文章编号:1674-2974(2025)06-0144-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025184

高铁站内机械绝缘节电场分布建模与仿真研究

李军丽†,张友鹏,赵斌,丁彦龙
(兰州交通大学 自动化与电气工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:明确高铁站内机械绝缘节在运行工况下的电场分布特性是解决绝缘失效问题的关键.基于静电场有限元法,考虑绝缘节厚度、材质和供电方式等工况,分别计算完好绝缘节在稳态电压和暂态过电压作用下的电场分布,并分析不同工况对绝缘节电场分布的影响.分析绝缘节可能存在的缺陷,研究气泡、气隙和碳化等缺陷对绝缘节电场分布的影响.结果表明,绝缘节整体电场分布不均匀.在暂态过电压条件下,绝缘节顶部表面可能会出现局部放电现象.绝缘节的厚度以及供电方式都会对电场分布产生影响,其中直接供电方式相较于AT供电方式的影响更为显著.气泡对电场分布的影响程度与其位置有关,气泡周围易发生空气击穿造成局部放电.碳化显著影响绝缘节的电场分布,随着碳化深度的增加,绝缘节局部电场强度的最大值会发生变化.特别是当碳化发生在顶部区域时,其对绝缘节电场强度的影响较之腰部和底部区域更为显著.

关键词:机械绝缘节;静电场;有限元法;缺陷;电场
中图分类号:U284.25 **文献标志码**:A

Modeling and Simulation Study on Electric Field Distribution of Mechanical Insulated Rail Joint in High-speed Railway Station

LI Junli†,ZHANG Youpeng,ZHAO Bin,DING Yanlong
(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Clarifying the electric field distribution characteristics of mechanical insulated rail joints in high-speed railway stations under working conditions is the key to solving the insulation failure problem. Based on the electrostatic field finite element method, the electric field distribution of the intact insulated rail joint under steady-state voltage and transient overvoltage is calculated considering the thickness, the material of the insulated rail joint and the power supply mode, respectively, and the influence of different working conditions on the electric field distribution of the insulated rail joint is also analyzed. The possible defects of the insulated rail joint are analyzed. The effect of bubbles, air gap and carbonization on the electric field distribution of the insulated rail joint is studied. The results show that the overall electric field distribution of the insulated rail joint is uneven. Partial discharges may occur at the top surface of the insulated rail joint under transient overvoltage. The thickness and the power supply mode have a certain effect on the electric field distribution of the insulated rail joint, and the effect of direct supply is

* **收稿日期**:2024-06-18
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51967010), National Natural Science Foundation of China(51967010)
作者简介:李军丽(1987—),女,甘肃临洮人,兰州交通大学讲师,博士
† 通信联系人,E-mail:lijunli@mail.lzjtu.cn

larger than that of auto-transformer (AT) power supply mode. The influence of bubbles on the electric field distribution is related to their locations, and air breakdown is prone to occur around bubbles, causing partial discharge. Carbonization has a greater effect on the electric field distribution of the insulated rail joint. The carbonization depth changes the maximum value of the local electric field distribution intensity of the insulated rail joint, and the influence of carbonization depth on the electric field intensity is greater in the top region than in the waist and bottom areas.

Key words: mechanical insulated rail joint; electrostatic field; finite element method; defects; electric field

机械绝缘节在轨道电路中起着电气绝缘和机械连接的作用.列车离开回流切断点处绝缘节瞬间产生的电弧对绝缘节和钢轨接头造成损伤[1],严重影响行车安全.现有研究表明绝缘节两端存在的高电位差[2]和暂态过电压[3]是形成电弧的主要原因.绝缘节表面的电位和电场分布对绝缘节的正常运行具有重要的影响,当沿绝缘节表面电场超过空气击穿场强时会产生局部放电,局部放电会对绝缘材料和钢轨造成损伤.因此明确稳态电压和暂态过电压作用下机械绝缘节的电场分布是研究绝缘节电弧产生根源的一个重要内容.

电弧的存在使得绝缘节受到电、磁、热、力等多种因素的影响,是整个轨道线路中的薄弱环节.绝缘节在生产、安装及运行过程中会出现各种缺陷,了解缺陷对电场畸变的影响程度,能更好地探究绝缘节电弧烧损机理.

针对绝缘节电弧烧损问题,杨世武等[4]通过模拟测试确认了现场绝缘节处的高亮光就是电弧光.毕红军等[2]理论推导了绝缘节电位差,发现绝缘节两端的电位差是形成电弧的主要原因.轮对经过绝缘节存在暂态过程,曹晓斌等[3]通过分析发现,绝缘节不仅承受着一定的稳态电压还承受着较高的暂态过电压.Li 等[5]进一步分析得到高铁站内移频轨道电路的绝缘节也存在相同结论.据此,相关学者从降低绝缘节两端电位差[6]和灭弧[7]角度进行研究.苏鹏飞等[8]研究了绝缘节碳化规律,得到绝缘节的碳化是一个量变的过程.张友鹏等[9]基于磁流体理论建立绝缘节电弧多物理场耦合模型,深入研究了电弧温度分布及电弧温度对绝缘节的影响.目前针对电弧烧损绝缘节和钢轨的问题,研究主要集中在电弧形成机理和电弧温度场方面,鲜少从绝缘节电场角度研究绝缘节烧损问题.此外,存在缺陷的绝缘节在暂态过电压作用下可能会使绝缘节电场发生畸变,造成局部放电等故障.

为此,本文以绝缘节为研究对象,基于静电场有限元法对绝缘节分别在稳态电压和暂态过电压作用下的电场分布进行计算,考虑绝缘节厚度、材质和供电方式等工况,对绝缘节完好以及发生不同类型缺陷时的电场分布进行仿真计算,研究绝缘节电场分布以及缺陷对绝缘节电场的影响.研究结果将为进一步揭示绝缘节电弧产生机理提供理论基础.

1　分析方法

轮轨间电流被机械绝缘节切断,造成拉弧[10].绝缘端板的电导率小[11],暂态过程中电弧温度保持相对稳定[5,9,12].此外,牵引电流频率为工频,其电磁波波长远大于绝缘节厚度,电场在任一瞬间可近似为静电场,因此,在不考虑电弧温度影响时,将绝缘节在稳态电压和暂态过电压下的电场看作静电场.根据麦克斯韦方程,高铁站内机械绝缘节电场可以描述为[13]:

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{E}$为电场强度;$\boldsymbol{D}$为电通密度;ρ为电荷体密度.

绝缘材料需要满足下列本构关系[14]:

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon \boldsymbol{E} \tag{3}$$

式中:ε为绝缘节介电常数.

