

免热处理强化铝合金的研究现状及应用

汤江涛^{1,2,3}, 冯恩浪⁴, 梁田^{1,3,✉}, 姜岳峰^{1,3}, 邢炜伟^{1,3}, 马颖澈^{1,3}

- 1 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016
- 2 沈阳化工大学材料科学与工程学院, 沈阳 110142
- 3 中国科学院金属研究所师昌绪创新材料研究中心, 沈阳 110016
- 4 吉利百矿集团有限公司, 广西 百色 533000

免热处理强化铝合金作为新能源汽车轻量化与一体化压铸技术的核心材料, 通过自然时效即可实现高强度与塑性的协同提升, 有效规避传统热处理工艺引起的鼓泡、变形等缺陷。本文系统阐述了免热处理铝合金的强化机制, 重点分析了晶粒细化、多相协同强化及元素调控对力学性能的影响规律。通过对比 Al-Si、Al-Mg-Si 等主流合金体系的设计策略, 国际商业化牌号以成分精简与工艺稳健性为核心优势, 而国内研究通过多元微合金化技术实现了强塑性的突破性提升, 但仍受限于成本控制与规模化生产稳定性。结合特斯拉 Model Y 后车底结构件等工程案例, 验证了该材料在简化制造流程、降低能耗及提升车身结构集成度方面的显著优势。本文从材料设计性能优化工程应用全链条视角构建研究框架, 为免热处理铝合金的产业化发展提供科学依据与技术路径。研究结果对推动新能源汽车轻量化技术革新及绿色制造工艺升级具有重要指导意义。

关键词 免热处理强化铝合金 一体化压铸 汽车轻量化 汽车零部件

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A

Current Status and Application of Non Heat Treatment Strengthened Aluminum Alloy

TANG Jiangtao^{1,2,3}, FENG Enlang⁴, LIANG Tian^{1,3,✉}, JIANG Yuefeng^{1,3}, XING Weiwei^{1,3}, MA Yingche^{1,3}

- 1 Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China
- 2 School of Materials Science and Engineering Science, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China
- 3 Master Changxu Innovative Materials Research Center, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China
- 4 Geely Baikuang Group Co., Ltd., Baise 533000, Guangxi, China

Non heat treatment strengthened aluminum alloys, as a core material for lightweight and integrated die-casting technologies in new energy vehicles, achieve synergistic improvements in strength and plasticity through natural aging, effectively avoiding defects such as blistering and deformation caused by traditional heat treatment processes. This paper systematically elaborates the strengthening mechanisms of non-heat-treated aluminum alloys, with a focus on analyzing the influence of grain refinement, multi-phase synergistic strengthening, and elemental regulation on mechanical properties. By comparing design strategies of mainstream alloy systems such as Al-Si and Al-Mg-Si, it is found that internationally commercialized grades prioritize compositional simplicity and process robustness as core advantages, while domestic research has achieved breakthrough improvements in strength-plasticity balance through multi-component microalloying technology, though challenges remain in cost control and production consistency during scale-up. Through engineering case studies such as the Tesla Model Y rear underbody structural components, the material's significant advantages in simplifying manufacturing processes, reducing energy consumption, and enhancing structural integration are validated. This study constructs a research framework from the perspective of the entire chain of material design, performance optimization, and engineering applications, providing scientific foundations and technical pathways for the industrial development of non-heat-treated aluminum alloys. The findings offer critical insights for advancing technological innovation in new energy vehicle lightweighting and upgrading sustainable manufacturing practices.

Key words non heat treatment strengthened aluminum alloy, integrated die-cast parts, lightweight automobile, automobile parts

0 引言

国际权威研究数据表明, 汽车自重每降低 100 kg, 每百公里的油耗可减少 0.7 L^[1-2]。基于此, 汽车轻量化已成为应对能源消耗与环境污染问题的必然选择。研究指出, 乘用车车身质量占整车质量的 20%~25%, 因此降低车身自重是实现轻量化的核心目标^[3-4]。当前轻量化技术主要涵盖结构优化、材料替代及工艺创新三类方向^[3]。在材料替代领域, 轻质合金凭借低密度、高比强度及优异的耐腐蚀性, 已在汽车零部件制造中实现规模化应用。典型案例如铝合金前纵梁与防撞梁、镁合金转向支架及钛合金排气系统等^[5]。综合材料综合性能、成本及循环利用潜力, 铝合金被公认为现阶段最具发展前景的轻质合金材料^[6]。

据统计, 汽车用铝合金中铝合金占比达 80%, 而压铸件占铸造铝合金总用量的 70% 以上, 凸显其在汽车轻量化中的关键地位^[7-9]。然而, 汽车大型关键结构件需承受持续交变载荷, 对材料的强度、韧性及疲劳性能提出严苛要求。传统

压铸铝合金在铸态下难以满足性能指标, 需依赖高真空热处理工艺进行强化, 导致生产周期延长、成本上升。此外, 热处理过程中易诱发鼓泡与变形缺陷, 造成零件报废率升高, 同时增加能源消耗与碳排放^[7]。针对上述问题, 开发免热处理高强韧压铸铝合金成为行业迫切需求。此类材料需在铸态下即具备满足服役要求的力学性能, 如抗拉强度不小于 300 MPa、延伸率不小于 10%, 并兼具抗冲击性、尺寸稳定性及可焊接性, 从而在简化工艺流程、降低生产成本的同时, 助力汽车工业低碳化转型。

