

[连接器]

高压快速自锁连接器设计

文/史陶比尔（杭州）精密机械电子有限公司 李太华 马长海 杨 勇 陈瑞瑞 徐 恒 张楼行

10 kV连接器在应急供电设备上是一环，讲述了一款10 kV高压快速自锁连接器的设计，包括应力锥的界面压力、通流和发热、快速自锁机构设计，以及密封设计和材料的选择，对目前的技术水平进行了阐述，分析了产品设计、客户操作便利性和产品安全性能等。

随着经济社会的快速发展，社会各界对于供电可靠性提出了越来越高的要求，尤其是重大活动保电、热点敏感地区供电、重点保障项目建设等对不间断供电提出了更高的要求。配电网不停电作业正是以实现用户对用户的不间断供电为目的，是国际先进企业的通行做法，通过采用带电作业、旁路作业等方式对配电网设备进行检修作业，已成为提升供电可靠性和优质服务水平最直接、最有效的重要手段。高压不停电作业电压等级有10 kV和20 kV、30 kV，其中以10 kV应用最广泛，10 kV不停电作业通过引流夹钳、柔性电力电缆、快速自锁连接器、负荷开关、移动箱变车和绝缘斗臂车等，以搭积木的方式搭建配电系统向用户供电。当今，客户对快速自锁连接器的要求越来越高，期望使用更大的额定电流、更多插拔次数及更加可靠的连接器。

快速自锁连接器可以广泛应用于10 kV不停电作业，具有快速自锁、性能稳定和可靠性高的特点。快速自锁连接器电气性能见表1。

表1 快速自锁连接器电气性能

序号	试验项目	性能参数
1	额定电压	10 kV
2	额定电流	250 A
3	交流耐压和直流耐压	45 kV，5 min（交流）； 55 kV，15 min（直流）
4	局部放电	在15 kV下，≤10pC
5	冲击电压测试	95 kV，每个极性冲击10次

(续)

序号	试验项目	性能参数
6	机械寿命	3 000次
7	操作力测试	<400 N
8	接触电阻	<50 μΩ
9	绝缘电阻	≥10 GΩ
10	防护等级	插合后IP65,68

高压快速自锁连接器设计关键问题

高压快速自锁连接器由插座端和插头端组成，分别由中心导电部件、中间绝缘组件和外壳组成，还有辅助功能部件，例如实现快速自锁功能的组件，屏蔽及夹紧电缆的格兰头组件，以及密封和带电指示的组件。采用高导电性的全金属外壳，可靠有效地屏蔽高压电场并接地，最大程度地保证使用者的电气安全。高压快速自锁连接器结构示意图如图1所示。

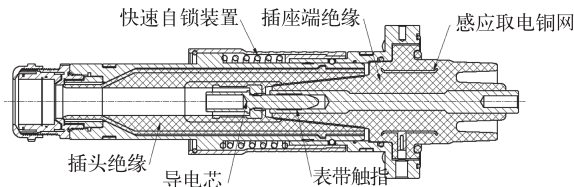


图1 高压快速自锁连接器结构示意图

1. 界面压力设计

国内外电缆附件设计较为成熟，它们的结构大同小异，采用内置应力锥或者外置应力锥结构实现

均化电场的作用，产品的好坏关键取决于细节的设计。本款连接器的插座端绝缘设置为斜面凸台的形式，插头端绝缘设计为喇叭口的形式，插座端和插头端插合后，插座端绝缘和插头端绝缘通过一定的过盈贴合来保证绝缘强度，过盈量是通过外部锁紧装置来实现。过盈量的大小是决定产品性能的关键因素，太大的过盈量会使绝缘变形量过大，短时间的使用就会产生永久变形；过盈量太小又不能实现良好的绝缘性能，存在击穿的风险。

