材料和热固性材料的电气性能基本相当,电击穿强度高于热固性材料,主要表现在机械性能方面不同。PPS/PA 合金的抗拉强度比热固性玻璃钢高,但冲击强度小于后者。热固性玻璃钢复合材料为各向异性,各向异性的层间裂纹位于夹层中,玻璃纤维布在垂直方向承受的力大,而其他两个厚度方向能够承受的力很小。层压板的层间界面相是

基体树脂,因为玻璃布每层之间只是通过树脂来连接,强度不能通过层压板的测试取得。实际上,层间界面可以认为是均质基体,其强度就等于基体的强度。热固性玻璃钢材料在厚度方向上的实测缺口冲击强度为 32 kJ/m^2 。而热塑性材料各向均匀,每个方向承受的压力基本相同。实际上,热塑性复合材料的 I 型层间断裂韧性高于热固性复合材料^[5]。所以,虽然 PPS/PA 合金的材料冲击强度小于热固性材料,但产品的性能却可以达到使用要求,或者更好。

表 1 几种玻璃钢材料特性的比较

参数	热塑性高分子材料			热固性玻璃钢
	PPS/PA 合金	PC/PPS 合金	改性 PA66	
体积电阻率 $\Omega \cdot \text{m}$	10^{14}	10^{15}	10^{14}	10^{14}
工频耐受电压 /kV	40	40	40	40
工频湿耐受电压 /kV	20	20	20	20
污耐受电压 /kV	5	5	5	5
抗拉强度 /MPa	≥ 238	82	≥ 165	170
弯曲强度 /MPa	332	99	≥ 245	120
冲击强度 $/(\text{kJ/m}^2)$	16.4	80	15	240
玻璃纤维体积含量 /%	50	20	40~45	25
电击穿强度 $/(\text{kV/mm})$	16.9	34	20	6
固化度 /%	—	—	—	95
耐泄痕性	PTI600	PTI600	PTI600	PTI600
吸水率 /%	0.4	0.12	1	0.2
耐燃性能	V-0级	V-0级	V-0级	V-0级
摩擦系数	0.47	—	0.4	0.5
热变形温度 / $^{\circ}\text{C}$	262	144	240	150

3 三元复合绝缘子的产品设计

三元复合绝缘子的产品延续瓷绝缘子的外形结构,但在产品设计中充分发挥热塑性材料的特性,使产品的壁厚减少至 8 mm。通过计算机力学模拟,在产品受力点增加 4 mm 厚的筋板,使产品的最终重量减至 1.8 kg(硅橡胶绝缘子重 4.5 kg 环氧树脂绝缘子重 7.5 kg 热固性玻璃钢绝缘子重 3.7 kg)。

3.1 三元复合绝缘子的结构形式

三元复合绝缘子由 3 部分组成:绝缘子上座、伞裙和绝缘子下座(见图 3)。分析绝缘子的受力情况,可以看出,绝缘子下座受主力,需采用机械强度较高的材料;绝缘子上座和卡子与接触轨接触,正常情况下受摩擦力和重力、曲线应力(曲线段),接触轨由于热胀冷缩作用时与上座和卡子发生摩擦,需采用耐磨型材料;伞裙底部有沟回,满足绝缘子的爬电距离,要求在地铁环境中保持较好的电性能。

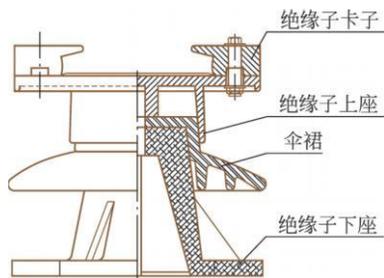


图 3 三元复合绝缘子

3.2 三元复合绝缘子的材料选择

结合以上 3 种高分子复合材料特点,绝缘子下座采用 PPS/PA 合金,其抗拉强度满足抗弯 20 kN 的系统要求;绝缘子上座和卡子采用改性 PA66,其耐磨性高于热固性材料,与接触轨接触时,摩擦力较热固性材料小,有利于接触轨的自由滑动;伞裙采用 PC 合金,因为 PC 合金吸水率较低,能在较宽的温度范围内保持较好的电性能,冲击性能好。这样结合,可以在价格不提高的条件下,使产品具有较高的机械性能、电气性能和较低的摩擦系数等。

3.3 三元复合绝缘子的成型工艺

三元复合绝缘子上座、下座、伞裙、卡子采用注塑工艺,分别成型,成型后组装。热塑过程分为 3 部分,首先原料在 140°C 的环境中充分干燥 6~8 h 然后将模具预热至 80°C ,料桶的温度控制在 300°C ,注射压力约为 80 kg。绝缘子成型所要求的温度和压力完全由计算机控制。原料在料桶中充分熔融,可使产品的性能更均匀。由于成型时间短,约为 3 min,使产品的人工费用大幅度降低。