1 免热处理强化铝合金的研究进展

1.1 免热处理铝合金的强化机制

免热处理强化铝合金在汽车工业中的应用具有显著技术优势, 其核心特征在于通过单一压铸成型工艺实现部件制造, 无需传统高温固溶处理及人工时效工艺, 仅依赖自然时效即可满足高强度与塑性的协同提升^[10]。当前主流免热处

理合金体系包括 Al-Si、Al-Mg-Si、Al-Mg 及 Al-Mg-Zn 等多元体系,其强化机制源于多尺度协同效应,涵盖晶粒细化、第二相强化、固溶强化及自然时效强化等复合作用。

晶粒细化主要通过铸造工艺优化与合金元素调控实现。与传统铸造工艺相比,免热处理铝合金采用薄壁结构设计与快速冷却技术,显著提高凝固组织均匀性。高温熔体注入低温模具时,模壁的剧烈热传导促使熔体表层形成高过冷度,诱导异质形核并生成细晶区,从而优化表层力学性能^[11]。研究表明,快速冷却可增大细晶区厚度,使铸件的抗疲劳性与抗拉强度优于常规铸造产品^[12]。此外,添加微量 Ti、Sc、Zr 等元素可形成 Al_3Ti 、 Al_3Sc 及 Al_3Zr 等纳米级析出相,作为形核基底促进晶粒细化,同时抑制晶界迁移以提升材料强度^[13]。

第二相强化与析出相的类型、分布及其与基体的相互作用密切相关。例如,在 Al-Si-Mg-Fe 系合金中引入 Mn 元素可诱导 β -Fe 相(针状脆性相)向 α - $Al_{15}(Mn, Fe)_3Si_2$ 相(汉字状韧性相)转变,降低脆性相比例并提升韧性^[14]。通过多元素协同调控,可在减少脆性相的同时增加韧性析出相数量,或通过降低溶质元素固溶度促进第二相析出,从而实现强化效果^[15]。此类析出相(如 Al_3Ti 、 Al_3Sc)不仅细化晶粒,其高模量特性还可阻碍位错运动,增强材料抗变形能力。

固溶强化源于 Si、Mg、Zn 等高溶解度元素在铝基体中的固溶作用。溶质原子与基体原子间的尺寸差异导致晶格畸变,形成局部应力场并增加位错运动阻力,从而提升合金强度^[16]。研究表明,固溶强化效果与溶质浓度正相关,且原子尺寸差异越大(如 Mg/Al 原子半径差达 12.8%),强化作用越显著^[17]。例如,Al-Mg-Si 系合金中 Mg 与 Si 的协同固溶可形成高密度位错钉扎点,显著提高屈服强度。

免热处理铝合金的独特优势在于其自然时效能力。室温时效过程中,Mg、Si 等原子通过扩散在特定晶面上偏聚,形成与基体共格的 GP 区,引发晶格畸变并产生弹性应变场,阻碍位错滑移以提升合金硬度^[18]。以国产 $AlSi_9Cu_3Zn_3$ 合金为例,自然时效 48 h 后,其抗拉强度由 245 MPa 增至 325.4 MPa,布氏硬度(HBS)由 71.6 提升至 96.4,但是延伸率由 4.5% 降至 3.4%,表明强度与塑性存在竞争关系^[19]。

1.2 免热处理强化铝合金的牌号

国际主流免热处理铝合金以美国铝业(Alcoa)、德国莱茵(Rheinfelden)及特里梅特(Trimet)等企业为代表,通过合金体系创新实现规模化应用^[20]。

美国铝业的 C611 合金(Al-Si 系)通过硅含量优化(与 A356 相当)^[21],在保证流动性的同时实现薄壁铸造,长期用于减震塔等部件。Alcoa 560 合金(Al-Mg 系)依赖 Mg-Mn 固溶强化(Mg 含量 2.8%~3.6%(质量分数,如无特别说明,下同))^[22],适用于高端车型车身。此外,EZCast-NHT™ 系列(如 A152/A153)进一步探索高镁含量(3%~4% Mg)的强化潜力^[23]。

在元素的协同强化上,德国莱茵公司开发了 Magsimal 系列(Al-Mg-Si-Zr)^[24],通过添加 Zr(0.1%~0.3% Zr)形成 Al_3Zr 沉淀相,提升硬度和强度^[25-26];Castaduct-42($AlMg_4Fe_2$)和 Castaduct-18($AlMg_4Zn_3Fe_2$)通过 Fe 替代 Si 来解决铸造性能

问题,其中 Castaduct-18 引入 Zn 实现高强度,同时避免脆性相生成,成为低成本高性能代表^[27]。特里梅特与宝马合作的 Trimal-04 再生合金则体现了循环经济需求,成功应用于油泵等部件^[22]。

国内研究以高校为主导,聚焦成分设计与组织调控。上海交通大学基于 Al-Mg-Si 体系,通过精确调控 Mg/Si 比(1.73)及添加 Ti、Zr、V 等晶粒细化元素,抑制粗大 Mg_2Si 金属间化合物析出^[28]。实验表明,Re/Ca 复合变质处理可实现共晶组织的微纳米级细化,显著提升塑性变形能力^[29]。进一步引入 Zn、Cu 等元素形成多元强化体系,通过固溶强化与沉淀强化协同作用实现基体强度的阶梯式提升^[30]。然而,国内合金仍面临成分设计冗余、工艺稳定性不足的问题。例如,Sr/稀土复合变质虽然可细化组织^[31],但是成本较高;部分专利合金元素种类过多^[32](如含 Cu、Mn、Ti、Zr、RE 等),可能增加熔炼难度和杂质风险。表 1 显示了上述各铝合金牌号的化学成分对比。

