

文章编号: 1674—8247(2018)05—0074—05

铁路牵引供电系统绝缘管型母线关键技术与实践

唐元方 汪秋宾 王志强

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:文章从系统的角度论述了铁路 27.7 kV 绝缘管型母线关键技术,通过标准比对,绝缘性能参数和试验方法选择,以及对接头要点、安装工艺、工程实践、验收与维护的分析,阐述了在铁路牵引供电系统实施绝缘管型母线优良的性能和新型产品技术,提出了解决高速铁路牵引供电系统 27.5 kV 侧大电流多根导线并联问题的技术措施和技术装备。所提出的绝缘管型母线的中间接头以屏蔽套、内衬套控制电场分布和接触面积的方法。试验基于系统试验项目和与电压有关的试验参数可在高速铁路上使用,实现了牵引供电系统更优的技术解决方案。

关键词:铁路; 绝缘管母线; 关键技术; 实践

中图分类号: U226.7

文献标志码: A

Key Technique and Practice of Insulated Tubular Bus-Bar for Railway Traction Power Supply System

TANG Yuanfang WANG Qiubin WANG Zhiqiang

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The key technology of 27.7 kV insulated tubular bus-bar for railway is discussed systematically. Through the standards comparison and the adoption of insulation performance parameters and test methods, as well as the analyses of main points of joint, installation technology, engineering practice, acceptance and maintenance, the excellent performance and new product technology of insulated tubular bus-bar for railway traction power supply system are expounded. The technical measures and technical equipment for solving the parallel problem of multi wires in case of large current on the 27.5 kV side of the traction power supply system are put forward. The intermediate joint of insulated tubular bus-bar proposed in this paper uses shielded sleeve and inner liner to control the electric field distribution and contact area, while the experiment based on system test item and test parameters related to voltage can be used on high speed railway. Thus a better technical solution for traction power supply system is realized.

Key words: railway; insulated tubular bus-bar; key technologies; practice

高速铁路列车运行速度高、密度大,列车功率可达 9 600 ~ 21 560 kW,因此需要配备更大的供电能力。高速铁路多采用 AT 供电方式,铁路牵引变电所 27.5 kV 侧多采用软导体钢芯铝绞线或 27.5 kV 电缆连接,由于钢芯铝绞线或电缆单根最大载流量约 800 A,

要满足单相供电臂负荷 2 000 A 以上电流或牵引变电所 27.5 kV 侧母线约 4 000 A 的电流,需要多根导体并联连接。多根导体的连接头、工艺和安装成为可靠运行的薄弱环节。铜管母线或铝合金管母线是空心导体,导体表面电流密度分布均匀,载流量可达 2 000 ~

收稿日期: 2018-03-21

作者简介: 唐元方(1963-),男,高级工程师。

引文格式: 唐元方,汪秋宾,王志强. 铁路牵引供电系统绝缘管型母线关键技术与实践[J]. 高速铁路技术,2018,9(5): 74-78.

TANG Yuanfang, WANG Qiubin, WANG Zhiqiang. Key Technique and Practice of Insulated Tubular Bus-Bar for Railway Traction Power Supply System[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(5): 74-78.

6 000 A 以上,特别适合工作电流大的回路,牵引 27.5 kV 室外软母线、室内硬母线或开关柜母线桥及牵引变电所至接触网上网供电线采用绝缘的铜管母线或铝合金管母线,可有效解决多根导体并联的问题。

电力系统及配电网系统大电流回路已大量选用管型母线或绝缘管母线,以替代传统的架空电缆和矩形母线,绝缘管母线的高载流量和优良的电气性能已被同行认可,复合绝缘材料所制造的产品也成为电气设备的主要部件。2016 年 12 月国家能源局颁发了 DL/T 1658 – 2016《35 kV 及以下固体绝缘管型母线》标准,给铁路牵引变电所采用 27.5 kV 绝缘管型母线提供了可遵循标准,结合铁路牵引供电系统自身特点,解决大电流多根导体并联问题值得探讨。

