

汽车铝合金转向节生产过程危险源辨识及安全对策分析

马朝辉

戴卡凯斯曼成都汽车零部件有限公司 四川省 成都市 610213

【摘要】：面向铸造型汽车铝合金转向节制造链，本文围绕熔炼、铸造、机加工三个核心环节开展危险源辨识与控制策略设计。通过过程机理分析、故障树建模与现场事件复盘，识别铝液泄漏与燃气积聚、滑块失控与工件弹射、高压切削液飞溅与刀具断裂等关键触发链，提出源头监测、能量联锁与界面隔离的组合对策。在典型量产线实施后，危险事件由12次降至2次，降幅83.3%，一次性投入50万元带来事故损失减少120万元，净收益70万元。对策同步改善熔炼温度稳定性与夹杂控制，降低铸造充型异常与机加工颤振诱因，验证了全流程协同治理对安全与工艺质量的双重增益。

【关键词】：铝合金转向节；危险源辨识；熔炼；铸造；机加工

引言：

在汽车轻量化与底盘操控协同发展的背景下，铝合金转向节凭借比强度和成形性能优势成为承载制动与侧向力的关键枢件，其制造稳定性直接关系到车辆耐久与操稳。铸造型铝合金转向节贯穿熔炼、铸造、机加工等高温高能且自动化程度较高的工序链，风险来源既包括材料与温度窗口偏离，也涉及联锁、传感与夹紧等控制系统失效，可能引发人身伤害、设备损毁与冶金质量劣化等复合后果。现有研究多集中于单工序安全或局部设备防护，缺乏基于全流程机理约束的系统辨识与量化评估，难以形成可复制的闭环治理路径。基于此，本文选取典型量产场景，以成分与纯净度控制、热管理、载荷路径和高压冷却液系统为主线，构建三环节危险源图谱与故障树框架，结合实际事件台账提炼触发机理，提出源头监测、能量联锁与界面隔离的组合策略，并通过实施前后对比验证其在频次、暴露与经济性维度的综合效益，为铝合金底盘件的安全与工艺协同提供工程化参考。

1 汽车铝合金转向节生产工艺概述

鉴于整车轻量化与底盘操稳的双重需求，铝合金转向节把轮毂总成与减振器、下控制臂、转向拉杆连接的关键枢件，用来传递制动力与侧向力并维持外倾角与主销后倾等定位参数的稳定。围绕铸造型铝合金转向节的制造链条，本研究把熔炼、铸造、机加工界定为核心环节，砂芯铸造、抛光、打磨与喷漆类工序不纳入工艺讨论范围。熔炼环节从合金成分控制展开，常选用Al-Mg-Si系铸造合金如6061或6082，把回炉料与新材料按质量比配料后在燃气或电阻炉内升温至720至750℃，期间借助转子在线精炼和惰性气体吹炼来降低氢含量并去除夹杂，随后进行扒渣与陶瓷泡沫过滤，把熔体浇注为铸锭并进行540至560℃的均匀化处理，保温8至12h后锯切成铸坯，亦可在连续供料条件下直接输送至加热工位。进一步观察铸造环节的过程控制，坯料一般加热至460至500℃并在1200至1500t级闭式模铸压力机上分步成形，模具预热多在220至280℃范围，预成形与充型成形之间通过调节冲程速度至150至300mm/s⁻¹来稳定金属流动，石墨或玻璃基润滑剂被用来降低摩擦并抑制折叠与充型不足，飞边修整后配置固溶加

热与水淬以及人工时效，用以提高屈服强度与抗疲劳性能。需重点关注的是，铸后组织的再结晶程度与残余应力直接影响机加工稳定性，因此把热处理曲线与锭坯历史进行同步追溯更具工艺约束力。机加工环节围绕功能基准开展，把铸件在专用组合夹具中进行六点定位后，依序实施端面找正、基准孔与轴承座孔精镗、转向臂孔钻削与安装面精铣，数控车铣复合与高刚性镗削中心配合高压冷却液管理，用来抑制热变形与刀具磨损，使关键尺寸达到正负0.05mm的公差要求，表面粗糙度稳定在Ra1.6μm左右。由此推导，贯穿熔炼的成分与气体含量记录、铸造的温度与吨位加载历史、机加工的在线测头与三坐标数据回溯，构成了支撑后续危险源辨识与工艺参数优化的必要工艺背景。

