

专题: 低温等离子体非平衡输运与主动调控

高速铁路弓网电弧研究进展: 影响因素与防治方法*

吴广宁# 钱鹏宇# 刘汶佶 高国强† 李红艳

(西南交通大学电气工程学院, 成都 611756)

(2025年8月29日收到; 2025年10月23日收到修改稿)

弓网滑动电接触是高速列车获取能量的唯一途径. 随列车速度、牵引功率提升以及在复杂多变环境中运行, 弓网电弧发生率提高、物性参数改变、危害增加, 严重威胁高铁安全. 本文系统综述了弓网电弧研究进展, 梳理了弓网电弧物理特性、仿真及试验研究方法, 重点分析了运行参数与环境条件对弓网电弧的影响机理及规律, 归纳了防治策略并探讨了电弧能量利用等新方向. 现有工作充分研究了运行参数对弓网电弧危害的影响, 但对弓网电弧物性参数及演化机理的研究较少, 缺乏对覆冰等特殊工况下弓网电弧特性的研究; 且现有弓网电弧防护手段需针对复杂环境工况进行改进, 以满足我国高铁大规模跨区域运行时的弓网电弧防护需求. 基于综述提出两点未来展望: 1) 要厘清特殊环境弓网电弧物性参数, 探明“环境工况-物性参数-电弧行为”关联机制, 为精准预测提供基础; 2) 要从“源头抑制-界面防护-过程干预”出发, 建立弓网电弧高效防治体系. 本文旨在为中国高速铁路弓网系统的可靠受流与电弧防治提供理论参考与工程借鉴.

关键词: 弓网电弧, 电气侵蚀, 弓网系统, 高速列车**PACS:** 52.25.-b, 52.25.Dg, 52.25.Kn, 52.30.Cv**CSTR:** 32037.14.aps.74.20251169**DOI:** 10.7498/aps.74.20251169

1 引言

高速铁路具有运载容量高、运输成本低、碳排放量小等优点^[1], 因此得到了中国、法国、德国、日本等国家的重视, 是推动经济发展与文化交流的大动脉. 高速列车通过弓网滑动电接触传能, 弓网系统工作状态如图 1(a) 所示, 为保障高铁稳定受流, 受电弓与接触网应始终保持接触, 接触网舞动、强气流^[2]、覆冰^[3]等恶劣条件会导致弓网分离, 引发弓网离线电弧, 如图 1(b) 所示. 电弧能量密度大, 会导致弓网接触界面严重烧蚀^[4], 产生电磁干扰与过电压谐波等危害^[5], 使设备服役寿命骤降. 近 20 年, 中国高速铁路经历了引进/消化/吸收/再创新的过程, 列车速度、牵引功率与运行范围不断增长^[6],

与此同时, 弓网电弧现象愈发复杂. 如图 1(c) 所示, 与开关电弧^[7]、焊接电弧^[8]、雷击放电^[9]相比, 弓网电弧产生及演化过程受环境、工况耦合扰动^[4], 使弓网电弧形态动态失稳. 物理特性方面, 弓网电弧等离子体温度、压强、质量密度分布极不均匀^[2], 粒子碰撞过程与非平衡输运状态复杂.

为减轻弓网电弧危害, 面向更高速度、更大功率和极端复杂环境下弓网系统安全稳定服役需求, 应围绕弓网电弧多因素影响特性及调控方法开展长期研究. 弓网接触压力难以维持恒定, 且列车速度越高, 弓网接触力的变化越剧烈, 越容易离线起弧. 多国学者广泛研究了列车运行速度对弓网电弧的影响, 探明不同速度下电弧发生率^[10]、烧蚀^[11]与电磁辐射特性^[12]的变化规律, 为弓网电弧的防护提供指导. 为了支撑列车的提速, 需要提升牵引

* 四川省自然科学基金创新研究群体 (批准号: 2024NSFTD0009) 和国家重点研发计划“交通基础设施”专项 (批准号: 2024YFB2606302) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: xnjdggq@163.com

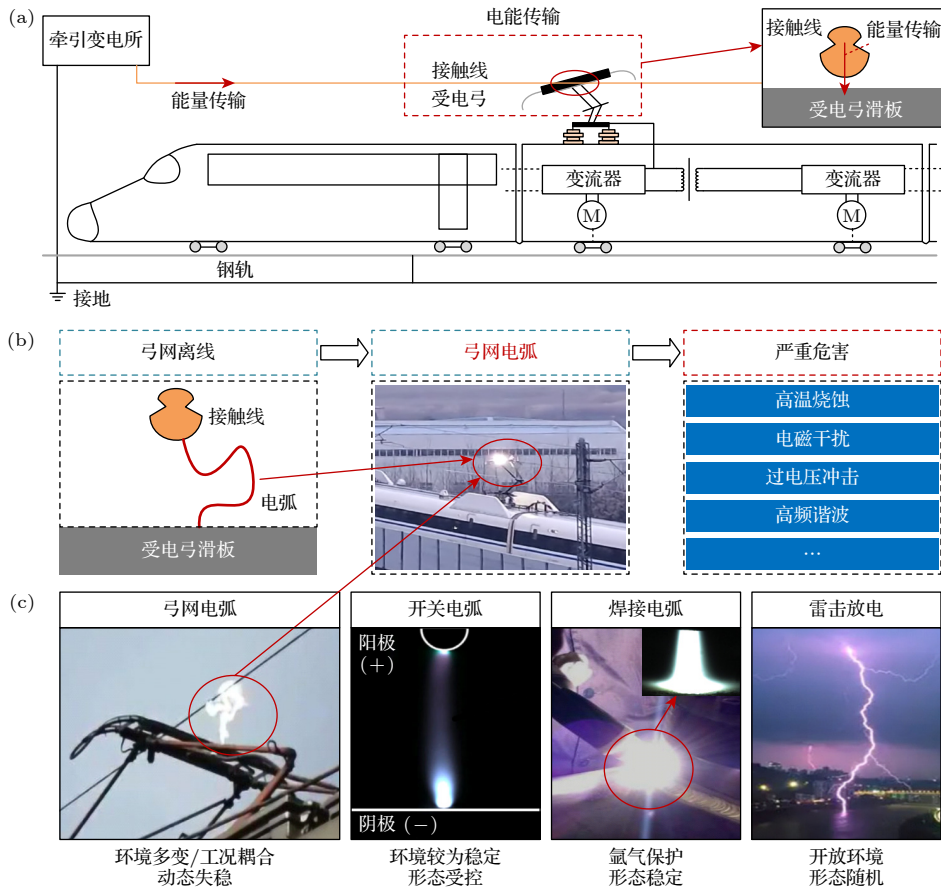


图 1 高速列车弓网系统与弓网电弧 (a) 高速列车弓网系统; (b) 弓网电弧的危害; (c) 弓网电弧及其他电弧的特点

Fig. 1. Pantograph-catenary system (PCS) and pantograph arc of high-speed train: (a) PCS for high-speed trains; (b) hazard of pantograph arc; (c) characteristics of pantograph arc and other arcs.

功率, 弓网电弧电流幅值同步提升. 本团队^[13]以及 Wang 等^[14]围绕电流对弓网电弧危害特性的影响规律开展研究, 揭示了不同电流幅值对应的多种电弧烧蚀损伤机制, 并提出防治措施或建议. 适配不同速度、功率的弓网接触压力也存在差别, 过大的接触压力会导致异常磨损, 过小的接触压力会影响传能质量, 接触压力过低甚至为零时则引发离线电弧. 载流摩擦领域学者普遍关注接触压力对滑动电接触过程的作用, 通过优化接触压力大小及波动幅频^[15]、解析电弧损伤机制^[16], 减小电弧发生率与磨损率, 为受电弓滑板服役寿命的延长做出了重要贡献.

随着铁路基础设施的进一步建设, 高速列车在强气流山地区域、高原低气压地区和高纬度高寒等地区服役, 这些特殊环境给弓网电弧的防治提出了挑战. 陈旭坤等^[17]研究了横风、走行风、峡谷风对弓网电弧频率、电压和电磁干扰特性的影响, 揭示了强气流下弓网电弧动态机制. Xu 等^[18]针对高原

及高寒环境探究了低气压条件下的弓网电弧现象, 采集了电弧光谱特征、伏安特性、接触斑点温度等关键参数. 由于全球气候剧烈变化, 频繁的极端天气使弓网电弧损伤及运动特性发生改变, 学者们研究了酸雨^[19]、高湿度^[20]、重度覆冰^[21]等条件下弓网电接触状态的改变规律, 揭示了多种环境因素对电弧的影响机制.

减轻弓网电弧危害的最佳办法是防止弓网离线、阻止电弧产生. 在保障列车速度的前提下, 主动调节弓网接触状态, 动态调整受电弓抬升力与接触线张力、维持稳定的弓网接触, 是降低电弧发生率的主要手段. Collina 等^[22]将比例-积分 (PI) 控制思路应用于受电弓的主动调控, Taran 等^[23]通过预测模型提升反馈控制的响应速度, Nie 等^[24]基于反步控制策略抑制受电弓对接触线的抬升作用. 现有接触力调控方法不能避免弓网电弧的产生, 通过研发多种耐烧蚀材料, 可以减小电弧对接触界面的影响程度. 如 Tu 等^[25]制备的聚酰亚胺

树脂/腰果改性树脂聚合物基受电弓碳滑板材料 (PI/YM-PMPCS), Deng等^[26] 制备的碳/铜纤维协同增强复合滑板材料 (Cf/Cu/C), Wang等^[27] 制备的铜合金浸渍及铜合金纤维增强碳/碳复合材料 (C/C-Cu, C/C-Cuf). 通过改变电路结构与控制逻辑也可以降低燃弧功率、断电时间与电弧过电压峰值. 如 Midya等^[28] 在电路中加入感性阻抗加速电弧重燃减少列车断电时间, Lu等^[29] 通过瞬态电压抑制器降低电弧过电压, Tang等^[30] 利用镍锌铁氧体磁环消耗电弧能量降低燃弧功率. 此外, 通过外加磁场控制电弧等离子体动态行为^[31], 也能减轻电弧烧蚀与电磁干扰.

本工作调研近年来弓网电弧领域相关文献, 补充 Andrea^[32]、宋冬冬等^[33] 围绕弓网电弧危害特性、等离子体仿真方法的综述工作, 系统整理列车运行工况与环境条件因素对弓网电弧的影响机制, 并总结现有的弓网电弧防治措施, 明确当前技术瓶颈与亟需开展的研究重点, 提出“源头抑制-界面防护-过程干预”协同电弧防治理论框架.

2 弓网电弧物理特性与研究方法

2.1 弓网电弧的物理特性

2.1.1 弓网电弧的产生

弓网接触不良时, 实际电接触面积较小, 流经接触点的电流密度达到 10^6 A/cm² 以上^[34], 使接触点温度剧增, 达到材料熔点甚至沸点. 电极材料气化使弓网间隙内充满高温金属蒸气, 大大降低间隙介质的绝缘强度. 当弓网接触点错位或分离时, 原本流经接触点的牵引电流被截断, 由于牵引供电回路中存在感性元件, 电流突变使弓网间隙两端电压骤增. 当两端电压超过间隙内空气-金属蒸气介质绝缘强度时, 间隙被击穿, 形成弓网电弧等离子体通道.

物理机制方面, 弓网系统接触界面分离时电流集中产生高温, 一部分自由电子因此具有较大的动能, 从原接触界面逸出, 从而发生热电子发射; 同时在弓网间的强电场作用下, 接触线及受电弓滑板表面发生场致发射. 两者共同导致空气间隙中自由电子的存在^[35]. 自由电子在电极间高速运动, 与间隙介质中的空气及金属蒸气粒子发生碰撞并发生电离. 随着碰撞游离的不断发展, 最终形成电弧.

2.1.2 弓网电弧的物性参数

电弧等离子体的物性参数包括粒子组分、热力学参数及输运参数. 粒子组分方面, 弓网电弧属于非平衡态等离子体, 非平衡条件下, 系统吉布斯自由能最小化原理不再适用, 通常采用双温质量作用定律求解. 通常利用双温质量作用定律的 Van de Sanden 形式计算非平衡条件下等离子体的粒子组分^[36], 该方法可表示为

$$\begin{cases} \frac{n_a n_b}{n_c} = \frac{Q_a Q_b}{Q_c} \left(\frac{2\pi m_a m_b k T_h}{m_c h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_d}{k T_h}\right), \\ \frac{n_e n_{r+1}}{n_r} = \frac{2Q_{r+1}}{Q_r} \left(\frac{2\pi m_e k T_e}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_l - \Delta E_l}{k T_e}\right), \end{cases} \quad (1)$$

其中, Q_i 代表粒子 i 的双温配分函数; m_i 代表粒子 i 的绝对质量; n_i 代表粒子 i 的密度, 下角标 a, b 代表分子 c 的解离产物, e 代表电子, r 代表粒子的电离阶数; h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数; E_d 和 E_l 分别代表解离能和电离能; ΔE_l 代表带电粒子间相互作用导致的电离能降落; T_e 与 T_h 代表电子温度与重粒子温度.

等离子体的热力学性质包括质量密度、比焓与比定压热容, 可表示为^[37]

$$\begin{cases} \rho = \sum_{i=1}^N m_i n_i, \\ h_T = \frac{\sum_{i=1}^N x_i h_i^T}{\sum_{j=1}^N x_j M_j}, \\ c_p = \frac{\partial h_T}{\partial T_e} \theta + \frac{\partial h_T}{\partial T_h}, \end{cases} \quad (2)$$

其中, ρ 代表质量密度; h_T 代表电弧宏观比焓; h_i^T 代表粒子 i 的比焓; x_i 代表粒子 i 的摩尔分数, M_i 代表粒子 i 的摩尔质量; c_p 代表电弧宏观比定压热容.

等离子体的输运系数包括电导率、热导率和黏度系数, 计算通常基于 Chapman-Enskog 方法^[38], 可表示为

$$\sigma = \frac{e^2 n}{\rho k T} \sum_{j=1, j \neq e}^{\xi} \left(n_j m_j Z_j D_{ej} - Z_j \sum_{i=1}^{\xi} n_i m_i Z_i D_{ji} \right), \quad (3)$$

$$\lambda = \lambda_{tr} + \lambda_{re} + \lambda_{in}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \lambda_{tr} = \lambda' + \frac{\rho k}{n} \sum_{i,j=1}^v \frac{E_{i,j} D_i^T D_j^T}{n_i m_i m_j}, \\ \lambda'(\xi) = -\frac{5}{4} k \sum_j n_j \sqrt{\frac{2kT}{m_i}} a_{i1}(\xi), \end{cases} \quad (5)$$

$$\eta(\xi) = \frac{kT}{2} \sum_j b_{j0}(\xi), \quad (6)$$

其中, σ 代表电导率, λ 代表总热导率, λ_{tr} 代表平动热导率, λ_{re} 代表反应热导率, λ_{in} 代表内部热导率, $\eta(\xi)$ 代表黏度系数, λ_{re} , λ_{in} 的计算方法参考文献 [37]; Z_i 代表粒子 i 的电荷数; T 代表等离子体温度, n 代表总粒子密度, P 代表压强, v 代表粒子的种数; D_{ij} 代表寻常扩散系数, D_i^T 代表热扩散系数; $E_{i,j}$ 代表粒子碰撞能量; $a_{i1}(\xi)$, $b_{j0}(\xi)$ 是 Sonine 多项式对分布函数一阶微扰 ξ 级有限项展开中的展开系数, 这些系数需要通过求解碰撞积分的线性方程组来确定.