1 关键技术分析

绝缘管型母线是集管型母线优点,通过特殊工艺

包以绝缘外套,使其满足大载流量和相关电气性能要求的同时实现全绝缘的,替代封闭母线、多片矩形导体和多跟并联导线等。绝缘管型母线是硬导体,可用于室内、外,通过现场实际测量后,在工厂进行加工,可视作为成套设备进行安装。绝缘管型母线关键技术在于除满足电气、物理性能之外,还与管型材料、绝缘材料、加工工艺、接头技术、试验方法、安装方式密切相关,只有对此进行技术分析,了解其性能,才能用好绝缘管型母线。

1.1 相关标准对照分析

要研制或使用 27.5 kV 绝缘管型母线,首先要对其采用的技术标准和参数进行了解,在 DL/T 1658 – 2016《35 kV 及以下固体绝缘管型母线》正式实施之前,电力配电网中,该产品的试验基本上是沿用了金属封闭母线,因此应对金属封闭母线、电缆及附件和电力配电网固体绝缘管型母线进行分析,结果如表 1 所示。

表 1 相关标准比对及参数选择

项目	金属封闭母线 ^[1] 1GB/T 8349 – 2000	电气化铁路 27.5 kV 单相交流交联聚乙烯绝缘电缆及附件 ^[2] GB/T 28427 – 2012		35 kV 及以下固体绝缘管型母线 ^[3] 。 DL 1658 – 2016	27.5 kV 绝缘管型 母线技术参数
		成品电缆	附件		
电压等级/kV	35	27.5		35	27.5
工频耐压/kV	干 100 kV 湿 80 kV	4 h 交流电压 110 kV 5 min	干 124 kV 5 min 湿 110 kV 1 min	3.5 Un = 91 kV 15 min 湿 80 kV 1 min	干 124 kV 5 min 湿 110 kV 1 min
雷电冲击/kV	185	250	250	200	250
局部放电/kV	–	48 kV 5 pC	48 kV 5 pC	1.73 Un 10 pC	48 kV 5 pC
雷电冲击后随后交流电压试验	–	250 kV 峰值 ±10 次 后 69 kV 15 min	250 kV 峰值 ±10 次 后 69 kV 15 min	200 kV 峰值 ±10 次, 91 kV 15 min)	250kV 峰值 ±10 次后 69 kV 15 min 或 110 kV 1min
tanδ 测量	为绝缘电阻测量 小于 100 MΩ	tanδ 测量 (<10 × 10 ⁻⁴)	–	tanδ 测量 (<4 × 10 ⁻²)	tanδ 测量(<4 × 10 ⁻²)
动热稳定	31.5 kA 80 kA 峰值 2 s	–	31.5 kA 80 kA 峰值 2 s	–	31.5 kA 80 kA 峰值 2 s
盐雾试验	人工淋水试验:考核 封闭母线段的密封	材料绝缘 老化试验	户外终端 34.5 kV 1 000 h	–	材料绝缘老化试验 和 34.4 kV 1 000 h

从表 1 可以看出,封闭母线标准较低,国家标准对成品电缆与电缆头本体和附件的绝缘要求、试验方法和试验顺序不一样,导致电缆连接故障较多。固体绝缘管型母线相关参数选择与电缆一致,试验为成套试验,其本体与接头试验均为同一标准,避免了连接头的薄弱环节。因此,27.5 kV 绝缘管型母线除具有固体绝缘管型母线的特征外,还适应了铁路的电压等级要求。