本款连接器插座端主绝缘采用硬质环氧树脂，插头端主绝缘采用软质三元乙丙橡胶，其具有电气性能优异、抗漏电起痕、耐腐蚀性能强及抗划伤的特点。通过对原材料的试验与分析，两个交界面的过盈量设计为0.9 mm。三元乙丙橡胶应力应变测试数据见表2。

表2 三元乙丙橡胶应力应变测试数据

项目	试样高度 h/mm	压缩 强度/ MPa	最大力/ N	规定应变 时的压 缩应力/ MPa	试样直径 d/mm
试样1	12.05	1.1	710.32	0.995 4	28.05
试样2	12.05	1.1	692.80	0.972 9	28.05
试样3	12.03	1.2	721.36	1.015 6	28.05
平均值	12.0433	1.1	708.16	0.994 6	28.050 0

2. 载流部件设计

作为高压大电流连接器，承载大电流时的通流能力及发热情况尤为重要。

本连接器额定电流为250 A，设计温升小于50 K。温升的大小除了和载流导体本身的材质和直径有关外，插头插座对接后的接触电阻至关重要。在铜导体直径相似的情况下，接触电阻的大小直接决定了温升的大小，小的接触电阻可以降低电能损耗，更低的温升可以把高温对绝缘的不利影响降到最低，保障连接器长期可靠运行。

本连接器采用史陶比尔公司专业的表带触指技术，具有优异的电气性能和机械性能。采用多点接触的手段，每个页片具有充分恒定的接触力，可以把接触电阻降到最低；同时表带还保证了连接器良好的机械寿命，数千次的插拔后，仍可以保证可靠稳定的连接，接触电阻值仍保持优异水平。表带还具有良好的散热性能，优良的抗热冲击性能及抗机械冲击性能，在各种工况下表现出优异的连接

性能。

史陶比尔专业表带如图2所示，温升试验如图3所示。

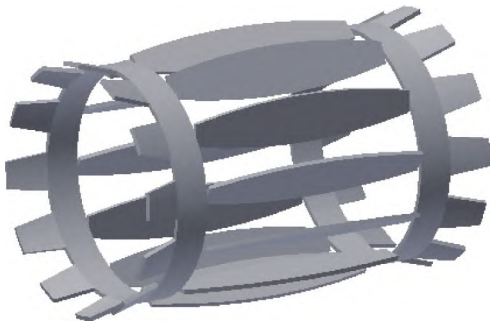


图2 史陶比尔专业表带



图3 温升试验

3. 快速自锁机构

本连接器采用钢珠锁紧的方式，插合到位后松手即可由弹簧机构自动锁定，有效防止由于误碰导致的异常脱开。这对于高压连接器的电气安全非常重要。如果连接器在带高压的情况下异常脱开，产生严重的电弧，可能造成严重的设备和人身危害。解锁时，需要执正确的部件（解锁套筒）先旋转再向后拉，方可解锁。通过调查研究，目前国内市场上相关的连接器也有采用钢珠锁紧的方式，只是钢珠锁紧设计在固定端，客户操作时需要向前推，操作不便，而向后拉和拔出连接器的力的方向是一致的，比较符合人机工程学。同时，如果先进行主动的解锁操作，直接拉电缆后端或其他任何部位，都无法解锁进而拉开连接器。另外，现有产品基本是

需要手动操作的被动锁紧功能，操作者如果遗漏锁紧动作，存在一定的风险。本款连接器的锁紧机构设计在插头侧，而且带有自动二次锁紧功能，插合操作执行到位后，松手即可自动锁紧，操作简单方便，而且从人机工程的角度出发，优化的操作方式和操作力最终达到满意的效果，即使力气较小的女性也可以轻松实现连接器的插拔及锁紧操作。

4. 感应取电设计

环氧插座内为感应取电而设置的感应铜网也是影响产品性能及可靠性的难点，因为感应铜网的大小、形状和位置决定了输出的感应电压及电流的大小，也决定了绝缘内部的电场分布情况，可通过计算机辅助仿真不断优化和改善感应铜网的设计。

