

新能源商用车高压插接器烧蚀故障机理分析与优化改进研究

千煜晗 王桥桥 范文斌

陕西重型汽车有限公司 陕西 西安 710200

摘要: 新能源商用车高压插接器长期处于重载振动、多介质侵蚀的复杂工况下,烧蚀故障是影响整车高压回路稳定运行的核心隐患,从结构组成、工况特征与材料属性维度梳理其基础运行特性,结合装配偏差、环境损耗、材料老化三类核心诱因拆解故障演化全链路,本文从接触电阻畸变、热累积扩散、界面不可逆损伤三个层面厘清烧蚀的内在作用机制,最终从结构设计、用材体系、装配工艺、工况适配四个维度提出可落地的优化改进方案,为商用车高压插接器可靠性提升提供实操参考。

关键词: 新能源商用车; 高压插接器; 烧蚀故障; 接触电阻; 可靠性优化

引言: 新能源商用车规模化应用进程中,高压电气系统的运行稳定性直接决定整车作业效率与安全属性。作为高压回路的核心连接部件,高压插接器在长期大电流传导、强振动冲击与多环境介质侵袭的叠加作用下,烧蚀类故障的发生频次逐年攀升,直接引发回路断电、动力中断等恶性工况。当前行业内针对商用车专属场景的烧蚀机理系统性梳理仍存在缺口,无法完全适配重载场景下的可靠性升级需求,亟需开展针对性的深度剖析与优化路径探索。

1 新能源商用车高压插接器基础特性分析

1.1 高压插接器结构组成解析

对新能源商用车专用高压插接器进行系统性结构拆解,产品整体由四大核心功能组件构成,各组件承担专属功能,共同支撑高压电气回路稳定运行。导电接触组件为电能传输核心载体,依靠精密对接结构实现高压电流稳定传导,整体构造适配商用车大电流传输的作业需求。密封防护组件布置于插接器对接缝隙与外露界面,通过专属嵌套结构阻挡外界杂质侵入内部腔体。锁紧定位组件采用机械式限位结构,实现插头与插座的精准对接与牢固固定,抵御车辆运行产生的机械扰动。绝缘支撑组件包裹全部导电结构,实现高压带电部位与车体结构的有效隔离^[1]。商用车长期处于重载、长时作业状态,插接器结构设计相较于乘用车更为严苛,整体结构强度、装配精度、机械耐受强度均经过专项升级。

1.2 高压插接器工作工况特征

新能源商用车主要应用于货运、工程作业等场景,运行负荷高、作业时长久,赋予高压插接器特殊且复杂的工作工况。电气载荷层面,设备长期维持高压大电流工作

模式,电能传输负荷基数大,作业周期内持续保持满负荷导通状态。机械运行层面,车辆行驶途经各类复杂路况,车身颠簸与车身晃动会产生持续性振动扰动,车辆启停、载重切换会带来间歇性机械冲击,持续作用于插接器对接结构。环境工况层面,车辆作业场地不固定,露天作业模式会面临昼夜与季节温度更迭,形成频繁的高低温交替环境。户外场景中的悬浮粉尘、路面水汽会持续侵袭插接器安装区域,逐步渗入结构缝隙内部。

1.3 高压插接器材料性能属性

高压插接器的运行稳定性,与核心用材的基础性能密切相关。接触导体作为核心导电部件,具备稳定的导电、导热能力,直接影响大电流工况下的产热水平与传输效率。材料具备适配长期工况的力学形变性能,可抵御机械挤压与振动带来的结构形变,维持导电界面完整状态。绝缘壳体采用特种高分子材质,拥有良好的耐温水平与绝缘性能,可适配温度波动工况,阻隔高压漏电风险。优异的抗老化性能能够延缓长期工况下的材质劣化速度,维持绝缘防护能力。密封弹性部件依托良好的耐候性能,应对外界温湿度变化与环境侵蚀。出众的形变恢复性能可让部件受压后快速回弹,稳定结构密封紧实度。

2 高压插接器烧蚀故障诱发因素研究

2.1 结构装配类诱发因素

高压插接器的装配质量直接决定内部接触结构的配合状态,各类装配缺陷会为烧蚀故障埋下长期隐患。插接器对接过程中出现的装配错位,会改变端子原本的对接轨迹,让接触区域发生偏移。端子接触位置偏离设计区域后,有效接触范围会出现缩减,接触分布状态失去

均匀性。锁紧结构未达到标准装配行程,会造成插接总成预紧力不足,对接结构无法保持紧密贴合状态。车辆运行过程中,松动的结构会产生细微位移,持续破坏电气连接的稳定性。插合间隙超出标准区间会让端子接触面处于不稳定工作状态,局部位置出现悬空,载流工作时会形成集中发热区域。各类部件装配偏差会破坏插接器整体结构的同轴度与配合精度,让内部受力分布出现失衡^[2]。接触贴合状态出现异常后,回路内部接触电阻会出现无序升高,电流传导过程中的热量聚集程度持续加剧。异常发热状态会逐步损伤端子表面镀层与金属基体,逐步推进烧蚀故障的萌生与发展。