1.2 绝缘材料性能选择

铁路 27.5 kV 绝缘管型母线的构成从内到外依次是铜管、内屏半导屏蔽层、绝缘层、外屏半导屏蔽层、接地屏蔽层和绝缘护套层。主绝缘材料为乙丙橡胶,通

过三层(第一层半导层、第二层绝缘层和第三层屏蔽防护层)共挤工艺,将导体与绝缘层可靠包裹。绝缘管型母线需有良好的绝缘性能,以满足工频耐受电压、雷电冲击耐受电压及局部放电试验,因此选择绝缘材料和合适的功能性填料是绝缘管型母线的关键技术,乙丙橡胶、聚氯乙烯绝缘材料,具有良好的机械力学性能和电气性能,乙丙橡胶绝缘材料可在 – 50 ℃ ~ + 150 ℃ 温度范围内可靠工作,能克服母线载流量大及连接处接触电阻较大所造成的发热问题。半导层可为固体硅胶,屏蔽防护层可为高分子聚烯烃材料,采用三层真空共挤形成一体工艺技术^[4],将导体与绝缘层可靠包裹,构成 1 根全绝缘管型母线。结合绝缘管型

母线的绝缘特性及具体的生产工艺要求,对乙丙橡胶基料、内外屏蔽基料的功能性助剂,按比例进行配合添加在工艺过程中。

另外,绝缘管型母线在选择绝缘材料时,还应考虑相关的抗张强度和断裂伸长性能(经 135 °C 168 h 空气烘箱后 $\geq 4.2 \text{ N/mm}^2$ 和 $\geq 200\%$),以及在空气温度 250 °C 的环境中施加 0.2 MPa 的应力(15 min),最大伸长率 $\leq 175\%$ (冷却后永久伸长率为小于 15%)的热延伸试验。对于户外接头还应满足在 34.5 kV 1 000 h 的盐雾试验中不出现闪络和击穿现象。

1.3 连接及工艺技术

高压绝缘管型母线系统因母线本体、中间头、90°弯头、终端头等组成,根据安装地点不同又分户内和户外终端。考虑制造工艺和运输,绝缘管型母线本体跨距一般为 7~9 m 1 根,大于此长度需采用中间接头,但接头连接就成为关键技术,既要保证连接处的电场分布均匀,又要保证连接处接触面积足够避免发热。绝缘管型母线采用密封屏蔽绝缘方式,外壳接地电位为零,电场分布均匀,电气绝缘性能强。

铁路绝缘管型母线连接头绝缘结构采用全绝缘主体结构,以屏蔽套和内衬套控制电场分布和接触面积,连接方式采用环抱式紧固连接,接头管内径和绝缘管型母线的外径相等,接头管壁上可有一条轴向的通长开口缝,安装前将屏蔽筒及外侧防护热缩套套入其中一侧铜管,内衬管一端插入铜管一侧端头内,并放入不锈钢套,另一边插入需要连接铜管的端头内,用专用夹具将不锈钢套夹紧并焊接,打磨使绝缘接触面光滑,缠绕耐高温的四氟乙烯自粘带,并将屏蔽筒挪到中间连接位置,用两端缠绕防水胶后热缩外护套,不采用螺栓连接,避免应力集中导致电场的分布不均匀。屏蔽可分离连接接头,该连接技术安装方便、密封良好、电气绝缘性能可靠、拆卸方便。

绝缘母线端部与设备的连接靠终端接头完成,采用端头应力控制连接技术完成与设备的连接,可有效减弱预制接头内的电场畸变。在主绝缘体外,根据电压等级和爬电距离在相应工作区域制作应力控制区,由加强绝缘体和应力锥构成,使母线内部场强均匀,端部表面电位小,减小预制接头直径,便于安装且提高散热性能,保证此部位温升低于导体。

目前,高压绝缘管型母线国内的生产工艺有浇注、绕包和挤包技术。浇注技术是最早从德国引进的,主要是采用环氧树脂真空浇注,成本高、工艺复杂,且局放控制严,需要专用的真空浇注机和大型烘烤设备。

绕包技术采用聚酯薄膜或聚四氟乙烯带表面涂硅油复合绝缘,该技术不需要专用设备,生产门槛低,但绝缘性能不稳定。高压绝缘管型母线采用挤包工艺,采用三元乙丙橡胶(EPDM)或硅橡胶。

