

高温熔炼环境下汽车转向节铸造安全防护技术研究

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】：针对非砂芯工艺下铝合金转向节熔炼阶段高温辐射、液态金属飞溅与铝烟暴露并存的问题，开展源端风险识别与防护技术集成。提出以炉前人机距离、金属液迁移路径、气溶胶扩散通道为核心的定点识别，并设计双层隔热防护屏、防飞溅导流槽与末端缓冲池、顶吸局部排风与袋滤净化系统。基于三工位一致工况对照，操作带温度由 62 ℃ 降至 35 ℃，飞溅边界由 3.0 m 缩至 0.5 m，呼吸带铝烟由 0.48 mg/m³ 降至 0.03 mg/m³，对应削减效率分别为 43.5%、83.3%、93.75%。结果表明，该体系可将热、动、气三类暴露路径有效收敛，为熔炼岗位本质安全提供工程化支撑。

【关键词】：铝合金熔炼；转向节铸造；安全防护；热辐射控制；局部排风

引言：

汽车轻量化推动铝合金在底盘关键件上的应用扩展，转向节由铁基向铝合金转型使熔炼与浇注环节成为新的风险集中区。熔炼炉前兼具高温、强辐射与开放操作面，人员需在近距离完成开炉口、扒渣与加料，热负荷与作业强度相互叠加。液态铝在倾倒与撞击固壁时易发生失稳，出现高速飞溅与地坪反弹，带来灼伤与击伤的复合伤害。同时，以氧化铝为主的铝烟可随炉口热羽流进入呼吸带，当质量浓度超过一定阈值将加剧呼吸系统刺激。既有措施多聚焦单一环节，缺乏对源、传与受全链路的系统约束与定量边界控制。为此，本文面向非砂芯工艺的倾转炉场景，建立以炉前人机距离、金属液迁移路径与气溶胶扩散通道为抓手的定点风险识别方法，提出双层隔热防护屏、导流槽与缓冲池一体化结构以及顶吸局部排风与袋滤净化的成套技术，并在多工位一致工况下开展对照测试，量化评估其对热、动、气三类暴露的削减效果，为车间本质安全与职业健康提供可复制的工程路径。

1 高温熔炼环境下汽车铝合金转向节铸造安全风险识别

鉴于汽车铝合金转向节在非砂芯工艺下的熔炼环节呈现高温、强辐射与开放式操作面并存的特性，安全风险需要被前置识别并把暴露路径刻画清楚。围绕熔炼炉本体及炉前作业区，从热辐射与对流叠加的环境负荷来看，炉口开启、扒渣与加料会把近场温度抬升到 60℃ 以上，皮肤裸露区域在短时停留就可能发生低度烫伤，若与长班次劳动叠加，还会加剧脱水与心肺负担。从液态铝的失稳行为来看，倾倒、包底渗漏与金属液遇湿爆沸会把高温液滴以约 5 m/s 的速度向四周抛射，飞溅轨迹可穿越操作者小腿至胸腹高度，锋缘件与地面反弹会进一步放大击伤与灼伤的叠加效应。需重点关注的是，熔炼过程中的铝

烟属于以 Al₂O₃ 为主的细微颗粒物，会在炉口热羽流与厂房气流作用下汇入呼吸带，若质量浓度超过 0.5 mg/m³，就会对鼻咽与支气管产生刺激并把既有呼吸系统基础病风险放大。由此推导，针对炉前人机距离、金属液迁移路径以及气溶胶扩散通道开展定点识别，构成后续防护边界与通风组织设计的输入条件。