2 汽车铝合金转向节生产过程危险源辨识

2.1 熔炼环节危险源辨识

鉴于熔炼工序把合金配比、温度控制与在线精炼直接作用于高温铝液，危险源呈现工艺性与设备性叠加的特征。高温铝液泄漏的发生缘由多与炉衬侵蚀、浇槽与工作门部位的微裂以及过热导致的氧化皮破裂相关，当铝液温度超出750℃、黏度下降并伴随氢溶解度上升时，任何与潮湿工具或地面残水的接触都可能触发瞬时爆沸，把喷溅覆盖作业区并引发灼伤与二次火灾的复合风险。燃气泄漏集中在燃气炉阀组密封、软管接头与点火系统失效场景，若燃气与炉膛残余空气形成可燃混合并在点火失败后被积聚，存在回火与爆燃，同时不完全燃烧会产生一氧化碳，形成急性中毒危害；精炼惰性气体管路的倒灌与转子密封失效也会把气体喷射扰动铝液表面，诱发飞溅与氧化夹杂增多。电气设备故障则以电阻炉加热回路绝缘退化、母排过热、控制柜接触器失灵与热电偶漂移为典型表现，这些异常会破坏升温曲线、造成过热或失电停炉，进而放大热应力并加速炉衬裂纹的演化。结合江苏无锡一汽配企业的熔炼炉热电偶失效事件，可以揭示传感链路对安全边界的实质影响：单支测温元件因铝氧化皮附着与套管腐蚀产生缓慢漂移，PLC在闭环控制中把偏低测温值当作真实反馈持续加大燃烧负荷，使炉温在短时段突破800℃；过热引起耐火材料剥落与缝隙渗漏，铝液经工作门下沿渗出后与未烘干扒渣工具发生急剧气化，喷溅

高度超过 1.5 m，造成人员烫伤与周边电缆外皮炭化。进一步观察还可发现，转子精炼过程中转速异常或叶片破损会把涡流增强并卷入空气，既提高夹杂含量也抬升飞溅概率，若与炉前地坪残水叠加则把爆沸风险显著放大。由此推导，熔炼环节的危险源并非孤立单点，而是传感器精度衰退、联锁冗余不足、现场持工具干燥度与燃气系统密封管理薄弱等因素耦合所致；一旦温度控制失稳，隐患会沿炉衬完整性、气体混合状态以及作业接口三个路径扩散，危害程度从设备损伤扩展到人身伤害与冶金质量退化，表现为铸锭孔隙度升高与夹杂超标，对后续铸造充型与机加工尺寸稳定性形成持续负面影响。

2.2 铸造环节危险源辨识

围绕转向节铸造线的危险源辨识，现场配置为 12-15 MN 封闭式模铸压机、感应加热与机器人上卸料，危险呈现高速重载与高温接触耦合的形态。基于故障树思路开展梳理，见图 1，顶事件设定为人员伤害与设备重大损伤，向下可分为滑块失控、工件飞出、模具破裂以及热灼伤与火灾等中间事件。从设备动作链来看，滑块行程异常的触发多与上死点限位开关漂移、离合制动器迟滞以及光电保护被旁路相关，导致空程缩短与二次打击；在载荷路径上，铸造力超出模具设计裕度常由坯料温度低于 460℃、润滑失效以及冲程速度高于 300 mm/s 叠加触发，使模具应力集中并诱发裂纹扩展；在传输环节，机械手夹持力设定不足或夹爪表面氧化皮积附，会把热坯在预成形位滑脱，偏离腔型后被滑块挤压产生弹射；在热管理层面，模具预热低于 220℃或喷涂剂含水率过高，会引发相变爆沸与金属飞溅，作业人员暴露于高温液滴与蒸汽云；在辅机界面，上下模具吊装与对中过程若起重链条磨损或定位销间隙超差，则存在重物坠落与对中撞击。由此推导，铸造环节的关键危险触发条件具有跨系统耦合特性，既包含传感链漂移、联锁失效与能量隔离缺失的控制失效，也包含坯料温度窗口偏离、润滑与预热管理不当的工艺失配。

