

新能源汽车用一体化压铸铝合金研究现状与发展趋势

罗婷瑞¹ 樊振中^{2,3} 胡惠翔¹ 王俊虎⁴ 田艳中¹

(1.东北大学材料科学与工程学院; 2.中国航发北京航空材料研究院; 3.北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心; 4.京开能源有限公司)

摘 要 新能源汽车行业对轻质结构部件集成化制造提出了更高的要求,一体化压铸免热处理铝合金材料结合超大型超高压压铸设备可实现复杂部件的低成本高集成化制造,已成为当前研究热点。系统总结了国内外免热处理压铸铝合金材料的研究现状与一体化压铸设备的研制现状,阐述了 Al-Mg 系与 Al-Si 系免热处理压铸铝合金的力学性能与微观组织调控机理。最后,对新能源汽车用一体化压铸铝合金材料发展趋势进行了展望。

关键词 一体化压铸; 新能源汽车; 铝合金; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG146.21; TG249.2

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.011.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Status and Development Trend of Integrated Die-casting Aluminum Alloy for New Energy Vehicles

Luo Tingrui¹, Fan Zhenzhong^{2,3}, Hu Huixiang¹, Wang Junhu⁴, Tian Yanzhong¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Northeastern University; 2.Beijing Institute of Aeronautical Materials; 3.Beijing Advanced Engineering Technology and Application Research Center of Aluminum Materials; 4.Jingkai Energy Co., Ltd.)

Abstract: The development of new energy vehicles has put forward higher requirements for manufacturing light-weight, integrated structural components. Ultra-large and ultra-high pressure die-casting equipment can fabricate integrated heat-treated-free die-casting aluminum alloy, which can realize the low-cost and highly integrated manufacturing of complex parts and has become a hot topic. The domestic and international research status of heat-treated-free die-casting aluminum alloy materials and the production status of integrated die casting equipment were systematically reviewed. The mechanical properties and controlling mechanisms of heat-treated-free die-cast Al-Mg and Al-Si series alloys were described. Finally, the development trend of integrated die-casting aluminum alloy materials for new energy vehicles was prospected.

Key Words: Integrated Die Casting, New Energy Vehicles, Aluminum Alloys, Microstructure, Mechanical Properties

从轻量化、低成本、环保等方面综合来看,铝合金是汽车制造业轻量化的首选材料之一,开发汽车用铝合金材料对提升我国汽车产业的国际竞争力具有积极作用。汽车用铝合金主要分为变形铝合金与铸造铝合金,其中锻铝件占 1%~3%,铸铝件占 80%左右,其余为加工型材,而在汽车用铸造铝合金中,压铸件占比高达 80%^[1-3]。但由于传统压铸过程中液态金属充填速度快,流动不稳定的特点,铸件易产生气孔、针孔等缺陷,在高温固溶处理时易引起工件表面起泡,复杂结构压铸件在淬火时极易产生严重的变形甚至开裂,故通过热处

理难以调控压铸件的力学性能^[4]。对于复杂结构件,采用传统的压铸工艺生产成本高、制造周期长,难以适应如今汽车行业对轻量化、低成本、低碳排放的技术发展要求。

一体化压铸使铸件制造周期大幅缩短,通过对压铸铝合金材料进行成分设计与制造工艺优化,可优选出适用于新能源汽车整体压铸的材料,将全铝车身材料回收率提高至 95%以上。一体化压铸成形工艺即车身部件的铸铝化与集成化,大型铝制零部件通过压铸设备一体化压铸成形,将传统汽车制造工艺所涉及冲压、焊接、涂

收稿日期:2022-11-27;修改稿收到日期:2023-03-06
基金项目:重点领域技术攻关院基金资助项目(KJSC220203)
第一作者简介:罗婷瑞,女,1998 年出生,硕士研究生,沈阳(110819),E-mail:tingruiluo@163.com
通信作者:田艳中,男,1984 年出生,教授,沈阳(110819),E-mail:tianyanzhong@mail.neu.edu.cn
引用格式:罗婷瑞,樊振中,胡惠翔,等. 新能源汽车用一体化压铸铝合金研究现状与发展趋势[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(11):1 472-1 478.
LUO T R, FAN Z Z, HU H X, et al. Research status and development trend of integrated die-casting aluminum alloy for new energy vehicles[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(11):1 472-1 478.

装与总装 4 个环节的冲压与焊接合并。用于汽车零部件一体化压铸的材料为免热处理压铸铝合金,其特点是无需经过高温固溶处理和人工时效,仅通过自然时效即可实现较佳的强度和塑性。免热处理压铸铝合金主要通过微合金化来调控合金的微观组织及尺寸形貌,结合固溶强化、细晶强化以及第二相弥散强化对材料进行强化。采用免热处理铝合金可改善铸件的质量,提升合金的力学性能,且节约能源,减少碳排放,使车身结构件在成本和性能方面具有较大的优势。

