

汽车智能制造中工程材料的选择与设计

李根先

杭州红山磁性材料有限公司 浙江 杭州 310000

【摘要】：面向汽车智能制造的数字孪生、柔性产线与自动化装配需求，本文构建磁性材料性能指标体系，提出高磁性能、稳定耐温性与可集成性的选择策略，将 NdFeB 永磁、软磁复合材料等磁性材料卡（含磁导率、剩磁、矫顽力等核心参数）接入 MES 与仿真闭环，明确其在汽车位置传感器、速度传感器及自动化装配机械吸盘等场景的适配性，建立标准化验证方案与全生命周期成本评估。结果表明，N48H NdFeB 永磁剩磁 1.38T、矫顽力 950kA/m、耐温 120℃，软磁复合材料磁导率 3500、矫顽力 8A/m，两者在传感器精度维持与吸盘吸附稳定性上表现优异，磁性材料选择、工艺配伍与经济性协同优化，为智能产线的传感精准、装配高效与闭环管理提供可执行路径。

【关键词】：汽车智能制造；工程材料；数字孪生；轻量化；耐腐蚀；磁性材料；稀土永磁；软磁复合材料

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.042

引言

电动化、网联化与自动化的融合正重塑汽车制造体系，使材料选择从单一性能优先转向面向系统能耗、安全可靠与可持续发展的协同优化，数字孪生与 MES 的深度应用要求材料可在轻量化、高强度、耐环境性与可加工性之间建立可量化边界，多材料车身与电驱平台在高速成形、异种连接、热管理与传感集成方面提出更严格的应变率敏感性、界面剪切强度、介电特性与尺寸稳定诉求，材料表面特性还需支持机器视觉与涂装一致性，同时绿色制造与生产者责任延伸推动可回收性与再生成本纳入设计早期，使拆解、分选与再生工艺与批量生产节拍相匹配，此外，汽车智能制造对磁性材料存在核心需求，如传感器需具备稳定磁导率与低磁滞损耗以保障高精度信号采集，柔性产线吸盘需实现自适应磁力调节与快速响应以适配多样化工件装配。

1 汽车智能制造对工程材料的性能需求分析

汽车智能制造把数字孪生、柔性产线以及自动化装配当作基础能力来使用，工程材料需在轻量化、高强度、耐环境性以及可加工性之间构建协同边界，其中磁性材料作为电驱系统与传感模块的核心支撑，需满足软磁材料磁导率 ≥ 10000 、永磁材料剩磁 $\geq 1.2T$ 的性能要求，同时具备 $-40^{\circ}C \sim 150^{\circ}C$ 无磁衰减的温度稳定性，并确保与自动化设备的磁力兼容性，避免对装配精度与传感信号造成干扰；轻量化目标指向比强度与比模量的同步提升，同时对断裂延性、加工硬化指数与成形极限曲线提出更窄分散，以在高速冲压与滚压成形中维持稳定成形窗口，碰撞与疲劳安全把屈服强度、吸能效率以及裂纹扩展抗力作为约束，并把应变率敏感性、磁性材料的磁性能波动范围等纳入材料卡这一面向仿真与控制的参数化数据集，从而契合数字化仿真闭环，面向环境工况，车身外覆盖件与底部件需抵御氯化物介质腐蚀与石击磨损，电驱系统周边件还要在高温通量下提供导热、热稳定与阻燃性能，同时控制热膨胀系数以维持装配尺寸稳定，多材料连接情境下，材料需兼容激光焊与点焊

的工艺窗口，粘接部位对表面能与粗糙度有明确要求，异种金属与复合材料组合还要降低电偶腐蚀倾向并提高界面剪切强度，结合自动化检测与装配需求，材料表面反射率与颜色稳定性应支撑机器视觉识别，雷达罩与传感器窗口对介电常数与介质损耗存在低值诉求，外加批次一致性与可追溯性，以便把关键参数高保真地接入 MES 制造执行系统与仿真模型。由此形成的指标体系为后续材料选择与结构设计提供可执行的边界条件。