静电场中电场强度$\boldsymbol{E}$表示为电位梯度$\nabla\phi$的负值:

$$\boldsymbol{E} = -\nabla\phi \tag{4}$$

绝缘节电场在内部满足式(1)~式(4),边缘满足边界条件下进行计算.本文基于静电场有限元法在 COMSOL Multiphysics 中计算绝缘节电场.

2 不同场景下绝缘节模型构建

高铁站内绝缘节多采用胶接绝缘,胶接绝缘接头由钢轨、绝缘端板、绝缘夹板、绝缘套管、高强度螺母等组成[11],如图1所示.胶接绝缘接头会受到纵向力、垂向力和侧向力的作用,它们通过胶黏剂和绝缘端板从钢轨传递到绝缘夹板.胶黏剂在力的作用下会发生应力、形变,而形变是通过分子的松弛行为实现的,即应力导致了极化[15],这属于结构力学的范畴.此外,胶接绝缘接头一般是悬挂或者支撑接头,支撑结构会影响绝缘节应力变化[16].本文重点关注绝缘节电场分布问题,暂不考虑电磁场结构耦合分析,只考虑接头夹板长度范围内的钢轨接头和绝缘端板.

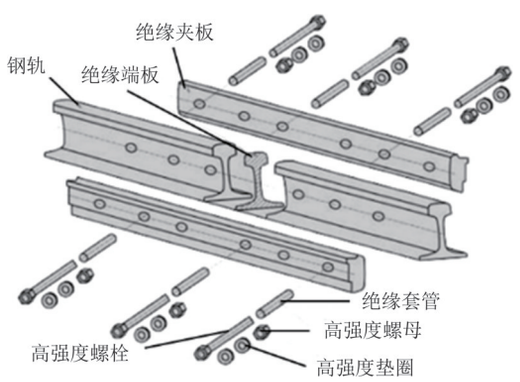


图1 胶接绝缘接头

Fig.1 Glued insulated rail joint

2.1 绝缘节完好

2.1.1 基础模型

以60 kg/m钢轨及对应的绝缘节为研究对象,模型长度取820 mm,其中,绝缘节初始厚度取8 mm,钢轨断面与绝缘节之间密贴,其结构与计算模型如图2所示.

当列车经过绝缘节时,绝缘节两端存在着最大为60 V的稳态电位差[2]和46.234 kV(持续约0.1 ms)的暂态过电压[3,5].为便于计算,取一侧钢轨为高电位,另一侧钢轨为零电位.绝缘节是用玻璃纤维增强的环氧树脂制成的[11],其相对介电常数通过测试获得,取3.167 5.钢轨是一种良导体,相对介电常数为无穷大,取1×10^{10}[17].空气域设置为边长2 000 mm的正方体,采用人工截断边界条件,并设置无限元域.

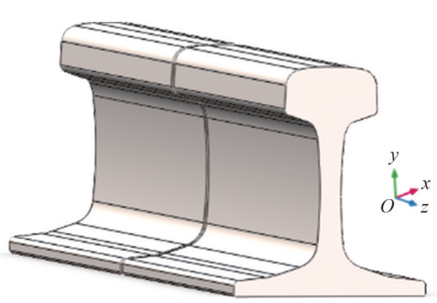


图2 绝缘节计算模型

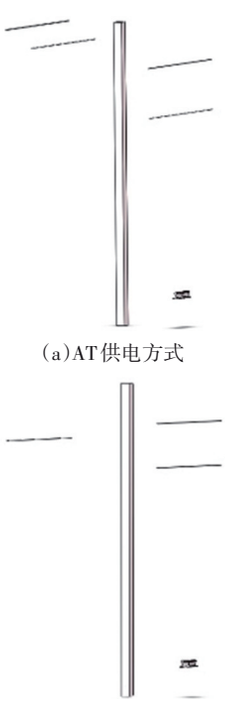
Fig.2 Insulated rail joint calculation model

2.1.2 不同供电方式下的模型

高铁牵引网主要有AT(auto-transformer,自耦变压器)供电和带回流线的直接供电(后文简称直供)两种方式[18].

考虑AT供电[19]时绝缘节计算模型如图3(a)所示.牵引网由接触网、正馈线、保护线、钢轨等组成,本文简化接触网结构,只考虑其横向结构中的支柱和接触线,并将接触网电场近似为静电场[20].计算时对承力索、接触线电压设置为接触网最高电压27.5 kV;正馈线电压设置为-27.5 kV;保护线电压设置为250 V[21];支柱采用H钢柱,设置为零电位.

考虑直供方式[22]时绝缘节计算模型如图3(b)所示.回流线电位也设置为250 V.模型中的各种设备型号如表1所示[23].两种供电方式下空气域均设置为边长20 000 mm的正方体.



(a)AT供电方式

(b)带回流线的直接供电方式

图3 不同供电方式下绝缘节计算模型

Fig.3 Calculation model of insulated rail joint under different power supply modes

表 1　设备型号

Tab.1　Device types

设备名称	型号
接触线	TCG-100
承力索	TJ-95
正馈线	LGJ-185
保护线	LGJ-120
回流线	LGJ-120
支柱	GH240X/8.5

2.2　绝缘节存在缺陷

2.2.1　气泡缺陷

绝缘端板是一种环氧层压制品,在环氧胶黏剂浸渍、渗透和流展到纤维增强材料的间隙的过程中易形成气泡[24].这些体积微小且难以检测的气泡在绝缘节暂态过电压这种高电压、强电场的环境下,可能会引发空气击穿,导致局部放电现象.这会加速周围绝缘材料的老化过程,进而导致绝缘性能的丧失,对行车安全构成威胁.

绝缘节内部存在的气泡缺陷局部模型示意图及气泡参数如图 4 所示.根据坐标(x,y,z)对气泡位置进行描述.编号上面不带撇的代表原始气泡位置,带撇的代表位置发生变化后的气泡位置.编号为 1~4 的气泡位于绝缘节顶部,5 位于腰部,6~7 位于底部.气泡设置为半径 1 mm 的球体.

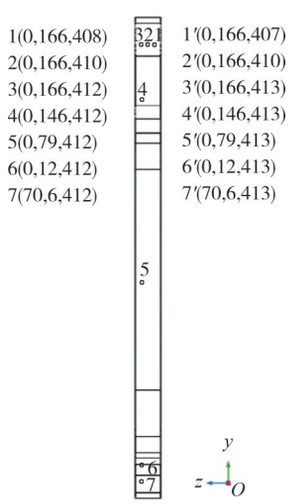


图 4　气泡缺陷局部模型示意图及气泡参数

Fig.4　Local model of bubble defect and parameters of bubble

2.2.2　气隙缺陷

绝缘节在钢轨线路上属于薄弱环节,它在列车载荷作用下会发生破坏,且破坏一般是从胶黏剂层、被黏物和胶黏剂与被黏物的界面区三个环节中的薄弱环节开始[15]. Beaty[16]通过测试发现胶接接头在承受一定的载荷时,绝缘端板与钢轨接头之间会出现气隙,即钢轨与胶黏剂界面发生脱黏.