弓网电弧主要由空气等离子体构成, 同时含有

来自接触线及浸金属碳滑板的金属蒸气和碳蒸气. 刘志伟等 [39]、Dong 等 [40] 的研究表明弓网电弧碳蒸气含量较少. Zhong 等 [41] 研究了标准大气压下含金属蒸气空气等离子体的物性参数, 其粒子组分、环境参数与常压下弓网电弧等离子体条件接近. 铜蒸气质量分数为 10%, 非平衡度 $\theta = 3$ 时, 弓网电弧等离子体主要粒子组分包括中性粒子 N_2 , N , NO , O_2 , O , CuO , Cu_2 , Cu , Ar 和带电粒子 N^+ , N^{2+} , N^{3+} , O^+ , O^{2+} , O^{3+} , Cu^+ , Cu^{2+} , Cu^{3+} , Ar^+ , Ar^{2+} , Ar^{3+} , e^- , 粒子组分与温度的对应关系参考文献 [41]. 常压下弓网电弧等离子体物性参数如图 2 所示.

2.2 实验研究方法

电弧等离子体温度高、密度低、能流集中 [38], 易受磁场 [42]、气流 [2] 等因素影响, 现场试验偶发扰动众多, 不利于数据处理. 为了解弓网电弧形态、演化及危害特性, 学者们搭建的试验平台如图 3 所示.

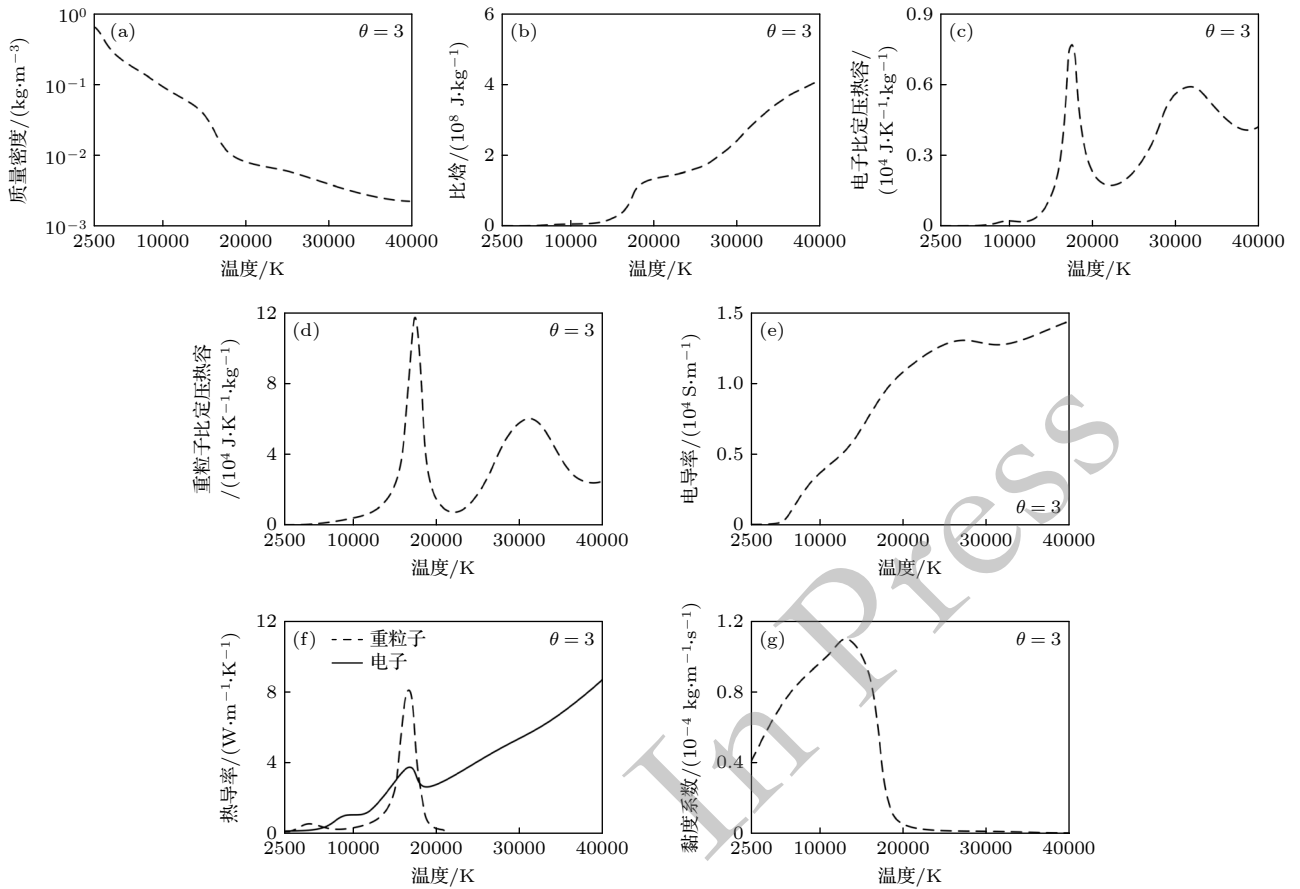


图 2 弓网电弧物性参数 [41] (a) 质量密度; (b) 比焓; (c) 电子比定压热容; (d) 重粒子比定压热容; (e) 电导率; (f) 热导率; (g) 黏度系数

Fig. 2. Physical parameters of pantograph arc [41]: (a) Mass density; (b) specific enthalpy; (c) electronic specific heat; (d) heavy particle specific heat; (e) electrical conductivity; (f) thermal conductivity; (g) viscosity coefficient.

列车运行速度较低时, 弓网电弧往往发生于过分相与受电弓升降阶段. 这种弓网电弧的特点是拉弧距离长、时间久并伴随强烈的电磁干扰, 为系统研究该工况下弓网电弧, Xie 等^[43]搭建了弓网电弧试验平台, 如图 3(a) 所示, 该平台通过调节电极对相对运动速度来模拟不同升降弓工况. 在此基础上, 为研究复杂环境下降弓电弧的特性, Xu 等^[44]搭建了外加环境气氛试验舱的弓网电弧试验平台, 该试验舱能够模拟高原低气压低氧含量、沿海高湿度、峡谷隧道强气流环境. 随着列车运行速度的提升, 弓网电弧发生率随接触力波动程度的增长而提升, 在过分相与升降弓区段以外, 高速工况下, 弓网电弧的特点包括放电频率高、单次放电时间短. 为研究电弧放电对载流磨损的影响, 载流摩擦领域的相关工作利用“盘-销”式结构^[45]模拟弓网高速相对运动, 如图 3(b) 所示, 并统计载流磨损试验过程中的电弧放电频率、能量、光强数据. 与高速列车受电弓与接触网间的“线接触”模式相比, “盘-销”式试验平台的接触线与碳滑板呈现“点接触”模式, 不能完全模拟实际工况. 王万岗等^[46]设计了线接触式的高速弓网试验平台, 如图 3(c) 所示, Wang 等^[19]在此基础上搭建了环境模拟系统, 研究低气

压、酸雨以及覆冰环境对弓网接触以及电弧放电的影响. 在此基础上, 针对极端天气和恶劣工况导致的弓网连续燃弧现象, Qian 等^[47]设计了弓网电弧试验平台, 如图 3(d) 所示, 通过实时控制弓网接触状态来调整起弧率, 模拟恶劣工况下受电弓滑板的损伤特性.

2.3 仿真研究方法

2.3.1 弓网电弧黑盒模型

黑盒电弧模型通过描述电弧外部特征来模拟和预测不同条件下的电弧特性^[33]. 以 Cassie 模型及 Mayr 模型为代表的一类黑盒电弧模型从热平衡原理出发, 考虑单位弧长输入功率 e 及损失功率 P_{loss} , 基于能量守恒建立电弧方程:

$$\frac{dQ}{dt} = e - P_{\text{loss}}. \quad (7)$$

(7) 式中 dQ/dt 为电弧单位弧长储存能量变化率, 对其做进一步展开:

$$\frac{1}{g} \left(\frac{dg}{dt} \right) = \frac{1}{gP_{\text{loss}}^{-1} \left(\frac{dQ}{dg} \right)} \left(\frac{ge^2}{P_{\text{loss}}} - 1 \right), \quad (8)$$

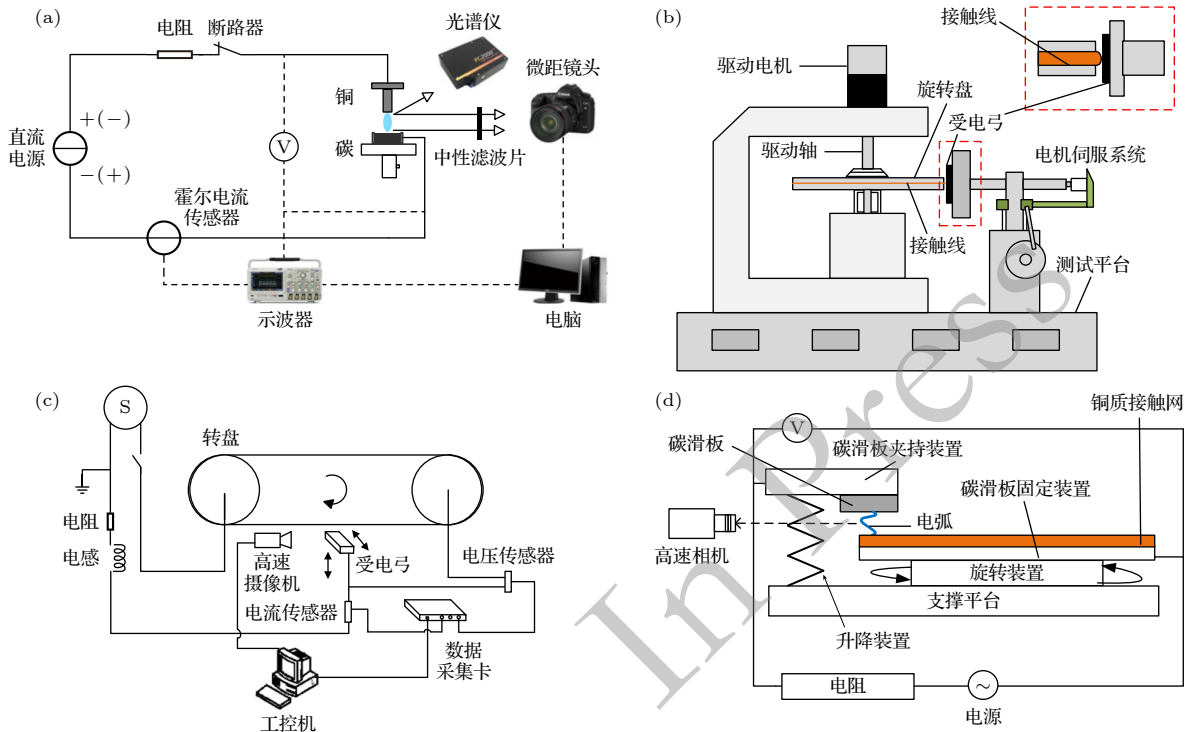


图 3 弓网电弧试验平台的发展 (a) 升降弓电弧试验台^[43]; (b) 盘-销式弓网载流摩擦试验台^[45]; (c) 高速弓网试验台^[46]; (d) 弓网电弧试验台^[47]

Fig. 3. Development of pantograph arc test platform: (a) Static arc test platform^[43]; (b) pantograph-catenary current-carrying friction test platform^[45]; (c) high-speed pantograph-catenary test platform^[46]; (d) pantograph arc test platform^[47].

(8) 式中 g 为电弧电导率. 又令:

$$\theta = f\left(g, P_{\text{loss}}, \frac{dQ}{dg}\right) = gP_{\text{loss}}^{-1}\left(\frac{dQ}{dg}\right), \quad (9)$$

可得

$$\frac{1}{g}\left(\frac{dg}{dt}\right) = \frac{1}{\theta}\left(\frac{g\epsilon^2}{P_{\text{loss}}} - 1\right), \quad (10)$$

(10) 式即黑盒电弧模型一般数学表达式, 根据假设条件的不同, 又可以得到 Cassie, Mayr, Habedank 等模型. Lin 等^[48] 将基于黑盒电弧模型的弓网电弧模型嵌入到牵引供电网络, 如图 4 所示, 主要探究持续时间不同的弓网电弧对四象限变流器的作用机制, 对过电压冲击、电压谐波特性进行了分析.

通过电弧黑盒模型, 学者们能够估算电弧电压冲击、电弧持续时间等外部特性, 得到电弧整体参数, 但难以模拟电弧局部特性, 欠缺对电弧温度分布、电流密度分布和行为特征的精确仿真能力.

2.3.2 弓网电弧磁流体动力学模型

为进一步了解弓网电弧内部特性, Xu 等^[18] 建立了弓网电弧磁流体动力学 (magnetohydrodynamics, MHD) 模型, 得到弓网电弧内部温度分布特征, 如图 5(a) 所示. MHD 模型将电弧等离子体视为导电流体来处理, 该模型控制方程通常包括常规磁流体力学方程 (能量守恒、质量守恒、动量守恒) 和麦克斯韦方程组, 这些方程已列在文献^[18] 中.

MHD 模型存在以下假设: 1) 仿真开始时电弧等离子体基本稳定, 处于局部热力学平衡状态; 2) 不考虑计算域内空气电荷的存在; 3) 电弧等离子体流动性质为层流.

MHD 模型能够得到电弧各位置温度、电流密度、电磁场强度等参数, 但现有弓网电弧 MHD 模型均为二维模型, 不能完全反映三维空间中弓网电弧的真实运动, 且运算量大、无法对现场数据进行

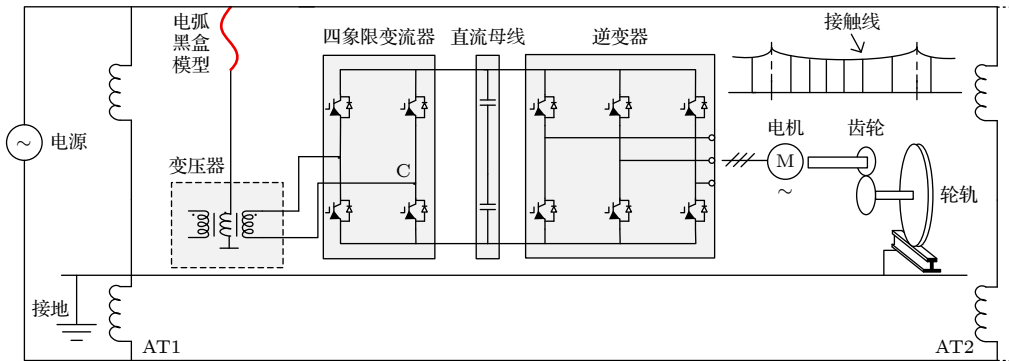


图 4 耦合电弧模型的牵引供电网络^[48]

Fig. 4. Traction power supply network model coupled with arc black-box model^[48].

