

研
究
开
发机车车顶高分子复合
绝缘子的研究与应用

韩克勤

(沈阳铁路局, 辽宁 沈阳 110001)



作者简介: 韩克勤 (1952-), 男, 高级工程师, 从事机车检修运用管理工作。

摘 要: 为解决电力机车车顶绝缘子在严寒结冰、冻雨、大雾、潮湿天气发生的闪络炸瓶和漏电击穿现象, 采用高分子复合材料 (高温硫化硅橡胶) 增加污闪梯度, 改变裙伞凹面增加爬电距离, 合理设计增加连接强度, 提高了安全可靠, 延长了使用寿命。

关键词: 机车; 高分子复合绝缘子; 闪络; 漏电击穿

中图分类号: U264.3; TM854 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)02-0022-03

Research and Application on Polymer Composite Insulator of Locomotive Roof

HAN Ke-qin

(Shenyang Railway Bureau, Shenyang, Liaoning 110001, China)

Abstract: The polymer composite insulator had been used to increase flashover gradient in order to solve the phenomenon of flashover bottle bomb and breakdown leakage of polymer composite insulator appeared in cold ice, freezing rain, fog, wet weather. The safety and reliability had been improved and the service life had been extended by changing skirt concave to increase creepage distance and increasing joint strength reasonably.

Key words: locomotive; polymer composite insulator; flashover; breakdown leakage

0 引言

车顶绝缘子作为电力机车车顶的重要绝缘支撑构件, 其绝缘强度和机械强度以及技术可靠性方面的要求很高。由于气候、环境对绝缘子的污染, 当遇到严寒结冰、雾雪潮湿天气时, 传统的车顶瓷绝缘子容易出现闪络、炸裂、击穿等事故, 使运行中的机车被迫停开、更换, 甚至烧断接触网导线, 危及行车安全, 干扰了正常运输秩序, 有时造成路风事件给旅客的利益造成很大损失。

沈阳铁路局管内配属 SS₄、SS₉ 型电力机车运用伊始, 每到初冬 0 左右冰雨、严寒结冰、开春湿雾天气时, 都会出现因车顶绝缘子污闪、湿闪发生影响行车的机车故障, 特别是在 2003 年、2004 年罕见的严寒风雪冻雨天气, 因车顶绝缘子闪络问题造成机车故障 37 件, 共停时超过 118 h, 一度造成局管内的京哈线、沈大线、

沈山线货运列车停运、客运列车大面积晚点。

解决车顶绝缘子闪络问题, 是我国铁路电力技术现代化中的重要课题。经过多年的努力, 研制出高分子复合绝缘子, 经过各种极端恶劣天气的考验, 现已大面积装车运行, 成功地解决了这一难题。

1 研制目标

安装连接尺寸以现有机车车顶绝缘子为依据, 保持产品应用范围的连续性;

根据东北地区气候复杂多变特点, 采用新材料、新工艺改变现有瓷质绝缘子, 增加绝缘强度, 同时适当改变裙伞外形, 增加爬电距离;

采用新材料做到绝缘子表面少被污染, 一旦闪络后自动恢复绝缘, 将运输损失降到最低;

在考虑气候与运行条件的同时, 使性价比合理;

考虑到动车组运行速度和为以后机车提速预留空间, 增加绝缘子机械强度。

收稿日期: 2011-01-26

2 高分子复合绝缘子的研制

1) 高分子复合材料的选型

选择合适的材料是提高车顶绝缘子的污闪和湿闪技术指标的保证。

污闪梯度可用式(1)表示：

$$E = U/L \quad (1)$$

式中： E 为污闪梯度，与绝缘材料有关； U 为污闪电压； L 为爬电距离。

经过多方比较和测试，确定选用抗污闪能力强的高温硫化硅橡胶作为绝缘材料。根据清华大学对电力绝缘子的有关测试证明，在相同条件下，高温硫化硅橡胶材料绝缘子的污闪梯度是瓷绝缘子的2.8倍^[1]。

