# 防爆电动车转向臂断裂分析及优化

# 党宏文

(国家能源投资集团神东煤炭集团 陕西 榆林 719315)

摘要: 矿用防爆锂离子蓄电池无轨胶轮车可有效解决传统防爆柴油车"四高一低一难"问题,改善司乘人员的驾乘体验,减小煤矿井下空气污染,但煤矿井下道路工况复杂,空气环境腐蚀性强,对车辆的转向系强度和耐用性提出了更高的要求。本文针对某型19座防爆电动人员运输车转向杆系断裂问题进行分析,采用故障树分析法(FTA),对可能造成断裂事件的原因从设计、生产、装调过程中可能存在的事件进行了逐一分析筛查,通过仿真分析与试验检测相互结合的手段,论证了转向压力过大和材料热处理是导致转向弯臂和转向直臂断裂的主要原因,并对故障件进行更换、跟踪、验证,证明了优化措施的有效性。

关键词: 防爆电动车; 转向臂; 断裂

## 0 引言

防爆无轨胶轮车是矿井实现高产高效的必备辅助运输设备,但防爆柴油车固有的"高污染、高油耗、高噪音、高故障、低寿命、难维护"的"四高一低一难"问题一直被各矿企所诟病。随着国家对矿山空气质量安全监管的加强,国内各大煤炭企业集团纷纷提出实施煤炭工业 4.0,大力推进煤炭装备自动化、智能化、信息化、集成化水平。绿色智能防爆电动无轨胶轮运输车采用纯电力驱动,零排放无污染,信息化集成度高,智能化扩展空间大,模块化布置,使用成本低,符合"安全矿山、绿色矿山、智慧矿山、高效矿山"的行业需求,确属行业发展方向。

转向拉杆是汽车转向系中的重要部件,直接传递汽车的转向力,影响车辆的操作稳定性。在车辆左转和右转的过程中,转向拉杆频繁承受拉应力和压应力,若存在加工缺陷、受力过大、材料缺陷、运动干涉及其他未知原因,在长期使用过程中会导致转向拉杆弯曲变形甚至断裂,影响行车安全。尤其是煤矿井下道路工况复杂,空气环境腐蚀性强,对车辆的转向系强度和耐用性提出了更高的要求,如某矿用防爆电动人员运输车运行18个月后连续发生转向弯臂和转向直臂断裂的故障。

#### 1 转向系介绍

转向系是用来保持或者改变车辆行驶方向的机构, 在车辆行驶时,其保证各转向轮之间有协调的转角关 系。根据阿克曼原理,将轮胎看作刚性体,忽略轮胎 侧偏等影响,车辆在转弯行驶时,最好的情况是保证 全部车轮绕同一个瞬时转向中心行驶,使在不同圆周 上运动的车轮作纯滚动运动,同时转向轮在最大转角 下获得最小的转弯半径,满足车辆通过性要求。因此 车辆内外轮有不同的转角,驾驶员通过操纵转向系统, 使车辆保持在直线或者转弯运动状态。

转向过程:司机操作方向盘,将转动量输入助力转向器,从而转变为转向垂臂的摆动,进而推动纵拉杆运动,带动车桥上的转向弯臂绕主销转动,转向直臂安装在主销下端,跟随主销摆动,并通过横拉杆带动另一侧车轮主销转动,实现内/外侧车轮偏转,达到转向目的。

## 2 车桥转向臂断裂

在使用过程中,某矿某型 19 座防爆电动人员运输车在井下掉头巷区域方向盘打死倒车时,听察断裂清脆声,随后司机打方向车轮无反应,车辆无法行走,经检查发现前桥发生转向弯臂断裂和转向直臂断裂故障。经查,故障发生时车辆运行数据为:运行总时间 18 个月,运行总里程分别为 22056km 和 24521km。故障件如图 1 所示。