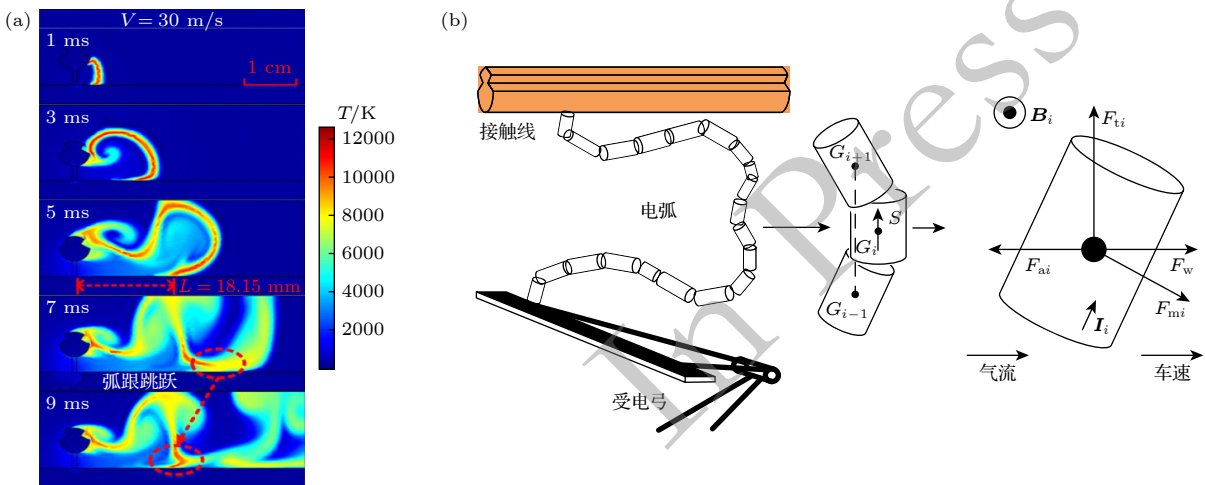


图 5 MHD 电弧模型与链式电弧模型 (a) MHD 电弧温度分布仿真^[18]; (b) 电弧链式模型^[49]

Fig. 5. MHD arc model and arc chain model: (a) Arc temperature distribution based on MHD model^[18]; (b) pantograph arc chain model^[49].

实时反馈,难以模拟弓网电弧燃弧全过程.如何在保障仿真精度的前提下降低MHD模型运算量,实现全尺寸、全过程、高保真的弓网电弧演化行为三维仿真模拟,是后续工作需要解决的难题.

2.3.3 弓网电弧链式模型

为真实模拟三维空间内弓网电弧行为特性,完整模拟弓网电弧燃弧演化过程,Qian等^[49]改进电弧链式模型以适应弓网受流工况.链式模型将电弧视为许多依次连接的圆柱体电流元,考虑电磁力、热浮力、空气阻力和风力对电流元的作用效果,建立多物理场耦合的动力学模型.

链式电弧模型假设如下:1)电弧电流元为质量集中在质点上的刚体;2)电弧弧柱内部温度均匀分布.

模型几何结构如图5(b)所示,弓网电弧被分为半径不同的电弧元,每个电弧元的位置由其重心确定,其轴向和长度由相邻两电弧元确定.其中 G_i 代表电弧元的重心坐标, S_i 代表电弧元的向量.

对电弧元进行受力分析,热浮力 F_t 的方向垂直向上,是引起电弧纵向畸变的主要原因;风载荷 F_w 是引起电弧横向畸变的主要原因;电弧自磁力 F_m 是一种自旋力,使电弧发生收缩,在电弧畸变较轻的情况下有约束弧柱的作用;空气阻力 F_a 方向与电弧元运动方向相反.

单个电弧元受到的电磁力 F_{mi} 可表示为

$$\mathbf{F}_{mi} = l_i \mathbf{I}_i \times \mathbf{B}_i, \quad (11)$$

式中, l_i 为电流元 i 的长度, \mathbf{I}_i 为电流元矢量, \mathbf{B}_i 为电流元所处位置的磁场强度.

单个电弧元受到的热浮力 F_{ti} 可表示为

$$\mathbf{F}_{ti} = (\rho_0 - \rho) \cdot g \pi r_i^2 l_i \cdot \mathbf{D}_{ti}, \quad (12)$$

式中, ρ_0 为标准大气压下空气密度, ρ 为高温下电弧密度, r_i 为电弧电流元半径, g 为重力加速度, \mathbf{D}_{ti} 为热浮力方向.

单个电弧元受到的风力 F_{wi} 可表示为

$$\mathbf{F}_{wi} = 0.5 \beta_z \mu_s \mu_z r_i l_i \rho v_w^2 \cdot \mathbf{D}_{wi}, \quad (13)$$

式中, β_z 为风振系数, μ_s 为体型系数, μ_z 为高度变化系数,应根据电弧的具体情况进行取值. v_w 为风速, \mathbf{D}_{wi} 为风力方向.

电弧运动过程中受到的空气阻力 F_{ai} 可表示为

$$\mathbf{F}_{ai} = 0.5 C_r \rho S v_i^2 \cdot \mathbf{D}_{vi}, \quad (14)$$

式中, C_r 是空气阻力系数, S 为物体迎风面积, v_i 是对应电流元的运动速度标量, \mathbf{D}_{vi} 是对应电流

元的运动速度单位矢量.

链式模型将电流元视为质量集中在质点上的刚体,其核心控制方程为

$$\mathbf{F}_{mi} + \mathbf{F}_{ti} + \mathbf{F}_{wi} + \mathbf{F}_{ai} = m_i \cdot \mathbf{a}_i, \quad (15)$$

式中 m_i 是对应电流元的质量, \mathbf{a}_i 是对应电流元的加速度矢量.

尽管链式电弧模型精细程度低于MHD模型,但该模型允许对弓网电弧动态行为的三维模拟,能够确定弓网电弧烧蚀范围.

2.3.4 基于神经网络技术的弓网电弧模型应用

为了解电弧内外特性的关联,可利用神经网络技术,以电弧电压电流信号、所处环境温度、气流速度等外部参数为输入,以电弧动态特性或电弧电压为输出,建立电弧发生率、电弧烧蚀程度与运行工况、环境参数的关联函数.Huang等^[4]将神经网络与弓网动力学模型结合,分析弓网接触力随覆冰程度的变化,认为接触力为0时弓网离线产生电弧,从而统计电弧发生率,该研究利用神经网络建立回归拟合模型,从而优化基于物理方程的模型,得到更精确的预测值.Yan等^[50]将神经网络与磨损量预测模型结合,分析受电弓滑板的电弧侵蚀及磨损特性,磨损量 ω 预测模型控制方程为

$$\omega = [\beta_w (1 - \eta) (V_a + \xi V_m) + \eta m_{arc}] s^{-1}, \quad (16)$$

其中, β_w 是碳滑板的密度, ξ 是熔融材料损失体积的比例, η 是电弧发生率, V_a 是摩擦导致的体积损失, V_m 是热量积累导致的体积损失, s 是滑动距离, m_{arc} 是电弧导致材料质量损失,可表示为

$$m_{arc} = Q_{arc} \gamma^{-1}, \quad (17)$$

式中 Q_{arc} 是电弧放电能量, γ 是碳滑板材料升华所需的潜热.

但由于弓网电弧易受多因素耦合影响的特性,需要增加神经网络使用的训练集样本、提升质量,以提升弓网电弧预测精确性.同时,为应对突发现场因素对弓网电弧发生、演化过程造成的扰动,应提升仿真模型响应速度,实现弓网电弧危害的快速预警.

上述模型涵盖了针对弓网电弧的主要仿真方法,揭示了电弧危害特性与多因素影响特征,为弓网电弧的抑制和调控提供研究基础,如表1所示.

值得一提的是,现有弓网电弧仿真研究主要集中在电弧功率、形态、危害等宏观特性方面,暂无

表1 弓网电弧仿真模型
Table 1. Pantograph arc simulation model.

模型名称	仿真目标	不足
柯西-梅尔模型 ^[33]	电弧电压、电流等外部参数	难以描述电弧局部及形态变化对外部参数带来的扰动
磁流体动力学(MHD)模型 ^[18]	电弧形态、温度、流场分布等宏观发展特征及物理特性	运算量大, 仿真耗时长, 难以模拟弓网电弧发展全过程
链式电弧模型 ^[49]	电弧形态、等效受力与发展演化全过程	难以追踪电弧温度、流场的动态变化, 精细程度低于MHD模型
神经网络预测模型 ^[1,50]	电弧特征参数及危害预测	对训练集数据的质量要求极高

针对弓网电弧环境工况的等离子体微观机理仿真模型. 因此, 为深入解析弓网电弧微观机理, 未来应从电弧物理-化学特性层面建模, 从而揭示弓网复杂环境工况对电弧等离子体热力学性质、输运参数的影响机制.

3 弓网电弧的影响因素与作用机制

3.1 列车运行参数对弓网电弧的影响

3.1.1 列车运行参数对弓网电弧特性的影响

对弓网受流产生影响的列车运行参数主要包括列车运行速度、牵引电流及弓网接触压力, 这些参数会显著影响弓网电弧的产生过程、形态特征、发展演化过程、宏观以及微观特性. 电弧的产生过程主要与弓网接触状态相关, Zhou 等^[51]的研究表明接触压力波动幅度与放电率直接相关, 接触力波动越剧烈、弓网离线及电弧发生率越大, 列车运行速度等因素则通过影响接触压力来间接改变弓网电弧发生率. 电弧率还会随牵引电流的增长而提升, 这是因为更大电流工况下弓网接触表面发热更明显^[52], 有助于电子热发射. 弓网电弧放电率与接触压力、牵引电流的关系如图6所示.

由于弓网电弧处于激发态、温度高、质量密度远低于空气, 电弧形态对气流、电磁等环境因素敏感. 而列车高速运行会带动周围空气, 形成气流速度较高的走行风^[17], 等离子体受走行风作用变形、动态失稳. Yang 等^[2]的研究指出, 弓网设备对气流的阻碍会改变流场分布状态, 使弓网电弧形态呈卡门涡街状. Xie 等^[43]的研究发现大电流会促进电弧自箍缩, 使形态更加集中. 郭凤仪等^[53]研究了接触力波动对电弧形态及其电气特性的影响如图7(a)所示, 随着接触力波动振幅的增大, 电弧面积及周长先增后减、电弧最大电压先减后增如图7(b)所示, 随波动频率的增长, 电弧面积减小、电弧周长振荡趋稳.

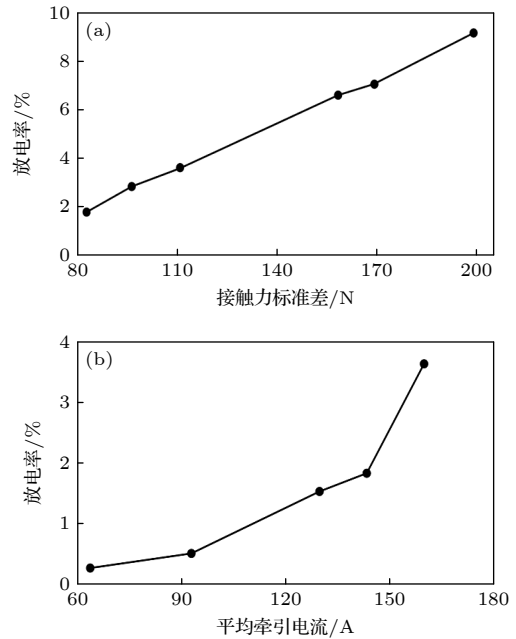


图6 接触压力与牵引电流对弓网电弧放电率的影响^[51]
(a) 接触压力对放电率的影响; (b) 牵引电流对放电率的影响
Fig. 6. Influence of contact force and current on pantograph arc rate^[51]: (a) Influence of contact force on arc rate; (b) influence of current on arc rate.

本团队^[13]使用高速相机对弓网电弧形态及发展演化过程开展研究, 通过二值化电弧图像计算电弧面积与周长, 结果表明电弧在燃弧过程中聚集收缩, 在燃弧第4—5.5 ms内最剧烈. Xu 等^[18]将气流影响下电弧演化过程划分为初始阶段、快速发展阶段及剧烈震荡阶段, 如图8所示, 初始阶段弓网间隙短、电弧形态稳定; 快速发展阶段电弧拉伸延长; 剧烈震荡阶段电弧动态失稳, 极易熄灭. 随后, Gao 等^[54]分析了电弧三阶段演化过程转变机制, 提出电弧行为在初始阶段由电磁力 (无外加磁场时, 由牵引电流产生的磁场提供) 主导、在快速发展阶段由风载荷 (由列车风与环境气流共同提供) 主导, 在剧烈震荡阶段由热浮力、风载荷共同主导, 且热浮力主导了弧根跳跃行为^[49], 弓网电弧受力状态如图5所示. 上述研究认为, 更大的牵引电流

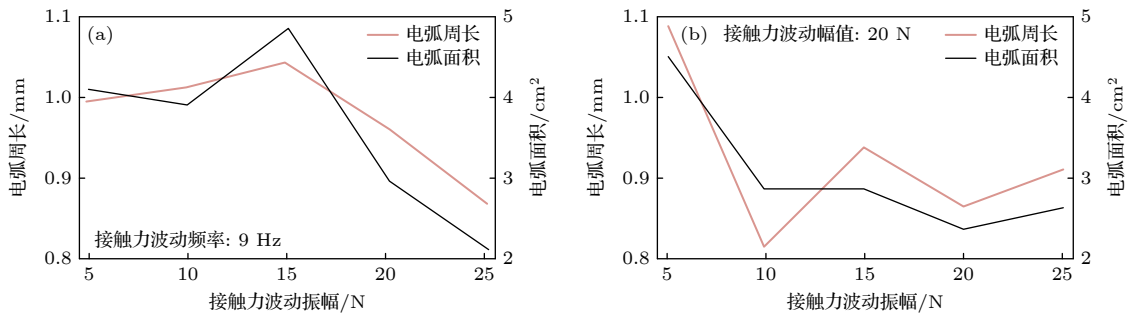


图 7 接触压力波动对弓网电弧形态特性的影响^[53] (a) 接触力波动幅值对弓网电弧的影响; (b) 接触力波动频率对弓网电弧的影响
Fig. 7. Influence of contact force on arc morphological characteristics^[53]: (a) Influence of contact force fluctuation amplitude on arc; (b) influence of contact force fluctuation frequency on arc.