对比分析表明(表 1),不同免热处理铝合金的化学成分存在显著差异:在 Si 含量上,C611(4.0%~7.0%)与 CN109881056B(9.0%~11.0%)的硅含量显著高于其他牌号,Castaduct 系列(0~0.2%)及 CN104805322A(<0.1%)的硅含量极低^[21,27-28]。在 Mg 含量上,Magsimal Plus(6.0%~6.4%)与 CN108754256A(6.0%~8.0%)镁含量最高,560 系列(2.8%~3.6%)及 Castaduct 系列(4.1%~4.5%)次之^[22-24]。在其他的特殊元素上,仅 Magsimal 系列含微量 Be(0.004%)^[24];Magsimal Plus(0.1%~0.3%)与 CN108754256A(0.02%~0.1%)含 Zr^[24,30];CN104805322A(<1%)及 CN110106401A(7%~10%)含 Re^[28,32],CN109881056B 含 Sr;CN108754256A 含 Ca(0.003%~0.01%)与 V(0.03%~0.1%);Castaduct-18 的 Zn 含量(3.3%~3.6%)显著高于同类合金^[27,30]。Castaduct 系列的 Fe 含量较高(1.5%~1.7%),而 C611 极低(0.05%~0.15%)^[21,27]。

国内外合金技术的研发聚焦于强韧性提升与综合性能优化。为满足车企对部件减重(如特斯拉 Model Y 后底板一体化压铸)及低碳制造需求,材料需兼具高流动性(适应薄壁填充)与高强韧性。免热处理工艺通过省略热处理工序,可缩短生产周期 30%~40%,降低能耗成本 20%~25%,显著提升供应链效率。在成分设计策略上,国际技术侧重元素功能化调控:Castaduct 系列在无 Si 体系中利用 Fe 改善铸造性能,同时避免脆性相生成^[27]。Zr 通过形成 Al_3Zr 沉淀相实现强化^[24],Re 通过变质作用细化共晶组织^[28]。国内研究虽然在多元微合金化(如 Zn、Cu、RE 添加)上取得突破,但是仍面临两大挑战,复杂成分体系(如含 Cu、Mn、Ti、Zr、RE 等)导致熔炼杂质风险增加,无法保证合金的工艺稳定性。Sr/Re 复合变质及 Sc 添加使合金的成本上升,制约了其规模化应用。

1.3 免热处理合金强化机制

图 1a 揭示了免热处理铝合金在自然时效过程中溶质原子的扩散行为。Mg、Si 等原子通过扩散在铝基体特定晶面上偏聚,形成与基体共格的 GP 区(Guiner-Preston zone)。GP 区的形成引发局部晶格畸变,产生弹性应变场,阻碍位错滑移,从而显著提升合金硬度和屈服强度。以 $AlSi_9Cu_3Zn_3$ 合

表 1 各铝合金牌号的化学成分(质量分数,%)对比

Table 1 Comparison of chemical composition (mass fraction, %) of each aluminum alloy grade

合金名称	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	Zr	Be	Re	其他(Ca, V 等)	Al
C611 ^[21]	4.0~ 7.0	0.05~ 0.15	0.05	0.4~ 0.8	0.15~ 0.25	—	0.1	0.01~ 0.03	—	—	—	—	Bal.
560 ^[22]	0.25	0.2	—	1.10~ 1.40	2.80~ 3.60	0.05	0.15	—	—	—	—	—	Bal.
560.1 ^[22]	0.25	0.15	—	1.10~ 1.40	2.85~ 3.60	0.05	0.15	—	—	—	—	—	Bal.
Magsimal ^[24]	1.8~ 2.6	0.15	0.05	0.5~ 0.8	5.0~ 6.0	0.07	0.2	—	—	0.004	—	—	Bal.
Magsimal Phus ^[24]	2.1~ 2.6	0.15	0.05	0.5~ 0.8	6.0~ 6.4	0.07	0.05	—	0.1~ 0.3	0.004	—	—	Bal.
Castaduct-42 ^[27]	0~ 0.2	1.5~ 1.7	0~ 0.2	0~ 0.15	4.1~ 4.5	0~ 0.3	0~ 0.2	—	—	—	—	—	Bal.
Castaduct-18 ^[27]	0~ 0.2	1.5~ 1.7	0~ 0.2	0~ 0.15	4.1~ 4.5	3.3~ 3.6	0~ 0.2	—	—	—	—	—	Bal.
CN104805322A ^[28]	<0.1	—	—	0.4~ 0.8	4.5~ 6.5	—	—	—	—	—	—	<1 Re	Bal.
CN108754256A ^[29]	2.0~ 3.6	—	—	0.6~ 0.9	6.0~ 8.0	—	0.15~ 0.20	—	0.02~ 0.1	0.004~ 0.006	0.01~ 0.2	0.003~0.01 Ca, 0.03~0.1 V	Bal.
CN109881056B ^[30]	9.0~ 11.0	≤0.16	—	0.5~ 0.8	0.1~ 0.5	1.0~ 3.0	—	0.005~ 0.04	—	—	0.05~ 0.35	—	Bal.
CN110079714B ^[31]	—	—	0.5~ 1.5	0.6~ 0.9	4.5~ 7.5	—	0.1~ 0.2	—	0.01~ 0.2	0.004~ 0.006	—	—	Bal.
CN110106401A ^[32]	—	—	—	—	0.05~ 0.5	—	0.05~ 0.1	—	—	—	7~10	—	Bal.

