

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

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 000V,干弧电压 27 000V,湿弧电压 20 000V;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。

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 1.5~2mm,涂乳白釉;上座及下座均为灰铸铁 HT-15-33,与瓷件胶接。

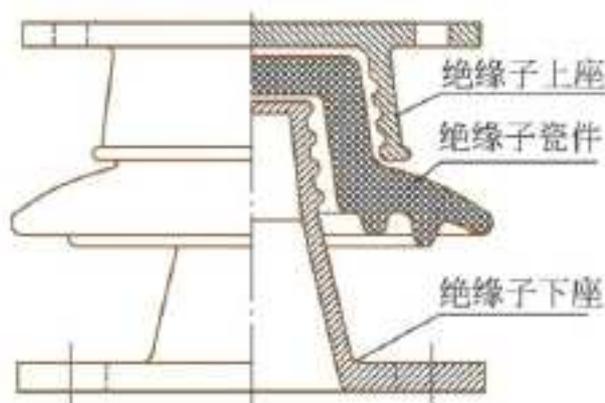


图 1 瓷绝缘子

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,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 0.3MPa,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。

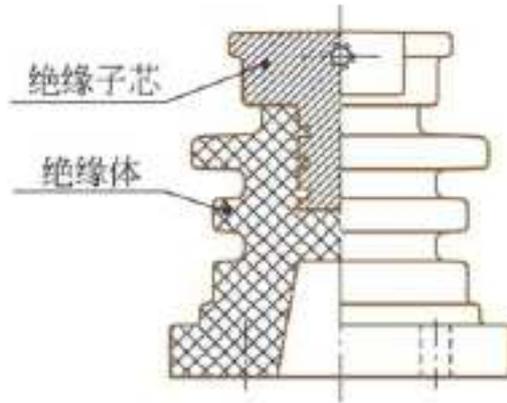


图 2 玻璃钢绝缘子

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。

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,新材料的发现和應用也愈加广泛。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 238MPa 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/m²。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 /Ω·m	10 ¹⁴	10 ¹⁵	10 ¹⁴	10 ¹⁴
工频干耐受电压 /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 /(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 /(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 /℃	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8mm。通过计算机力学模拟,在产品受力点增加4mm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。

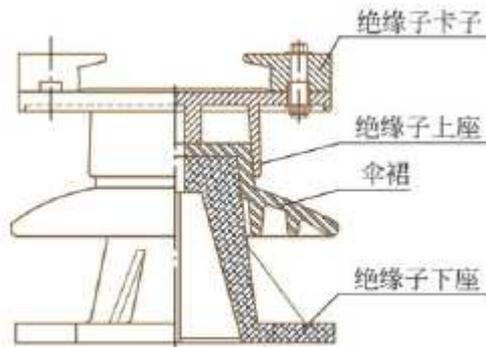


图3 三元复合绝缘子

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℃的环境中充分干燥6~8 h,然后将模具预热至80℃,料桶的温度控制在300℃,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稍高,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.