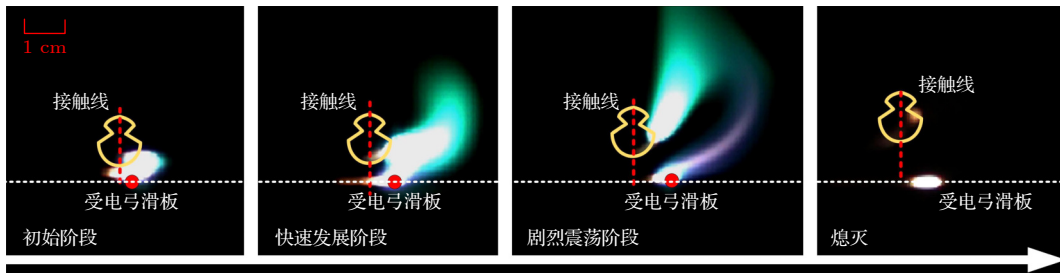


图 8 弓网电弧发展演化过程^[54]
Fig. 8. Evolution process of the pantograph arc^[54].

会增强电弧的稳定性, 更高的运动速度则会促使电弧快速演化并熄灭.

弓网电弧微观特性方面, 根据刘志伟等^[39]、Dong 等^[40]的研究, 列车高速运行时, 受气流影响拉伸的弓网电弧会卷入更多空气组分, 来自电极(受电弓滑板与接触线)的金属蒸气被稀释, 运行速度越高、气流速度越大, 弓网电弧的粒子组分越接近空气电弧. 此外, 高速气流会冷却弓网电弧, 使等离子体比焓、比热、电导率与热导率等热力学及输运系数降低. 牵引电流的提升则会进一步加热和破坏电极材料, 为弓网电弧提供更多的金属蒸气, 从而改变等离子体粒子组分; 随着电流密度的提升, 弓网电弧温度上升^[18], 物性参数随之改变.

此外, 电弧电气特性与弓网受流质量息息相关, 马云双等^[10]搭建弓网电弧放电模型研究高速工况 (200—350 km/h) 下弓网电弧放电特征, 如图 9(a) 所示, 电弧放电频率及电压随列车速度提升而提升, 该研究强调: 当击穿电压大于供电电压时, 电弧将在弓网离线过程中拉断, 导致“断流”, 影响列车供电. Peng 等^[11]通过电弧电气参数计算电弧能量, 研究了多因素对弓网电弧能量的影响, 发现电弧能量随功率因素的提高而降低、与牵引电流同步增长如图 9(b) 所示. 雷栋等^[55]改进 Cassie 和 Mayr 电弧模型, 考虑电弧长度、列车速度对电

弧功率的影响, 发现弓网起弧电压随列车速度、离线时间的增大而增大, 且列车运行越快, 离线时间对电压的影响越显著. Bormann 等^[56]依托庞巴迪与 ABB 公司, 围绕德国 ICE (InterCity Express) 项目, 在实验室条件下研究弓网电弧直流分量的产生过程、耦合机制及影响因素, 发现电弧直流分量会随着列车速度和弓网离线距离的增大而增大, 对车载电力电子设备、铁路信号传输与开关控制造成更严重的影响. Gao 等^[57]研究了不同速度对弓网电弧电气特征的影响, 发现电弧平均输入功率与列车速度的二次方成正比、电弧持续时间与列车速度成反比, 如图 9(c) 所示.

电弧电气特性与电弧行为关联紧密, Midya 等^[58]通过实验揭示了多因素对电弧行为的影响规律, 发现电流的增大使电弧倾向于保持原来的弧根位置, 而电弧重燃时两弧根的距离主要与电流和速度相关, 随后又在文献^[28]中进一步探究了电弧重燃特性与直流分量受多因素影响机制, 发现电弧直流分量主要源于弓网电弧两弧根电热条件的差异: 相比于受电弓上的弧根, 接触线上的弧根随列车高速运动, 因此散热更快、温度较低; 该研究还将电流过零后电弧重燃机制区分为低电流下受弧根电热条件差异影响显著的介质击穿型重燃, 以及大电流下受感性负载影响显著的热击穿型重燃.

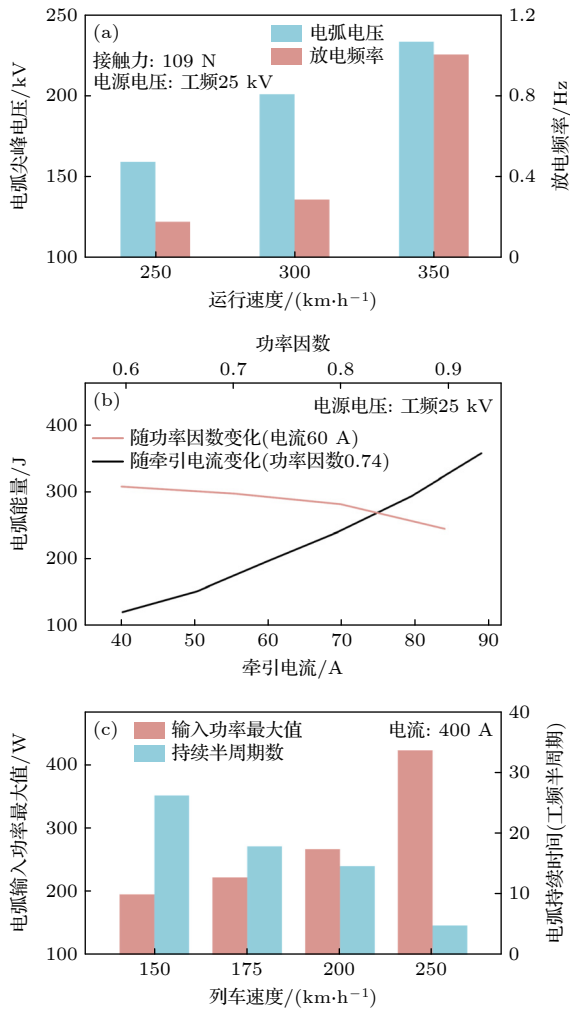


图9 高铁运行参数对弓网电弧特性的影响 (a) 列车速度对弓网电弧特性的影响^[10]; (b) 电流特征对弓网电弧能量的影响^[11]; (c) 列车速度对电弧功率与持续时间的影响^[57]
 Fig. 9. Influence of high-speed train operating conditions on pantograph arc characteristics: (a) Influence of train speed on arc characteristics^[10]; (b) influence of current characteristics on arc energy^[11]; (c) influence of speed on arc power and duration^[57].

上述研究分别阐述了多因素对弓网电弧电气、形态及行为的影响,揭示了弓网电弧电气-形态、电气-行为特性关联机制,进一步可以探究弓网电弧电气-形态-行为特性耦合规律,建立准确度更高的弓网电弧模型。

3.1.2 列车运行参数对弓网电弧电磁干扰的影响

弓网电弧电磁干扰是电气化铁路难以避免的问题,郭凤仪等^[59]设计了屏蔽外部电磁干扰的弓网电弧电磁噪声试验系统,发现弓网电弧电磁干扰频段主要在30—500 MHz,干扰强烈的频段在30—

60 MHz;随牵引电流的增长,电弧电磁干扰幅值增大、频段更广;随弓网接触力增长,干扰幅值先减后增,频段先窄后宽,表明存在最佳接触力使干扰幅值最小、频段最窄,如图10(a)所示. Wang等^[14]延续文献^[59]的研究,发现弓网电弧电磁噪声主要由电场噪声组成,该噪声随运行速度的增长频段先窄后宽.为研究更高速度、更大功率下弓网电弧辐射能量分布特性与幅频特征影响规律,金梦哲等^[60]搭建平台进行试验,模拟列车速度最高达到450 km/h,电流达到700 A,发现起弧阶段的电磁干扰强于熄弧阶段,且起弧阶段的电磁辐射能力主要集中在0—15, 45—55, 75—85 MHz频段,熄弧阶段则集中在45—55 MHz频段,且随着列车运行速度的增大,

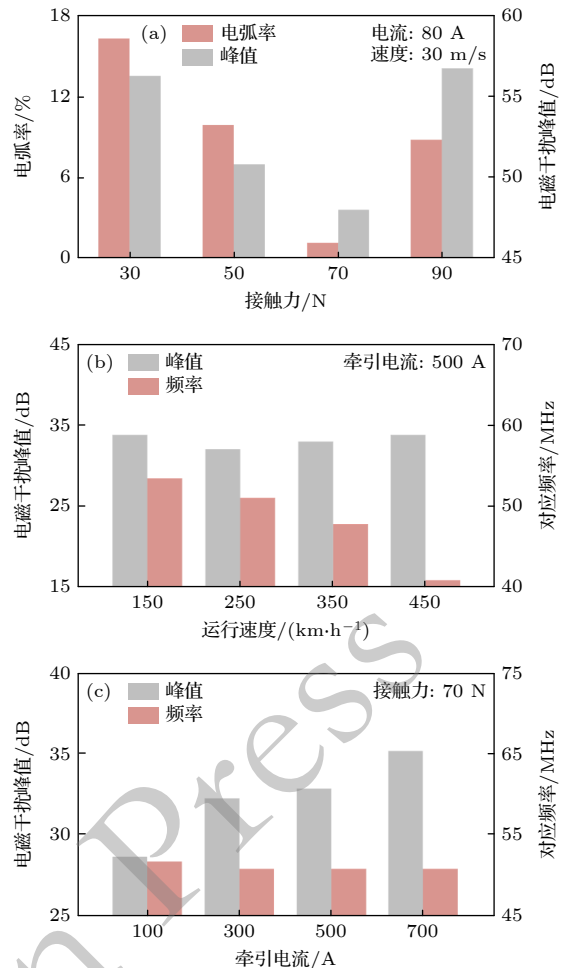


图10 高铁运行参数对弓网电弧电磁干扰的影响 (a) 接触力对电弧电磁干扰的影响^[58,64]; (b) 运行车速对电弧电磁干扰的影响^[60]; (c) 牵引电流对电弧电磁干扰的影响^[60]
 Fig. 10. Influence of high-speed train operating conditions on arc electromagnetic interference: (a) Effect of contact force on arc electromagnetic interference^[58,64]; (b) effect of vehicle speed on arc electromagnetic interference^[60]; (c) effect of traction current on arc electromagnetic interference^[60].

电磁辐射频域峰值对应频率逐渐减小, 随列车牵引电流增大, 电磁辐射峰值不断上升、对应频率则相对稳定, 如图 10(b), (c) 所示. 上述研究探明了弓网电弧电磁干扰产生机制、分布特征及受运行条件影响演化规律, 主要在稳定接触力下进行测试, 实际运行中弓网接触力波动大、不同工况下波动规律存在差异, 找到接触力波动与电弧干扰特征的关联机制、求解使电弧电磁干扰最轻的最优接触力, 可以作为下一步研究方向.

3.1.3 列车运行参数对弓网电弧烧蚀行为的影响

受电弓滑板的载流能力和服役寿命关系着高铁运行的安全性和经济性, Yang 等^[61]在研究载流摩擦磨损特性的过程中发现, 当速度大于 250 km/h 时, 分层磨损与电弧烧蚀是碳滑板的两个主要磨损机制, 随列车速度增大而增强的电弧放电是碳滑板表面磨损加剧的原因, 在后续研究^[12]中, 发现电弧能量主要受电流影响, 其次是速度、运行时间与接触力, 并利用偏最小二乘法建立了电弧能量与滑板磨损量的预测模型.

为实现更精确的高速列车多工况载流摩擦磨损模拟, Zhang 等^[15]利用有限元方法建立弓网动力学模型并计算动态接触力, 将仿真得到的动态接触力载入实验装置, 发现电弧发生率即烧蚀程度随动态接触力幅值、频率以及列车速度的增大而增大. 电弧发生率超过 2% 时, 碳滑板的载流性能出现明显恶化, 随着电弧发生率的增大, 磨损机制从机械磨损转变为电弧侵蚀^[16], 且运行速度超过 80 km/h 时, 电弧发生率将迅速上升^[62], 如图 10(a) 所示. 周虹屹等^[63]针对双弓运行工况建立了弓网动力学模型, 研究双弓工况对弓网电弧发生率的影响, 发现后弓电弧发生率远高于前弓. Mei 等^[52]采用全尺寸弓网系统试验台提升研究精度, 发现电弧烧蚀与热增强磨损是碳滑板磨损的主要因素, 且较大的弓网接触力可以减少电弧放电、抑制电弧导致的碳滑板损伤. Zhang 等^[64]发现在固定运行速度为 100 km/h 时, 使接触力为 70 N 电弧发生率最低, 且电弧是导致摩擦系数和磨损率升高的主要原因, 电弧发生率随接触力变化规律如图 11(a) 所示.

为明确弓网电弧烧蚀损伤机制, Xiong 等^[65]对持续电弧条件下的碳材料受电弓滑板/铜材料接触导线磨损行为进行试验, 最大试验速度为 110 km/h,

最大电流密度为 650 A/cm², 研究揭示: 氧化烧蚀、电热冲击与高温石墨化作用是电弧烧蚀磨损的主要机制, 此外还在磨屑中发现乱层碳纳米球, 该物质由电弧与滑动摩擦共同产生. 2023 年, Yan 等^[66]设计了时速 400 km/h 的环形受电弓滑板磨损试验机, 发现剥落磨损最初出现在滑板边缘, 但随磨损时间的延长会逐步发展至滑板中部, 这会加剧滑板磨损并增强电弧放电, 而在电弧持续侵蚀加热下, 碳滑板会出现分层磨损, 接触线也出现材料转移和氧化现象. 刘新龙等^[67]研究了牵引电流大小对弓网电弧侵蚀机理的影响, 聚焦在电弧侵蚀之后受电弓滑板表面载流磨损演化机制, 发现电弧高温会导致浸铜碳滑板中的铜材料析出, 破坏其结构均匀性

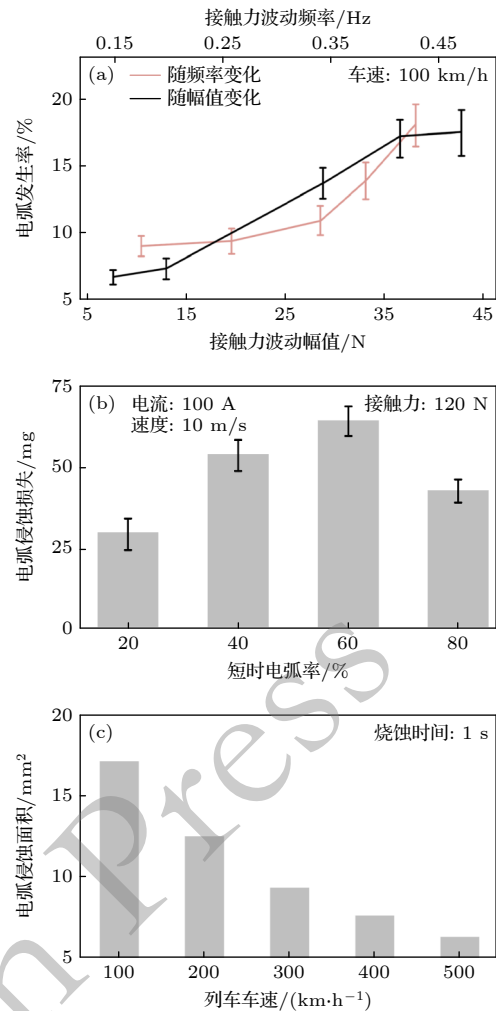


图 11 高铁运行参数对电弧烧蚀行为的影响 (a) 接触力波动对电弧发生率的影响^[15]; (b) 电弧发生率对侵蚀量的影响^[47]; (c) 车速对电弧烧蚀面积的影响^[69]

Fig. 11. Influence of high-speed train operating conditions on arc ablation behavior: (a) Effect of contact force fluctuation on arcing incidence^[15]; (b) effect of arc rate on erosion^[47]; (c) effect of vehicle speed on arc ablation area^[69].