铁路专用绝缘管型母线采用的三层共挤技术,工艺流程主要有配模、挤出、硫化、端头处理、产品清洗、包装等,采用多层共挤技术和自动化流水生产工艺,将粒状的绝缘乙丙橡胶、内外屏蔽料在挤出机上进行挤出,非金属屏蔽层和绝缘层一次性挤包在铜管上,在自动化连续硫化罐中进行硫化成型处理,具有抗漏痕、抗电蚀、耐热、耐寒、耐老化、温升低。母线导体内自然形成热空气对流的通道,可参考 GB/T 12706 挤包绝缘电力电缆标准,主要控制挤出温度、压力、时间。生产工艺过程中对绝缘层及屏蔽层尺寸的控制,对挤出过程中机头“老胶”的控制、硫化过程中防止绝缘层与屏蔽层的分开及鼓包是工艺技术的难点。通过成套产品电气试验,铁路高压绝缘管型母线采用乙丙橡胶电气性能更加优于三元乙丙橡胶(EPDM),性能更稳定。

1.4 试验参数及方法

在 DL/T 1658-2016《35 kV 及以下固体绝缘管型母线》实施之前,市场上大部分的绝缘管型母线试验标准仍参照 GB/T 8349-2000《金属封闭母线》作为试验标准,各企业的产品试验项目及标准不一,市场上产品质量参差不齐,导致事故时有发生。据统计,事故主要发生在终端与设备连接发热,母线和中间头绝缘击穿、金属屏蔽层接地线熔断、母线热胀冷缩和基础沉降造成母线变形等方面,因此选择合适的试验标准非常关键。

铁路 27.5 kV 绝缘管型母线没有专有标准,除遵循 DL/T 1658-2016《35 kV 及以下固体绝缘管型母线》标准外,还应结合铁路电气化特殊电压实际工况,参照 GB/T 28427-2012《电气化铁路 27.5 kV 单相交流交联聚乙烯绝缘电缆及附件》作为试验标准,按照更加严格的标准来选择试验参数和试验方法。

目前国内成品电缆和附件一般是由不同的厂家生产,在电气化铁路电缆标准中,其参数和试验方法不太一样且分开进行。成品电缆可用 5 m 作样品,除绝缘试验外,侧重材料的老化试验,未对绝缘试验强调试验顺序。冲击后的工频试验只有对电缆附件作工频耐压顺序要求,选择加热循环试验及随后的局部放电试验(20 个循环后局放试验),盐雾试验仅对终端接头有要求。在 GB/T 8349-2000《金属封闭母线》标准中,没有湿闪电压,仅有淋雨试验且试验目的和方法与电缆和绝

缘管型母线的试验方法不一样(考核封闭母线试验段外表面包括焊缝、外壳的各种连接等密封性能)。绝缘管型母线试验分型式试验、特殊试验、出厂试验、验收试验,通常型式试验在第三方试验站进行,虽然 DL/T 1658 标准在 2017 年 5 月才开始实施,很多试验站还未对试验方法进行详细研究,但要在同一试件(母线本体+中间头+90°弯头+终端头)完成所有试验,且必须按照试验顺序进行,因此,绝缘管型母线的试验要比成品电缆或封闭式母线试验要求严格。铁路用绝缘管型母线相关的试验电压参考了铁路电缆标准,电压参数更加严格,绝缘管型母线型式试验主要有工频耐压、雷电冲击电压、温升试验、动热稳定、局部放电、tanδ 测量试验(试验参数如表 1 所示)。盐雾试验可作为特殊试验,按户外电缆终端头考虑

表 2 27.5 kV 钢芯铝绞线、电缆、铜绝缘管型母线载流量及根数

对比项目	钢芯铝绞线 LGJ-400 导体 70℃ 环境 35℃		交联聚乙烯绝缘铜芯电缆-400 导体 90℃ 环境 40℃		27.5 kV 铜绝缘管型母线 导体 90℃ 环境 40℃	
	单根载流量(A) ^[5]	根数	单根载流量(A) ^[5]	根数	单根载流量(A)	根数
需要 2 500 A 载流时	810	4	890	3	2 500	1(φ60×9)
需要 4 000 A 载流时	810	5	890	5	4 000	1(φ80×10)