假设钢轨接头与绝缘端板之间已全部脱胶出现气隙,气隙缺陷局部模型如图 5 所示.由于钢轨端面与绝缘端板之间应密贴,气隙不应大于 1 mm,因此,本文建立气隙大小为 0.5 mm 和 1 mm 的两个模型.

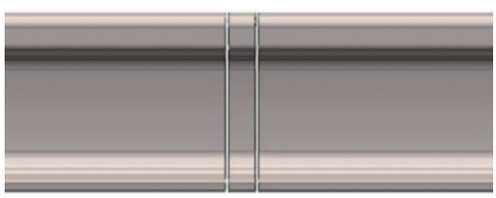


图 5　气隙缺陷局部模型

Fig.5　Local model of gap defect

2.2.3　碳化缺陷

绝缘节电弧高温沿着绝缘节纵深方向呈下降分布,且绝缘节承受的温度随着电弧发生次数、电弧电流而发生变化[9],这使得绝缘节发生不同程度的碳化.此外,绝缘端板材料为有机物中的热固性树脂,这种高分子聚合物在电弧高温下会发生热分解[25],分解产物积累形成碳化路径.

本文用碳化深度来度量绝缘节碳化程度,绝缘节碳化局部模型如图 6 所示.其中,h_t为相对于绝缘节顶部发生的碳化深度,单位 mm.由于绝缘节结构不规则,计算绝缘节顶部、腰部和底部不同位置的电场.碳化部分的相对介电常数取 7×10^4[17].

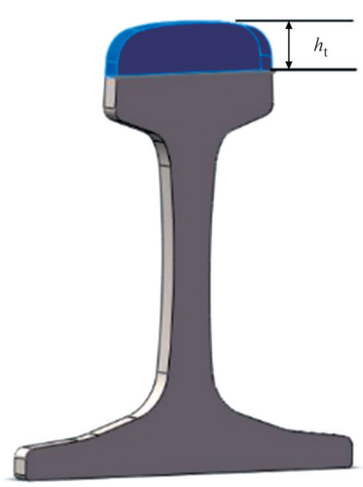


图 6　碳化局部模型

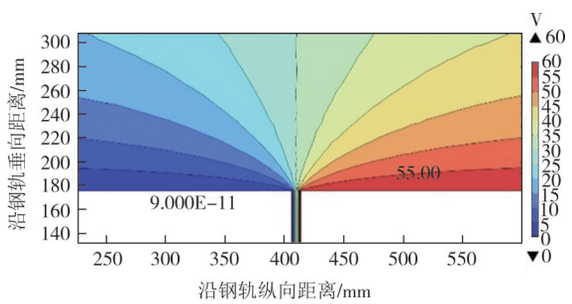
Fig. 6　Local model of carbonization

3　结果及分析

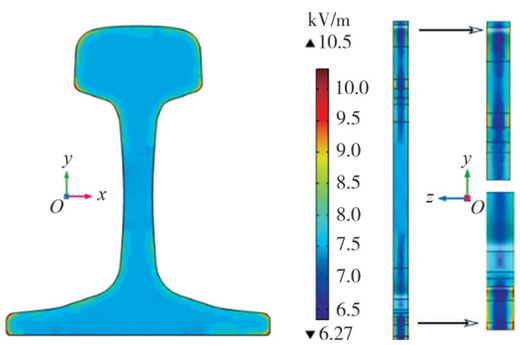
稳态电压作用下,计算图 2 模型得到图 7 所示的

沿钢轨中心位置纵向切面上的等位线分布及绝缘节电场分布.

暂态过电压作用下的分布规律与图7一致,只是幅值不同.由图7可知,当绝缘节两端加载一确定的电压时,绝缘节厚度方向上每一横截面都是等位面.绝缘节整体电场分布不均匀,顶部和底部边界上电场强度较大,且在厚度方向上呈现两边大、中间小的情况;腰部电场分布较均匀,这主要与绝缘节几何结构不规则有关.



(a)等位线



(b)绝缘节电场分布

图7 稳态电压下绝缘节电位及电场分布

Fig.7 Insulated rail joint potential and electric field distribution at steady state voltage

根据绝缘节电场分布云图,提取图8所示绝缘节厚度范围内顶部$AA1$、$BB1$以及底部$EE1$、$FF1$四条线段上的数值进行分析,得到稳态电压、暂态过电压分别作用下的最大电场强度值E_{wa}、E_{za},如表2所示.

由表2及对绝缘节厚度范围内若干个不同位置处最大电场强度的不完全统计可知,最大场强出现在两侧,即模型的406 mm和414 mm处,且在相同位置处,在暂态过电压条件下,电场强度显著高于稳态电压下的水平.

绝缘节在一定电压作用下的静电场,理论上可简化为理想的平行板电容器模型[13],由此得到两钢轨接头间的电场强度$\boldsymbol{E}(t)$为:

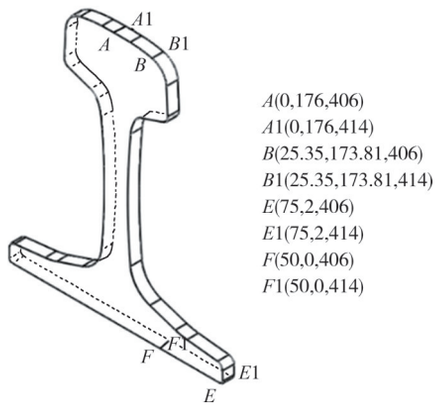


图8 提取的绝缘节厚度范围内的四条线段

Fig.8 Four line segments in the range of insulated rail joint thickness

表2 绝缘节厚度范围内不同位置处的最大电场强度

Tab.2 Maximum electric field intensity at different locations in the thickness of the insulated rail joint

位置	E_{wa}/(kV·mm^{-1})	E_{za}/(kV·mm^{-1})	z坐标/mm
$AA1$	10.145×10^{-3}	7.260	406
$BB1$	9.705×10^{-3}	7.478	406
$EE1$	12.783×10^{-3}	9.850	406
$FF1$	9.614×10^{-3}	7.408	414

$$\boldsymbol{E}(t)=\frac{u}{d}\times(-\boldsymbol{e}_z)=\frac{U_{\mathrm{m}}\cos\omega t}{d}\times(-\boldsymbol{e}_z) \tag{5}$$

式中:U_{m}为绝缘节两端的最大电压值;d为两钢轨接头之间的距离;ω为角频率;$\boldsymbol{e}_z$为沿z轴方向的单位矢量;t为时间.