并在滑板表面形成瘤状铜凝块, 导致摩擦系数与接触电阻升高. Pan 等 [68] 研究了高速大功率下新型弓网材料滑动电接触摩擦性能, 认为在电弧侵蚀、黏着磨损、磨料磨损和分层磨损等主要损伤机制中, 电弧侵蚀危害最大. Qian 等 [47] 研究了长时连续电弧工况下受电弓碳滑板的失效机制, 发现电弧烧蚀后的材料更易磨损, 磨损后的粗糙表面又会加剧电弧放电, 且存在一个电弧发生率, 使电弧烧蚀与摩擦磨损的耦合损伤作用最强, 如图 11(b) 所示. 电弧烧蚀是受电弓滑板质量损失的主因, Gao 等 [69] 提出一种针对电弧侵蚀的受电弓滑板质量损失评估模型, 通过弓网电弧模型获取注入受电弓滑板上的热通量密度, 并计算因受热出现质量损失的区域面积, 模拟速度达 500 km/h, 发现在固定速度下质量损失区域随燃弧时间增长, 在相同燃弧时间内质量损失区域随速度提升而缩小, 如图 11(c) 所示. 大部分研究关注电弧对碳滑板的侵蚀行为, 针对弓网电弧对接触线的烧蚀损伤, Sunar 等 [70] 研究发现, 强电流下电弧导致接触线材料软化, 直流供电时损伤更严重, 易引发接触线疲劳失效、影响弓网接触力.

上述研究探明了列车速度、接触力、牵引电流对弓网电弧发生率、放电能量、烧蚀量的影响规律, 揭示了弓网电弧损伤机制, 为减轻电弧侵蚀危害提供了理论基础.

3.2 高铁运行环境对弓网电弧的影响

3.2.1 覆冰环境对电弧及弓网受流的影响

覆冰环境下, 接触网表面冰层不均匀, 将导致严重的接触力波动与频繁的弓网燃弧 [3], Yao 等 [71] 研究了覆冰厚度对接触力的影响, 如图 12(a) 所示, 接触力对电弧放电频率、形态特性的影响可参考图 6 和图 7; 接触网表面冰层会阻碍弓网接触受流 [21], 降低实际电流值, 使弓网电弧更容易向剧烈振荡阶段演化; 蒋兴良等 [72] 对覆冰表面交流电弧发射光谱特性的研究表明, 冰层会为等离子体提供大量的 OH 基、NH 基分子等冰面粒子, 改变电弧等离子体的粒子组分. 此外, 瑞典学者研究了覆冰工况下弓网电弧直流分量及其电磁干扰特性, 指明覆冰会加剧电弧危害 [28]. Guo 等 [73] 研究了弓网电弧对接触网冰层的热效应, 发现电弧对冰层的热效应无法完全融化冰层, 且覆冰工况下电弧对接触线的侵蚀更严重, 图 12(b) 显示了覆冰工况对接触线表面电弧热量积累的影响.

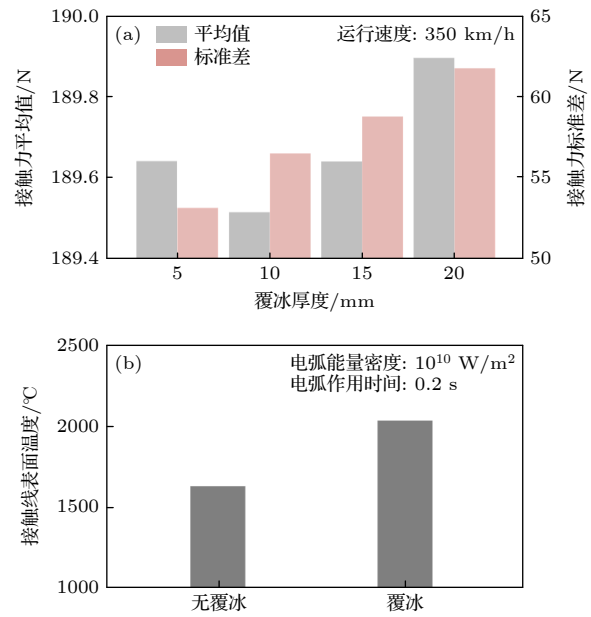


图 12 覆冰对弓网接触状态的影响 (a) 覆冰对接触力的影响 [71]; (b) 覆冰对电弧导致的接触线表面发热的影响 [73]
Fig. 12. Influence of ice on PCS contact condition: (a) Influence of ice on contact force [71]; (b) effect of icing on surface heating of the contact line caused by arcing [73].

除了对覆冰弓网电弧的直接研究, 更多学者通过弓网动力学性能及受流质量来了解覆冰状态对弓网系统的影响. Yao 等 [21] 在研究覆冰工况弓网系统动力学的同时关注覆冰条件对弓网受流质量的影响, 结果显示覆冰越厚弓网受流质量越差, 列车速度越高覆冰影响越严重, 该工作指出, 覆冰弓网动力学仿真需同时考虑覆冰对接触网系统惯性及几何形态的改变. Li 等 [3] 搭建考虑温度、风速、液态水含量及水滴中值直径的接触网覆冰演化模型, 使覆冰弓网状态模拟更精确, 随后利用 CNN-LSTM 神经网络实现快速预测 [74], 且覆冰质量、轮廓预测模拟结果可接入弓网动力学模型, 实现覆冰工况电弧发生率的精确预测. 尽管针对覆冰工况弓网电弧的研究较少, 但上述工作为重覆冰条件下弓网电弧发生率及发生位置的高精度预测提供了技术基础.

3.2.2 气流气压对弓网电弧的影响

影响弓网电弧的气流主要有环境横风与列车运行引起的列车风, 陈旭坤等 [17] 研究了不同车速下列车风对弓网电弧的影响, 量化研究了电弧耗功率随车速及气流速度增大的规律. 相比于列车风, 环境横风对弓网电弧行为的影响更为复杂, 王英等 [75] 利用链式电弧模型研究了升降弓工况下横

向气流对弓网电弧影响机制,认为大风工况下电弧更容易熄灭,但拉弧形态更复杂、影响范围更广. Yang等^[2]建立弓网电弧磁流体动力学模型,模拟横风对弓网电弧动态特性的影响,发现横风对电弧温度分布特征具有显著影响,且会引起电弧电压升高,该工作着重介绍了弓网电弧在大风速下的卡门涡街效应,即电弧形态、温度及电压出现周期性振荡. 气流对弓网电弧形态、发展演化及微观性质的影响见3.1.1节. 随着高速列车在高海拔地区的建设,低气压、强气流、低氧含量环境对弓网电弧的影响受到关注, Xu等^[18]搭建低气压强气流弓网试验平台,试验发现低气压下弓网电弧形态拉伸严重,不同气压气流条件下电弧弧根最大运动距离及弧柱最大长度如图13(a), (b)所示;低气压下弓网电弧向快速发展和剧烈振荡阶段演化的趋势放缓,但剧烈振荡阶段电弧形态变化程度更大、影响范围更广;还发现低气压下燃弧时间延长、弧根运动减缓,且弧根跳跃更为频繁,这会导致更严重的电弧烧蚀与过电压危害;在后续工作^[44]中指出低气压下热辐射增强和空气易击穿是弧根频繁跳跃的原因,环境气流与气压对电弧动态特性的影响如图13(c), (d)所示. 上述工作充分研究了气流与气压条件对弓网电弧形态、动态特性的影响规律、揭示了电弧演化机制. 此外,低气压低氧环境会导致弓网电弧

粒子组分中的氧元素相关粒子减少. Dong等^[40]的研究指出,高浓度氧气对电弧起抑制作用、会降低电弧能流密度及等离子体通道内的电子数密度;因此易知,低压低氧环境下,氧气对弓网电弧抑制作用减弱,电弧能流密度增长平均温度提升,并改变等离子体热力学及输运参数,其中等离子体的比焓及电导率将增长. 后续研究可围绕复杂气压气流条件下电弧行为的精确仿真及物性参数的定量计算开展,为弓网设备的防电弧设计提供依据.

3.2.3 潮湿降雨环境对弓网电弧的影响

全球气候变暖导致极端天气频发,其中极端降雨天气给高铁运行带来了诸多不确定因素,为保障弓网系统安全稳定运行,籍欣欣等^[76]研究了降雨条件下弓网电弧演化特性,发现降雨会导致弓网电弧形态严重拉伸、电弧发生率及电压增大如图14(a)所示,电弧面积及周长随降雨量先增后减,如图14(b)所示,图中电弧周长及面积通过像素数量表示. 降雨往往伴随着环境湿度提升,为电弧等离子体提供来自雨水的粒子组分. 胡绳荪等^[77]的研究指出水蒸气等离子体电弧具有高温、高焓的特点,因此,在高湿度条件下,弓网电弧等离子体各项热力学、输运参数因温度升高与组分改变发生变化. 危害特性方面,李含欣等^[20]研究了湿度变化对弓网载流磨

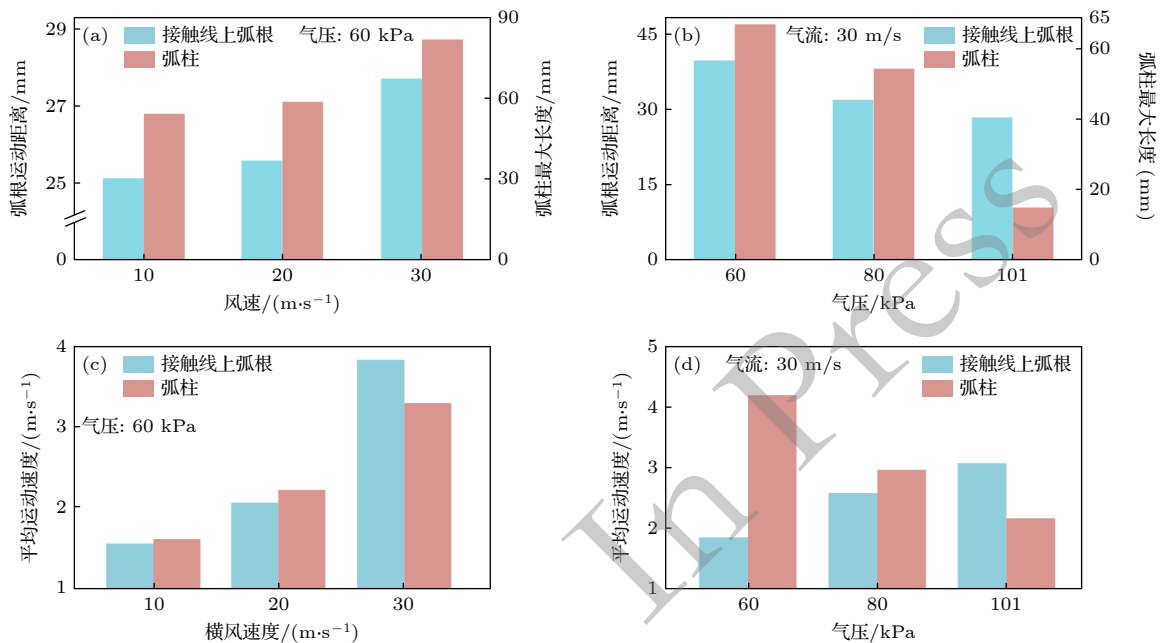


图13 大气环境对电弧的影响^[18] (a) 气流对弧柱弧根的影响; (b) 气压对弧柱弧根的影响; (c) 气流对电弧运动速度的影响; (d) 气压对电弧运动速度的影响

Fig. 13. Influence of atmospheric environment on arcing^[18]: (a) Effect of airflow on arc column and root; (b) effect of air pressure on arc column and root; (c) effect of airflow on arc velocity; (d) effect of air pressure on arc velocity.

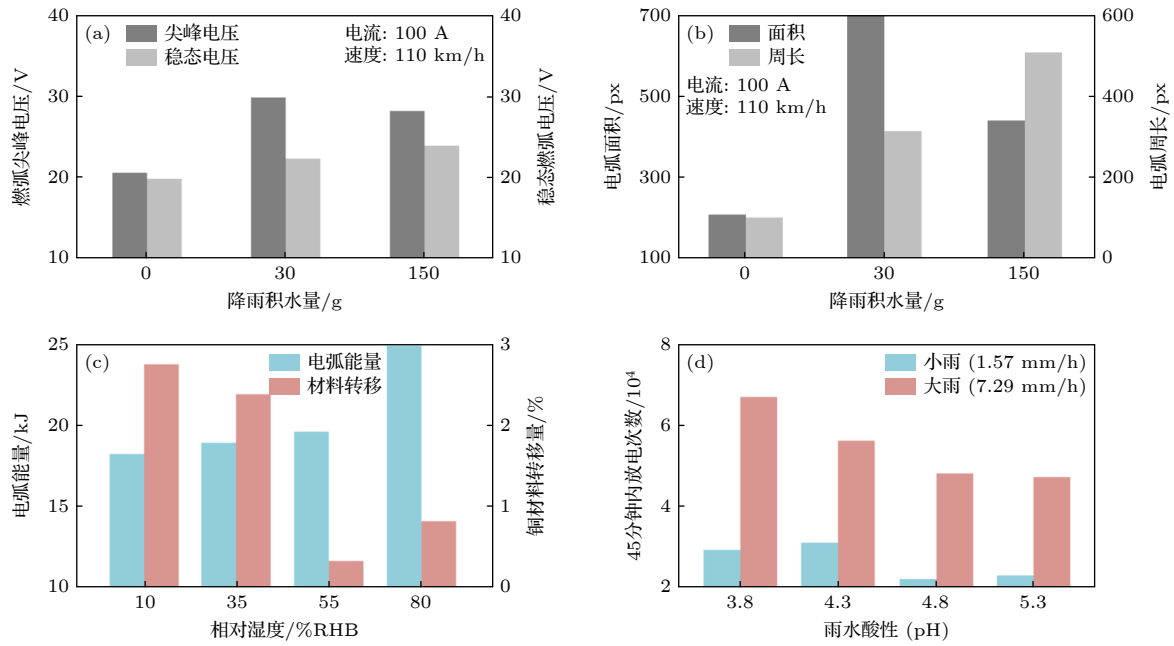


图 14 潮湿降雨环境对电弧的影响 (a) 降雨量对电弧电压的影响^[76]; (b) 降雨量对电弧形态的影响^[76]; (c) 湿度对弓网电弧特性的影响^[20]; (d) 雨水酸性对电弧放电频次的影响^[19]

Fig. 14. Influence of humid and rainy environment conditions on arcing: (a) Effect of rainfall on arc voltage^[76]; (b) effect of rainfall on arc morphology^[76]; (c) effect of humidity on arc characteristics^[20]; (d) effect of rainwater acidity on arc discharge frequency^[19].