2) 爬电距离的确定

根据式(1)，加大绝缘子的爬电距离 L ，是提高污闪电压的有效办法。

由于机车车顶空间尺寸限制和陶瓷工艺技术的局限性，传统的车顶瓷质绝缘子表面的爬电距离最小的只有650 mm，新型的复合绝缘子在裙伞设计时将常规的双面凸角改成上凸下凹形状，使得每个伞裙的下部凹面均有凸起量很大的加强筋，并增加了裙伞数量，使爬电距离大大增加。

新型的复合绝缘子最短爬电距离 L 达到900 mm，由式(1)得到 $U = E \times L$ ，又已知硅橡胶的污闪梯度 E 为0.073 kV/mm^[1]，计算的 U 值为65.7 kV，大于设计标准32 kV，能够满足要求。

3) 采用新材料的优点

采用高温硫化硅橡胶制作的绝缘子有以下优点：

憎水性。当伞裙表面被雨水淋湿或者在大雾潮湿气候时，雨水和湿气不能形成片状的导体，而象落在荷叶上一样，形成一个个孤立的水珠，然后在重力或气流作用下滚落，使伞裙表面保持良好的绝缘电阻和污闪电压。

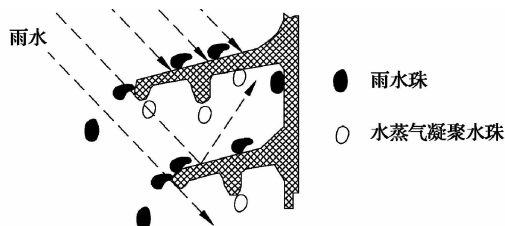


图1 高温硫化硅橡胶制作成的绝缘子

憎水迁移性。当空气中的污秽物粘附在绝缘子的伞裙上以后，这种憎水性可以迁移到这些污秽物，使之具有同样的憎水性。

憎水性恢复。当绝缘子的伞裙表面受到强烈摩擦、高温、酸碱破坏作用时，这种憎水性会在作用的瞬间降低甚至消失，但在这些破坏作用失去后不久，伞裙表面的这种憎水性又会完全恢复。

耐污持久性。也就是憎水迁移效应能维持的时

间，高温硫化硅橡胶的这种耐污性能可以持续到整个使用寿命期20年以上。这种特有的憎水性迁移和憎水性恢复特点，能有效地保证车顶绝缘子在免清扫的情况下具有可靠的绝缘强度。

抗老化性。能够引起合成材料绝缘子老化的主要是阳光中的紫外线，能量达到398 kJ/mol。高温硫化硅橡胶的分子结构带有端乙烯基，其中主要的是Si-O键，其键能达到445 kJ/mol，所以强烈的阳光不能“打断”高温硫化硅橡胶的硅氧键，使车顶绝缘子外绝缘伞套具有足够的使用寿命。

提高裙伞机械强度。机车高速运行时气流的冲刷对绝缘子裙伞造成高频率飘摆，是造成合成绝缘子裙伞容易撕裂与变形的原因所在。裙伞每个伞裙的下部凹面均有凸起的加强筋，增加了机械强度。

因此，新型机车车顶合成绝缘子在运行中不需要清扫维护，也不会发生污闪和湿闪。

4) 绝缘子绝缘强度与机械强度的关系

车顶绝缘子的内绝缘是绝缘子的主绝缘，同时是受电弓等车顶高压电器的承力构件。机车在高速运动时，为了保证车顶绝缘子具有高的绝缘水平和机械强度，绝缘电阻 R 和绝缘芯棒的最大受力点的弯曲强度必须同时满足式(2)~式(4)：