考虑绝缘节电弧温度分布,后续分析中主要对$AA1$所在路径上的电场进行分析.稳态电压作用下,$AA1$所在路径上的电场分布如图9所示.绝缘节所在位置的电场强度相较于两端钢轨有较大变化.考虑到绝缘节结构不规则,计算得到厚度范围内的平均电场强度为8.082 kV/m,根据式(5)可得绝缘节最大电场强度为7.5 kV/m,仿真误差为7.76%.误差主要来源于绝缘节的特殊结构以及网格剖分离散处理和人工截断边界.

暂态过电压下,绝缘节厚度范围内的平均电场强度为6.228 kV/mm,大于空气击穿理论值3 kV/mm,绝缘节顶部端面处可能会发生表面放电现象,放电持续一定时间后,绝缘节将会在电弧高温、场强作用下发生碳化沉积[26],造成绝缘节碳化.

3.1 材质和厚度对绝缘节电场的影响

文献[16]指出,为了增加绝缘端板的抗压强度、减小应力,绝缘端板可使用陶瓷材料.同时,纳米复

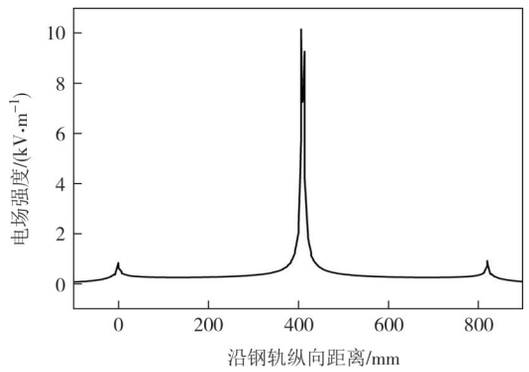


图 9　稳态电压下 *AA*1 路径上的电场分布

Fig.9　Electric field distribution in the path of *AA*1 at steady state voltage

合材料的加入可有效降低绝缘材料的电导率,提高器件的交流击穿强度[27]. 为此,本文探讨了采用陶瓷材料以及符合标准要求的环氧树脂材料作为绝缘节,对绝缘节电场进行计算. 陶瓷的相对介电常数取 6[20].

我国高铁站内绝缘节厚度通常为 6~10 mm[11,28]. 考虑不同材质及厚度,比较稳态电压、暂态过电压分别作用下绝缘节 *AA*1 路径上的平均电场强度值 E_{wv}、E_{zv} 如表 3 所示.

表 3　不同材质及厚度下绝缘节平均电场强度

Tab.3　Average electric field intensity of insulated rail joint with different materials and thicknesses

材质	厚度/mm	E_{wv}/(kV·mm^{-1})	E_{zv}/(kV·mm^{-1})
陶瓷	6	10.328×10^{-3}	7.959
	8	8.096×10^{-3}	6.239
	10	6.405×10^{-3}	4.935
玻璃纤维增强的环氧树脂	6	10.308×10^{-3}	7.943
	8	8.082×10^{-3}	6.228
	10	6.379×10^{-3}	4.915

由表 3 可知,材质对绝缘节电场强度的影响较小. 绝缘节厚度范围内的平均电场强度随着厚度的增加而减小,这与式(5)结果一致. 在规定的标准厚度范围内,不论选择哪种材料,在暂态过电压条件下,其平均电场强度均会超过空气的击穿场强,在绝缘端面处易发生空气击穿,导致局部放电.

3.2　供电方式对绝缘节电场的影响

为确保不同供电方式下绝缘节电场分布计算结果的准确性,首先需要计算 AT 和直供这两种不同供电方式下的电场分布. 钢轨取 820 mm,无绝缘节;各导线长度取 4 100 mm. 为了与镜像法计算结果比较,未考虑支柱;钢轨对地电位取 250 V,空气域大小同 2.1.2 节中空气域的设置. AT 供电方式下电场分布如图 10 所示,其与文献[21]结果对比如表 4 所示.

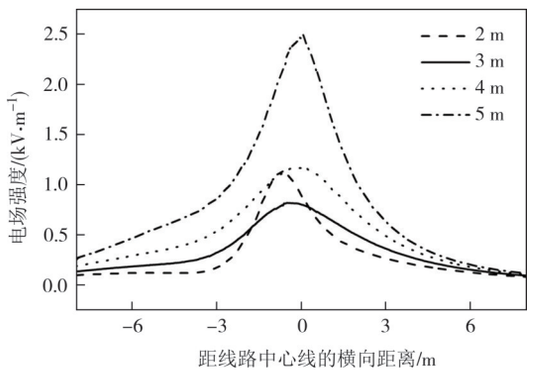


图 10　AT 供电方式下电场分布

Fig.10　Electric field distribution under AT power supply mode

表 4　不同方法计算得到 AT 下的最大电场强度

Tab.4　Maximum electric field intensity under AT power supply mode calculated by different methods

距地面高度/m	最大电场强度/(kV·m^{-1})		差值/(kV·m^{-1})
	有限元方法	镜像法	
2	1.135	1.02	0.115
3	0.813	1.10	0.287
4	1.170	1.42	0.250
5	2.493	1.72	0.773

根据图 10 和表 4 可知,距地面高度为 2~5 m 范围内的仿真结果与镜像法计算结果[21]基本一致,差异主要源于牵引网中各导线的参数以及钢轨型号的不同.

AT 供电方式下,考虑支柱后 *AA*1 路径上的电场分布如图 11 所示. 由图 11 可知,接触网在钢轨表面的电场强度约为 14.342 kV/m. 此外,电场在轨道线路两端呈现出一个突变后快速衰减.

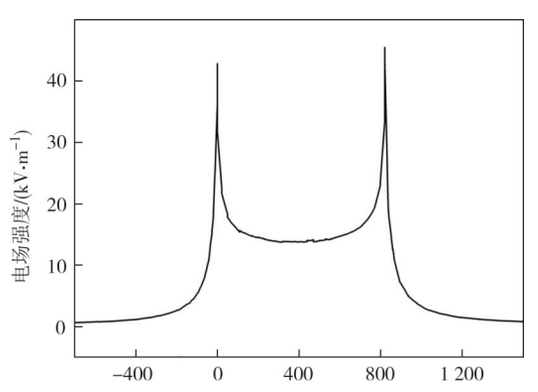


图 11　AT 供电方式下 *AA*1 路径上的电场分布

Fig. 11　Electric field distribution in the path of *AA*1 under AT power supply mode

为消除钢轨长度、位置以及各导线长度对电场计算结果的影响,对不同长度、位置下的电场进行仿真,发现钢轨长度、位置和导线长度对*AA*1上的平均电场强度影响很小,因此模型中钢轨和导线长度是合理的.