2 汽车铝合金转向节铸造安全防护技术设计

2.1 熔炼过程高温防护技术设计

鉴于熔炼炉前辐射与对流叠加把近场温度迅速抬升，本研究把双层隔热防护屏设计为炉前热负荷削减的主体构件。屏体结构由内层硅酸铝纤维与外层不锈钢板构成，内层贴近热侧承担绝热，外层提供强度与易清洁界面，形成导热与辐射屏蔽的协同效应。结合转向节铸造倾转炉的炉口高度与操作者视线，屏体前缘距炉口 0.6 m，覆盖地面至 1.6 m，左右各外展 0.3 m，底部抬高 0.1 m 构成下部补风缝隙，使补风在屏前形成上升层流，减弱热羽流侵入操作带。围绕把操作区空气温度控制在 35℃ 以下的目标，采用稳态一维传热模型对层间导热进行初算，据此限定纤维厚度与金属面板厚度的组合区间，并把人员站位与工具通道布置在炉口中心线 0.8 m 处，从视因子与对流叠加效应两端同步降低热负荷。考虑铝液侧表观温度场的时变性与炉口间歇开合，纤维层选用 1260 级材料以维持高温下低导热，金属面板厚度控制在 1.5 mm 以兼顾刚度与快速散热，屏体与炉口保持 0.2 m 以上安全间隙以避免热短路。

$$q = \frac{T_h - T_c}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}$$

其中， q 表示热流密度（单位：W/m²）， T_h 为热侧等效温度（单位：K）， T_c 为冷侧目标温度即操作区侧代表性空气温度（单位：K）， δ_1 与 δ_2 分别为硅酸铝纤维层与不锈钢层厚

度(单位: m), λ_1 与 λ_2 分别为对应导热系数(单位: $W/(m \cdot K)$)。凭借该传热关系可把屏体外表面允许热流密度反推至厚度选型, 从而在既定布局条件下实现对操作区热负荷的工程化约束。

2.2 铝合金液飞溅防护结构优化

鉴于倾环节高动能液体与固壁碰撞触发初级喷溅, 本研究把防飞溅导流槽与末端缓冲池构成一体化被动防护结构。导流槽沿金属液迁移方向设置圆弧过渡, 圆弧中心线相对水平倾角为 15° , 借助壁面附着与曲率诱导的流线拉伸, 把垂向冲击转化为沿壁滑移, 从源头削弱液舌破碎与滴状剥离。为抑制润湿不均引起的二次飞散, 入段选用等宽收敛口, 槽底铺设耐火浇注料并覆陶瓷涂层, 同时在侧缘加设翻边把切向抛射液滴导回主流。由此推导, 缓冲池布置在导流槽末端最低点, 选用 $0.5 m^3$ 有效容积与圆角过渡内壁, 并在池底铺设惰性陶瓷颗粒, 以吸收来流动能并衰减液面波幅; 池体设置短距溢流堰与排渣口, 把夹带氧化夹渣分层导出, 避免表面膜破裂诱发局部喷溅。结合炉前人机距离与地坪反弹路径, 在导流槽出口至缓冲池之间布置低位挡板与柔性垫层, 把反弹动能进一步消耗, 使飞溅影响半径稳定在 $0.5 m$ 以内, 并与热防护屏保持独立支撑与安全间隙。

2.3 有害气体收集与净化系统设计

鉴于熔炼炉口热羽流把铝烟推送至呼吸带, 本研究把局部排风系统当作治理主路径, 构建集气、输送、净化以及排放的闭环。结合倾转炉开口位置以及操作走位, 在炉上方设置 $1.2 m \times 0.8 m$ 顶吸式集气罩, 罩口下缘距炉口中心约 $0.4 m$, 四周下垂裙边 $0.15 m$, 借助约 $0.7 m/s$ 面吸速度稳定捕集羽流, 并把补风从炉前防护屏下缘引入形成顺压气幕。为控制输送段压降与磨损, 主支管选用内表面光滑的螺旋风管, 单炉设计风量约 $2400 m^3/h$, 干管设置喇叭口与分支调节阀, 以便炉口间歇开合时维持负压。管网接入脉冲喷吹布袋除尘器, 过滤材料选用覆膜芳纶抗静电针刺毡, 额定温度 $200^\circ C$, 过滤效率不低于 99% , 并配置文丘里喉口以及均流板以抑制局部冲刷。考虑铝烟以氧化铝微粒为主且可能夹带金属蒸汽, 除尘器入口布置火花捕集器以及折流扩散室, 清灰压缩空气做干燥处理以降低结露与糊袋风险。风机运用变频联动模式, 在炉口开启以及加料阶段提高转速, 在待机阶段维持保压流量, 风量反馈与压差计以及皮托计读数联锁, 用于识别管网堵塞与滤袋衰减。围绕系统运行安全, 除尘器设置防静电接地以及泄爆面板朝向安全区, 灰斗配置密闭卸灰阀, 把回收粉尘集中转运至危废暂存间。为避免对热防护以及人机距离产生干扰, 集气罩支架独立于防护