2.2 安装方式

目前铁路牵引变电所 27.5 kV 侧导线有室外安装和室内安装,室外采用软导体,且多根导体并联连接,室外与室内穿墙时需采用穿墙套管。采用 27.5 kV 绝缘管型母线后,可根据不同的安装空间、不同的进出线方式进行安装,安装方式灵活,可倒吊安装、直立安装、横梁立柱安装等,亦可水平折弯安装在地沟走线侧

34.4 kV/1 000 h;出厂试验为例行试验,主要有外观检查、局放电压 48 kV/10 Pc 及工频耐压97 kV/1 min。铁路绝缘管型母线必须要通过上述试验。

2 实践方案

2.1 导体选择及载流量

高铁牵引变电所 27.5 kV 低压侧电流较大,从牵引变压器低压侧出来,一般采用多根电缆或多根钢芯铝绞线并接或在高压室采用多根母排并接的金属封闭母线,由于软导体钢芯铝绞线和电缆最大载流量都比较小,要满足更大载流量需多跟导体并联。若采用 27.5 kV 绝缘管型母线则只需 1 根即可满足 2 500 A 以上的载流量,对比如表 2 所示。

(弯曲方式应在工厂进行)。室外同相 1 根母线可直接固定在钢结构或混凝土支架上,且可直接引入室内,可穿墙套管^[6](只需预留方形孔洞,安装完成后用绝缘板封堵孔洞即可)。室内导体可根据设备布置(开关柜)情况,作支架安装,在绝缘管型母线两端预留接线端子,通过螺栓即可与相应设备的连接部位可靠连接,如图 1 所示。

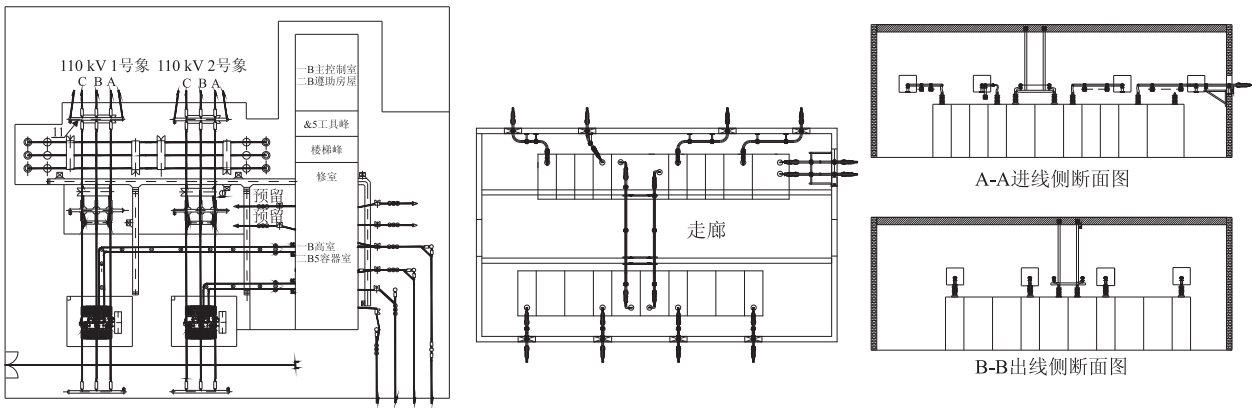


图 1 绝缘管型母线在典型牵引变电所室外、27.5 kV 高压室布置安装示意图

由于绝缘管母线安装布置与现场高压柜及房建开孔的位置相关,因此,绝缘管母线的生产要在现场测量完后,根据现场测量的尺寸进行安装布置设计,设计完成后进行相关部件的生产,生产完成后根据测量图纸进行现场安装,每个终端头及中间接头在安装前,都要