2.2 工况环境类诱发因素

新能源商用车全天候、高强度的作业场景,会对高压插接器形成持续性工况损耗。车身结构承受的持续振动会不断冲击插接器对接结构,让端子接触面产生往复微摩擦。长期微磨损会破坏接触面平整状态,粗糙的表面结构会提升电流传输阻力。车辆行驶启停、载重切换会带来频繁载荷波动,高压回路电流状态频繁变动,接触界面长期处于不稳定载流环境。自然环境带来的极端温度变化会交替冲击插接器各类组件,低温环境收缩结构间隙,高温环境加速结构松弛,两类状态反复交替破坏结构稳定性。作业场景中的粉尘、水汽、腐蚀性介质会逐步侵入插接器内部结构,沉积在端子接触表面。介质附着会削弱导电性能,加速金属表面氧化变质。多重外界条件持续作用,不断劣化插接器接触界面状态,加速各类结构部件的性能衰减,搭建烧蚀故障发生的外部条件。

2.3 材料老化类诱发因素

长期服役状态下的材料性能退化,是高压插接器烧蚀故障产生的核心内在诱因。导体材料长期承载大电流,表面会逐步生成氧化层与硫化层,表层导电性能出现大幅下降。导体表层结构发生质变后,接触电阻会出现持续性攀升,发热问题会愈发突出。密封弹性部件长期承受结构挤压与温度冲击,会出现弹性疲劳问题,形变回弹能力逐步衰减。密封结构失效后,外部环境杂质更容易进入结构内部,加重内部接触结构的损耗速度。绝缘壳体长期处于高温工作环境,会产生热老化现象,材质内部结构逐步疏松,绝缘耐受能力持续下降。各类材料出现微观性能退化后,插接器会陆续显现前置故障特征。接触电阻异常升高、密封防护能力衰退、绝缘性能下降等问题,都会破坏高压回路的稳定工作状态,逐步诱发局部过热与电弧现象,最终造成插接器烧蚀失效。

3 高压插接器烧蚀故障形成机理剖析

3.1 接触电阻异常演化机理

高压插接器的电气传导稳定性,取决于接触界面的微观接触状态。端子接触面并非绝对平整光滑,微观视角下存在大量微小凸起与间隙,实际导电区域仅集中在部分微凸起位置。装配偏差会改变端子对接姿态,打乱微观接触点位的分布形式,有效导电区域出现不均匀分布。局部点位承载全部回路电流,剩余接触区域处于空置状态。材料氧化会在端子表层生成致密氧化薄膜,覆盖原有微观导电点位,削弱金属接触导通能力。振动磨损会持续打磨接触界面,磨平原有稳定接触凸起,催生新的不规则接触结构。界面接触状态的持续改变,会让接触电阻从常规稳定数值逐步发生畸变。电阻数值会出现不规则上升,不同接触点位的电阻差值持续拉大。电阻异常状态会在长期工况中不断累积加剧,形成固定的高电阻区域^[3]。通电工作过程中,高电阻区域会产生明显的发热效应,成为局部过热问题的起始源头,搭建起接触缺陷向热损伤故障转化的核心路径。

3.2 局部过热与热累积机理

高压大电流工况下,插接器异常接触区域会依托焦耳定律持续产生热量,形成固定产热区域。接触电阻异常点位的载流损耗大幅提升,电能会持续转化为热能堆积在接触界面。插接器内部结构紧凑,端子排布密集,预留散热空间有限。固有散热条件无法匹配持续产热需求,形成结构性散热短板。商用车长期持续作业的工作模式,让插接器始终处于满载荷工作状态,热量散失速度长期低于产热速度。零散热量逐步汇聚堆积,形成持续性热累积效应。堆积的热量会持续向端子基体、表面镀层、周边密封与绝缘结构传导。接触界面金属材料会处于高温炙烤状态,表层结构性能逐步衰减。密封弹性部件会承受持续热应力作用,老化速度大幅加快。绝缘结构会出现温度耐受透支,内部材质性能逐步劣化。热累积带来的持续性损伤,会不断放大接触界面的缺陷程度,让电阻异常问题进一步加重,形成产热、升温、劣化的恶性循环。

3.3 界面烧蚀不可逆损伤机理

接触界面的持续高温状态,会突破插接器材料的常规耐受阈值,引发一系列不可逆的结构与性能损伤。高温环境会软化端子表层金属结构,微观接触点位出现熔融形变,原本规整的接触界面变得凹凸无序。高温会加速金属材料氧化反应,生成大量疏松的氧化产物,附着在接触界面表层。极端高温工况还会引发界面杂质与镀层材料碳化,形成绝缘性碳化层覆盖在导电区域。熔融、氧化、碳化三类变化会彻底破坏原有导电结构,引