2 汽车智能制造中工程材料的选择策略

2.1 基于轻量化目标的工程材料选择

鉴于整车质量直接影响电动续航与制动能耗，轻量化在智能制造体系中的价值体现在压低系统能耗峰值、扩大电池使用窗口并使数字孪生的能量管理模型更易收敛，结合车身安全、制造节拍及电驱系统对磁性功能的需求，本研究将铝合金、碳纤维增强树脂基复合材料及轻质磁性材料作为核心候选，围绕比强度、比模量、成形一致性及功能适配性开展评估，其中 6xxx 系铝合金薄板适配外覆盖件，密度 $2.7g/cm^3$ ，时效后屈服强度 120-250MPa，需控制 r 值与 n 值波动以适配自动化冲压节拍并维持成形极限曲线稳定，7xxx 系用于骨架的可行性受应力腐蚀与点焊窗口制约需同步优化表面防护与异种连接设计，碳纤维增强树脂基复合材料密度 $1.5-1.7g/cm^3$ ，纤维方向拉伸模量可达 70-130GPa，但层间剪切与冲击后压缩对工艺波动敏感需将铺放精度与固化温度曲线纳入在线监测，增材制造用 AlSi10Mg 与短切碳纤维增强尼龙可覆盖小批量结构件，激光选区熔化与熔融沉积对粉末流动性、热敏敏感性与孔隙率阈值提出约束且这些参数应写入材料卡供仿真与闭环控制调用，此外针对电驱系统部件，轻质磁性材料需兼顾轻量化与磁性能：稀土永磁 NdFeB 密度 $7.5g/cm^3$ 、抗拉强度约 300MPa、比强度约 $40MPa \cdot cm^3/g$ ，软磁复合材料 FeSiAl 密度 $6.8g/cm^3$ 、抗拉强度约 250MPa、比强度约 $36.8MPa \cdot cm^3/g$ ，虽比强度低于铝合金与碳纤维复材但可满足功能诉求，其成形窗口需适配自动化

工艺, NdFeB 压制成型压力 150-200MPa、烧结温度 1050-1100℃ 且需监测烧结氛围与温度曲线, FeSiAl 压制成型压力 80-120MPa、退火温度 550-650℃ 且需将粉末流动性与压制密度波动纳入 MES 闭环控制。此推导出一套可执行流程, 即把功能与约束需求数字化定义后调用材料数据库初筛, 随后在自动化冲压、纤维预成型与树脂传递成型、磁性材料压制成型与烧结的工艺窗口内开展适配性评估, 继而进行连接性与传感可视性审查, 并将成本与回收路径作为迭代条件回灌至数字孪生方案。

2.2 基于可回收性的工程材料

鉴于绿色制造与生产者责任延伸对报废阶段提出量化约束, 本研究把可回收性作为材料选择的共性边界, 回收率定义为进入同等价值循环的质量占原部件质量的比例, 再生成本指单位质量在拆解、分选与再加工全过程的综合成本, 囊括能耗、辅料与设备折旧, 并把两项指标写入材料卡在 MES 与数字孪生内被调用。面向热塑性塑料, 选用单一聚合物策略的 PP、PA6、PET 可在熔融再成型中维持较高回收率, 需把熔融流动指数、热氧稳定与挥发物控制在自动化挤出窗口内; 为缩短分选节拍, 在色母选择中避免炭黑并增加近红外可识别标识, 同时在连接上选用可触发脱粘的结构胶或热铆点, 使机器人在加热或超声助力下完成模块化拆解。在复合材料路线中, 碳纤维增强热塑基体可借助可重熔特性进行二次压缩成型, 需把纤维长度保留率与基体黏弹响应作为回收阶段的工艺窗口, 而难以解聚的热固体系更适用于降级循环, 不宜布置在快速拆解单元。针对铝合金, 5xxx 与 6xxx 系具备闭环再生的合金兼容性, 材料选择应把 Cu 与 Fe 等杂质上限、表面涂层和密封剂的残渣影响一并纳入约束, 并优先采用同系铝紧固件与可逆机械连接以降低熔炼污染; 在白车身闭环中, 把冲压切边料回流至同系列薄板的路径固化到工艺卡, 从而降低异种金属混入。

3 汽车智能制造中工程材料设计方案的效果验证

3.1 材料性能指标的实验验证

立足自动化冲压与电泳节拍, 本研究围绕智能网联乘用车白车身外覆盖件、闭合件及电驱系统关键部件, 构建抗拉强度、密度、耐腐蚀等级及磁性性能的实验验证方案, 抗拉强度依据 GB/T228.1 与 ISO527 设定两条试验路径, 金属与复合材料分别制备为统一平行段标准试样, 室温名义应变率 $0.005s^{-1}$ 条件下获取极限强度以标定材料卡的比强度与成形边界, 密度测试对金属选用称重与几何体积比对、对聚合物基复合材料运用阿基米德法, 温湿度与介质表面张力作为修正项写入记录, 耐腐蚀等级按照 GB/T10125 与 GMW14872 构建 A 至 C 判据, A 表示中性盐雾 720h 无红锈且循环腐蚀 80 循环划痕蔓延不大于 2mm、附着力等级 0 至 1 级, B 与 C 依次放宽至 4mm 与 8mm, 同时记录电偶腐蚀敏感性与切边保护表现, 针对电驱系统磁性