带回流线直供下接触网电场分布与无回流线直供方式的分布规律一致,且幅值更小[21].

3.2.1 稳态电压下供电方式对绝缘节电场的影响

稳态电压下,分别计算图3(a)、图3(b)所示模型的电场分布,AT供电方式下*AA*1路径上的电场分布如图12所示,直供下的电场分布情况与图12一致.

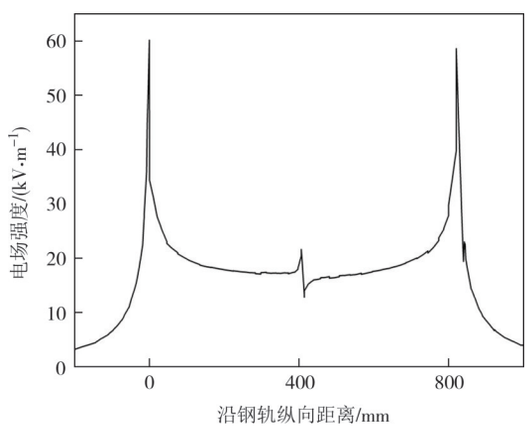


图12 稳态电压下*AA*1路径上的电场分布

Fig. 12 Electric field distribution in the path of *AA*1 under steady state voltage

对比图11和图12可知,当轨道线路上存在绝缘节时,绝缘节厚度范围内*AA*1路径上的电场强度会发生突变.不同供电方式下,绝缘节厚度范围内*AA*1路径上的电场强度变化情况如图13所示.

由图13可知,同一稳态电压下,从406 mm到414 mm的绝缘节厚度范围内,考虑不同供电方式影响时的电场强度明显大于不考虑供电影响时的,且绝缘节电场强度逐渐降低.同时相较于不考虑供电方式影响时的电场强度,直供下绝缘节处的电场强度比AT供电方式下的大.这是因为,相同条件下,距离地面同一高度同一位置处的电场强度,直供下的比AT方式下的大[21].仿真过程中设置钢轨和绝缘节顶端距地面高度为1 000 mm,相同高度条件下,直供下的电场强度比AT下的大.

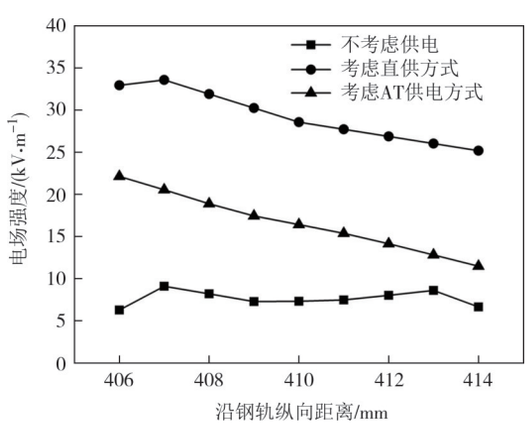


图13 稳态电压下*AA*1路径上的电场强度变化曲线

Fig. 13 Variation curves of electric field intensity in the path of *AA*1 at steady state voltage

3.2.2 暂态过电压下供电方式对绝缘节电场的影响

暂态过电压下,分别计算图3(a)、图3(b)所示模型的电场分布,AT供电下*AA*1路径上的电场分布如图14所示.相对于钢轨顶端平均电场强度,绝缘节处最大突变量约为6 kV/mm.直供下的电场分布情况与图14一致.

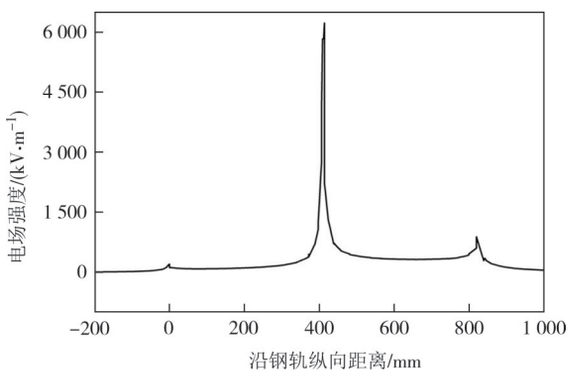


图14 暂态过电压下*AA*1路径上的电场分布

Fig. 14 Electric field distribution in the path of *AA*1 under transient overvoltage

不同供电方式下,绝缘节厚度范围内*AA*1处的电场强度变化情况如图15所示.

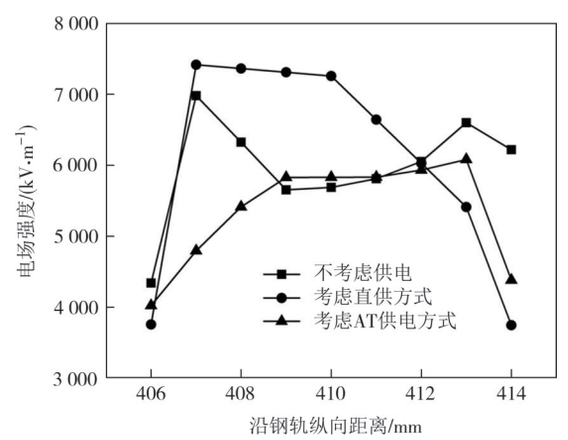


图15 暂态过电压下*AA*1路径上的电场强度变化曲线

Fig.15 Variation curves of electric field intensity in the path of *AA*1 at transient voltage

由图 15 可知,考虑 AT 供电时,绝缘节厚度范围内 *AA*1 处的平均电场强度比不考虑牵引供电系统影响时的低. 在考虑直供的情况下,沿钢轨纵向距离从 407 mm 到 412 mm,绝缘节电场强度大于不考虑供电的情况,但是距离大于 412 mm 时电场强度比另外两种情况下的小. 考虑直供的情况下,绝缘节电场在厚度两侧位置的变化梯度更大.

无论是否考虑牵引供电系统的影响,暂态过电压下绝缘节处的电场强度均大于 3 kV/mm,这使得绝缘节表面易发生局部放电,造成绝缘节损伤.