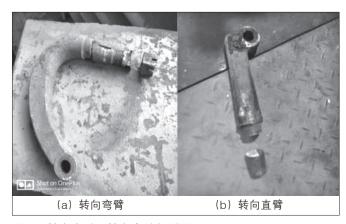


图 1 转向弯臂和转向直臂断裂图

表 转向臂断裂原因

弯臂和直臂本体通过锥面分别安装在主销上端和下端,配合锥孔内部平键防止转动,背面安装开槽螺母防松。弯臂和直臂通过球头销与其他杆件相连,传力过程中需承受球心偏距引起的弯矩。转向弯臂和转向直臂断裂位置相似,断裂处位于配合锥面上端并远离键槽处。

# 3 故障定位

防爆电动人员运输车主要用于煤矿井下人员通勤, 运送距离较长,受当前电池技术限制,矿用磷酸铁锂电 池能量低、质量大,为保证足够的续航里程来满足实际

运行需要,配置了 2 个防爆电池箱,质量约 1.5t,满载总质量达 7t,整机质量较柴油车增加 50% ~ 80%,转向轴载荷相对柴油车增加很多。为保证方向盘操控力,需配置更大的动力转向器,导致转向系统传力部件负载增加。

转向弯臂断裂部位及断口形貌见图 2,肉眼观察断面质地粗糙,未见明显初始裂纹挤压区,初步判断为材料缺陷和强度不足导致的突然断裂失效。



图 2 转向弯臂断口形貌

转向直臂断裂部位及断口形貌见图 3,肉眼观察有 1/3 区域断面光滑,另 2/3 区域断面粗糙,起始断裂区



图 3 转向直臂断口形貌

域位于安装水平面上,初步判断在较大的水平力作用下,先产生裂纹,在反复作用下裂纹不断扩大,断面不断挤压摩擦出现光滑区域,随着裂纹深度逐渐增大,当直拉杆臂无法承受水平压力时,最终发生断裂。

## 4 故障分析

故障树分析法(FTA)是由上向下演绎式失效分析法,利用布林逻辑组合低阶事件,分析系统中从底层不希望出现的状态到顶层事件失效之间的故障树,并利用科学方法进行故障分析及排除,最终确定故障原因。引起本故障发生的因素见表。

故障现象	原因分类	原因	备注
转向弯臂 和转向直 臂断裂	设计原因	车桥选型问题	车桥额定载荷不足导致断裂
		动力转向器选型问题	转向器额定输出过大导致杆系过载
		转向压力问题	转向压力过大导致杆系过载
		运动干涉问题	运动干涉导致结构损坏
	装配原因	装配不合理	装配不合理导致受力不符合预期
	生产制造原因	拉杆材质问题	不同材质强度差异较大
		拉杆热处理问题	热处理不到位导致强度、刚度不符合标准
	<i> </i>	拉杆加工问题	加工缺陷导致应力集中

下面针对以上可能的原因逐个进行分析。

# 4.1 设计原因

### 4.1.1 车桥选型原因

前转向桥型号 WW103QSW-00000,额定载荷3000kg,最大转角35°,而根据故障车辆实测重量结果,该型防爆电动人员运输车满载前轴载荷2330kg,小于车桥额定载荷,选型满足要求。

## 4.1.2 转向器选型原因

转向器型号为BC8640,厂家为北辰汽车转向系统有限公司,适用前轴负荷2~3.5t,最高使用油压13MPa。根据轴荷调整转向压力匹配合适的方向盘手力,该型防爆电动人员运输车满载前轴载荷2330kg,在动力转向器匹配轴荷范围内,选型满足要求。

#### 4.1.3 运动干涉校核

经实际极限转向试验,转向弯臂和转向直臂在车轮 左转/右转极限范围内无运动干涉,满足转向极限需求。 4.1.4 转向系统压力分析

防爆电动人员运输车采用液压助力转向系统,查液 压原理图车辆转向系统压力与液压系统主路压力一致, 而转向压力越大则方向机输出力矩越大,作用在转向 弯臂和转向直臂上的推力也随之增加。