1 免热处理压铸铝合金研究现状

1.1 国外免热处理压铸铝合金研究现状

考虑到一体化压铸件的复杂曲面构型与结构尺寸轮廓,需要采用工艺流动性优异的铝合金,其中 Al-Si 系铸造合金由于具有理想的工艺流动性而受到重视。作为首个在汽车领域成功应用的低铁含量压铸铝合金,Salafont-36 通过添加适量的 Mn 元素,降低 Fe 含量,有效改善了粘模问题,在合金中形成的球状 $Al_{12}Mn_3Si_2$ 相,可改善材料的延展性;通过添加 Sr 元素来改善合金的延展性、铸造性、工艺流动性以及焊接性^[5]。德国开发的 Castasil-37 铝合金中添加了一定含量的 Zr、Mo 元素,同时将 Mg 含量严格限制在 0.06% (质量分数,下同)以内,成分调控后的 Castasil-37 合金可产生尺寸更

为细小的共晶结构,铸造性能大幅改善,更适用于车身薄壁压铸件高强高韧的性能需求^[6]。对 C611 合金所制铸件进行涂装烘烤后屈服强度可进一步提高,其铸态的力学性能可与 T5/T6 态的 Al-Si 系压铸铝合金相当。Aural 5 合金铸态下至少具有 8% 的伸长率,同时具备良好的热稳定性与自然时效稳定性,是铆钉工艺的首选。

近年来,具有良好耐蚀性、较高塑韧性的 Al-Mg 系压铸铝合金也得到了充分的研究和关注。以 Mn 和 Mg 作为主合金元素起固溶强化作用的 C446F 合金,其力学性能超过 T6 态的 AlSi10MnMg 合金铸件,但该合金凝固范围较宽,压铸时热裂倾向较大,不适于制造厚薄不均的复杂压铸件。美铝开发的 A152 (Mg 含量为 3% 左右)、A153 (Mg 含量为 4% 左右)合金具有优异的铸造性能与良好的铆接性能,其铸态力学性能与 T5/T6 态的 Al-Si 系压铸铝合金相当。由莱茵菲尔德公司开发的 Magsimal 59 合金与 Al-Si 系合金相比收缩性更好,同时具有较好的抗疲劳强度、耐腐蚀性、铸造性能、抗热裂性能与焊接性能。该公司开发的 Fe 含量较高的 Castaduct 42 合金,由约 4.2% 的 Mg 和约 1.6% 的 Fe 组成共晶成分,保证了与 Al-Si 合金类似的良好铸造性能,且铸态下有良好的塑韧性、焊接性及优异的耐蚀性能^[9]。国外典型免热处理压铸铝合金性能指标见表 1。

表 1 国外典型免热处理压铸铝合金性能汇总^[6-7]

Tab.1 Summary of properties of typical heat-treated-free die casting aluminum alloys abroad										
合金	名义成分	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	疲劳强度/MPa	伸长率/%	电导率/(MS·m ⁻¹)	热裂倾向	铸造性能	焊接性	合金系
Castasil-37	AlSi9MnMoZr	280~300	120~150	86	10~14	18~22	低	好	好	Al-Si 系
C611	AlSi7MnMg	240	120	-	12~15	-	低	好	-	
Salafont-36	AlSi9MgMn	250~290	120~150	89	5~10	21~26	低	良好	好	
Aural 5	-	262~274	122~133	-	11~13	-	-	-	-	
560(C446F)	-	250~280	160~200	-	6~8	-	高	-	-	Al-Mg 系
Magsimal 59	AlMg5Si2Mn	280~340	160~220	100	12~16	14~16	低	好	好	
Castaduct 42	AlMg4Fe2	245~265	120~135	106	11~16	-	-	良好	好	
A152	AlMg3	265	150	-	11	-	低	好	-	
A153	AlMg4	280	170	-	9	-	低	好	-	

1.2 国内免热处理压铸铝合金研究现状

随着国内新能源汽车领域的飞速发展,对免热处理压铸铝合金的用量需求逐年增加,目前免热处理压铸铝合金的材料研制已成为国内铝合金研究领域的热点。立中集团采用独特的低 Mo 技术研发了 Al-Si 系免热处理压铸铝合金,其抗拉强度≥220 MPa,屈服强度≥110 MPa,伸长率≥12%。湖北新金洋通过合金成分优化设计、原材料精细化预处理、熔体精炼纯净化和变质处理等研发了免热处理压铸铝合金,压铸后各项性能稳定,抗拉强度达 280 MPa,屈服强度达 150 MPa,伸长率大于 10%,优于传统的 Al-Si 系合金^[8]。蔚来汽车与帅

翼驰联合开发的 EZCAST™ 压铸铝合金,已在 ET5 车型量产,解决了传统压铸铝合金使用时尺寸变形与热处理表面褶皱等问题^[9-11]。上海交通大学开发了 JDA1x、JDA2x 系列免热处理铝合金,其中 JDA1x 系压铸铝合金抗拉强度可达 300~330 MPa,屈服强度可达 180~200 MPa,伸长率可达 6%~8%,该合金同时具备了较佳的加工性能、焊接性能、抛光性能与延展性,压铸后经自然时效 4~72 h 后可达 Silafont 36-T6 态力学性能^[12]。JDA2x 系压铸铝合金的抗拉强度可达 300~320 MPa,屈服强度可达 160~180 MPa,伸长率高达 15%~20%。国内厂家开发的免热处理压铸铝合金现状见表 2。