3.3　气泡缺陷对绝缘节电场的影响

基于前文分析结果,考虑到绝缘节在稳态电压下处于弱电场环境中,针对绝缘节缺陷对电场分布的影响,本文主要分析暂态过电压作用下的影响.

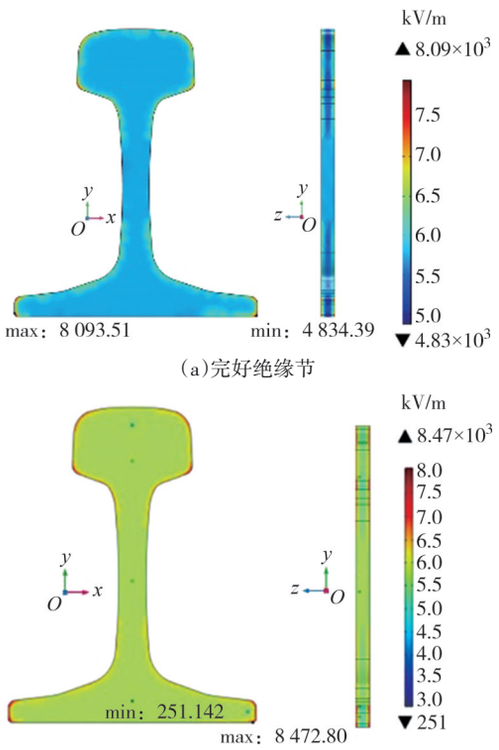
有无气泡时绝缘节电场分布如图 16 所示. 图 17 为底端气泡处于不同位置时,绝缘节局部电场分布图. 由图 16 可知,气泡对绝缘节整体电场分布影响不明显,但改变了最大场强大小以及最大场强出现的位置,最大电场强度出现在气泡及其附近位置. 对比图 17 可知,位置 1 的气泡对该区域电场分布的影响小于位置 2 的. 图 17 中位置 1 和位置 2 分别代表初始气泡位置和气泡在生产过程发生变化后的位置. 这说明绝缘节厚度底部纵向两侧位置的气泡比靠中间位置的气泡对其附近区域电场分布的影响大一些.

处于不同位置的气泡与气泡周围电场强度最大值的关系如图 18 所示.

由图 18 可知,气泡对最大电场强度的影响程度与其位置有关,气泡改变了气泡周围最大电场强度,最大畸变量可达 22.86%. 当气泡位置靠近绝缘节厚度两侧位置,此时的最大电场强度较气泡位于内侧位置处的稍大. 存在气泡缺陷时,因气泡及其周围电场强度大,易发生空气击穿造成局部放电,虽然单次放电能量不大,但是多次局部放电产生的累积效应会使绝缘材料老化并使缺陷扩大,加剧放电,最终造成绝缘击穿[29-30],影响绝缘性能.

3.4　气隙缺陷对绝缘节电场的影响

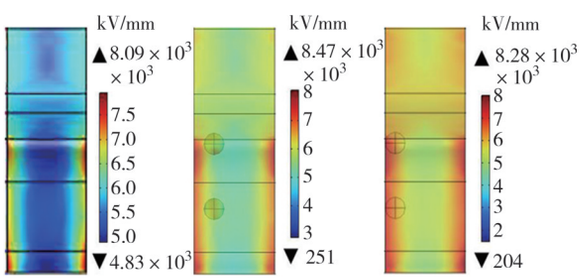
存在气隙时绝缘节电场分布如图 19 所示,对比图 19 与图 16(a)可知,绝缘节承受的电场强度随着气隙的增大而下降. 这是因为气隙的存在增大了两钢轨端面之间的距离,由式(5)可知电场强度会减小.



(a)完好绝缘节　(b)存在气泡

图 16　绝缘节电场分布

Fig.16　Electric field distribution of insulated rail joint



(a)无气泡　(b)位置 1　(c)位置 2

图 17　底端气泡处于不同位置时绝缘节局部电场分布

Fig.17　Local electric field distribution of insulated rail joint when the bottom bubbles are in different positions

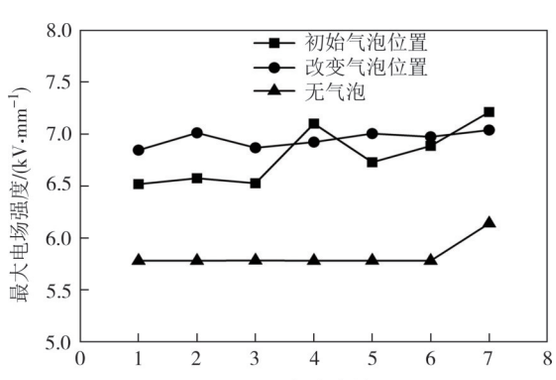
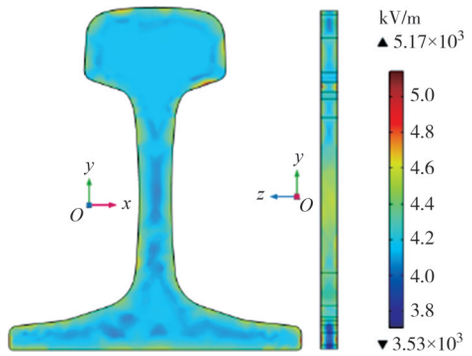
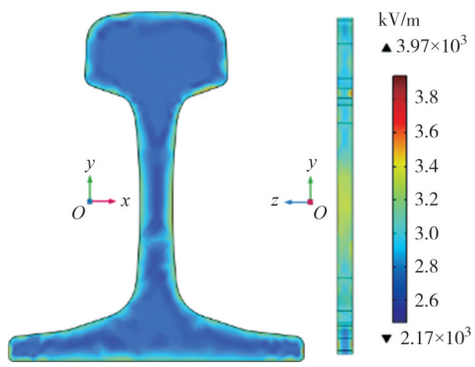


图 18　气泡位置对最大电场强度的影响

Fig.18　Effect of bubble position on maximum electric field intensity



(a)0.5 mm



(b)1 mm

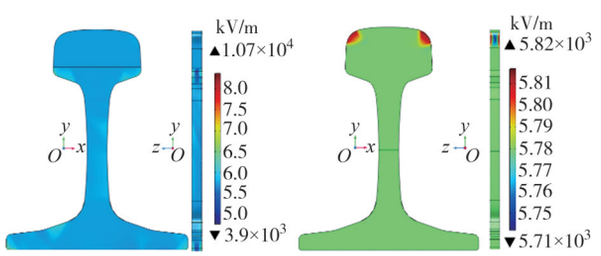
图 19 不同气隙大小下的绝缘节电场分布

Fig.19 Electric field distribution of insulated rail joint with different air gaps

3.5 碳化缺陷对绝缘节电场的影响

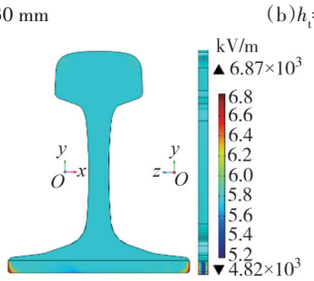
对图 6 模型中的 h_t 取不同值,计算得到绝缘节电场分布如图 20 所示.