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{\rho L}{\frac{\pi}{4} d^2} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{M_{\omega}}{W} = \frac{M_{\omega}}{\frac{\pi}{32} d^3} < [\tau] \quad (3)$$

$$f = \frac{Pl^3}{3EJ} = \frac{Pl^3}{3E \frac{\pi}{64} d^4} \quad (4)$$

式中： ρ 为材料的体积电阻系数； L 为有效绝缘长度（或泄漏距离）； d 为等效绝缘直径； τ 为许用弯曲剪切应力； M_{ω} 为绝缘子受到的外力矩，是一个与机车运动状况有关的变量； l 为绝缘子高度； P 为弯曲应力； J 为截面轴惯性矩； E 为弹性模量。

由式(2)可知， R 与绝缘长度 L 成正比，与绝缘直径 d 的平方成反比。由于机车车顶尺寸空间的限制，加上绝缘子两端的金属连接件，使得芯棒的有效绝缘长度 L 受到严格限制；现代高速机车运行中车顶绝缘子受到强大的外力作用，由式(3)、式(4)知芯棒的直径必须尽可能地做大，这与加大绝缘电阻 R 必须减小芯棒的直径 d 是矛盾的。因此必须对芯棒的绝缘强度与机械强度进行合理设计。

高分子复合绝缘子所选择的芯棒材料是环氧玻璃纤维引拔棒。这种材料是把经过表面处理好的玻璃纤维浸渍环氧树脂，在经锥形模具加热引拔固化，间隙

密实无气泡。这种材料的增强纤维每一根都是在受到拉伸力时呈定向排列的,其拉伸强度和弯曲强度甚至大大超过了优质碳素钢。其相应技术参数为:体积电阻系数 $\rho \geq 1\,010\,\Omega \cdot \text{m}$;弯曲强度 $\tau \geq 1\,100\,\text{MPa}$,安全弯曲强度 $[\tau]$ 为 $550\,\text{MPa}$ 。

受电弓支持绝缘子在车顶上最短,其有效绝缘长度 L 为 $198\,\text{mm}$;等效绝缘直径 $d=25\,\text{mm}$,结合式(4)中的挠度要求,取 $d=56\,\text{mm}$;通过式(2),得到绝缘电阻计算值为 $R=8.04 \times 10^5\,\text{M}\Omega$,满足设计要求。

按照设计弯矩 $M_0=8\,\text{kN} \cdot \text{m}$,芯棒截面直径 $d=5.6\,\text{cm}$,代入式(3),得到弯曲剪切应力 $\tau=464\,\text{MPa}$,小于安全弯曲强度。

根据标准TB/T 3077^[2],机车受电弓支持用绝缘子弯曲破坏负荷不小于 $8\,\text{kN}$,取 $10\,\text{kN}$,则70%的弯曲破坏负荷 $P=7\,\text{kN}$,受电弓支持绝缘子结构高度为 $l=31.5\,\text{cm}$,轴惯性矩为 $J=48.27\,\text{cm}^4$,玻璃纤维引拔棒的弹性模量为 $E=30\,\text{GPa}$,代入式(4),得到挠度 $f=5.04\,\text{mm}$,小于结构高度的2%,满足标准规定。

5) 机械连接方面的考虑

车顶绝缘子机械强度要充分考虑长期工作的安全可靠,高速运行中绝缘子在车顶受力复杂,重点考虑金属连接附件与材料芯棒的连接强度,绝缘子端部连接设计非常重要。

端部是绝缘件和金属件的连接,为防止底部金属件和玻璃钢芯棒连接界面不破坏芯棒表面,同时考虑金属附件在长期受力状态下疲劳蠕变最小,端部附件按照图2装配,按照图3设计。