表 2 国内厂家研发免热处理压铸铝合金汇总^[8-15]

Tab.2 Domestic summary of research and development of heat-treated free die casting aluminum alloy

序号	厂家	公开年份	合金组分	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	应用部位
1	广东鸿泰	2012	Al-Mg-Si-Mn	312.7	217.1	7.1	底盘、车门
2	苏州惠驰	2017	Al-Mg-Si-Mn-Cu	340~350	180~200	10~15	-
3	立中集团	2020	Al-Si-Mn-Fe	≥220	≥110	≥12	电池包壳体
4	永茂泰	2020	Al-Si-Zn-Mn	270	160	7	发动机底壳
5	广东鸿图	2021	Al-Si-Mn-Mg	≥250	≥120	≥10	底盘
6	嘉丰工业	2021	Al-Mg-Mn-Fe	>270	>140	>18	支架
7	新金洋	2022	-	>280	>130	>10	-
8	山西瑞格	2022	Al-Mg-Si-Mn	280	150	23	-
9	华人运通	2022	Al-Si-Mn-Mg	300~330	180~200	6~8	电机壳体
		2022	Al-Mg-Si-Mn	300~320	160~180	15~20	底盘

2 新能源汽车一体化压铸铝合金开发

2.1 合金元素对 Al-Mg 系免热处理压铸铝合金的作用

Mg 作为压铸 Al-Mg 合金中除 Al 外含量最高的元素,在 Al 中的固溶度可达 17.4%,具有良好的固溶强化作用,在提高合金强度的同时不影响合金的韧性,还可提高合金的流动性和抗热裂倾向,并减轻粘模现象。但过量 Mg 不仅会发生氧化,还会降低合金的铸造性能,并与 Al 形成 Al₃Mg₂相,对合金的力学性能与耐蚀性能产生不利影响^[16]。免热处理压铸 Al-Mg 合金的

铸态组织主要为树枝晶、大尺寸颗粒状 α₁-Al 晶粒、细小球状 α₂-Al 晶粒和共晶组织,见图 1^[15]。通过调控元素成分,添加微量元素,可以显著改善合金的力学性能。JI S 等^[17]基于各合金元素对材料力学性能的影响,获得的最佳成分为 5.0%~5.5% 的 Mg、1.5%~2.0% 的 Si、0.5%~0.7% 的 Mn、0.15~0.2% 的 Ti 和不高于 0.25% 的 Fe,余量为 Al。该合金铸态下的屈服强度可达 150 MPa、抗拉强度达 300 MPa、伸长率大于 15%。吴晗^[18]通过正交试验确定压铸铝镁合金的最优成分为 5.4% 的 Mg、2.0% 的 Si、0.77% 的 Mn、≤0.22% 的 Fe,余量为 Al,使铸态合金的抗拉强度达 353.58 MPa,屈

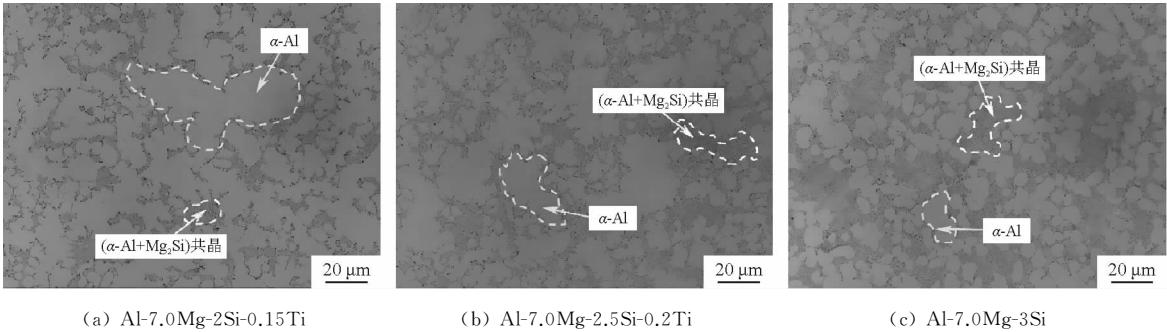


图 1 Al-Mg 系免热处理压铸铝合金微观组织形貌^[15]

Fig.1 Microstructure of heat-treated-free die-casting Al-Mg alloys

服强度达 204.53 MPa,伸长达 12.46%。

Si 可与 Mg 形成 Mg₂Si 共晶相,是 Al-Mg 系免热处理压铸铝合金的主强化相,Mg、Si 对合金性能影响见图 2^[17]。为促进铸态下合金强度、延展性与耐蚀性的提

高,应使 Mg 和 Si 全部形成理想的 Mg₂Si 颗粒,因此 Mg 和 Si 的质量比应为 1.73:1(对应于 Mg₂Si 的 2:1 化学计量比)^[19]。为增强合金铸态下的固溶强化,合金中 Mg、Si 含量应处于 Mg₂Si 在 Al 中最大溶解度