损及其电弧放电过程的影响如图 14(c) 所示, 发现在湿度为 55%RH 时滑板材料转移最少即损失量最小, 且高湿度环境下电弧放电能量更大, Huang 等^[78] 发现在 20%—40%RH 湿度范围内, 随着湿度的提高, 逐渐增长的电弧发生率会促进氧化膜的生成, 从而起到润滑和保护作用. 曾子毅等^[79] 认为, 潮湿环境空气散热效果变差是电弧热量积累与滑板升温增长的原因. Shen 等^[80] 进一步研究了温湿度交变条件下的弓网摩擦学行为及导电特性, 发现高温会软化铜表面, 使磨损率与电弧发生率上升, 该工作观察到高湿度环境下电弧放电在碳滑板表面形成的烧蚀坑与铜颗粒, 更粗糙的表面使磨损率提升. Wang 等^[19] 考虑极端酸雨环境对弓网系统的危害, 图 14(d) 显示了不同雨量下雨水酸性对电弧放电频次的影响, 研究认为低降雨量下雨水酸性的提升能够软化铜材料、在碳滑板表面形成保护层, 在高降雨量下雨水酸性提升会增强水膜内电子迁移能力、导致更强烈的电弧侵蚀.

为设计适应降雨、湿热环境的弓网系统, Wang 等^[81] 测试了滑板含水量对载流摩擦过程的影响, 发现水环境中电弧侵蚀加剧、碳滑板异常磨损, 且在大电流工况下, 电弧放电率随水含量先减后增, 该工作认为, 水膜在一定程度上能通过润滑作用抑制电弧放电, 但当含水量过高时, 水膜会阻碍弓网

受流、导致更严重的电弧放电. 上述研究为降雨条件下高速铁路弓网系统运行、检修和维护提供了理论依据, 未来可依据降雨潮湿环境电弧放电机理, 研发具备针对性适应能力的新型受电弓材料.

4 弓网电弧防治措施

4.1 基于升弓压力调控的弓网电弧防治方法

接触网系统的等效刚度变化会导致受电弓经过时接触力快速变化, 出现机械振荡并产生弓网电弧, 受电弓结构如图 15(a) 所示, 通过反馈以及主动控制手段调整受电弓状态, 可以提升弓网接触稳定性, 避免弓网电弧产生. Pisano 和 Usai^[82] 提出了一种基于高增益高阶滑模观测器的弓网接触力输出反馈控制方案, 初步抑制弓网接触力波动. Collina 等^[22] 在弓网动力学模型中考虑了列车牵引电机的动态特性, 并设计了基于 PI 控制的受电弓主动控制方法, 使接触力波动缩小 50%. Sanchez-Rebollo 等^[83] 提出了一种基于 PI 控制的硬件在环弓网动态接触控制策略, 进一步使接触网波动范围缩小 70%. 随着人工智能神经网络技术与智能优化算法的发展, Taran 等^[23] 提出了一种基于模型预测的弓网接触力闭环控制方法, 在列车速度超过 40 m/s

时,弓网接触力波动能够在 0.3 s 内被控制在 5 N 以内. Nie 等^[24]提出了基于反步控制策略的弓网接触力反馈控制方法,使接触线抬升量小于 55 mm,研究发现提高弓网接触力可以有效降低电弧电磁干扰. 杨岗等^[84]应用动力学模型与数值计算方法,结合前馈-反馈控制策略,针对地铁道床沉降不平顺路段,将弓网接触压力最大差值从 150 N 缩小到 11 N. 针对双弓受流工况,周虹屹等^[63]提出应保持前弓接触力在 70—80 N 范围内、并适当提升后弓静态抬升力以抑制电弧. 除了对弓网接触力的主动控制,还可以通过调整弓网系统结构来降低电弧发生率, Calvo 等^[85]提出了一种安装在刚性接触网上的动态刚度补偿装置,该装置可以在速度为 250 km/h 时将平均接触力降低 9%,并降低接触力标准差至原来的 50%. Zhou 等^[11]研究了接触线半径及曲率对弓网电弧弧根特性的影响,发现增大导线半径、减小导线底部曲率可加速弧根运动减少集中烧蚀. Zhang 等^[86]研究了严重覆冰条件下接触网结构对弓网电弧发生率的影响,发现缩短接触网跨距、提升张力有助于降低电弧发生率,接触网结构如图 15(b) 所示,承力索、吊弦等设备的长度、间距、张力均是调控对象.

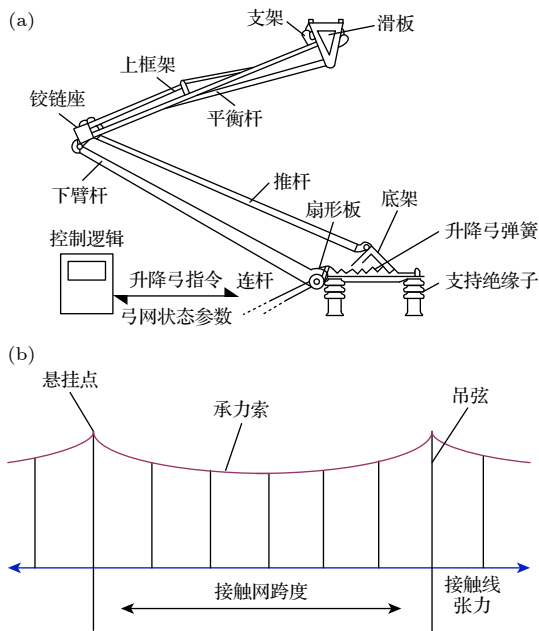


图 15 弓网结构 (a) 受电弓结构; (b) 接触网结构
Fig. 15. Structure of PCS: (a) Pantograph structure; (b) catenary structure.

上述研究分别从主动控制受电弓抬升力或改变接触网结构两方面降低电弧发生率,未来可耦合

两者优势,同时调控受电弓与接触网,实现弓网系统的协同动态调控、最大程度地降低电弧发生率.

4.2 基于电接触界面材料调控的防护方法

针对受电弓碳滑板载流磨损问题,涂川俊等^[87]研制出耐大电流并具有减摩功能的树脂基受电弓滑板 (RMPCS),但发现弓网电弧与氧化磨损的交互作用会降低树脂基滑板的性能,随后利用热压制、水固化和浸渍处理过程制备了聚酰亚胺树脂/腰果改性树脂聚合物基受电弓碳滑板材料 (PI/YM-PMPCS),该材料的耐电弧性能显著提升,在电流密度 285 A/cm² 下磨损率减小 50%^[25]. Wang 等^[88]首先制造的热解碳涂覆铜/碳复合材料 (PyC-Cuf/C),利用其容易在电弧热作用下产生氧化物形成润滑膜的特性,减小摩擦系数与磨损率,随后进一步制备铜合金浸渍及铜合金纤维增强碳/碳复合材料 (C/C-Cu, C/C-Cuf),发现其磨损表面较高的光滑度能降低电弧放电能量至原来的 70%,进而减小磨损率^[27]. 除了降低电弧放电能量,也可通过材料性能减少电弧发生率, Deng 等^[26]通过有序化学气相渗透技术、呋喃树脂浸渍及碳化工艺,制备碳/铜纤维协同增强复合滑板材料 (Cf/Cu/C),该材料机械性能及耐电弧性能优秀,对比普通碳铜复合材料 (C/Cu), Cf/Cu/C 材料表面不易起弧,在 30 m/s 的速度下电弧发生率约为 1.6%. Wang 等^[89]通过热压技术与树脂浸渍及碳化工艺制备碳铜纤维复合碳滑板材料 (Cuf/Cf/C),发现碳纤维含量越大,电弧发生率越低. 上述材料参数见表 2.

表 2 受电弓滑板材料性能参数表
Table 2. Material parameters of pantograph slider.

碳滑板及其材料名称	密度 /(g·cm ⁻³)	冲击强度 /(kJ·m ⁻²)	电阻率 /(μΩ·m)
RMPCS ^[87]	3.85	7.1	9.5
PyC-Cuf/C ^[88]	1.96	5.8	8
C/C-Cu ^[27]	2.24	8.6	16.27
C/C-Cuf ^[27]	2.13	25	6.3
Cf/Cu/C ^[26]	2.08	26.7	1.67
C/Cu ^[26]	3.59	13.3	12.6
Cuf/Cf/C-35 (碳纤维含量35%) ^[89]	1.92	13.5	8.2
Cuf/Cf/C-40 (碳纤维含量40%) ^[89]	1.86	17.9	7.8
Cuf/Cf/C-45 (碳纤维含量45%) ^[89]	1.96	22.1	7.5
纯碳滑板 ^[89]	1.67	8	40

此外, Huang 等^[90]还关注接触线材料与弓网电弧的耦合作用, 相比于典型接触线材料 (Ti_3AlC_2), 研发的新型接触线材料 ($\text{Cu-Ti}_3\text{AlC}_2$) 电弧放电能量降低约 25%. 现有工作通常基于碳滑板材料或接触线材料单独开展, 下一步工作可研究弓网材料匹配特性与弓网电弧的作用机制.

4.3 基于供电系统电气参数调控的电弧抑制方法

弓网电弧引起的过电压与电磁干扰将入侵车载电子设备、影响开关控制. Sun 等^[91]针对 400 km/h 工况下高速列车电弧电磁干扰难题, 提出系列处理思路, 包括降低电弧发生率、优化电路参数与布线方式减少电弧能量与燃弧时间、采用主动滤波装置消除电弧影响等措施. Bartelt 等^[92]将锁相环与离散傅里叶变换结合, 基于前馈控制方法缩短电弧识别耗时、缩短瞬态响应时间, 能在 1.5 个工频周期内消除电弧导致的影响. Lu 等^[29]在电缆终端加装特定瞬态电压抑制器, 使过电压幅值减小 40%. Zou 等^[93]在电路中并联一组电容阻尼器, 使电弧导致的二次侧过电压从 800 V 降低至 100 V 以内. Tang 等^[30]在电缆上嵌套镍锌铁氧体磁环, 通过电磁能量转换耗散的方式抑制弓网电弧过电压及电磁干扰, 使干扰峰值降低 7 dB. 除了抑制弓网电弧, Midya 等^[28]通过在电路中加入感性阻抗加速电弧重燃、利用电弧辅助融冰. Plesca^[94]提出利用气吹稳弧装置与耐烧蚀电极实现稳定的电弧传能, 相较于滑动电接触传能方式, 电弧传能流密度更大. 上述研究不仅通过多种控制方法对电弧过电压及电磁干扰进行抑制, 还初步研究了弓网电弧的利用方法, 有望成为未来大功率高速列车能量传输方式.

4.4 基于磁场调控的弓网电弧抑制方法

电弧等离子体电流密度大、对外加磁场敏感, 在开关电弧领域, 常使用磁吹灭弧装置抑制电弧危害. 在弓网电弧领域, 李权等^[95]初步探索了磁场对弓网电弧动态特性的影响规律, 发现磁场可以有效抑制弓网电弧的集中烧蚀现象. Huang 等^[31]利用交流横向磁场在气流环境下调控弓网电弧动态行为, 发现随着交变磁场频率的提升, 弓网电弧电压波动逐渐降低, 当磁场频率超过 50 Hz 时, 电压波动率趋于稳定, 约为 5.47%. 该工作还研究了三角

波、正弦波、方波对弓网电弧电压波动的影响, 发现使用三角波时电弧电压稳定性最强. 此外, Kuo 和 Lo^[96]等将磁性材料应用于接触网与受电弓, 基于磁吸原理增强弓网接触稳定性, 使电流均值提升 10%—20%, 大幅减少弓网离线次数, 抑制电弧发生. 现有研究验证了磁场及磁性元件对弓网电弧的抑制效果, 但如何在弓网系统中安装相应设备、如何设计磁场幅频特性以最大程度地抑制弓网电弧危害, 还需进一步研究.

4.5 复杂运行条件下的弓网电弧防治

基于 4.1—4.4 节, 现有电弧防护方法可总结为: 通过改善弓网关系阻止电弧的产生、通过提升材料性能减少电弧造成的损失、通过调控电弧行为降低其危害程度. 现有弓网关系改善方法主要从受电弓的接触力前馈-反馈主动调控入手, 少数工作围绕接触网结构进行优化; 材料方面旨在增强受电弓滑板和接触网的机械性能与滑动电接触质量, 通过减少表面破坏来抑制尖端放电、材料蒸发与电场畸变^[97], 降低电弧危害, 间接降低电弧危害; 行为调控方面以抑制特定危害为导向, 例如通过滤波器、电容阻尼器等抑制电弧过电压谐波, 或通过磁场带动弧根运动减轻烧蚀影响.

未来高铁速度更高、牵引功率更大、运行环境多样, 并伴随恶劣天气影响, 意味着弓网电弧发生率激增、物性参数变化、电弧能流密度更高、行为更复杂, 可以预见电弧烧蚀损伤与电磁干扰危害的加剧. 此外, 现有电弧防护技术效果也将受到影响: 弓网关系改善方面, 列车高速重载导致接触力波动频率、幅度增大, 对反馈控制的响应速度与调控效果提出挑战; 快速变化的复杂环境则会放大神经网络及简化模型对高铁弓网接触状态的预测误差, 使前馈控制效果不佳; 材料方面, 电弧输入能量的提升对材料的耐烧蚀性能提出了更高要求; 行为控制方面, 复杂环境导致电弧过电压谐波特性与烧蚀范围、行为改变, 相关抑制措施需针对新特性进行调整. 为应对未来复杂运行条件下的弓网电弧, 从“系统协同调控”, “材料匹配设计”, “电弧行为控制” 3 个方面提出防治方法与研究方向, 展望“源头抑制-界面保护-过程调控”协同电弧防治策略.

4.5.1 弓网系统协同调控避免电弧产生

系统协同调控方面, 依据上述分析, 为改善高

速铁路复杂环境工况弓网关系,需结合前馈控制提前响应与反馈控制实时调整的优势,形成前馈-反馈控制策略,调控弓网实际接触力使其稳定并接近目标值.基于上述策略,施加给受电弓的主动抬升力 F_{control} 控制方程如下:

$$F_{\text{control}} = \text{PID}(e(t)) + F_{\text{feedforward}}(F_{\text{mean}}, F_{\text{stand}}, F_{\text{max}}, F_{\text{min}}, U_m), \quad (18)$$

其中, $e(t)$ 代表实时接触力与目标接触力的差值, $F_{\text{feedforward}}$ 代表前馈控制对 F_{control} 的贡献,是受力状态预测值的函数.受流状态评估标准一般包括接触力平均值 F_{mean} , 标准差 F_{stand} , 最大值 F_{max} , 最小值 F_{min} 与接触线抬升最大值 U_m ^[1].

提升接触状态预测精度与前馈控制效果,对弓网关系的改善具有重要意义. Huang 等^[1]结合弓网动力学机理模型、梯度提升决策树分类模型与多层前馈深度学习回归模型,实现高速铁路弓网受流质量的预测、评估和优化.这一方法为高铁弓网关系的改善提供了借鉴,弓网动力学模型控制方程可表示为

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F, \quad (19)$$

式中, M , C , K 分别为接触网的质量矩阵、阻尼矩阵与刚度矩阵; y 为接触线的纵向位移; F 为接触网受到的外力矩阵.