发接触结构永久性形变。碳化层与氧化层会隔离金属有效接触,阻断局部导电通路。导电通路数量持续减少,剩余通路承载电流负荷进一步提升,温度会再次攀升。单点局部劣化会逐步向整个接触界面拓展,损伤范围持续扩大。初始轻微的界面缺陷逐步演变为大面积结构损伤与电气失效,最终造成高压插接器彻底丧失稳定导电能力,完成烧蚀故障的全过程演化。

4 高压插接器烧蚀故障优化改进策略

4.1 结构设计优化改进

结合高压插接器烧蚀故障对应的各类结构缺陷,可对产品整体结构开展针对性优化设计。调整端子接触结构的整体造型与接触布局,优化接触面微观形态,扩大有效导电接触范围。规整的接触结构可以降低局部电流集中现象,削弱异常发热的产生条件。升级锁紧定位结构的限位方式与卡紧行程,提升机械卡紧的牢固程度。优化后的结构可以降低行车振动带来的结构松动概率,维持长期稳定的对接状态。重新规划插接器内部散热结构布局,调整端子间距与腔体通风结构,拓宽热量扩散通道。改善界面接触的配合形式,提升结构自身容错能力,弱化轻微结构偏差对接触状态的负面影响^[4]。多维度结构优化可以全面提升插接器抗振动干扰、维持稳定接触、散发残余热量的基础性能,从结构层面减少过热烧蚀的发生概率。

4.2 用材体系优化改进

材料性能退化与热损伤是烧蚀故障产生的内在根源,针对核心部件用材体系开展升级改良尤为关键。筛选适配商用车高强度工况的导体材料,提升基体材质的导电效率与导热性能,降低常规载流工况下的发热损耗。更新端子表面处理工艺,选用耐温、抗氧化的镀层材质,强化接触界面的防护能力,延缓表层氧化变质速度。更换适配复杂环境的密封部件材料,提升耐老化与抗热变形能力,长期维持结构密封完整性。迭代升级绝缘壳体用材,强化高温耐受能力与绝缘稳定性,减少热老化引发的性能衰减。各类核心用材的性能提升,可从故障源头抑制材料劣化进程,降低接触电阻异常、密封失效、绝缘衰减等问题的出现频次,筑牢插接器长期稳定运行的材质基础。

4.3 装配与适配工艺优化改进

装配工艺缺陷是诱发接触异常与早期烧蚀隐患的重要人为因素,需要对整套装配工艺体系进行优化完善。

梳理原有装配作业流程,剔除不合理作业步骤,建立标准化的插接对接工序。细化插接对位校准工艺,明确对接角度、插入行程、同轴度控制等关键工艺要求,减少对接错位与偏心问题。完善锁紧质控工艺,规范锁紧操作力度与到位判定标准,杜绝虚锁、未锁到位等装配问题。细化整车安装适配标准,统一安装固定方式与结构间隙控制要求。标准化的工艺管控可以最大程度消除各类装配偏差,规避装配缺陷引发的接触面积不足、电阻偏高等异常状态。有效提升大批量装配作业的一致性,强化插接器长期服役过程的结构稳定性与电气可靠性。

4.4 工况适配性优化改进

新能源商用车多变的作业工况,会持续对高压插接器产生结构与性能损耗。需要结合实际运行场景开展工况适配性优化设计。强化插接器整体抗振动结构设计,提升结构抗疲劳能力,弱化颠簸路况带来的界面微磨损。优化部件耐高低温性能设计,适配季节交替与区域温差带来的温度波动,减少温变引发的结构松弛与材质劣化。升级整体防护结构设计,提升腔体防尘、防水、防介质侵蚀能力,阻断外界杂质对接触界面的持续损伤。针对性的工况适配优化,能够稳定极端作业环境下的接触状态与结构性能,切断工况因素引发的性能劣化链路,提升插接器全工况范围内的抗烧蚀能力。

结束语

整套优化方案落地后,可有效降低高压插接器接触异常发热的发生概率,大幅延缓核心部件的性能衰减速度。从结构、材料、工艺、工况适配多维度形成的协同改进体系,能够全面强化高压插接器在商用车复杂作业场景下的抗劣化能力,减少烧蚀故障引发的非计划停机问题,为新能源商用车高压电气系统的长期稳定运行筑牢底层支撑。

参考文献

- [1]王琴,龚旭,刘琦,等.某车型涡轮增压执行器及接插件热害问题研究[J].机械设计与制造,2024(7):158-162.
- [2]刘伟强,胡小康,徐利雄,等.电动汽车自动充电连接器柔性对接机构设计研究[J].汽车工艺与材料,2025(3):48-54.
- [3]王辰玥,乔冰,胡玄,等.新能源汽车电流传感器搭接电阻的研究[J].传感器世界,2026,32(1):31-35.
- [4]胡玄,叶柳凯,袁哲锋,等.新能源汽车电流传感器电连接器可靠性研究[J].汽车电器,2025(3):43-47.