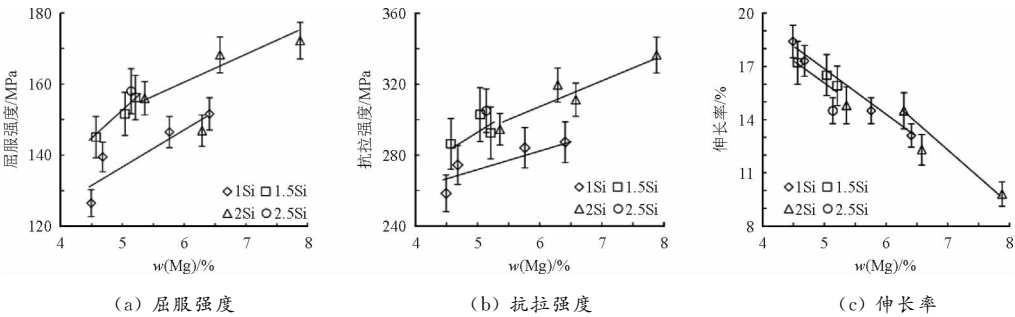


图 2 Mg、Si 含量对 Al-Mg-Si 压铸铝合金铸态力学性能的影响^[17]

Fig.2 Effects of Mg and Si content on as-cast mechanical properties of die-casting Al-Mg-Si alloy

1.85%附近。HU Z Q 等^[20]发现当 Mg 含量在 5.7%~7.2%之间时,屈服强度和硬度分别提高了 11%和 9%,但伸长率显著下降,且随着 Mg 含量增加,合金抗疲劳性能增加。YUAN L Y 等^[15]以化学成分、共晶相分数、平均晶粒尺寸、Mg 固溶体和拉伸性能之间的关系建立了等高线图,作为开发高强韧压铸 Al-Mg-Si 合金的指南,确定当 Mg 含量在 6.5%~7.5%之间, Si 含量在 2.4%~3.0%时,伸长率可大于 10%,同时有较高的屈服强度和抗拉强度。

Mn 是 Al-Mg 系合金中的重要组成元素,在铝合金中添加 1%的 Mg,可使合金的抗拉强度提升 35 MPa,而 Mn 的强化效果是同量 Mg 的两倍^[21]。目前,主要通过添加 Mn 代替 Fe 来提高合金的脱模性,并使 Al_3Mg_2 相均匀析出,改善合金的抗腐蚀性 with 焊接性能。合金中形成的 Al_6Mn 相可降低合金的热裂倾向。此外, Mn 还可增大 $\alpha\text{-AlFeSi}$ 金属间化合物中 Fe 含量,抑制针状 $\beta\text{-AlFeSi}$ 、 AlFe_3 相的形成,从而改善合金性能,特别是塑韧性。合金中最佳 Mn 含量为 0.3%~0.8%,当 Mn 含量为 0.8%时,获得最大的伸长率,含量继续增加时,塑性显著降低,且 Mn、Si 结合形成的 AlMnSi 相使合金强度下降。

Cu 可固溶于 $\alpha\text{-Al}$ 基体或以颗粒状化合物存在于 Al-Mg 合金中,能够显著提高合金的强度和硬度,且在后期烤漆过程中促进 β'' 相的形成,提高烤漆硬化性能,但含裂纹的 Al_2CuMg 相与富 Cu 的网状化合物会使伸长率略微下降^[22-23]。Cu 的存在还会增加合金的晶间腐蚀倾向与热裂倾向,因此一般控制 Cu 含量在 0.3%~0.8%,并尽可能减少 Cu 的含量。

Ti 是细化合金铸态组织、减小开裂倾向、提高力学性能的主要添加元素^[24]。在合金中添加 Ti 后形成的 Al_3Ti 颗粒及 TiC 可促进 $\alpha\text{-Al}$ 基体形核细化晶粒尺寸,同时 Al_3Ti 可使析出相在合金中弥散分布,有效钉扎晶界和位错,阻碍再结晶发生,提高强度,并改善伸长率。当 Ti 与 B 一起添加, B 不仅可形成作为基体自发形核点的 Al_2B 亚稳相,还可降低 Al_3Ti 的溶解度或形成作为异质形核质点的 TiB_2 相,促进 Al_3Ti 相形核,显著增强细化效果。但需注意 Ti 与 Cr、Zn、Mn 等杂质元素产生中毒反应^[25]。

2.2 合金元素对 Al-Si 系免热处理压铸铝合金的作用

Si 在免热处理压铸 Al-Si 系合金中含量一般在 4.0%~11.5%之间。随着 Si 含量提高, $\alpha\text{-Al}$ 枝晶晶粒不断得到细化, Mg_2Si 强化相和共晶 Si 相数量持续增加,其中共晶 Si 相的尺寸及形貌显著影响合金性能,应尽量使共晶 Si 相呈球状或纤维状均匀分布,以此改善合金的强韧性^[26]。免热处理压铸 Al-Si 系合金铸态组

织主要为均匀细小的 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶、共晶 Si 及其他颗粒状第二相^[27]。该合金的强化需调控合金成分与添加细化剂、变质剂,细化初生 $\alpha\text{-Al}$ 相、减小二次枝晶臂间距及改善共晶 Si 形貌。图 3 为添加变质元素 Sr 和复合添加 Sr 与细化剂 Al-Ti-B 后 Al-Si-Mg 合金的微观组织凝固示意图^[28]。ZHANG P 等^[27]通过调控 Cu、Mn、Fe 含量开发出的 Al-10Si-1.5Cu-0.8Mn-0.15Fe 合金表现出较佳的力学性能,屈服强度达 190 MPa,抗拉强度达 308 MPa。BOSCH D 等^[29]指出,在 Al-Si 系压铸铝合金中添加 Mn,且 $w(\text{Mn})/w(\text{Fe})$ 比为 1 时,再结合高冷却速度,可使合金获得优异的塑性(伸长率>10%)。