煤矿井下巷道狭窄,车辆存在原地转向调头工况,由于原地转向阻力矩计算受很多因素影响,传统设计中常采用轴荷和胎压的经验公式计算车辆的原地转向

阻力矩。公式如下:  $M = \mu/3\sqrt{G^3/P}$ 

式中: M一在沥青或水泥路面上的原地转向阻力矩;

 $\mu$ 一轮胎与地面的滑动摩擦系数,取 0.7;

G-转向轴负荷 2330kg;

*P*─轮胎气压, 0.67MPa。

计算得原地转向阻力矩 996Nm, 根据转向杆系传 导力臂计算得助力转向器所需油压 5.49MPa。

为进一步确认采用防爆电动人员运输车在原地打方 向所需的转向压力,采用 5650 万能液压测试仪分别检 测原地转向压力和方向盘打到极限后的溢流压力值,分 别测得原地实际所需转向压力 5.5MPa, 方向盘打死持续 溢流压力 13MPa。在转向器输出压力 13MPa 和 5 5MPa 时对应的输出力矩分别对弯臂进行强度仿真计算,应 力值见图 4。

根据仿真结果,在5.5MPa转向压力下,弯臂根部 应力 467MPa, 在 13MPa 转向溢流压力下, 弯臂根部应 力 934MPa, 接近 40Cr 材料抗拉强度 980MPa, 安全系 数 1.04, 在原地转向至溢流情况下车辆行驶在不平道 路上极易导致转向弯臂断裂。转向直臂的安装接口尺 寸、力臂与转向弯臂相同,在此弯扭复合作用下同样 会发生断裂。

## 4.2 生产制造原因

#### 4.2.1 加工原因

转向弯臂和转向直臂均为模锻件, 机加工面未见明 显缺陷, 断裂部位位于圆锥面外沿并远离平键键槽位 置,因此加工质量非本次断裂直接原因。

#### 4.2.2 化学成分检验

根据 GB/T 4336-2002 《碳素钢和中低合金钢火花 原子发射光谱分析法》,对转向弯臂委托第三方进行化 学成分检验,根据检测结果化学成分对比分析, C元素 占比 0.41%, Cr 元素占比 0.99%, 材质为 40Cr 与弯臂 原厂材料一致。

#### 4.2.3 硬度测试

根据 GB/T 230.1-2004《金属洛氏硬度试验 第1部 分:试验方法》委托第三方进行检测,先将转向弯臂横 断面进行精加工, 无氧化皮和其他污物, 利用硬度计沿 直径方向分别检测外圆至芯部的硬度来确认样件的热 处理工艺,从径向圆柱面至中心等间距选取4个点检测 硬度(大约间隔 4mm 取 1 个点), 测得从芯部到边缘硬 度值分别为 24.7HRC、25.2HRC、25HRC 和 26.8HRC、 说明采用了调质处理工艺,但硬度值偏小(理论要求 28~32HRC)。此外,同步开展转向直臂的拉伸试验, 试样抗拉强度 814MPa, 小于 40Cr 钢材材料标准热处 理后的抗拉强度 980MPa, 因此试样热处理工艺不满足 标准要求。

## 4.3 装配原因

车辆已运行 20000km 以上, 未出现结构干涉或由 于装配原因导致的其他结构零部件损坏, 因此装配满 足要求,可排除该因素。

## 4.4 其他原因

煤矿井下道路条件差,经现场查看,断裂发生所在 区域无明显大减速带或深坑, 断件表面无明显磕碰, 均 为在打转向过程中断裂,因此排除外部冲击断裂原因。

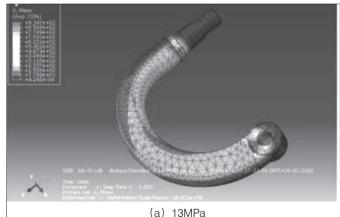
# 故障定位

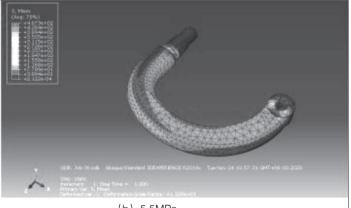
综上分析,某型19座防爆电动人员运输车转向弯 臂和转向直臂断裂主要原因为转向系统压力大,次要原 因为材料热处理工艺未达到标准要求,从而发生断裂。