金为例,经 48 h 自然时效后,其抗拉强度由 245 MPa 增至 325.4 MPa,强化效果显著^[19]。当添加微量 Sc (0.02% ~ 0.1%) 或 Zr (0.1% ~ 0.3%) 时,合金在快速凝固过程中可形成纳米级 Al₃Sc、Al₃Zr 析出相,它们均匀分布于基体中。这些

析出相不仅作为异质形核基底细化晶粒(如 Magsimal Phus 合金的晶粒尺寸可降至 5 μm 以下^[24])还通过钉扎晶界阻碍位错运动,使 Al-Mg-Si-Zr 合金的抗拉强度提升至 360 MPa^[25]。

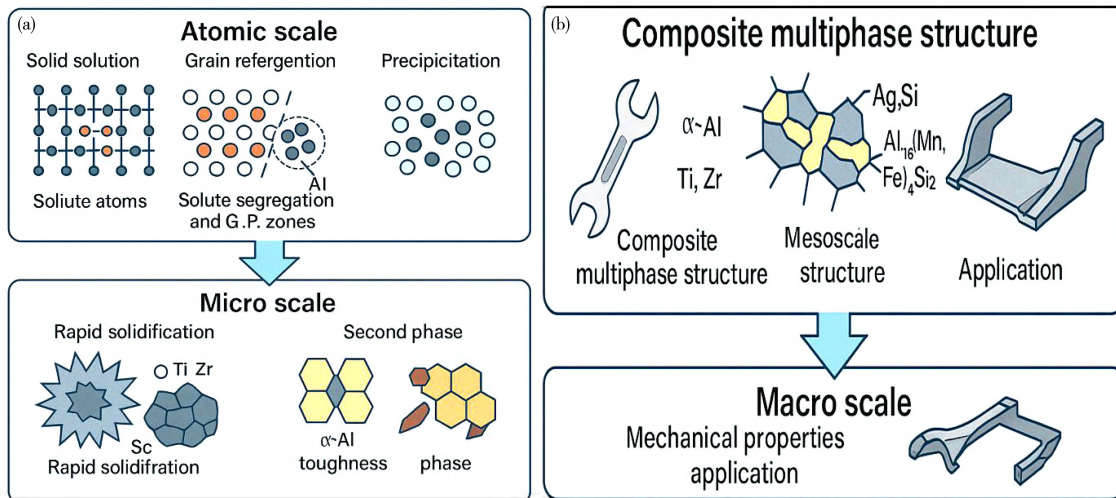


图 1 免热处理铝合金强化机制:(a)微观尺度 GP 区与纳米析出相强化,(b)晶界强化与多相协同作用

Fig.1 Strengthening mechanisms of non-heat-treated aluminum alloys: (a) microscale GP zone and nanoprecipitate strengthening, (b) grain boundary strengthening and multiphase synergistic effect

图 1b 进一步展示了晶界强化与多相协同强化机制。通过快速冷却及添加 Ti (0.1% ~ 0.2%)、Re (0.05% ~ 0.35%) 等微合金元素,可细化晶粒并调控第二相形态。如 α-Al₁₅(Mn, Fe)₄Si₂ 相(汉字状分布)替代脆性 β-Fe 相,显著提升合金强度与硬度^[14]。在实际应用中,上海交通大学开发的 JDA 系列合金通过细晶强化机制抑制裂纹扩展,延伸率达 15%^[33];Castaduct-18 合金通过添加 Zn (3.3% ~ 3.6%) 促使

第二相由针状 β-Fe 相转变为韧性汉字状相,抗拉强度提升了 27%^[27]。

在宏观尺度上,免热处理工艺结合成分设计与压铸参数优化(如模具温度控制在 200~250 °C、注射速度不小于 4 m/s),可有效平衡高强度与韧性,同时避免热处理缺陷。以特斯拉 Model Y 后车底采用的 C611 合金为例,其抗拉强度大于 300 MPa,延伸率不小于 10%,满足大型结构件对力学性能与

成型精度的双重需求。

1.4 免热处理强化铝合金的组织与性能

在国际上,国际研究聚焦于窄凝固区间设计与多相协同强化策略。在窄凝固区间设计上,美国铝业 C611 合金通过剔除 Cu、Zn 元素,将凝固温度范围压缩至 60 °C,热裂倾向降低 50%,铸态抗拉强度大于 300 MPa,延伸率不小于 10%,该合金还具有优异的抗粘模性能(Anti-sticking 特性),适用于精密压铸零部件^[34]。在多相强化方向,如美国铝业 560 合金,基于 Mg-Mn 固溶强化(Mg 2.8%~3.6%,Mn 1.1%~