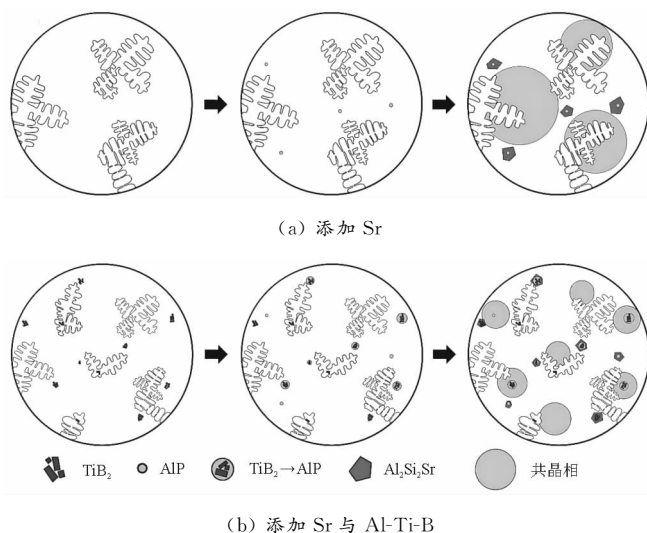


图 3 添加 Sr 和复合添加 Sr 与 Al-Ti-B 后 Al-Si-Mg 合金组织凝固示意图^[28]

Fig.3 Schematic diagram of microstructure solidification of Al-Si-Mg alloy after adding Sr and Al-Ti-B

Cu 加入 Al-Si 系合金中可显著提高强度,但耐蚀性与抗热裂倾向显著下降,合金的凝固温度区间将大幅增加。在低 Cu 含量下,合金性能主要取决于 Al_2Cu 相的存在方式,当 Al_2Cu 相呈球形颗粒状均匀分布于基体时,可显著提高材料强度并保持较高的塑性;若以连续网状沿晶界分布时,强度几乎保持不变,但延展性大幅下降^[30]。随着 Cu 含量增加, Cu 的共晶偏析会恶化材料塑性,形成的大量 Al_2Cu 相显著降低耐蚀性。因此,应严格控制免热处理压铸铝合金的 Cu 添加量,或添加其他元素替代,如 Zr、V、Mo 等。

Mn 在 Al-Si 系合金中可抑制再结晶,提高再结晶温度,显著细化再结晶晶粒,改善合金高温性能,并提高抗疲劳性能,降低收缩率^[27]。此外, Mn 还可消除 Fe 元素带来的不利影响,在 Al-Si 系合金中, Mn 可形成球形或汉字状的 $\text{Al}_{12}\text{Mn}_3\text{Si}_2$ 和 AlFeMnSi 相,避免长针状 $\beta\text{-AlFeSi}$ 相的形成,同时还可与 Mg 形成均匀沉淀,改善合金的耐蚀性能与焊接性能。但含量过高的 Mn 会降

低合金的伸长率,因此一般将其控制在 0.8% 以下。

Mg 在 Al-Si 系合金中可提高材料抗拉强度、硬度和耐蚀性能,有效降低 Sr、Cu 元素添加后的铸件微孔倾向。在高 Si 铝合金中添加 0.3%~0.4% 的 Mg 时,形成的二元强化相 Mg₂Si 可使 α-Al 与共晶 Si 形态细化且分布趋于有序,显著提高合金材料的抗拉强度和屈服强度,改善合金的加工性能,但材料塑性则会显著下降^[30-31]。当 Mg 含量超过 0.5% 时,合金屈服强度不再增加;过量的 Mg 反而会降低合金的铸造工艺性能,增加铸件冷却时的凝固收缩率,使热裂纹、缩孔、缩松等缺陷倾向大幅增加。

2.3 稀土元素作用机制

免热处理压铸铝合金主要通过微合金化调控材料微观组织进行强化,其主要的强化方式为细晶强化,故在熔炼过程中需添加细化剂与变质剂来改善微观组织的尺寸及形貌,常用变质元素有 Na、Ca、Sr、La、Ce 等,其中稀土元素的变质效果具有长效性和重熔性,能使合金的铸态组织明显细化。其细化机理为稀土元素在 α-Al 基体中的固溶度有限,会在二次枝晶表面富集,增大成分过冷度,提高形核率,进而实现晶粒细化。此外,稀土元素会改变共晶 Si 相晶粒的生长机制,使共晶 Si 相由板状、针状转变为层状、纤维状或球状^[32]。稀土元素添加量过高,易形成粗大的稀土元素化合物相,导致用于改性的稀土元素含量减少,改性效果下降。