不同碳化深度下绝缘节最大、最小电场强度如图 21 所示.



(a)h_t=30 mm

(b)h_t=97 mm



(c)h_t=166 mm

图 20 不同碳化深度下绝缘节电场分布

Fig. 20 Electric field distribution of insulated rail joint at different carbonization depths

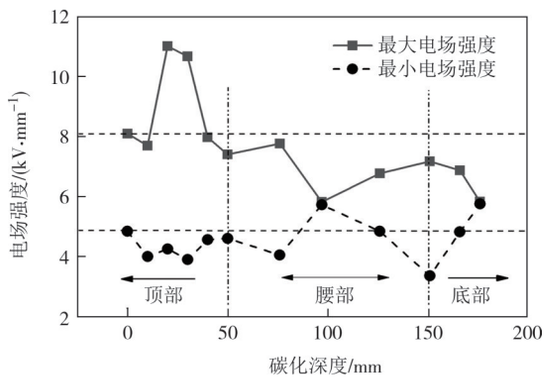


图 21 不同碳化深度下绝缘节电场强度最值

Fig. 21 Maximum and minimum values of electric field intensity of insulated rail joint at different carbonization depths

用 h_t=0 mm 和 h_t=176 mm 分别代表绝缘节未碳化和完全碳化. 对比图 20~图 21 与图 16(a)可知,绝缘节发生碳化,不管碳化深度如何,都会改变绝缘节电场分布. 碳化深度改变了绝缘节局部电场强度的最值. 由于绝缘节碳化是一个量变过程[8],仅顶部发生碳化时,绝缘节上的最大电场强度先降后升再降,最大电场强度达 11.003 kV/mm,畸变量为 35.94%. 绝缘节的碳化相当于在静电场中引入了一个导体,根据电磁场基本原理[13],导体表面的电场线垂直于导体表面,这使得绝缘节顶部局部位置出现场强最大值. 当碳化深度达到腰部中间位置即 h_t=97 mm 时,最大与最小电场强度相差约 0.1 kV/mm,虽然最大电场强度减小,但是提高了绝缘节整体承受的电场强度. 当碳化深度增大至底部时,最大电场强度整体小于碳化前的. 当完全碳化后,绝缘节相对介电常数大,这使得绝缘节承受的最大、最小电场强度基本相等. 因此,碳化对绝缘节电场的影响较大.

4 结 论

1) 稳态电压和暂态过电压作用下绝缘节整体电场分布不均匀,顶部和底部边界上电场强度较大,且在顶部和底部厚度方向上呈现出两边大、中间小的情况,腰部电场分布较均匀;绝缘节厚度处电场强度较两端钢轨接头会发生大的突变.

2) 无论绝缘节采用陶瓷材料还是玻璃纤维增强的环氧树脂材料,由于相对介电常数相差不大,对其电场强度的影响小. 增加绝缘节厚度会减小其电场强度. 两种供电方式对绝缘节电场都有影响,直供方式的影响大于 AT 供电.

3) 完好绝缘节在暂态过电压作用以及带回流

线直供工况下,绝缘节端面处易发生空气击穿造成局部放电,影响绝缘性能.绝缘节若存在缺陷,在气泡及气泡周围,特别是当碳化范围在绝缘节头部时,缺陷位置处电场强度畸变量大,更易发生局部放电.

4)气泡对电场分布的影响与其位置有关.相较于气泡和气隙两种缺陷,碳化对绝缘节电场的影响比较大,碳化导致绝缘节最大场强的畸变量达到35.94%.

参考文献

[1] 荣德础. 高铁轨道电路钢轨胶接绝缘节烧损问题研究[J]. 铁路通信信号工程技术,2020,17(增刊1):1-6.
RONG D C. Study on burning problem of rubber-bonded insulation joints of track circuits for high-speed railways [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17 (Sup.1): 1-6.(in Chinese)

[2] 毕红军, 赵幸, 张敏慧. 高铁站内绝缘节两端电位差的分析计算[J]. 北京交通大学学报,2013,37(5):151-156.
BI H J,ZHAO X,ZHANG M H. Analysis of potential difference of mechanical insulating joint in high-speed railway station [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(5): 151-156.(in Chinese)

[3] 曹晓斌,唐逢光,何祥照, 等. 不同类型机械绝缘节快速暂态过电压产生机理[J]. 中国铁道科学,2020,41(1):85-91.
CAO X B,TANG F G, HE X Z,et al. Generation mechanism of fast transient overvoltage in different types of mechanical insulation joints[J]. China Railway Science, 2020, 41(1): 85-91.(in Chinese)

[4] 杨世武,姜锡义,王星晖,等. 高速铁路站内绝缘节和钢轨烧损模拟测试及研究[J]. 铁道学报,2013,35(10):82-88.
YANG S W, JIANG X Y, WANG X H, et al. Study and simulation tests of burning damage to insulation joints and rails in high-speed railway stations [J]. Journal of the China Railway Society,2013,35(10):82-88.(in Chinese)

[5] LI J L, ZHANG Y P, ZHAO B. Analysis and suppression study of transient overvoltage of mechanical insulated rail joint in high-speed railway station [J]. Journal of Applied Science and Engineering, 2024, 27(9): 3143-3152.