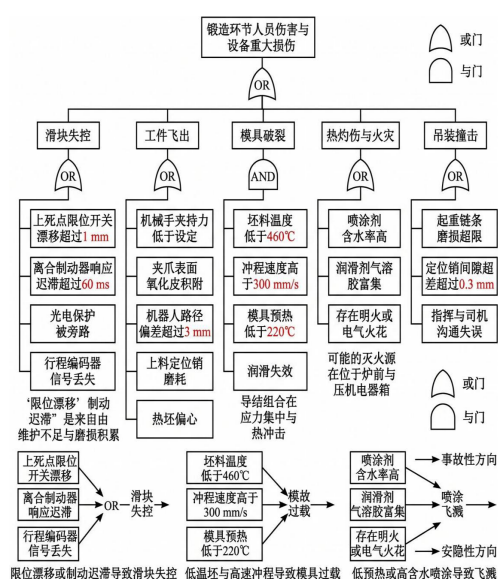


图1 铸造环节危险源故障树分析图

2.3 机加工环节危险源辨识

基于转向节机加工线的装置构成与节拍需求，典型单元由车铣复合中心、镗削中心以及在线测头组成，配套高压冷却液系统把压力提升至 5 至 8 MPa 以抑制切削热与黏结磨损，这一高能工况把危险源呈现为流体、碎片与噪声的复合暴露。切削液飞溅来源于喷嘴偏位、软管爆裂与刀尖断裂造成的瞬时回弹，还与铝合金长切屑打散液滴形成雾化气溶胶相关，易在封闭防护衰退或门禁联锁被旁路时扩散至操作者区域，叠加地坪湿滑使滑倒与皮肤刺激增多。刀具断裂则与铝合金积屑瘤、轴承座孔断续切削以及夹紧力波动引起的再生颤振耦合，脆裂的涂层硬质合金片会在主轴壳体与工件间弹射，既可能损伤主轴密封也会击打防护窗；当断裂发生在深孔镗削中，还会把镗杆弯曲叠加在主轴扭矩突升上，出现卡死与抱死。设备噪声超标更多发生在粗加工与断续轮廓切削阶段，主轴转速高于 8000 r/min⁻¹ 并伴随壳体共振时，声级可在 85 至 95 dB A 区间徘徊，长时间暴露会把听力负荷与疲劳感显著抬升；若机床防护罩密封老化或吸音衬里脱落，噪声能量泄漏会进一步扩大。进一步观察还可发现，铝合金长条切屑的缠绕会把刀具拉扯进入工件并诱发超切，排屑螺旋输送的卡滞则把人员清理引向近距离接触；六点定位的夹具若夹紧力设定不足或液压单元瞬时压力下降，会使工件在高 g 值加减速下产生位移与弹出；在线测头的标定与轨迹若失配，还会引发探针撞击工件或夹具，形成碎片飞散与测量系统漂移的双重后果。以江苏苏州相城区黄埭镇一条年产 80 万件的转向节机加工线在 2025 年 1 月至 12 月的风险台账为样本，切削液飞溅事件在全部记录中占比 35，刀具断裂占比 20，其余 45 由设备噪声超标通报、金属屑缠绕、夹具松脱导致的工件位移与弹出以及自动测头碰撞共同构成。需重点关注的是，铸后残余应力与热处理状态的批次波动会把切削力与颤振阈值推高，从而抬升刀具断裂与噪声超标的发生概率；由此推导，机加工环节的危险呈现为工艺参数、夹紧与防护三条链路的耦合扩散，必须把冷却液管理、刀具健康与能量隔离作为同层级控制对象来开展整线辨识与闭环治理。

3 汽车铝合金转向节生产安全对策及效果评估

3.1 针对性安全对策制定

鉴于熔炼、铸造、机加工环节危险的工艺性与设备性耦合，本研究把对策设计为源头监测、能量联锁与界面隔离的组合路径。熔炼环节在炉底、流槽与工作门周界加装铝液泄漏报警装置，运用红外与光纤测温识别渗流前兆，并把燃气阀组与氮气吹扫纳入统一联锁；在炉前布置 CH₄ 与 CO 探头，设置爆炸下限 10% 的联锁阈值与 50 ppm 预警阈值，超限即关断并同步声光提示。铸造环节围绕工件脱落与弹射风险，对装夹结构进行齿形衬块配合耐热高摩擦垫层的优化，叠加机械限位与双回路液压锁抑制夹紧衰减，同时把压机作业区以钢制防护栏和联锁门进行物理隔离，辅以区域扫描器限定设备进入窗口。机加工环节构建封闭式切削液循环系统，在全封闭罩内形成微负压并设置纤维凝聚与活性炭净化以削减气溶胶；把 5—8 MPa 高压回路配置泄压阀与破裂盘并加装防爆护套，冷却液储箱设置