对于稀土元素改善压铸铝合金性能的研究,MAO F 等^[33]研究发现,添加稀土元素 Eu 可对共晶 Si 相生长方式与形貌产生影响。当添加 0.3% 的 Eu 后,共晶 Si 相由针状、板状转变为纤维状,见图 4。MU-HAMMAD A 等^[34]利用 Sc 对压铸 Al-Mg-Si 合金改性,发现当 Sc 含量为 0.4% 时,晶粒尺寸减小了 80%,抗拉强度和硬度相比未添加 Sc 的分别提高了 28% 和 19%,伸长率增加了 165%。PRACH O 等^[35]在铸态 Al-5Mg-2Si 合金中添加 0.2% 的 Sc 后获得了最佳的强度和塑性,屈服强度为 206 MPa,抗拉强度为 353 MPa,伸长率达 10%。ZHENG QJ 等^[36]研究发现 Al-Si 合

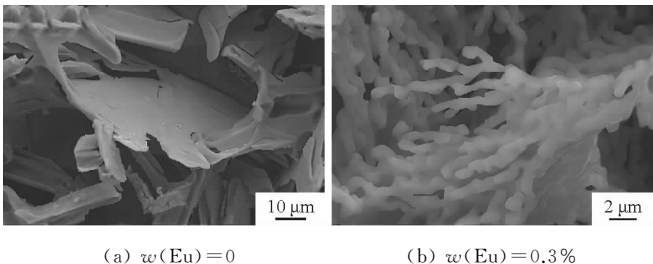


图 4 不同 Eu 含量下的共晶 Si 相 3D 形貌图^[33]
Fig.4 3D morphologies of eutectic Si with different Eu contents

金中添加 0.06% 的 La 时,可在细化 α-Al 晶粒的同时改善共晶 Si 相形貌,使伸长率从 6.7% 提高至 12.9%。JIN H N 等^[37]发现,当 Al-Mg-Si 合金中添加 0.1% 的 Ce,可获得最小的晶粒二次枝晶臂间距(25.95 μm)。

3 新能源汽车一体化压铸设备研制现状

新能源汽车大多采用冷室压铸机,是一体化压铸的核心装备,根据锁模力大小可分为小型(<4 000 kN)、中型(4 000~10 000 kN)和大型(≥10 000 kN)压铸机。由于压铸机的锁模力大小需覆盖所压部件的投影面积,故大型车身结构件如后底板、前舱架等需要锁模力至少为 60 000 kN 的压铸机,而结构件投影面积越大,所需压铸机的锁模力越大,如压铸电池托盘、中底板所需锁模力为 80 000~120 000 kN,压铸整个底盘、白车身所需的锁模力为 120 000~200 000 kN。

目前,全球具备 60 000 kN 以上超大型压铸设备生产能力的厂商为瑞士布勒、海天金属、伊之密、力劲科技及其子品牌 IDRA 等。一体化压铸用大型压铸设备的研制情况见表 3。未来新能源汽车要采用一体化压铸技术,必须大量采购超大型压铸设备,因此量产超大型一体化压铸设备仍是当前一体化压铸技术快速发展的关键壁垒之一。

表 3 一体化压铸用大型压铸设备研制现状	
Tab.3 Development status of large-scale die casting equipment for integrated die casting	
年份	压铸机研制情况
2016	伊之密 DM 2500 压铸机投入使用
2017	伊之密 HPM 45 000 kN 压铸机正式出机
2018	意德拉成功研制 55 000 kN 压铸单元 意特佩斯雷研发 TF 5600 压铸机
2019	力劲 60 000 kN 压铸机全球首发 海天金属 HDC 45 000 kN 压铸机交付使用
2021	力劲 90 000 kN 压铸机全球首发 力劲发布 60 000 kN 两板压铸机 海天金属 HDC 88 000 kN 压铸机交付使用
2022	意德拉 90 000 kN 压铸机 Giga Press 完成建造与测试 伊之密 LEAP 70 000 kN 压铸机完成开发

4 总结与展望

(1)新能源汽车行业的蓬勃发展为国内一体化压铸铝合金材料研发和超大型一体化压铸设备制造提供了行业发展驱动,“节能减排”与“新能源化”汽车产业的国家政策扶持为合金材料开发、工艺装备制造、汽车产业升级换代及国际市场开拓提供了稳定高效的发展前景。

(2)与传统压铸工艺相比,一体化压铸成形制造对材料、模具、工艺及装备均提出了更高的技术要求。在工艺要素方面,包括合金熔化及预处理、浇注凝固方式、

喷涂与脱模工艺、高真空压铸装备等提出了更高的技术要求;在生产要素方面,对压射比压、充型速度、充型时间、保压时间与加压凝固参数控制方面提出了更为苛刻的生产控制要求;在模具生产制造方面,除对模具强度与塑韧性提出更高的技术指标外,还对模具表面质量、抗热裂、抗高温氧化及使用寿命等方面提出了更高的要求;在超大型压铸装备方面,为满足未来一体化压铸件在新能源汽车行业的快速普及,实现超大型压铸装备的低成本、高精度、长寿命设计开发与量产制造仍将是未来新能源汽车行业的关注热点。