1.4%),其铸态抗拉强度达 350 MPa,延伸率为 12%,性能超越传统 T6 态 AlSi₁₀MnMg 合金,满足高载荷部件需求^[22]。而德国的 Magsimal Phus(Al-Mg-Si-Zr 系),通过添加 Zr 元素优化了枝晶结构,形成 α-Al+Mg₂Si+Al₁₅(Mn,Fe)₂Si₂ 多相组织,抗拉强度为 360 MPa,媲美 T5 热处理合金,但是延伸率降至 9%~12%^[24]。Castaduct-18 引入了 3.3%~3.6% Zn 抑制 Al₁₃Fe₄ 相生长,抗拉强度提升至 323 MPa,耐腐蚀性优异,但是延伸率仅 7%^[27]。表 2 为国际主流免热处理铸造铝合金设计特点与性能对比。

表 2 国际主流免热处理铸造铝合金设计特点与性能对比

Table 2 Comparison of design characteristics and properties of international mainstream non-heat treatment cast aluminum alloy

合金名称	成分设计	创新点	力学性能(铸态)	应用优势	主要缺点
美国铝业 C61 ^[21]	无 Cu、Zn,以 Mg-Mn 固溶强化为主	凝固温度范围仅 60 °C,热裂降低 50%;防粘优异 铸态性能超越 T6 态	抗拉强度大于 300 MPa,延伸率不小于 10%	高尺寸精度铸件	Mn 含量高导致熔炼氧化风险
美国铝业 560 ^[22]	高 Mg-Mn 固溶强化(Mg 含量高于 3%,Mn 含量高于 0.5%)	AlSi ₁₀ MnMg (抗拉 350 MPa,延伸率 12%)	抗拉强度为 350 MPa,屈服强度大于 200 MPa,延伸率 12%	高载荷结构件	高 Mg 含量增加熔体氧化倾向
德国 Magsima ^[24]	α-Al+共晶 Mg ₂ Si,含 Ti 细化晶粒	共晶 Mg ₂ Si 网络化分布,延伸率 11%~17%	抗拉强度 300~350 MPa,屈服强度 160~200 MPa	高韧性铸件	屈服强度偏低
Magsimal Phus ^[24]	添加 Zr(0.1%~0.3%),优化为 α-Al+Mg ₂ Si+Al ₁₅ (Mn,Fe) ₂ Si ₂ 多相组织	Zr 抑制晶界迁移,抗拉强度达 360 MPa (媲美 T5 态)	抗拉强度 340~360 MPa,屈服强度 200~220 MPa	替代热处理合金	延伸率降至 9%~12%,成本增加 20%
Castaduct-42 ^[27]	α-Al+Al ₁₃ Fe ₄ 相(Fe 0.8%~1.2%)	Al ₁₃ Fe ₄ 相尺寸 3~5 μm,耐腐蚀性优异	抗拉强度 254 MPa,延伸率 14%	耐腐蚀焊接件	强度偏低
Castaduct-18 ^[27]	添加 3.3%~3.6% Zn 抑制 Al ₁₃ -Fe ₄ 相生长	Zn 固溶强化使抗拉强度提升 27%,达 323 MPa	抗拉强度 323 MPa,屈服强度 180 MPa,延伸率 7%	高强度耐蚀件	塑性显著下降

国内研究主要集中于高强度与高塑性协同提升。主要代表有上海交大 JDA 系列,其通过控制 Mg/Si 比为 1.73 及 Sr/RE 复合变质细化晶粒,铸态抗拉强度达 400 MPa,延伸率为 15%,性能对标 T6 态进口合金,能耗降低 30%^[33,35]。张煜琰等添加 16%~21% Zn 实现自然时效后屈服强度大于 300 MPa(为当前最高强度),但是延伸率骤降至 1.5%^[36]。在高塑性上,代山元全实团队开发的高 Mg-Mn 固溶强化铝合金(Mg 9%,Mn 1.7%)延伸率突破 30%,创压铸铝合金塑性纪录,适用于复杂薄壁件,但是屈服强度仅 136~152 MPa^[37]。

表 3^[33,36-41] 为国内典型免热处理铸造铝合金设计特点与性能对比。

当前国内外合金普遍存在强塑性矛盾,且 Sc、Zr 等微合金元素成本高昂,如 Sc 高于 500 美元/kg^[40],多元成分体系量产一致性难以保障。未来需开发低成本微合金化技术,开发 Ca、Sn 等替代元素,降低对贵金属(Sc、Zr)的依赖。通过成分优化与工艺创新,提升合金综合服役性能。结合机器学习与相场模拟,建立“成分-工艺-性能”定量预测模型,促进其在新能源汽车与航空航天领域的工程化应用。

表 3 国内典型免热处理铸造铝合金设计特点与性能对比

Table 3 Comparison of design characteristics and properties of domestic typical non-heat treatment cast aluminum alloys