后续工作可在此基础上考虑环境及工况因素对弓网动力学过程的影响,搭建高速铁路弓网系统数字孪生模型.一方面为接触力的前馈控制提供高精度数据基础,另一方面对前馈-反馈弓网系统协同调控效果进行预测评估.

4.5.2 弓网接触界面耐电弧材料匹配设计

升降弓操作、列车过分相、接触网覆冰舞动等复杂运行环境工况会不可避免地引发弓网电弧.电弧对材料的烧蚀主要发生在弧根区域,该区域的能量注入由弧根压降 V_c 与弧根电流密度 J_{arc} 决定^[98].电弧弧根注入能量 q_i 计算公式为(20)式,此外,弧柱辐射热流也会加热材料表面,因此总注入能量 q_c 如(21)式所示:

$$q_i = J_{\text{arc}} \times V_c, \quad (20)$$

$$q_c = q_i + q_{\text{rad}}, \quad (21)$$

式中, q_{rad} 代表来自弧柱辐射热流的能量.

基于(21)式,弓网接触界面材料可从如下方

向提升耐电弧性能:提高材料导热率与比热容,快速分散电弧能流、避免热量积累;提升表层材料电子功函数 ϕ_c ,减少电子热发射,降低电弧电子数密度与电弧温度,减小弧柱辐射热流与电流密度 J_{arc} ,减轻电弧烧蚀损伤;提高材料熔点、沸点,减轻烧蚀破坏和对电弧带电粒子的供应,使电流密度 J_{arc} 下降.以文献[87]中研发的硅油浸渍树脂基滑板材料为例,该材料利用硅油热分解反应吸收电弧热量并吸附带电粒子,使电弧温度和带电粒子数下降,从微观层面影响电弧等离子体,降低辐射热流与电流密度 J_{arc} ,达到减轻电弧危害的目的;但硅油的材料性质会降低滑板导电与机械性能,如何在调控电弧的同时保障弓网电接触材料的导电性与机械强度,是未来研究需要解决的关键问题.此外,面向高寒、高湿地区极端降雨及覆冰工况,弓网接触材料也需要抗冰疏水性质.

值得一提的是,弓网材料长期接触摩擦,两种接触材料匹配的好坏关系着弓网系统的整体性能,例如过高的滑板机械强度将对接触线造成危害^[99].因此,在设计抗电弧弓网材料时,还要考虑弓网接触材料匹配特性,实现弓网系统抗电弧性能的同步提升.

4.5.3 复杂工况弓网电弧主动调控

复杂环境工况使弓网电弧主要危害类型不同,因此需要考虑电弧危害特性及环境工况,实施针对性地主动调控.例如强气流、降雨条件会导致电弧形态拉伸、温度降低,使弓网电弧动态失稳、过电压峰值提升、断电时间延长,此时希望弓网电弧稳定,避免电弧拉断导致的过电压冲击与断电;低气压环境则会抑制弧根运动,导致长时集中烧蚀,此时希望弓网电弧能流分散、快速熄灭,减轻烧蚀危害.以抑制电弧动态失稳为例,基于文献[44]对电弧受力状态的研究,拟利用外加磁场调控电弧形态及动态行为.施加时变外加磁场 B ,实时抵消气流对电弧的拉伸作用,使电弧所受合力趋近于0,稳定电弧动态行为,避免过电压冲击与断电危害.基于(11)式—(15)式,施加在电弧电流元 i 上的时变外加磁场力 $F_{\text{bi}}(t)$ 可表示为

$$F_{\text{bi}}(t) = -(F_{\text{mi}}(t) + F_{\text{ti}}(t) + F_{\text{wi}}(t)), \quad (22)$$

式中, $F_{\text{mi}}(t)$, $F_{\text{ti}}(t)$, $F_{\text{wi}}(t)$ 分别为 t 时刻电弧电流元 i 所受自磁力、热浮力及风载荷.

欲减轻弓网电弧集中烧蚀,则可施加一个外加

磁场加速电弧运动,促使电弧熄灭.但过大的外加磁场又会加剧电弧动态失稳及相关危害,因此仍需结合实际需求计算合适的外加磁场强度及方向.

电路控制方面,肖嵩等^[100]提出“源头-路径-受端”过分相弓网电弧过电压综合防护体系,可为复杂环境工况弓网电弧过电压谐波危害防治提供借鉴:首先利用电力电子投切技术从源头抑制过电压及励磁涌流;随后考虑过电压在对应环境工况下的传播及分布规律指导高压设备、电缆等布局及设计,从传播路径上削弱电弧过电压冲击;最后针对电弧危害特性设计滤波器、消弧线圈、过电压抑制器等,为重点设备提供保护.

5 结论与展望

随着高速列车运行速度、功率和服役范围的提升,弓网系统受环境工况影响接触压力波动剧烈,使弓网电弧更易发生,对弓网系统及车载电力设备造成越发严重的烧蚀、过电压谐波和电磁干扰危害.本文系统综述了近年来弓网电弧领域的研究进展,重点围绕多因素耦合作用下弓网电弧等离子体的行为机制、演化规律及防治策略展开分析.主要结论如下.

1) 首先,阐述了弓网电弧发生发展过程与基本物性参数,梳理了弓网电弧试验研究方法与仿真模拟技术.试验研究方面,现有工作通过构建系列弓网电弧试验平台,调控运行速度、牵引电流、弓网材料及环境气压、气流、温湿度等变量,初步揭示了多因素对电弧电气、行为及危害特性的影响规律与耦合机制.建模与仿真方面,现有弓网电弧仿真模型包括专注于电弧过电压、电流、电阻等整体(外部)特征的黑盒电弧模型,关注电弧动态行为、弧根行为、电流密度及温度分布等局部(内部)特征的MHD模型及链式模型,以及利用人工神经网络关联电弧内外部特性、将弓网电弧模型与弓网动力学、摩擦学等模型串联应用于危害预警、损伤评估等用途的耦合模型.

2) 总结影响弓网电弧发生发展过程、形态特性、物性参数及危害特性的关键因素:弓网接触力是影响弓网电弧产生的根本因素,存在合适的接触力使电弧危害最小;列车运行速度通过影响弓网接触力间接改变电弧发生率、通过影响气流环境改变电弧行为,运行速度突破 300 km/h 后弓网接触力

波动剧烈电弧发生率呈指数提升,同时较高的车速会提升弓网电弧中空气组分的占比,使电弧物性参数发生改变;牵引电流直接影响电弧输入功率,电流越大、电弧侵蚀、过电压谐波与干扰危害程度越高;环境方面,覆冰、低氧、高湿度、降雨及酸雨环境会直接改变弓网电弧的粒子组分,使电弧物性参数改变;气流、气压环境对电弧形态、行为影响效果显著.总体而言,气流速度越大、气压越低、接触网冰层越厚,会导致更严重的电弧危害;而温湿度、降雨量、雨水酸碱性则存在最佳值或最佳关联条件,使电弧危害较小.

3) 为降低弓网电弧对高速铁路关键设备的危害,目前的弓网电弧防治工作主要包括:主动控制弓网接触力阻止电弧产生;研发新型耐电弧材料减少电弧对弓网设备的烧蚀损伤;利用具有电弧抑制效果的电路结构,例如通过滤波器、过电压抑制器减轻电弧过电压谐波危害,或通过消弧线圈降低电弧能量、缩短电弧持续时间;利用外加磁场调控电弧行为,例如通过外加磁场力拖动弧根运动避免集中烧蚀危害,或通过外加磁场力稳定电弧、避免电弧拉断导致的过电压与断电损伤.

基于目前研究成果,发现领域内存在特殊环境工况弓网电弧物性参数不清、危害特性不明,现有弓网电弧防护手段不能满足未来高速重载广域运行需求的问题.故基于综述研究,对该领域亟待开展的研究内容进行两点展望.

1) 现有研究重点考虑弓网电弧的外部特性,对物性参数关注不足.但相比于正常工况,低温、低压、低氧等环境会显著改变电弧粒子组分及物性参数,改变电弧行为特性.为掌握高寒、高海拔等特殊环境工况弓网电弧演化机制、实现更精确的仿真预测研究,亟需计算对应工况下电弧等离子体物性参数,从微观、机理层面建立仿真模型,探明“环境工况-物性参数-电弧行为”关联机制.同时,为适应未来更高速度、更大功率及极端气候条件下的弓网电弧试验与仿真需求,有必要对现有试验平台进行升级,实现高保真度的环境及工况模拟,提升试验结果的工程适用性.

2) 弓网电弧防护方面,本文展望了“系统-材料-特性”电弧协同防治思路,首先拟结合前馈-反馈控制策略的优势提升弓网接触力协同调控水平,从源头减少弓网电弧的发生率;搭建考虑复杂环境工况的弓网电弧数字孪生模型,提升弓网电弧预测

精度与前馈控制效果; 在材料层面, 开发高性能、高匹配、高适应的弓网电接触材料以耐受冻雨覆冰、高湿度、酸雨等极端环境, 并依据电弧烧蚀机理优化对应材料参数; 最后, 通过外加磁场或电路结构抑制不同工况下弓网电弧主要危害, 保护关键设备, 进而形成“源头抑制-界面防护-过程干预”相结合的协同防治。

参考文献

- [1] Huang G Z, Wu G N, Yang Z F, Chen X, Wei W F 2023 *Appl. Energy* **333** 120608
- [2] Yang Z F, Xu P, Wei W F, Gao G Q, Zhou N, Wu G N 2020 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **48** 2822
- [3] Li Z, Huang G Z, Wu G N, Gao G Q, Yang Z F, Zhu H Y, Gan G W 2024 *Cold Reg. Sci. Technol.* **227** 104306
- [4] Luo Y F, Yang Z F, Dong K L, Qian P Y, Xia L Y, Huang C, Zhang H, Wu G N, Wei W F 2024 *IEEE Trans. Transp. Electrification* **10** 6707
- [5] Zhang K, Zhang Y, Zha X M, Xiong Y, Peng G Q, Fan Y P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 164 (in Chinese) [张鲲, 张扬, 查晓明, 熊一, 彭光强, 樊友平 2012 物理学报 **61** 164]
- [6] Wu G N, Dong K L, Xu Z L, Xiao S, Wei W F, Chen H, Li J, Huang Z L, Li J W, Gao G Q, Kang G Z, Tu C J, Huang X Y 2022 *Railway Eng. Sci.* **30** 437
- [7] Li X W, Jia S L, Zhang B Y 2020 *High Volt. Eng.* **46** 757 (in Chinese) [李兴文, 贾胜利, 张博雅 2020 高电压技术 **46** 757]
- [8] Chen S J, Xu B, Jiang F 2017 *Acta Metall. Sin.* **53** 631 (in Chinese) [陈树君, 徐斌, 蒋凡 2017 金属学报 **53** 631]
- [9] Wang X L, Cai H, Zhao X G, Liu G, Liao M C, Qu L 2020 *High Volt. Eng.* **46** 4300 (in Chinese) [王晓蕾, 蔡汉, 赵贤根, 刘刚, 廖民传, 屈路 2020 高电压技术 **46** 4300]
- [10] Ma Y S, Liu Z G, Wen Y H, Ma L, Zhang J B 2013 *J. Beijing Jiaotong Univ.* **37** 99 (in Chinese) [马云双, 刘志刚, 闻映红, 马岚, 张金宝 2013 北京交通大学学报 **37** 99]
- [11] Peng K S, Gao G Q 2016 2016 *IEEE International Conference on High Voltage Engineering And Application (ICHVE)* Chengdu, China, September 19–22, 2016 pp1–4
- [12] Hu Y, Dong B J, Zhou P Y, Chen G X 2015 *Lubr. Eng.* **40** 66 (in Chinese) [胡艳, 董丙杰, 周培勇, 陈光雄 2015 润滑与密封 **40** 66]
- [13] Wu G N, G Z, Gao G Q, Hao J, Zhu G Y 2015 *High Volt. Eng.* **41** 3531 [吴广宁, 古圳, 高国强, 郝静, 朱光亚 2015 高电压技术 **41** 3531]
- [14] Wang Z Y, Guo F Y, Wang X L, Zhang Y L, Wang B W, Yan X M 2015 2015 *IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)* San Diego, CA, USA, October 11–14, 2015 p256
- [15] Zhang Y Y, Zhang Y Z, Du S M, Song C F, Yang Z H, Shanguan B 2017 *Tribol. Int.* **123** 256
- [16] Zhang Y Y, Zhang Y Z, Song C F 2018 *Materials* **11** 796
- [17] Chen X K, Cao B J, Liu Y Y, Gao G Q, Wu G N 2016 *High Volt. Eng.* **42** 3593 (in Chinese) [陈旭坤, 曹保江, 刘耀银, 高国强, 吴广宁 2016 高电压技术 **42** 3593]
- [18] Xu Z L, Gao G Q, Wei W F, Yang Z F, Xie W H, Dong K L, Wu G N 2021 *High Volt.* **7** 369
- [19] Wang Q S, Gao G Q, Fu R, Chen J H, Qian P Y, Wang H, Wu G N 2025 *Wear* **572–573** 205970
- [20] Li H X, Ji D H, Shen M X, Xiao J L, Zhao H P, Liu X L, Xiong G Y 2022 *Tribology* **42** 709 (in Chinese) [李含欣, 季德惠, 沈明学, 肖叶龙, 赵火平, 刘新龙, 熊光耀 2022 摩擦学学报 **42** 709]
- [21] Yao Y M, Zhou N, Mei G M, Zhang W H 2020 *Shock Vib.* **2020** 887609
- [22] Collina A, Facchinetti A, Fossati F, Resta F 2005 *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control* Seville, Spain, December 15–15, 2005 pp4602–4609
- [23] Taran M F, Rodriguezayerbe P, Oлару S, Ticlea A 2013 17th *International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)* Sinaia, Romania, October 11–13, 2013 p527
- [24] Nie Z Q, Ren Z L, Lin D, Zhang G Q 2017 *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* Denver, CO, USA September 10–13, 2017 pp194
- [25] Tu C J, Chen Z H, Xia J T 2009 *Tribol. Int.* **42** 995
- [26] Deng C Y, Yin J, Zhang H B, Xiong X, Wang P, Sun M 2017 *Tribol. Int.* **116** 84
- [27] Wang P, Xie F M Y, Wexler D, Yin J, Zhang H B, Zhu H T 2023 *Tribol. Int.* **185** 108483
- [28] Midya S, Bormann D, Schütte T, Thottappillil R 2011 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **53** 18
- [29] Lu H D, Zhu F, Liu Q X, Li X, Tang Y T, Qiu R Q 2019 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **61** 361
- [30] Tang Y T, Zhu F, Chen Y Y 2021 *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.* **36** 205
- [31] Yang Z F, Huang C, Luo Y F, Huang Z W, Xia L Y, Zhang H, Zhou S G, Dong K L, Wei W F 2025 *Plasma Sci. Technol.* **27** 59
- [32] Andrea M 2023 *Energies* **16** 1465
- [33] Song D D, Cheng L, Lin Z F, Du H J 2018 *High Volt. Eng.* **44** 932 (in Chinese) [宋冬冬, 程林, 林志法, 杜海江 2018 高电压技术 **44** 932]
- [34] Wu J Q 2008 *Electr. Rail.* **2** 26 (in Chinese) [吴积钦 2008 电气化铁道 **2** 26]
- [35] Zhu G Y, Wu G N, Gao G Q, Gu Z 2016 *High Volt. Eng.* **42** 642 (in Chinese) [朱光亚, 吴广宁, 高国强, 古圳 2016 高电压技术 **42** 642]
- [36] Pan Z H, Chen X H, Wang C, Xia W D 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 085201 (in Chinese) [潘子哈, 陈仙辉, 王城, 夏维东 2021 物理学报 **70** 085201]
- [37] Wang G Y, Zhang B Y, Liu W, Wang W, Li X W 2025 *Trans. China Electrotech. Soc.* **40** 5626 (in Chinese) [汪冠宇, 张博雅, 刘伟, 王雯, 李兴文 2025 电工技术学报 **40** 5626]
- [38] Wang W Z, Wu Y, Rong M Z, Yang F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 105201 (in Chinese) [王伟宗, 吴翔, 荣命哲, 杨飞 2012 物理学报 **61** 105201]
- [39] Liu Z W, Chen S K, Li C K, Zhu Y L, Gao J F 2020 *Low Volt. Appar.* **2** 25 (in Chinese) [刘志伟, 陈少昆, 李成坤, 朱银龙, 高晋峰 2020 电器与能效管理技术 **2** 25]
- [40] Dong K L, Yang Z F, Luo Y F, Ma Y G, Qian P Y, Wei W F 2024 *Phys. Scripta* **99** 075036
- [41] Zhong L L, Wang X H, Cressault Y, Teulet P, Rong M Z 2016 *Phys. Plasmas* **23** 093514
- [42] Tang B, Yang Z F, Li Z, Wei W F, Xia L Y, Li Z, Li P F, Wu G N 2025 *Talanta* **292** 127927
- [43] Xie W H, Wu G N, Yang Z F, She P P, Wang H, Zuo H Z, Wei W F, Gao G Q, Tu C J 2021 *High Volt.* **6** 674
- [44] Xu Z L, Gao G Q, Qian P Y, Xiao S, Wei W F, Yang Z F, Dong K L, Ma Y G, Wu G N 2023 *Chin. Phys. B* **32** 493
- [45] Gao G Q, Fu R, Wang Q S, Chen J H, Qian P Y, Zeng J J, Weng X, Li H Y, Yang Z F, Wang H, Wu G N 2025 *Friction*