(3)当前用于一体化压铸免热处理制造的轻质合金材料仍以 Al-Si 系与 Al-Mg 系为主,通过微合金化设计结合固溶强化与细晶强化作为其强韧化作用机理。受材料强度限制,仅可用作中等承载部件的一体化压铸制造;未来兼顾静载强度、涂挂性能、工艺性能、疲劳寿命、耐蚀性能与可回收性的压铸铝合金材料研发将会成为铝合金材料领域的研究重点。

参 考 文 献

- [1] 候世忠. 汽车用铝合金的研究与应用[J]. 铝加工, 2019(6): 8-13.
- [2] 李平, 王祝堂. 汽车压铸及铸造铝合金[J]. 轻合金加工技术, 2011, 39(12): 1-19.
- [3] 甄雯. 铝合金在汽车工业中的应用现状及展望[J]. 山东工业技术, 2014(21): 21-25.
- [4] 万里, 潘欢, 罗吉荣. 高真空压铸技术及高强韧压铸铝合金开发和应用的现状 & 前景[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(12): 939-942.
- [5] ANNA Z, FEDERICO C. SILAFONT-36, The low iron ductile die casting alloy development and applications[J]. La Metallurgia Italiana, 2007(6): 33-38.
- [6] CASAROTTO F, FRANKE A J, FRANKE R. 6-High-pressure Die-cast (HPDC) Aluminium Alloys for Automotive Applications [M]. USA: Woodhead Publishing, 2012.
- [7] 段宏强, 韩志勇, 王斌. 汽车结构件用非热处理压铸铝合金研究进展[J]. 汽车工艺与材料, 2022(5): 1-6.
- [8] 郭军辉, 张秋合, 赵玉兵, 等. 一种高强韧免热处理铝合金材料及制备方法: 中国 CN113755722A[P]. 2021-12-07.
- [9] 汪时宜, 周银鹏, 李德江, 等. 一种高韧性压铸铝合金及其制备方法: 中国, 106319306A[P]. 2017-01-11.
- [10] 朱宇, 闫锋, 万里, 等. 一种可免热处理的铝合金铸造件压力铸造制备方法: 中国, 113373351A[P]. 2021-09-10.
- [11] 刘后尧, 万里, 赖沛基, 等. 一种压力铸造用的高强韧压铸铝合金: 中国, 102796925B[P]. 2015-04-15.
- [12] 彭立明, 韩盼文, 袁灵洋, 等. 一种高强韧压铸铝合金及其制备方法: 中国, 109881056B[P]. 2020-11-06.
- [13] 李远发, 徐涛, 樊晓泽, 等. 一种高延展性非热处理压铸铝合金及其制备方法: 中国, 111378878B[P]. 2021-10-26.
- [14] 闫国庆, 林毛古, 张旭, 等. 一种非热处理高韧性压铸铝合金及其制备方法: 中国, 114150191A[P]. 2022-03-08.
- [15] YUAN L Y, HAN P W, ASGHAR G, et al. Development of high strength and toughness non-heated Al-Mg-Si alloys for high-pressure die-casting [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2021, 34(6): 845-860.

- [16] ZHU X Z, YANG H L, DONG X X, et al. The effects of varying Mg and Si levels on the microstructural inhomogeneity and eutectic Mg₂Si morphology in die-cast Al-Mg-Si alloys[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(7): 5 773-5 787.
- [17] JI S X, WATSON D, FAN Z, et al. Development of a super ductile die-cast Al-Mg-Si alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2012, A556: 824-833.
- [18] 吴晗. 高强韧压铸铝镁合金组织及力学性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [19] 陈超. 高强韧压铸 Al-Si(Mg)合金组织与性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [20] HU Z Q, WAN L, WU S S, et al. Microstructure and mechanical properties of high strength die-casting Al-Mg-Si-Mn alloy[J]. Materials & Design, 2013, 46: 451-456.
- [21] 孙景旺, 王渠东, 丁文江. 铸造 Al-Mg-Mn 合金的显微组织及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(1): 85-89.
- [22] YUAN L Y, PENG L M, HAN J, et al. Effect of Cu addition on microstructures and tensile properties of high-pressure die-casting Al-5.5Mg-0.7Mn alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(6): 1 017-1 026.
- [23] MURAYAMA M, HONO K, MIAO W F, et al. The effect of Cu additions on the precipitation kinetics in an Al-Mg-Si alloy with excess Si[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2001, A32 (2): 239-246.
- [24] JI S X, WATSON D, WANG Y, et al. Effect of Ti addition on mechanical properties of high pressure die cast Al-Mg-Si alloys[J]. Materials Science Forum, 2013, 765: 23-27.
- [25] MAO G L, TONG G Z, GAO W L, et al. The poisoning effect of Sc or Zr in grain refinement of Al-Si-Mg alloy with Al-Ti-B[J]. Materials Letters, 2021, 302: 130 428.
- [26] ZEREN M, KARAKULAK E, GÜMÜŞ S. Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al-Si-xCu alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(8): 1 698-1 702.
- [27] ZHANG P, LI Z M, LIU B L, et al. Effect of chemical compositions on tensile behaviors of high pressure die-casting alloys Al-10Si-yCu-xMn-zFe[J]. Materials Science and Engineering, 2016, A661: 198-210.
- [28] LEE J Y, LEE J M, SON K S, et al. A study on the interaction between a Sr modifier and an Al-5Ti-1B grain refiner in an Al-7Si-0.35Mg casting alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 938: 168 598.
- [29] BÖSCH D, POGATSVHER S, HUMMEL M, et al. Secondary Al-Si-Mg high-pressure die casting alloys with enhanced ductility [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2015, A46(3): 1 035-1 045.
- [30] HU R Z, GUO C, MA M L. A Study on high strength, high plasticity, non-heat treated die-cast aluminum alloy [J]. Materials, 2022, 15(1): 295-301.
- [31] YANG H L, JI S X, YANG W C, et al. Effect of Mg level on the microstructure and mechanical properties of die-cast Al-Si-Cu alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2015, A642: 340-350.
- [32] 樊振中, 袁文全, 王端志, 等. 压铸铝合金研究现状与未来发展趋势[J]. 铸造, 2020, 69(2): 159-166.
- [33] MAO F, QIAO Y F, ZHANG P, et al. Modification mechanism of rare earth eu on eutectic si in hypoeutectic Al-Si alloy[J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 16(2): 634-645.