合金名称/专利号	成分设计	创新点	力学性能(铸态)	应用优势	主要缺点
上交 JDA 系列 ^[33]	Mg/Si 比为 1.73, Sr/RE 细化晶粒	共晶 Mg ₂ Si 网络化+纳米析出相,抗拉 400 MPa	抗拉 360-400 MPa,延伸率 10%~15%	替代 T6 态 Si-lafont36	成分控制精度要求高(±0.05%)
CN111197132A ^[36]	16%~21% Zn+多元素协同	自然时效后屈服大于 300 MPa(当前最高)	抗拉强度 310 MPa,延伸率不小于 1.5%	超高强度铆接件	Zn 含量过高导致密度增加 10%
CN112930410A ^[37]	9% Mg+1.7% Mn 抑制偏析	延伸率突破 30%(压铸铝合金最高)	抗拉强度 322 MPa,延伸率 18%~30%	复杂薄壁件	屈服强度仅 136~152 MPa
CN110983120A ^[38]	7.5%~8.5% Si+多元微合金(Ti/Cr/Sr)	高硅铝合金强塑性突破(抗拉强度大于 300 MPa,延伸率不小于 8%)	抗拉强度不小于 300 MPa,延伸率不小于 8%	高强塑铸件	熔体粘度高,流动性下降
CN112301260A ^[39]	添加 5~30 ppm Be+Fe-Mn-Zr 多元元素	Be 降低熔体表面张力,延伸率 15.8%	抗拉强度 324 MPa,延伸率 15.8%	高韧薄壁件	Be 元素毒性限制应用

(续表 3)

合金名称/专利号	成分设计	创新点	力学性能(铸态)	应用优势	主要缺点
CN111378878B ^[40]	0.01%~1% Sc+9% Mg	Sc 细化晶粒至 5 μm, 延伸率 19%	抗拉强度 285 MPa, 延伸率 19%	高延展性压铸件	Sc 成本高于 500 美元/kg
CN107858567B ^[41]	7.5%~10.5% Cu + 1.5%~3% Ca 形成 Al-Cu-Ca 共晶	250 °C 下 500 h 强度保持率>95%	抗拉强度 340 MPa, 延伸率 3%~5%	耐热结构件	塑性差, 耐蚀性下降

1.5 免热处理强化铝合金在汽车工业中的应用现状

随着新能源汽车产业的快速发展,高压压铸铝合金在车身结构件制造中的规模化应用显著提升。免热处理强化铝合金凭借工艺简化、成本优化及环境友好等优势,成为车身轻量化技术革新核心材料。相较于传统热处理工艺的合金,该类合金通过成分设计与微观组织调控,在铸态下即可满足力学性能要求,避免了热处理导致的尺寸变形与表面缺陷,同时降低 20%~30% 的工序能耗^[42-43],契合汽车产业低碳化转型需求。

在国际典型应用案例上,特斯拉在 Model Y 采用美国铝业 C611 免热处理 Al-Si 合金(Si 含量 4.0%~7.0%),将 Model 3 所需的 70 个零部件整合为 2 个一体化压铸件,其抗拉强度大于 300 MPa,延伸率不小于 10%,满足超大型薄壁铸件的填充能力与力学性能平衡需求,如图 2 所示^[42]。C611 合金凭借与 A356 相当的硅含量,确保了超大型薄壁铸件的填充能力,其抗拉强度与延伸率的平衡性满足了结构件性能要求。美国铝业 560 合金(Mg 2.8%~3.6%, Mn 1.1%~1.4%)通过 Mg-Mn 固溶强化机制,延伸率达 12%,应用于日产 Nissan GT-R 车门面板、车体框架等部件,表面质量适配高端车型要求^[22]。德国莱茵 Magsimal-plus 合金(含 0.1%~0.3% Zr)形成 Al₃Zr 沉淀相,显著提升铸态硬度(≥85HV),兼具高强度与耐蚀性,已用于奥迪新能源汽车电池盒组件^[43];Castaduct-42 合金(Fe 1.5%~1.7%)突破传统 Si 元素限制,在无 Si 体系中实现优异铸造性能,批量应用于车门内板及车体部件^[44]。

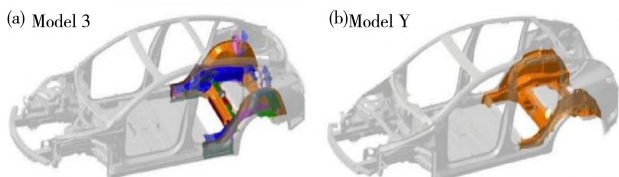


图 2 (a) Model 3 分体式后车底, (b) Model Y 一体化压铸后车底
Fig.2 (a) Multi-component rear underbody of Model 3, (b) integrated die-cast rear underbody of Model Y

而在国内技术研发与产业化突破上,以高校-企业合作为核心,上海交通大学开发的 JDA1 合金(Mg/Si 比为 1.73, 含 Ti、Zr 等微合金元素)替代德国 SF36 材料,减重 26%,产品合格率提升 15%,应用于凯迪拉克 CT6 发动机支架,如图 3 所示;在奔驰电池箱侧板制造中,JDA1 合金的免热处理特性使焊接应力集中风险降低,生产效率提升 40%。新能源汽车底盘构件,JDA2 合金在国内某车企中替代钢结构,减重率达 32%,12 道冲压工序简化为单次压铸成型,推动“冲压-焊接”工艺向一体化压铸转型^[45]。

1.6 国内外免热处理强化铝合金技术对比

在技术路径上,欧美国家依托成熟的工业体系与长期积累的工艺经验,以工艺稳定性与规模化生产为核心技术路径。例如,美国铝业(Alcoa)与德国莱茵(Rheinfelden)通过优