- [46] Wang W G, Wu G N, Gao G Q, Wang B, Cui Y, Liu D L 2012 *J. China Rail. Soc.* **34** 22 (in Chinese) [王万岗, 吴广宁, 高国强, 王波, 崔易, 刘东来 2012 铁道学报 **34** 22]
- [47] Qian P Y, Gao G Q, Li H Y, Wu G N, Zhou C F, Li Z, Wang Q S, Tang B, Hong Wang 2025 *Eng. Fail. Anal.* **178** 109714
- [48] Lin F, Wang X F, Yang Z P, Sun H, Liu W Z, Hao R X, Jiao J H, Jin Yu 2017 *Proceed. Instit. Mech. Eng. t F: J. Rail* **231** 185
- [49] Qian P Y, Gao G Q, Dong K L, Wang Q S, Peng W, Ma Y G, Zhou C F, Chen S J, Yang Z F, Xiao S, Wu G N 2023 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **56** 415205
- [50] Yan Z F, Huang Z W, Pan L K, Huang C, Xing T, Fu R, Zhang H, Wei W F, Wu G N 2024 *Tribol. Int.* **198** 109925
- [51] Zhou H Y, Duan F C, Liu Z G, Chen L, Song Y, Zhang Y X 2022 *IET Electr. Syst. Transp.* **12** 128
- [52] Mei G M, Fu W N, Chen G X, Zhang W H 2020 *Wear* **452–453** 203275
- [53] Guo F Y, Zhou Q, Wang Z Y, Li Z H, Ji X X 2019 *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation* **31** 178 (in Chinese) [郭凤仪, 周奇, 王智勇, 李苗恒, 籍欣欣 2019 电子测量与仪器学报 **41** 178]
- [54] Gao G Q, Qian P Y, Xu Z L, Dong K L, Wang Q S, Peng W, Liu Y X, Ma Y G, Xiao S, Huang G Z, Wu G N 2022 *Phys. Plasmas* **30** 053502
- [55] Lei D, Zhang T T, Duan X W, Gao G Q, Wei W F, Wu G N 2019 *J. China Rail. Soc.* **41** 50 (in Chinese) [雷栋, 张婷婷, 段绪伟, 高国强, 魏文斌, 吴广宁 2019 铁道学报 **41** 50]
- [56] Bormann D, Midya S, Thottappillil R 2007 *18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility* Munich, Germany, September 24–28, 2007 p369
- [57] Gao G Q, Zhang T T, Wei W F, Hu Y, Wu G N, Zhou N 2018 *Proceed. Instit. Mech. Eng. t F: J. Rail* **232** 1731
- [58] Midya S, Bormann D, Larsson A, Schutte T, Thottappillil R 2008 *2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility* Detroit, MI, USA, August 18–22, 2008 pp1–6
- [59] Guo F Y, Zhang Y L, Wang Z Y, Wang B W, Wang X L, Zhang J L 2015 *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy* **34** 49 (in Chinese) [郭凤仪, 张艳立, 王智勇, 王宝巍 2015 电工电能新技术 **34** 49]
- [60] Jin M Z, Liu S H, Xing T, Yang C Z, Liu W D, Fang Q Y, Hu M 2022 *Electr. Power Autom. Equip.* **42** 177 (in Chinese) [金梦哲, 刘尚合, 邢彤, 杨才智, 刘卫东, 方庆园, 胡曼 2022 电力自动化设备 **42** 177]
- [61] Yang H J, Chen G X, Gao G Q, Wu G N, Zhang W H 2015 *Wear* **332** 949
- [62] Zhang Y Y, Li C H, Pang X J, Song C F, Ni F, Zhang Y Z 2021 *Wear* **477** 203809
- [63] Zhou H Y, Liu Z G, Xiong J M, Xu Z, Deng Y C 2023 *J. Traffic Transp. Eng.* **23** 77 (in Chinese) [周虹屹, 刘志刚, 熊嘉铭, 徐钊, 邓云川 2023 交通运输工程学报 **23** 77]
- [64] Zhang H J, Sun L M, Zhang Y Z, Bao S G 2014 *Tribol. Trans.* **57** 1157
- [65] Xiong X Z, Tu C J, Chen D, Zhang J Q, Chen J H 2014 *Tribol. Lett.* **53** 293
- [66] Yang H J, Yang D S, Mei G M, Cai C, Deng, X Q, Yang Y 2023 *Wear* **522** 204718
- [67] Liu X L, Zhou C W, Wang D Y, Zhou X J, Hu M J, Guan X, Zhang W L, Zheng Y T, Gao M S, Yang W B, Xiao Q 2024 *Tribology* **44** 189 (in Chinese) [刘新龙, 周朝伟, 王冬云, 周新建, 胡明捷, 关欣, 张武略, 郑伊亭, 高明生, 杨文斌, 肖乾 2024 摩擦学学报 (中英文) **44** 189]
- [68] Pan L K, Yang C Z, Xing T, Yu Q 2025 *Lubricants* **13** 87
- [69] Gao G Q, Xu P, Wei W F, Yang Z F, Wu G N 2018 *Proceedings of 2018 29th International Conference On Electrical Contacts and 64th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* Albuquerque, NM, USA, October 14–18, 2018 pp1–5
- [70] Ozgun S, David F, Adam B 2021 *IEEE Trans. Power Deliver.* **36** 3074
- [71] Yao Y M, Zou D, Wang J W, Zhou N, Zhang W H 2020 *Advances in Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks. IAVSD 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Vol. 1) (Cham: Springer) p189
- [72] Jiang X L, Wu H T, Wang H, Guo Y J 2019 *High Voltage Engineering* **45** 2596 (in Chinese) [蒋兴良, 吴海涛, 王涵, 郭裕钧 2019 高电压技术 **45** 2596]
- [73] Guo L, Li Y L, Yang J, Yu W Y *IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)* Wollongong, NSW, Australia, September 28–October 01, 2016 pp1–6
- [74] Li Z, Wu G N, Huang G Z, Guo Y J, Zhu H Y 2025 *IEEE Trans. Transp. Electr.* **11** 1189
- [75] Wang Y, Liu Z G, Gao S B 2016 *Proceed. CSU-EPSA* **28** 5 (in Chinese) [王英, 刘志刚, 高仕斌 2016 电力系统及其自动化学报 **28** 5]
- [76] Ji X X, Wang Z Y, Fang Z P 2019 *J. Electr. Meas. Instrum.* **31** 47 (in Chinese) [籍欣欣, 王智勇, 方志朋 2019 电子测量与仪器学报 **31** 47]
- [77] Hu S S, Meng Y Q, Bao J M, Sun D 2004 *Trans. China Weld. Institut.* **25** 5 (in Chinese) [胡绳荪, 孟英谦, 鲍家铭, 孙栋 2004 焊接学报 **25** 5]
- [78] Huang M, Yang B, Rong Y X, Zhao L, Xiao S N 2023 *Tribol. Trans.* **66** 953
- [79] Zeng Z Y, He Q X, Chen G X, Zhao P P, Dong B J 2024 *Lubr. Eng.* **49** 98 (in Chinese) [曾子毅, 何泉鑫, 陈光雄, 赵鹏鹏, 董丙杰 2024 润滑与密封 **49** 98]
- [80] Shen M X, Ji D H, Hu Q, Xiao L, Li Q P 2024 *Sci. China (Technol. Sci.)* **67** 2537
- [81] Wang H, Gao G Q, Deng L, Li X N, Wang X, Wang Q S, Wu G N 2023 *Coatings* **13** 42
- [82] Pisano A, Usai E 2004 *Automatica* **40** 1525
- [83] Sanchez-Rebollo C, Jimenez-Octavio J R, Carnicero A 2013 *Vehicle Syst. Dyn.* **51** 554
- [84] Yang G, Kong G W, Shen X 2024 *Electr. Drive Locomot.* **6** 163 (in Chinese) [杨岗, 孔国伟, 沈鑫 2024 机车电传动 **6** 163]
- [85] Calvo H A, Sanz B J D D, Gomez F J, Badolato M A 2021 *Int. J. Sim. Model.* **20** 315
- [86] Zhang H, Wei W F, Pan L K, Yang Z F, Huang G Z, Liu Y X, Chen X, Yang Z Q, Wu G N 2024 *Chin. J. Electr. Eng.* **10** 70
- [87] Tu C J, Chen Z H, Chen D, Yan H G, He F Y 2008 *Trans. Nonferr. Metals Soc. China* **18** 1157 (in Chinese)
- [88] Wang P, Deng G Y, Zhang H B, Yin J, Xiong X, Zhang X, Zhu H T 2019 *J. Mater. Sci.* **54** 13557
- [89] Wang P, Song H, Li K, Guo Y G, Deng C Y, Deng G Y, Zhu H T 2024 *Tribol. Int.* **192** 109224
- [90] Huang X C, Feng Y, Qian G, Ge J L, Zhang X F, Wang C H 2020 *Rare Metal Mater. Eng.* **49** 34 (in Chinese) [黄晓晨, 凤仪, 钱刚, 葛金龙, 张现峰, 王传虎 2020 稀有金属材料与工程 **49** 34]
- [91] Sun J F, Yu J 2017 *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* Beijing, China, October 29–November 01, 2017 p7046
- [92] Bartelt R, Heising C, Staudt V, Steimel A Badajoz, Spain, May 20–22, 2009 p217
- [93] Zou D D, Wang M Y, Hu P Z, Cui C 2020 *AIP Adv.* **10** 125029
- [94] Plesca A 2014 *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* **57** 212

- [95] Li Q, She P P, Mu T Y, Lu C 2020 *Chin. J. Vacuum Sci. Technol.* **40** 1064 (in Chinese) [李权, 余鹏鹏, 母婷佑, 鲁超 2020 真空科学与技术学报 **40** 1064]
- [96] Kuo M T, Lo W Y 2014 *IEEE Trans. Ind. Appl.* **50** 2891
- [97] Dong K L, Wu G N, Qian P Y, Ma Y G, Luo Y F, Yang Z F 2024 *IEEE Trans. Transp. Electr.* **10** 1706
- [98] BESSIS B, MESSAAD M, KHORIEZ H. 2018 *Electrical Engineering* **100** 2737
- [99] Hu J H, Chen J C, Li Q 2004 *Electr. Eng. Mater.* **01** 38 (in Chinese) [胡建红, 陈敬超, 李强 2004 电工材料 **01** 38]
- [100] Xiao S, Cao Y, Wu G N, Gao G Q, Guo Y J, Zhang X Q 2024 *Chin. Soc. Elec. Eng.* **44** 4682 (in Chinese) [肖嵩, 曹野, 吴广宁, 高国强, 郭裕钧, 张血琴 2024 中国电机工程学报 **44** 4682]

SPECIAL TOPIC—Non-equilibrium transport and active control strategy in low-temperature plasmas

Research progress of high-speed railway pantograph arc: Influencing factors and prevention methods^{*}

WU Guangning[#] QIAN Pengyu[#] LIU Wenji GAO Guoqiang[†] LI Hongyan

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

(Received 29 August 2025; revised manuscript received 23 October 2025)

Abstract

The pantograph-catenary system (PCS) serves as the exclusive means of power supply for high-speed trains. As train speeds increase, traction power rises, and operations take place in complex and variable environments, pantograph arcing has become more frequent. This phenomenon is accompanied by changes in physical properties and increased hazards, which seriously threaten the safety of high-speed railways. This paper systematically reviews the recent researches on pantograph arc, and outlines physical characteristics, experimental techniques, and simulation methods. The study focuses on analyzing the effects and mechanisms of operating parameters and environmental conditions on pantograph arc, summarizes prevention strategies, and explores applications such as arc energy utilization. Existing research has sufficiently examined how operational parameters affect arc hazards, yet studies on arc physical properties and evolution mechanisms remain limited, particularly regarding special conditions such as icing. Current protection methods also require adaptation to complex environments to meet the growing demands for arc management. Two future research priorities are proposed: first, clarifying the physical properties of an arc under special environments and establishing the correlation among “environmental conditions, an arc’s physical properties, and its behavior” to enable accurate prediction; second, developing an efficient arc prevention system through the approach of “source suppression, interface protection, and process intervention”. This review aims to provide theoretical and practical guidance for realizing reliable current collection and effective arc control in high-speed railway PCS in China.

Keywords: pantograph arc, electrical erosion, pantograph-catenary system, high-speed trains

PACS: 52.25.-b, 52.25.Dg, 52.25.Kn, 52.30.Cv

DOI: 10.7498/aps.74.20251169

CSTR: 32037.14.aps.74.20251169

^{*} Project supported by the Innovative Research Group Project of the Natural Science Foundation of Sichuan Province, China (Grant No. 2024NSFTD0009) and the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2024YFB2606302).

[#] These authors contributed equally.

[†] Corresponding author. E-mail: xnjdggq@163.com