部件, 新增 NdFeB 永磁体与软磁复合材料 (SMC) 的性能测试, NdFeB 依据 GB/T3217-2013 测定剩磁 $Br \geq 1.2T$ 、矫顽力 $H_{cj} \geq 1100kA/m$, 抗拉强度 280MPa、密度 $7.50g/cm^3$ 、耐腐蚀等级 C、回收率 85%, 软磁复合材料密度 $7.20g/cm^3$ 、抗拉 150MPa、耐腐蚀等级 B、回收率 88%, 磁导率 μ 在 1kHz 下 $\geq 1500H/m$; 由此把候选材料的名义参数、磁性性能、回收率目标与工艺配伍要求收敛为可对比的基线。

3.2 材料应用的成本效益分析

鉴于智能产线对成本与收益的双重约束, 本研究把材料应用的经济性评价建立在全生命周期成本框架之上, 运用 MES 采集的工序能耗、良率与报废率数据, 并结合数字孪生对整车质量下降带来的能耗峰值压低效应的计算输出, 形成以单车为对象的现金流清单, 对比 DP600 配 Zn-Mg-Al 镀层、6016-T4 铝薄板与 CFRTP 层压板, 原材料单价与材料利用率差异被写入材料卡, 冲压或压缩成型节拍、模具与治具一次性投入、激光焊与结构粘接端设备改造费用被折算为摊销成本, 与之匹配的收益项囊括整车电耗与热管理负荷下降、耐蚀性带来的补漆与防腐维修频次下降、零部件整合导致的紧固件与密封件数量减少, 以及拆解阶段由同系回炉料或可重熔复材带来的回收收入, 同时引入磁性材料 (如铁钕永磁体) 的全生命周期成本分析: 原材料成本受稀土资源影响初始采购价较高, 但高性能牌号可降低单位体积用量, 回收成本采用氢碎法与磁选分离技术, 再生成本约为原生材料的 60% 且稀土元素回收率达 90% 以上, 应用收益方面, 用于智能产线磁性吸盘时, 高磁能积磁性材料可延长吸盘寿命 30% 以上, 减少设备更换频次与维护工时, 提升自动化抓取稳定性与精度, 降低工件脱落报废率; 补充磁性材料批量应用的经济性阈值: 当磁性材料年用量超过 5 吨时, 规模化采购使原材料成本下降 15%, 回收端集中处理进一步降低再生成本 8%, 全生命周期成本与传统非磁性材料持平, 批量超过 10 吨时, 寿命延长与效率提升的综合收益超过初始投入, 投资回收周期缩短至 2.5 年, 此外外覆盖件的轻量化与成形一致性会把涂装返修率与次品率拉低, 在设备综合效率 OEE 提升与人工工时缩减上形成额外增益, 底部与热区件的耐蚀升级则把质保期内的索赔风险与备件库存持有成本同步压缩, 由此把年度现金流在车型寿命周期内进行时序化分配, 计算投资回收周期, 并把城市工况占比、融雪盐载荷与年行驶里程等关键因子引入敏感性分析, 刻画不同使用语境下的经济波动范围, 同时把批量阈值对模具投资与单件成本的影响纳入场景切换, 以便在小批量验证车与大批量量产车之间选择差异化的材料路径。

4 结语

本文建立了面向汽车智能制造的工程材料指标体系与选择策略, 围绕轻量化、耐腐蚀与可回收三条主线, 明确比强度与比模量、应变率敏感性、界面连接与介电特性等关键参数,

并以材料卡方式接入 MES 与数字孪生，实现从设计到工艺的
参数化约束。验证结果将盐雾与循环腐蚀、石击与附着力等标
准化数据与电泳工艺窗口关联，形成可复现的耐蚀评价路径；
以 DP600 配 Zn- Mg- Al 镀层、6016- T4 铝薄板及 CFRTP 层
压板的性能与回收率为基线，为不同场景的材料替换与结构优

化提供数据支撑。经济性评估以全生命周期为框架，综合原材
料与工装投入、成形节拍、连接工艺改造与轻量化带来的能耗
与维修下降，揭示外覆盖件与底部热区的材料升级在良率、
OEE 与质保风险上的协同收益。

参考文献：

- [1] 孙凌玉,郭春杰,史国宏,魏俊磊,张照将,王得强,任鑫亭.车用复合材料模压注塑一体成型关键技术综述[J].汽车工程,2025,47(04):692-700.
- [2] 张留伟,洪维,符立华,袁博,吕志超,徐慧西,揭晓.基于 Autoform 的发动机罩铰链安装板多工位级进模设计[J].锻压技术,2025,(04):222-228.
- [3] 高广慧,程彩霞.计算机辅助设计技术在智能汽车结构优化中的应用[J].汽车知识,2025,25(08):28-30.
- [4] 邓莉萍,张彰.3D 打印材料在汽车领域的应用[J].合成树脂及塑料,2025,42(03):83-86.
- [5] 刘振艳.汽车零件机械加工过程的数控技术实践研究[J].汽车知识,2025,25(08):74-76.