[6] 杨世武,李奕霖,陈海康,等. 基于高速铁路典型车站牵引供电系统仿真模型的降低绝缘节两端电位差方案[J]. 中国铁道科学,2016,37(2):70-77.
YANG S W,LI Y L,CHEN H K,et al. Solution to reduction of potential difference on both ends of insulation joint based on simulation model of traction power supply system in typical station of high speed railway[J]. China Railway Science,2016,37(2): 70-77.(in Chinese)

[7] 杨廷方,罗屹豪,周西杰,等. 电磁式灭弧空气炮理论研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(4):193-199.
YANG T F,LUO Y H,ZHOU X J,et al. Theoretical research on electromagnetic arcing air cannon [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50 (4): 193-199.(in Chinese)

[8] 苏鹏飞, 谭丽, 温润. 高速铁路轮轨电弧烧损绝缘节的研究[J]. 铁道学报,2022,44(8):36-41.
SU P F,TAN L, WEN R. Research on high-speed railway wheel rail arc burned insulation joint[J]. Journal of the China Railway Society,2022, 44(8): 36-41.(in Chinese)

[9] 张友鹏, 郑泽荣, 李军丽, 等. 高铁站内机械绝缘节烧损碳化与钢轨表面温升研究[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(3): 155-163.
ZHANG Y P,ZHENG Z R,LI J L,et al. Study on burning loss and carbonization of mechanical insulation joint and temperature rise of rail surface in high-speed railway station [J]. China Railway Science,2023,44(3): 155-163.(in Chinese)

[10] 肖嵩,朱涛,段君璋,等. 高速列车过绝缘节轮轨间拉弧机理分析及抑制[J]. 铁道学报, 2024, 46(6): 46-55.
XIAO S, ZHU T, DUAN J Z, et al. Mechanism analysis and suppression of arcing between wheel and rail of high-speed train over insulated joints[J]. Journal of the China Railway Society, 2024,46(6):46-55.(in Chinese)

[11] 钢轨胶接绝缘接头:TB/T 2975—2018[S]. 北京:中国铁道出版社, 2018: 1-9.
Bonded insulated rail joints:TB/T 2975—2018[S]. Beijing:China Railway Publishing House,2018:1-9.(in Chinese)

[12] 刘志明. 京沪高铁电弧灼伤钢轨和绝缘节问题的研究[D]. 北京:北京交通大学,2014:3-31.
LIU Z M. Research on electric arc burning damage to rails and insulation joints of beijing-shanghai high-speed railway [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2014:3-31.(in Chinese)

[13] 倪光正. 工程电磁场原理[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2016.
NI G Z. Principle of engineering electromagnetic field[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press,2016.(in Chinese)

[14] TANG Y J,GAO G Q,LIU K,et al. Electric field distribution and performance optimization of high-speed train cable terminal with internal defects [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 151: 107360.

[15] 王孟钟,黄应昌.胶黏剂应用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1987: 42-111.
WANG M Z, HUANG Y C. Adhesive application manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1987: 42-111.(in Chinese)

[16] BEATY P. Experimental testing procedures to investigate and improve insulated rail joint design and life cycle[D]. Sheffield, Yorkshire and the Humber,UK:University of Sheffield,2015.

[17] 曹雯,栾明杰,申巍,等. 绝缘子芯棒碳化对其电场分布特性的影响[J]. 电机与控制学报,2018,22(11):89-95.
CAO W,LUAN M J,SHEN W,et al. Effects of carbonization of insulator core rod on properties of electric field distribution [J]. Electric Machines and Control, 2018, 22 (11): 89-95.(in Chinese)

[18] 夏炎. UIC国际铁路标准IRS 60682《高速铁路设计标准-供

电》制定研究[J]. 电气化铁道,2020,31(增刊2):1-5.
XIA Y. Study on the formulation of UIC international railway standard IRS 60682 "Design standard of high-speed railway-power supply"[J]. Electric Railway,2020,31(Sup.2):1-5.(in Chinese)

[19] 刘仕兵,刘威,宋陵灿,等. AT供电方式下高铁站台空间电场分布研究[J]. 计算机仿真,2022,39(1):111-115.
LIU S B,LIU W,SONG L C,et al. Research on spatial electric field distribution of high-speed railway station under AT power supply mode[J]. Computer Simulation,2022,39(1):111-115.(in Chinese)

[20] 赵珊鹏,张友鹏,姚晓通,等. 接触网腕臂绝缘子电场分布建模与仿真研究[J]. 铁道学报,2017,39(9):59-66.
ZHAO S P,ZHANG Y P,YAO X T,et al. Modeling and simulation of electric field distribution of cantilever insulators for catenary[J]. Journal of the China Railway Society,2017,39(9):59-66.(in Chinese)

[21] 赵震. 不同供电方式铁路电牵引系统工频电磁场计算与分析[D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2001: 23-65.
ZHAO Z. Calculation and analysis of power frequency electromagnetic fields in railway electric traction systems with different power supply modes[D]. Beijing: Research Institute of the Ministry of Railways, 2001: 23-65.(in Chinese)

[22] 曹晓斌,王满想,朱传林,等. 重载铁路直接供电方式下牵引回流分配及影响因素[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(4): 137-144.
CAO X B, WANG M X, ZHU C L, et al. Traction return current distribution and influencing factors under direct power supply mode of heavy haul railway[J]. China Railway Science, 2021, 42(4): 137-144.(in Chinese)

[23] 李群湛,贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 3版. 成都: 西南交通大学出版社, 2012: 70-75.
LI Q Z, HE J M. Analysis of traction power supply system[M]. 3rd ed. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2012: 70-75.(in Chinese)

[24] 俞翔霄,俞赞琪,陆惠英. 环氧树脂电绝缘材料[M]. 北京:化学工业出版社,2007:184-185.
YU X X, YU Z Q, LU H Y. Epoxy resin electrical insulating material[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 184-185.(in Chinese)

[25] 唐昭晖, 许志红, 叶骁勇. 交流故障电弧作用下电缆碳化的实验与仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2024,44(23): 9496-9506.
TANG Z H,XU Z H,YE X Y. Experimental and simulation study on cable carbonization under AC fault arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(23): 9496-9506.(in Chinese)

[26] 张芊,韩旭涛,张哲铭,等. 固体绝缘内部气隙缺陷尺寸和位置对其局部放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1313-1322.
ZHANG Q, HAN X T, ZHANG Z M, et al. Influences of internal void defect dimension and position on partial discharge characteristics in the solid insulation [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1313-1322.(in Chinese)

[27] ZHOU L J, ZHANG H B, QUAN S W, et al. Electric-thermal field analysis for EPR on-board cable terminal using stress tube modified by ZnO nonlinear material [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(2): 3913-3926.

[28] LI J L, ZHANG Y P, ZHAO B, et al. Research and analysis on contact resistance of wheel and insulated rail joint in high-speed railway stations [J]. Electronics, 2023, 12(6): 3073-3082.

[29] 王紫君. 高压直流电缆中间接头电热耦合仿真及局部放电试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022: 11-62.
WANG Z J. Research on electro-thermal coupling simulation and partial discharge experimental of high voltage cable joint [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022: 11-62.(in Chinese)

[30] 陈芳,荣娜,胡晓. 直流电压下局部放电数值模拟方法研究综述[J]. 绝缘材料, 2024, 57(4): 1-12.
CHEN F, RONG N, HU X. Review of numerical simulation methods for partial discharge under DC voltage [J]. Insulating Materials, 2024, 57(4): 1-12.(in Chinese)