基于响应面法的 TC21 钛合金热变形参数优化

李 鑫 张开铭 王克鲁 鲁世强
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 在热模拟试验机上对 TC21 钛合金进行了等温恒应变速率压缩试验,利用获得的流动应力数据计算了不同变形条件下的 $\ln Z$ 、变形激活能 Q 和功率耗散效率 η ,建立了这些参数对变形温度、应变速率和应变的响应面模型。绘制出 $\ln Z$ 、 Q 和 η 对变形温度、应变速率和应变之间交互作用的响应曲面,分析了 $\ln Z$ 、 Q 和 η 随这些热变形参数之间交互作用的变化规律,通过追求最低的 Q 值和 $\ln Z$ 值以及最高的 η 值对热变形参数进行了多目标可视化优化。结果表明, $\ln Z$ 和 Q 随应变速率的降低而减小, η 随应变速率的降低而增大,三者均随变形温度的增加先增大后减小。所建立的响应面模型具有较高的精度,利用该模型优化的热变形参数范围为 $860\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.001\sim 0.002\text{ s}^{-1}$,最佳变形条件为 $877\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 0.001 s^{-1} ,在该变形条件附近加工可获得球化分数较高、尺寸较小的等轴组织。

关键词 TC21 钛合金;响应面法;微观组织

中图分类号 TG146.23 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.011.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Hot Deformation Parameter Optimization of TC21 Titanium Alloy Based on Response Surface Methodology

Li Xin, Zhang Kaiming, Wang Kelu, Lu Shiqiang

(School of Aerospace Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The isothermal compression tests for TC21 titanium alloy with lamellar microstructure were carried out at constant strain rates on hot working simulator. The obtained flow stress data was utilized to calculate the $\ln Z$, deformation activation energy Q and power dissipation efficiency η under different deformation conditions, and the response surface models of parameters to deformation temperature, strain rate and strain were established. The response surfaces of $\ln Z$, Q and η to the interaction between deformation temperature, strain rate and strain were plotted, and the variation law of $\ln Z$, Q and η with the interaction between these hot deformation parameters were analyzed. By pursuing the lowest Q and Z values and the highest η value, the hot deformation parameters were optimized by multi-objective visualization. The results indicate that with strain rate decrease, the values of $\ln Z$ and Q are decreased and the value of η is increased, while all parameters are increased firstly and then decreased with deformation temperature increase. The established response surface model possesses high accuracy, and the range of hot deformation parameters optimized by the model is $860\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.001\sim 0.002\text{ s}^{-1}$. The optimal deformation condition is $877\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 0.001 s^{-1} , where the equiaxial microstructure with higher spheroidization fraction and smaller size can be achieved.

Key Words: TC21 Titanium Alloy, Response Surface Methodology, Microstructure

收稿日期:2022-12-19;修改稿收到日期:2023-02-15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51864035);江西省自然科学基金资助项目(20202ACBL204001)
第一作者简介:李鑫,男,1975 年出生,副教授,南昌(330063),E-mail:lixin572@163.com
引用格式:李鑫,张开铭,王克鲁,等. 基于响应面法的 TC21 钛合金热变形参数优化[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(11):1 478-1 484.
LI X, ZHANG K M, WANG K L, et al. Hot deformation parameter optimization of TC21 titanium alloy based on response surface methodology[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(11):1 478-1 484.

[34] MUHAMMAD A, XU C, WANG X J, et al. High strength aluminum cast alloy: A Sc modification of a standard Al-Si-Mg cast alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2014, A604: 122-126.

[35] PRACH O, TRUDONOSHYN O, RANDELZHOFFER P, et al. Effect of Zr, Cr and Sc on the Al-Mg-Si-Mn high-pressure die casting alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A759: 603-612.

[36] ZHENG Q J, ZHANG L L, JIANG H X, et al. Effect mechanisms of micro-alloying element La on microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 47: 142-151.

[37] JIN H N, SUI Y D, YANG Y, et al. Effect of Ce content on the microstructure and mechanical properties of squeeze-cast Al-5Mg-2.2Si-0.6Mn alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 1 798-1 804.

(编辑:张正贺)