4 三元复合绝缘子的性能特点

利用 PPS/PA 合金、PC 合金和改性 PA66 制造的绝缘子,除满足地铁绝缘子的基本要求外,还具有重量轻、生产周期短、寿命期长(可达 30 年)、可回收再利用等特点。除此以外,与上面提到的几种绝缘子相比,其特点还表现如下。

- 1) 与瓷绝缘子相比,三元复合绝缘子的抗弯及抗拉强度高,具有耐冲击强度高、不易损坏的特点;绝缘子伞裙的憎水性与抗污性能与瓷绝缘子基本相当。
- 2) 与环氧树脂绝缘子相比,三元复合绝缘子的抗弯及抗拉强度高,具有耐冲击强度高、不易损坏的特点;绝缘子伞裙的憎水性与抗污性能比环氧树脂绝缘子稍高。
- 3) 与硅橡胶绝缘子相比,三元复合绝缘子的抗弯

及抗拉强度相当,但硬度高,在使用中不易损坏;绝缘子伞裙的憎水性与抗污性能相当。

4) 与玻璃钢绝缘子相比,三元复合绝缘子的厚度约为 8 mm,玻璃钢绝缘子的绝缘体平均壁厚约为 20 mm。三元复合绝缘子在成型过程中无填料,只添加了改善其性能的添加剂;而玻璃钢片材的填料多为石灰,使成品笨重,且在模压过程中由于材料流动性不强,造成玻璃纤维分布不均,从而降低了机械强度。三元复合绝缘子采用注塑工艺,1 h可生产 20个;而玻璃钢采用模压工艺,1 h可生产 3~4个。三元复合绝缘子价格低,约为同型号玻璃钢材质绝缘子的 4/5。

5 结语

绝缘子性能是材料配方、产品设计和制造过程相互影响的结果,本文所提到的三元复合材料(PPS/PA合金+PC合金+改性PA66)绝缘子就是这样的产物。在产品的设计过程中,充分利用基体材料的特性,并使其合金化,增进材料特性,改善其不足,并对绝缘子的结构进行力学分析,使产品达到或超过现有水平。

三元复合材料绝缘子从性能看,某些指标可以达

到或超过现有产品的性能;从环保的角度看,其本身材料无毒,在制造环节没有刺激性气味,不影响环境,产品可回收再利用,符合国家可持续发展的要求;从价格看,只比瓷绝缘子价格高,比其他复合材料绝缘子价格都低,价格适中。

三元复合材料绝缘子已经在地铁 13号线试用,它的性能特点在不久的将来将得到验证,应有广阔前景。

参考文献

- [1] 魏军源, 庞茂东. 合成绝缘子的应用与事故预防 [J]. 电气时代, 2003(7): 97.
- [2] 饶军, 梁志勇, 张佐光. 热塑性复合材料断裂韧性研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 1995(1): 8-10.
- [3] 肖德凯, 张晓云, 孙安垣. 热塑性复合材料研究进展 [J]. 山东化工, 2007, 36(2): 15-21.
- [4] 赫妮娜, 刘俊龙. 聚碳酸酯合金研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2006, 35(1): 69-72.
- [5] 黄家康, 岳红军, 董永祺. 复合材料成型技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.

(编辑:郭洁)

Developing New Insulators for Metro Third Rail

Zhou Jing

(Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100037)

Abstract Advantages and disadvantages of all kinds of insulators for the third rail system of Beijing metro are analyzed. New insulators with equivalent electrical and mechanical characteristics and made from thermoplastic composite materials are recommended, which feature fast molding, better uniformity, great recyclability, environmental friendliness and the low price. Characteristics of composite insulators are described in detail from the aspects of materials, configuration and molding techniques, and comparisons were made between the composite insulator and other kinds of insulators used in Beijing metro at present.

Key words Beijing metro; third rail; composite insulators; composite materials; thermoplastic

校企联合建立教学与科研实践基地

2010年1月20日,北京交通大学与北京城建设计研究院总院举行了联合建立教学与科研实践基地的签约仪式。联合建立教学与科研实践基地的目的在于:一是充分发挥校企双方的优势,共同培养高素质、高质量的专业技术人才;



在联合培养期间,增加企业对学生的全面了解,提高人才选拔的效率,也有效地缓解企业人员紧张的问题。二是加强企业的继续教育,选派人员参加工程硕士的培养,促进企业人才队伍的建设,保障企业的可持续发展。三是开展科技项目合作,共同解决企业生产的关键问题和科技前瞻的问题。

(蔡超 供稿)

郑州地铁校企合作培养专业人才

2009年底,北京交通大学与郑州市轨道交通有限公司签署战略合作协议,并举行博士工作站揭牌仪式,这将十分有利于郑州市培养自己的地铁专业人才。

按照合作协议,北京交通大学博士工作站将协助郑州市解决轨道建设运营中遇到的各类难题,而轨道公司也将成为北京交通大学的专业技术人才实训基地,双方将在人才培养、科研合作等领域在校企之间开展长期广泛的合作。

摘编自 www.chinametro.net 2009-12-25