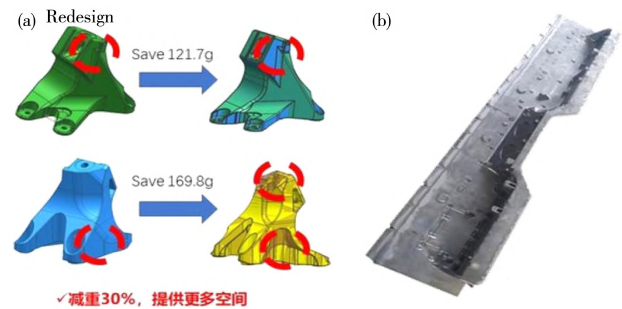


图 3 JDA1 压铸铝合金制备的(a)凯迪拉克 CT6 发动机支架,(b)奔驰电池箱侧板^[45]

Fig.3 (a) Cadillac CT6 engine support, (b) Mercedes Benz battery box side plate prepared by JDA1 die cast aluminum alloy^[45]

化凝固温度区间(如 C611 合金的凝固区间压缩至 60 °C)及模具设计,确保产品一致性。其核心优势在于工艺参数的精准控制,例如特斯拉 Model Y 后车底采用的 C611 合金通过窄凝固区间设计,热裂风险降低 50%。这一技术导向源于欧美汽车产业链对高可靠性产品的需求,以及碳排放与成本控制的严格法规约束。

中国与日本作为后发追赶者,则倾向于通过成分创新与微合金化技术突破性能瓶颈。例如,上海交通大学 JDA 系列合金通过稀土元素(Sr/RE)细化晶粒,铸态抗拉强度达 400 MPa,延伸率为 15%,性能对标欧美 T6 态合金;日本研发团队开发的超高 Zn 合金(Zn 16%~21%)实现自然时效后屈服强度大于 300 MPa,为当前最高强度免热处理合金。此类技术突破旨在规避欧美专利壁垒(如 Alcoa C611 合金专利),同时响应新能源汽车轻量化政策需求。

而在市场的需求上,欧美汽车产业高度成熟,供应链效率与生产成本敏感度较高,倾向于选择工艺稳健、可快速量产的合金。例如,Alcoa 560 合金凭借高延伸率与表面质量稳定性,广泛应用于高端车型车身框架。同时,Trimal-04 的再生铝技术与循环经济深度融合,符合欧洲环保法规,但需依赖高附加值元素如 Zr、Sc 的进口,导致成本上升。

中国新能源汽车市场呈爆发式增长,催生对一体化压铸技术的迫切需求。然而,产业链上游高纯铝原料(纯度大于 99.9%)与高端压铸设备(如 6000T 以上超大型压铸机)仍依赖进口,中游熔炼工艺稳定性不足(如成分波动±0.1%),下游车企对国产材料信任度较低。尽管上海交通大学 JDA 系列合金已在凯迪拉克 CT6 等车型中成功替代进口材料,但是多数国内车企仍优先选用欧美合金。

在专利壁垒及产业生态上,欧美企业通过核心专利,如 Alcoa 的 C611 莱茵的 Magsimal 系列,且垄断了关键合金体系(Al-Si、Al-Mg-Si)和工艺技术(如 Zr 沉淀强化),形成技术护城河。拥有完整的产业链生态,从合金设计、模具制造到

压铸设备(如布勒、力劲)形成闭环,支持高精度生产。例如,德国 Magsimal 系列与奥迪电池盒组件的协同开发,体现了产业链深度整合的优势。

中国的专利布局以高校和科研机构为主,侧重于成分创新,但是商业化应用较少,且部分专利存在元素冗余(如含 Cu、Mn、Ti、Zr 等),增加工艺复杂度,难以规模化。

1.7 未来免热处理铝合金设计方向

在合金的设计上,基于热力学相图计算(如 Thermo-Calc 软件)可预测多元合金中析出相的类型、尺寸与空间分布规律。结合机器学习模型对实验数据进行训练,可建立“成分-工艺-性能”的定量映射关系,突破传统试错法的效率瓶颈。例如,通过高通量实验筛选微合金元素(如 Ca、Sn)对 Al-Mg-Si 体系的影响,结合随机森林算法优化元素配比,突破传统试错法局限,实现高强韧合金的快速设计。

而在自然时效的强化方式上,可通过采用原位透射电镜和同步辐射 X 射线衍射实时观测自然时效过程中 GP 区、析出相的动态演变,结合相场模拟和分子动力学计算,建立从原子扩散到宏观性能的跨尺度时效动力学模型,为时效工艺的精准调控提供理论依据。

2 结语

免热处理强化铝合金凭借工艺简化、能耗低及性能优异等特性,已成为汽车轻量化与绿色制造的核心材料。本文系统揭示了多尺度组织调控与元素功能化设计对材料性能的关键作用。国际主流牌号通过窄凝固区间设计及低成本元素协同实现商业化应用,而国内研究虽然在强韧性突破上取得进展,但是仍需攻克成分冗余、工艺稳定性不足等产业化瓶颈。未来研究应聚焦以下方向。

(1) 相平衡计算与实验验证:利用 Thermo-Calc 软件解析 Al-Ca/Sn 体系的相平衡关系,预测 CaAl_2 、 Sn_3Al 等金属间化合物的形成条件,并通过熔炼实验验证 Ca(0.1%~0.5%)、Sn(0.05%~0.2%)对 Al-Mg-Si 合金强塑性的影响规律。