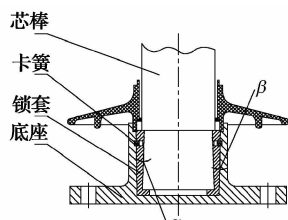


图2 端部附件装配图

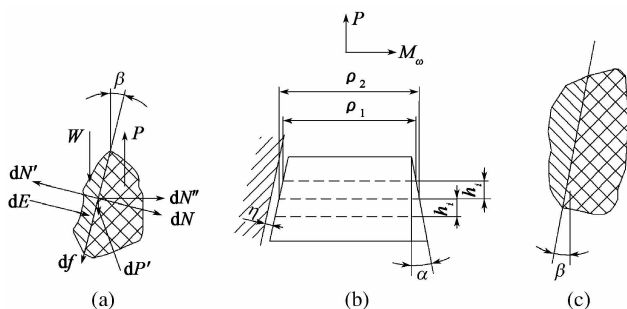


图3 端部附件设计图

图2中的芯棒的端部做成外大内小的锥形,锥角为 2α ;卡簧为开口圆环形,截面形状为矩形;锁套为内外锥度相反的变形套,内锥有牙齿,外锥有环形槽;底座的内锥也有环形槽。装配时通过底座的内锥与锁套的外锥之间的很大过盈量,使锁套的牙形内锥收缩固定芯棒。底座压装到位后,内锥中的环形槽会与锁套

外锥的环形槽对正,预先放在锁套外锥的环形槽中的卡簧会回弹扩张进入底座的环形槽中进行定位。

由图3可知,依靠压装底座的力 W 使锁套收缩,对芯棒产生径向压力 $E=W/\sin\beta$,同时通过牙齿的嵌入增大摩擦力。工作时受到外力 P 和 M_0 后,端部附件机构将外力转化为锁套对芯棒的径向压力 N 和摩擦力 f 。由图3(b)可知,对端部附件内任一相邻的小段 h_i ,因为 $\rho_2>\rho_1$,所以有 $dV(\rho_2)>dV(\rho_1)$ 。

6) 防止内部漏电闪络的措施

由于机车高速运动和车顶的设计空间限制,应改进工艺设计以控制内部漏电闪络。

对芯棒表面进行粗糙和洁净处理,芯棒的表面电阻率和耐压水平均提高了36%以上。

伞套与芯棒之间采用硅油调节的反应型硅胶进行灌注成型。这种胶在密封状态下能发生常温硫化而不产生收缩和气体,并将伞裙套和芯棒粘合在一起,在伞套与芯棒之间形成一层柔软的缓冲层。

3 试验与应用

通过试验,高分子复合绝缘子的各项指标符合标准TB/T 3077。在现场应用中,沈阳机务段试装的SS90010号、0013号、0038号在未做维护清扫的情况下,3台机车2003年末和2004年经受了突如其来的大雾考验,并平稳运行至入厂大修。随后高分子复合绝缘子在沈阳铁路局电力机车上大面积装车运行,在2005年大雪和2008年冻雨的极端恶劣天气考验下,没有发生污闪、湿闪,为铁路运输提供了强有力的动力保证。

4 结语

车顶绝缘的安全和可靠性关系到铁路正常行车秩序及运行安全。高分子复合绝缘子利用高温硫化硅橡胶特有的憎水性和憎水迁移性,提高抗雾闪、污闪、湿闪能力;裙伞的设计增加了爬电距离,且不易积尘;裙伞的准流线型凸面在运行中产生的高速气流具有很好的自洁作用;裙伞边缘强度高,不易变形撕裂。设计中很好地处理了绝缘强度与机械强度的关系,对机械连接和防止内部漏电闪络方面也做了周密的考虑,提高了安全性、可靠性,延长了使用寿命。

此外,高分子复合绝缘子的机械强度指标要比国家标准高2.5~7.5倍,工频干闪络电压达到了 $75\,\text{kV}$,是绝缘子额定工作电压的3倍,也为今后适应高速铁路的发展,新型移动装备的再提升预留了足够的空间。

参考文献:

- [1] 薛家麒.合成绝缘子及其耐污性[J].高压电器,1993(4)
- [2] TB/T3077.2—2006,电力机车车顶绝缘子 第2部分:复合绝缘子[S]