给环氧插座施加100 kV的交流电压，电场计算涉及的材料的主要性能见表3。

表3 材料性能数据

材料	空气	SF ₆	环氧树脂
相对介电常数 ϵ	1	1.002	3.5~4.3 (4)

在内部铜杆和感应铜网上加载一定的交流电压，金属外壳电位设为零，得到电场分布情况如图4所示。

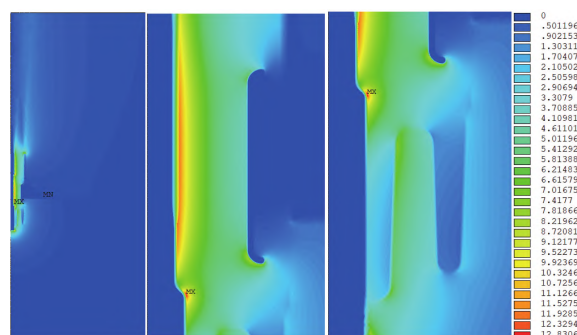


图4 电场分布情况

根据图4，铜网与铜杆之间的电场强度相对较均匀，绝对值也不大，系统中电场强度最大值 $E_{\max}$ 出现在铜杆凹槽下部分拐角处，为12.8 kV/mm；SF₆的场强最大值 $E''_{\max}$ 出现在环氧树脂凹槽内，为7.11 kV/mm。现有结构下，产品中的 $E_{\max}$ 远小于环氧树脂强度，固体绝缘击穿的可能性较小。根据IEC60243-1《固体绝缘材料电气强度试验方法第1部分：工频下试验》，环氧树脂击穿强度指导值为20~30 kV/mm。同时，SF₆内的场强数值也意味着环氧树脂表面发生沿面放电的风险不大。

其他设计问题

1. 密封设计

插头端与插座端插合后密封等级可以达到IP68，要求SF₆柜体的年漏气率 $\leq 0.01\%$ 。插座的密封靠密封圈来实现，在连接器所有断开面位置都设计了密封圈，在环氧树脂与SF₆柜体连接处设置O形圈，在外壳上设置了用于静密封的密封圈，同时巧妙地设计了燕尾槽结构，可以很好地防止O形圈掉落，在插座端壳体内部设置了用于动密封的密封圈，当插头端和插座端插合后密封等级可以达到IP68。

2. 材料选择

电缆附件的结构设计固然重要，然而材料的选择也是至关重要的，产品的电场分布情况和电缆附件的结构设计有关，也和绝缘材料的介电常数有关。绝缘材料的介质强度决定了连接器的耐电压能力，绝缘材料的电性能参数决定了连接器尺寸的大小，如果绝缘材料的电性能参数比较强，那么需要的绝缘厚度就可以适当减小，对产品整体尺寸的控制是很有利的。

由于绝缘材料的参数受温度影响较大，在高温下，电气和机械性能都可能有较大变化，导致介质损耗的增加、电场分布的改变及界面压力的下降等问题，严重时会导致击穿。因此，应考虑连接器使用温度的限制情况。另外，还应考虑各种材料的抗老化等性能。

半导体材料的参数和性能也是影响产品性能的关键，半导体材料的参数设置不合理，会造成交界面的电场压力过大，电场分布不合理，可能导致产品局部放电异常等问题。

插头端选择有弹性的三元乙丙橡胶，插座端采用硬质的环氧树脂，一软一硬，有助于控制形变及界面压力。硬质环氧树脂也易于实现端面密封，利于保证SF₆柜体的泄露率指标。

结束语

本文主要介绍了一款高压快速自锁连接器，包含绝缘界面压力的设计、导体的通流及发热、快速自锁机构、感应取电设计以及密封设计和材料的选择。本连接器具有额定电流大、温升小、插拔次数高和安全可靠的特点，可适用于应急供电领域、环网柜模块化领域以及盾构机装备等。EA

(收稿日期：2022-04-02)