屏, 管道跨越操作带时设置防撞构件, 屋顶排气筒加装消声以及避风帽并预留采样口, 整体结构与布置见图1。

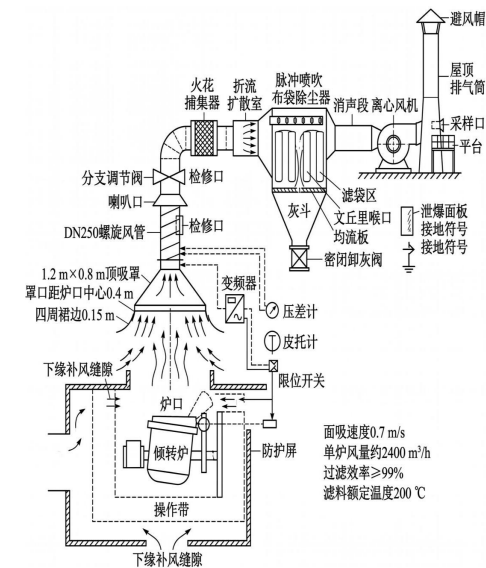


图1 有害气体收集与净化系统架构图

3 汽车铝合金转向节铸造安全防护技术效果评估

3.1 防护技术的现场测试方法

立足转向节铸造车间的东侧、中央与西侧3个熔炼工位, 把防护措施实施前与实施后的同工况时段作为对比对象, 围绕环境温度、铝合金液飞溅距离与铝烟质量浓度开展同步测试。为把环境温度客观映射到操作者暴露带, 选用精度为 $\pm 0.5^\circ C$ 的红外测温仪, 事先在炉口中心线外侧 $0.8 m$ 布置消光黑涂层基准片, 分别设置地面以上 $0.2 m$ 、 $1.0 m$ 与 $1.5 m$ 三处测点, 测温发射率统一设定为 0.95 , 单次测量驻留时间不低于 $5 s$, 按 $1 min$ 为窗口记录时序数据, 并把炉口开启、扒渣与加料的开始与结束时刻精确标注。为把飞溅边界刻画为可重复的几何量, 运用精度为 $\pm 1 cm$ 的激光测距仪, 以炉口前缘中心作为零点沿操作通道布设放射测线, 在倾倒工序结束且液滴固化后完成测距, 选取等效直径不小于 $2 mm$ 的固化颗粒作为有效样点, 记录最远样点距离并补充5个方向的边界点距以形成包络描述, 期间把地面残留的历史附着物清除以避免混淆。针对铝烟浓度, 运用精度为 $\pm 0.01 mg/m^3$ 的粉尘浓度检测仪, 在操作者呼吸带高度 $1.5 m$ 处设置采样探头, 横向距离炉口中心 $0.8 m$, 采样时间粒度不高于 $1 s$, 保障集气罩未投用与投用阶段以及炉口间歇开合的典型工况均被覆盖。为控制干扰变量, 把合金牌号、单炉装料量、倾转角度与浇注节拍保持一致, 把厂房通风与补风状态稳定在既定设定, 并把测前的仪器校核纳入流程, 红外测温仪开展黑体比对, 测距仪进行已知距离核验, 粉尘仪完成零点与跨度核查。每个工位在两类工况下各完成不少于3个独