把相应母线本体的安装部位打磨光滑,防止局部放电击穿。安装时应控制内外屏蔽层和绝缘接触面、户内外终端绝缘与导电接触部位打磨程度以满足安装要求。保证绝缘管型母线本体、中间接头和终端处的绝缘完好无缺,安装完成后应进行相关的验收试验。

3 验收及维护

目前,铁路上还未大量使用 27.5 kV 绝缘管母线,相关的验收与维护标准还处于摸索阶段,验收可参考“电气装置安装工程母线装置施工及验收规范”及“电气装置安装工程 接地装置施工及验收规范”进行。主要区别在于导体外表、中间接头、终端接头、母线在支架上固定及接地铜编织带线,母线穿墙安装要求所有暴露在大气中的金属部件应有可靠的防锈层或采用不锈钢材料制成^[7],工程实施时可编制作业指导书及验收标准,安装由制造厂家完成。验收标准可按现场验收参照出厂试验,但工频耐压可按 55 kV/60 min 进行。绝缘管型母线运营备用可根据现场工点的具体情况,将母线材料及附件进行编号(相别、长短、电流大小),并进行备案登记,验交时将 A 相或 B 相的绝缘管型母线配置表移交给运营单位,当发生故障时,上报编号,即可及时买到备用导线进行更换。

另外,绝缘管型母线的工程数量计量方式与钢芯绞线和电缆不同,应按成套材料供给,没有预留长度概念,长度尺寸测量后才制造,安装精确,因此母线的计量方式应包含本体+中间接头+终端接头+接地带+支架及辅材等,中间接头和终端接头的长度计量方式不应按与本体一致来考虑。

4 结束语

每种新型的绝缘管型母线都有它自身的特点和适应范围,只要在绝缘性能、制造工艺、接头形式与制作、试验方法及技术参数等关键技术上,通过系统设计和严格的质量控制,就能在实际工程中得到较好应用。本文提出的乙丙橡胶通过三层共挤制作工艺、中间接头以屏蔽套和内衬套控制电场分布和接触面积的方

法、终端接头应力控制连接技术减弱以控制预制接头内的电场畸变、试验基于系统试验项目和与电压有关的试验参数和典型工程的安装与验收方法,可供其他铁路工程借鉴。

参考文献:

- [1] GB/T 8349-2000 金属封闭母线[S].
GB/T 8349-2000 Metal Enclosed Bus-bar [S].
- [2] GB/T 28427-2012 电气化铁路 27.5 kV 单相交流交联聚乙烯绝缘电缆及附件[S].
GB/T 28427-2012 Cross-linked Polyethylene Insulated Cable and Accessories of Electrified Railway 27.5kV Single-phase AC [S].
- [3] DL/T 1658-2016 35 kV 及以下固体绝缘管型母线[S].
DL/T 1658-2016 35kV and Below Solid Insulated Tubular bus-bar [S].
- [4] 汪秋宾,林宗良,贺毅,等. 铁路专用绝缘管母线:中国,ZL 2015 2 038433.5 [P]. 2016-05-11.
WANG Qiubin, LIN Zongliang, HE Yi, et al. Railway Dedicated Insulated Tubular Bus-bar; China, ZL 20152038433.5 [P]. 2016-05-11.
- [5] 能源部西北电力设计院. 电力工程电气设计手册[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
Northwest Power Design Institute of the Ministry of Energy. Electrical Design Manual of Electric Power Engineering [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [6] 许晓蓉,孙敏,刘晓卉,等. 电气化铁路直供牵引变电所导流回路构造:中国,ZL 2015 2 0021835.5 [P]. 2015-05-27.
XU Xiaorong, SUN Min, LIU Xiaohui, et al. The Structure of Diversion Loop of Direct Supply Traction Substation for Electrification Railway; China, ZL 2015 2 0021835.5 [P]. 2015-05-27.
- [7] GB 50149-2010 电气装置安装工程 母线装置施工及验收规范[S].
GB 50149-2010 Electric Installation Engineering Bus-bar Installation and Acceptance Specification[S].

(编辑:赵立红 白雪)