## 改讲措施及验证

为验证定位准确性,针对故障原因采取如下措施:

- (1) 消除隐患。修复故障车辆并将同批次车桥转向 弯臂和转向直臂统一进行更换;
- (2) 降低转向压力。由于助力转向器缺少泄压阀, 通过在车辆液压系统与转向系统之间增加减压阀,将





(b) 5.5MPa

图 4 弯臂强度仿真

助力转向器极限位置的转向溢流压力由 13MPa 降低至 6MPa。

更换故障件后进行矿区累计运行 32424km 后跟踪检查,未重复发生此类故障,问题得到有效解决。

## 7 结语

本文采用故障树分析法(FTA)对某型 19 座防爆电动人员运输车转向弯臂和转向直臂断裂进行故障分析,对可能造成断裂事件的原因从设计、生产、装调过程中可能存在的原因进行了逐一分析筛查,最终确定了导致故障发生的主要原因为:设计过程中未对转向压力进行理论核算,液压系统和转向系统之间未设置

减压阀导致方向盘打死时助力转向器持续溢流输出最大力矩,最终导致转向弯臂和转向直臂断裂。

## 参考文献:

[1] 张 亦 良 , 姜 公 锋 , 徐 学 东 , 等 . 汽 车 转 向 横 拉 杆 断 裂 失 效 分 析 [J]. 北 京 工 业 大 学 学 报 , 2010 , 36 (10) : 1317-1323.

[2] 嵇正波, 菅宝柱, 孙见君. 42CrMo 转向横拉杆断裂分析及优化设计 [J]. 锻压技术, 2015, 40(12):136-140.

[3] 吴文祥,尚灿,廖冰,等.汽车转向直拉杆断裂原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2016.52(11):818-821.

## (上接第68页)

浸入水中 3 ~ 6mm, 观察一段时间, 待气泡排出速度 稳定后, 测量每分钟气泡数量。阀门泄漏量测量装置 如图 6 所示。

#### 3 结语

通过分析凝汽器水室真空破坏阀内漏的各种原因,并提出针对性的调整、车削、对研及整体更换的方法,同时明确密封性能测试的要求和方法,可以有效解决阀门内漏故障。希望能够对类似结构阀门的检修提供一些借鉴和指导。

## 参考文献:

[1] Masoneilan 21000 系列截止阀产品手册 [Z].

[2]ANSI/FCI 70-2-2013, American National Standard Control Valve Seat Leakage[S].

**作者简介**: 李攀攀 (1982.12-) , 男, 汉族, 河南洛阳人, 本科, 高级工程师/技师, 研究方向: 核电站维修; 杨博文 (1989.06-) , 男, 汉族, 山西忻州人,

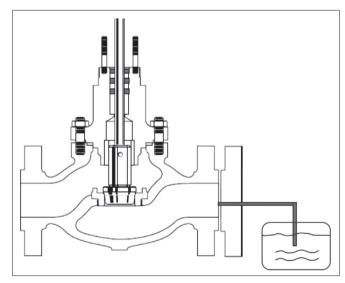


图 6 阀门泄漏量测量装置

本科,工程师/技师,研究方向:核电站维修;金泽(1989.06-),男,汉族,宁波慈溪人,本科,工程师/技师,研究方向:核电站维修;韩鹏(1985.05-),男,辽宁沈阳人,本科,工程师/技师,研究方向:核电站维修。