立循环的全流程观测，把时间标注、作业照片与测量记录进行编号关联，最终形成可追溯的原始数据集与事件序列，用于后续防护效果的量化分析。

3.2 防护效果的量化分析

立足 3.1 节的同步测试与一致工况约束，本研究把炉前操作带代表性温度、金属液飞溅边界距离以及呼吸带铝烟质量浓度作为核心指标，构建以相对削减率表征的量化评价框架。为降低偶然波动的影响，把 3 个熔炼工位多循环观测的算术平均作为代表值，并以实施前值作为归一化基准开展对比。计算结果表明，操作带温度由 62 °C 降至 35 °C，对应热负荷削减效率为 43.5%，契合双层隔热屏的导热阻断与视因子压低机理；飞溅边界由 3.0 m 收敛到 0.5 m，削减效率达到 83.3%，导流槽与缓冲池把垂向冲击转化为沿壁滑移并在池底完成动能耗散，飞溅包络不再跨越 0.8 m 人机距离；呼吸带铝烟由 0.48 mg/m³

下降至 0.03 mg/m³，削减效率为 93.75%，顶吸集气与顺压补风形成稳定捕集，炉口间歇开合阶段仍维持负压。进一步观察可见，各测高位降幅一致性较好，地面以上 0.2 m 至 1.5 m 的温度梯度被显著压平，采样时序的浓度波动幅度亦同步收敛。为强化结论的可比性，合金牌号、装料量与倾转角度保持恒定，温度与浓度取等时窗平均值，飞溅边界依据等效直径不小于 2 mm 的固化颗粒形成包络测度，综合结果汇总于表 1，用于支撑运行参数优化与防护边界维护。在上述框架下，各指标均低于目标阈值，暴露路径被收敛至可控范围。

$$\eta = \frac{X_{\text{before}} - X_{\text{after}}}{X_{\text{before}}} \times 100\%$$

其中， η 表示防护效率（单位：%）， X_{before} 为实施前指标代表值， X_{after} 为实施后指标代表值，三类指标分别对应温度、飞溅距离与铝烟质量浓度。

表1 防护技术实施前后安全指标对比表

指标	实施前	实施后	防护效率	目标/阈值
炉前操作带代表性温度 (°C)	62	35	43.5%	≤35 °C
金属液飞溅边界距离 (m)	3.0	0.5	83.3%	≤0.5 m
呼吸带铝烟质量浓度 (mg/m³)	0.48	0.03	93.75%	≤0.5 mg/m³

结语

本研究面向铝合金转向节熔炼环节，构建了前置风险识别与多维防护协同的技术体系。双层隔热屏通过导热阻断与视因子压低显著降低炉前热负荷，导流槽与缓冲池把垂向冲击转化为沿壁滑移并完成动能耗散，顶吸集气与顺压补风形成稳定捕集通道并实现高效净化。基于三工位多循环实测，操作带温度由六十二降至三十五，飞溅边界由三米收敛至零点五米，呼吸

带铝烟由零点四八降至零点零三毫克每立方米，关键暴露路径被收敛至可控区间。工程实现上，防护屏与集气罩独立支撑，管网变频联动与在线压差监测保障工况波动下的持续效能。建议建立例行点检与维护清单，关注纤维层老化、导流结构磨损、滤袋结露与静电接地完整性。研究仍受单一厂房气流格局与工艺参数限制，后续可引入多物理场仿真与人机工效评估，完善不同合金与炉型下的参数库与标准化应用指南。

参考文献

[1]张涛,苏小平,毛旭海. 铝合金制动钳金属型重力铸造工艺设计及优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(04):581-586.

[2]师可馨,熊艳才,洪润洲,张喆. 基于JMat-Pro计算的Al-Cu-Mn系耐热铸造合金的热处理[J]. 金属热处理, 2025, 50(06):249-254.

[3]王现瑞,冯周荣,李文定,纳学洋. 高合金耐热钢铸件精加工后的预氧化方法研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2025, 60(06):27-30.

[4]毛有武,吴树森. 精密铸造不锈钢铸件的免固溶处理技术应用研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(05):789-792.

[5]孟庆文,安玲玲,何媛,姚红汝. 基于3D打印砂芯与立浇工艺的球铁半圆压缩机隔板铸件铸造技术研究与应用[J]. 中国铸造装备与技术, 2025, 60(06):114-118.

作者简介：马朝辉（1974—），男，汉族，本科，研究方向为安全工程。