(2) 工艺-性能关联建模:采集压铸温度、压力、冷却速率等工艺数据,分析微观组织(如枝晶间距、析出相密度)与力学性能的关联性,构建数据驱动的工艺窗口优化模型。

(3) 四元合金体系开发:设计 Al-Mg-Fe-Mn 四元体系,研究 Fe 含量(0.5%~1.5%)对合金韧性的影响机制。结合热挤压工艺生产细化 Fe 相尺寸至小于 $2\ \mu\text{m}$,且抗拉强度不小于 320 MPa 的耐蚀-高韧合金。

(4) 时效动力学机制深化:通过原位表征与多尺度模拟,揭示自然时效过程中缺陷(如空位)浓度的演化规律,建立时效时间与性能的定量关系。

随着新能源汽车对一体化压铸需求的增长,免热处理铝

合金在电池包壳体、底盘等关键部件的应用潜力将进一步释放,其发展将推动汽车产业朝高效、低碳方向转型,并为航空航天、轨道交通等领域的轻量化提供新思路。

参考文献

- 李玲,董建雄,黄云飞.汽车与配件,2015(32),69.
- 潘占福,李悦,付林,等.汽车工艺与材料,2021(5),1.
- 王小兰.汽车文摘,2021(2),30.
- 王正科.内燃机与配件,2021(1),102.
- 杨甄鑫,廖抒华.汽车零部件,2021(1),107.
- 刘智彬.时代汽车,2021(12),15.
- 樊振中,袁文全,王端志,等.铸造,2020,69(2),159.
- 董显明,赛超.铸造,2017,66(10),1122.
- 张百在,万里,黄志垣,等.特种铸造及有色合金,2009,29(11),1030.
- 史宝良,刘旭亮,孙震,等.汽车工艺与材料,2022(12),1.
- 陈龙.高真空压铸汽车减震塔的热处理工艺研究.硕士学位论文,华南理工大学,2020.
- 耿明山,曹建宁,刘艳.中国冶金,2017,27(9),1.
- 王连登,耿斌,林益雄,等.铸造,2022,71(8),950.
- 陆从相,杨彦,周鹏飞.铸造,2021,70(4),454.
- 崔海超,左秀荣.铸造技术,2007(1),64.
- 代鹏林,华永乐,阔洋,等.热加工工艺,2018,53(9),80.
- 刘安民,杨梦楚,张梦晗,等.中国有色金属学报,2019,33(10),3117.
- 毛建辉,张玉贤,姜路文,等.中国冶金,2021,31(5),66.
- 曾鹰.汽车工程学报,2018,8(5),373.
- 力劲集团出席第11届国际汽车工业4.0峰会.中国铸造装备与技术,2023,58(1),3.
- 王祝堂.轻金属,2014(10),1.
- Sokolova M, Franciosa P, Ceglarek D. *Engineering*, 2021, 21, 21.
- 赵飞,黄文森.贵州师范大学学报,2024,42(1),1.
- Meng Y, Cui J, Zhao Z, et al. *Materials Characterization*, 2014, 92, 138.
- Yuan W, Liang Z. *Materials & Design*, 2011, 32(8), 4195.
- Lityńska L, Abou-Ras D, Kostorz G, et al. *Journal of Microscopy*, 2006, 223(2), 182.
- Wiesner S, Niklas F, Boer N, et al. In: The 13th China International Die Casting Conference and the 4th International Symposium on Nonferrous Alloys and Special Casting Technology. 2018, pp.176.
- 张鹏,丁文江,刘保良,等.中国专利,CN104805322A,2015.
- 王渠东,蔡会生,雷川,等.中国专利,CN109881056B,2023.
- 彭立明.中国专利,CN110079714A,2019.
- 李德江,权北北,朱文杰,等.中国专利,CN110106401A,2019.
- 彭立明,袁灵洋,刘保良,等.中国专利,CN108754256B,2018.
- 郭纯.中国专利,CN110983120A,2020.
- Prach O, Trudonoshyn O, Randalzhofer P, et al. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 759, 603.
- 曾小勤.第十二届中国汽车轻量化技术研讨会.上海交通大学,2018.
- 李俊俊,江雨,长海博文.中国专利,CN111500903A,2020.
- 山元泉实,矾部智洋,堀川宏.中国专利,CN112930410A,2021.
- 张煜琰,长海博文.中国专利,CN111197132A,2020.
- 闫锋.中国专利,CN112301260A,2021.
- 李远发.中国专利,CN111378878B,2020.
- 周广顺.中国专利,CN107858567B,2018.
- 鄯雷敏.中国专利,CN109750189A,2019.
- 喻友贵,何建文.中国专利,CN104651675A,2015.
- Piazza G, Olbrich S, Beeh E, et al. *SAE WCX* 2019, 2019.
- http://www.laf-ls.cn/h-nd-47.html#_np=108_597.



汤江涛,2019年6月于辽宁科技大学获得工学学士学位。现为沈阳化工大学材料科学与工程学院硕士研究生,在梁田副研究员的指导下进行研究。目前主要研究领域为轻质铝合金方向。



梁田,通信作者,中国科学院金属研究所,副研究员,硕士生导师。2013年博士毕业于中国科学院大学,长期从事第四代核电、小型核反应堆堆芯组件用高性能奥氏体不锈钢、铁马钢包壳材料研发及制备技术以及核安全等研究工作。