在线折光仪与含油率监测，联动门禁与喷嘴启停，把飞溅与地坪湿滑控制在工位内部。

3.2 安全对策实施效果评估

立足熔炼—铸造—机加工全流程的风险闭环，本研究把对策落地后的事件变化作为评估切口。对比实施前半与实施后半，危险源事件总次数由12次降至2次，降幅为83.3%。结合对策机理可见，熔炼侧的泄漏预警与气体联锁把温度失稳与可燃气积聚这两条触发链提前切断；铸造侧的双回路液压锁与物理隔离把工件脱落与弹射概率拉低；机加工侧的密闭抽排与高压回路防护把飞溅与碎片暴露收敛在设备内部。投入产出层面，安全改造一次性投入为50万元，事故损失按企业台账折算减少为120万元，净收益为70万元，年度成本压力得到对冲。经济评价选用把直接维修费、停线损失与医疗支出加总的口径进行测算，口径保持前后对比的一致性。从工艺稳定性视角，熔炼温度波动被压缩，氢含量与夹杂控制改善减少后续充型异常与切削颤振诱因，从而间接降低刀具断裂的连带风险；能量联锁把压机滑块意外行程的窗口缩窄，叠加区域扫描器对人员进入的时空约束，人员暴露面进一步收敛；界面隔离与冷却液品质监测把雾化气溶胶浓度维持在可控区间，地坪湿滑导致的次生伤害概率同步走低。由此推导，该对策组

合在频次、暴露与成本三维度形成同向改善，见表1。

表1 安全对策实施前后危险源发生情况对比表

时间段	统计时长	危险源事件总次数
实施前半年	6个月	12
实施后半年	6个月	2

结语

本文以铸造型铝合金转向节为对象，系统揭示熔炼、铸造、机加工三环节危险的跨系统耦合特性，明确温度失稳、能量释放失控与界面暴露扩张三条关键路径，并据此形成源头监测、能量联锁、界面隔离的协同控制框架。实施结果显示，该框架不仅降低事故频次与人员暴露，还通过稳定熔炼纯净度与热管理，改善铸后组织与机加工可加工性，实现安全与质量的同向提升。研究同时验证过程追溯对风险治理的价值，建议将成分与气体含量、加热与加载历史、在线测量数据纳入统一平台，叠加刀具与设备健康监测，构建从异常早期识别到联锁处置的闭环。需要指出，本研究基于单厂区样本，评估窗口有限，噪声与气溶胶的职业暴露仍需持续量化。后续将面向多场景与多批次拓展，结合模型驱动与数据驱动方法，细化阈值设定与策略自适应，推动安全控制与工艺参数优化协同演进，并探索向控制臂等同类铝合金底盘件的推广应用。

参考文献

- [1] 全国汽车标准化技术委员会. QC/T 273-2025 汽车用铝合金压铸件技术条件[S]. 北京：中国标准出版社，2025.
- [2] 全国金属切削机床标准化技术委员会. GB 15760-2025 金属切削机床 安全防护通用技术规范[S]. 北京：中国标准出版社，2025.
- [3] 中国标准化研究院. GB/T 13861-2025 生产过程危险和有害因素分类与代码[S]. 北京：中国标准出版社，2025.
- [4] 中国电子节能技术协会. T/CEATEC 001-2025 汽车铝合金转向节轻量化设计要求[S]. 2025.
- [5] 汪西. 某汽车转向节锻造工艺优化及淬火裂纹控制策略研究[D]. 2023.
- [6] 黄亦韬. A356铝合金转向节的结构强度与差压铸造工艺研究[D]. 2023.
- [7] 秦学龙, 苏小平. 低压铸造铝合金后副车架工艺设计及优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(4).
- [8] 张弓, 苏小平. 铝合金转向节低压铸造工艺参数设计与优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2025.
- [9] 王晓东, 李志强. Al-Nb-B细化剂形核质点的弥散化及其对铸造铝合金组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2025.

作者简介：马朝辉（1974—），男，汉族，本科，研究方向为安全工程。