

压铸铝合金研究现状与未来发展趋势

樊振中^{1,2}, 袁文全³, 王端志³, 董春雨⁴, 杨欢⁴, 陈军洲^{1,2}

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心, 北京 100095;
3. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 4. 四川航天长征装备制造有限公司, 四川成都 610100)

摘要: 介绍了压铸铝合金的特点和分类, 列举了压铸铝合金目前在汽车、电子器件等方面的典型应用, 阐述了压铸铝合金材料的组织性能与压铸技术方面的研究进展及当前压铸铝合金技术研究与产品应用的现状, 预测了压铸铝合金未来的发展方向, 也指出了需要亟待解决的问题。

关键词: 压铸铝合金; 压铸技术; 研究现状; 微观组织; 力学性能

铝是地球上蕴藏量最多的金属元素, 制成铝合金后具有密度小、比强度高、耐腐蚀佳、热稳定性好、机械加工性能好、回收再生性能稳定、回收效率高、成本低等优点。1994年3月, 奥迪在日内瓦车展上推出了第一款拥有世界上独一无二的奥迪全铝车身框架结构 (Aluminum Space Frame, ASF) 的豪华轿车Audi A8, 整车减重50%, 强度性能提升60%。2013年, 美国福特百年车型Ford GT整车采用全铝质结构, 绝大部分车身外覆盖件制造均采用铝合金超塑性成形技术, 实现了64%的全车减重。目前就全球汽车行业制造而言, 每辆汽车的铝合金平均用量均超出120 kg, 约占全车总重的10%, 以铝代钢的趋势不断增显。目前的先进制造工艺主要有: 激光焊接、液压成形、挤压铸造和高真空压铸工艺等, 广泛采用的轻量化材料包括高强度钢、铝合金、镁合金、增强塑料和复合材料等, 结构优化设计包括拓扑优化、尺寸优化、形状优化及多学科综合设计优化等^[1-3]。

与其他制造工艺相比, 压铸成形工艺生产效率高、尺寸精度高、力学性能优良、材料利用率高、批量化生产经济效益较佳。在汽车用铝合金中, 压铸铝合金与其他铸造铝合金约占80%, 加工铝材 (板、带、箔、管、棒、型、线、锻、粉、膏等) 仅占20%左右, 压铸件的用量占铸造产品总用量的70%左右, 因此压铸铝合金制品在汽车用铝中约占54%~70%。

自2009年以来, 我国汽车销量已连续10年占据世界第一, 从2009年的1 300万辆增长至2019年超2 700万辆^[4-5]。随着汽车市场竞争愈加激烈, 各制造厂商都在向高质量、高可靠性、轻量化、节能环保、低成本方向发展, 且随着汽车排放标准和国际环保政策的逐年加严, 新能源汽车已成为未来汽车领域的重点发展方向, 高强韧、高质量新能源汽车结构部件 (汽车车身、立柱、底盘、减震塔等) 也越来越多需要采用压铸成形工艺来进行制造。这些都说明, 铝合金压铸在压铸行业内占有举足轻重的地位, 是压铸行业的主流^[6-7]。

1 压铸铝合金的工艺特点

压铸铝合金除了具有较好的压铸工艺性能及较佳的力学性能外, 还需具备以下几点工艺性能: ①良好的热塑性流变性能, 在过热度不高及液、固相线温度附近应具有有良好的热塑性流变性能, 以实现复杂型腔的填充, 形成良好的铸造表面, 避免缩孔缺陷的产生; ②较小的线收缩率, 避免压铸过程产生裂纹和变形, 提高制品的

作者简介:

樊振中 (1985-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新型轻质合金材料研发与大型整体复杂构件一体化精确成形制造。电话: 010-62496400, E-mail: fanzhenzhong2010@163.com

中图分类号: TG244

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)

02-0159-08

收稿日期:

2019-06-30 收到初稿,

2019-12-03 收到修订稿。

尺寸精度；③较小的凝固温度区间，便于实现快速同时凝固，减少内部收缩孔洞等缺陷的数量；④良好的高温热强度，避免开模时产生热裂或严重变形；⑤较好的铸件/铸型界面性能，与压铸模具不发生化学反应、亲和力小，避免粘型和铸件/铸型界面发生合金化反应；⑥良好的物化性能，在高温熔融状态下不易吸气、氧化，能满足压铸过程长时间保温的需求。

2 压铸铝合金分类

按合金成分来分，压铸铝合金可分为Al-Si（Al-Si-Cu、Al-Si-Mg）、Al-Cu、Al-Mg与Al-Zn四个系列。Al-Si压铸合金因结晶温度间隔小、硅相凝固结晶潜热和比热容大、线收缩率小、且具有良好的流动性能、充型性能和较小的热裂、疏松倾向，因此应用最为广泛。Al-Cu系压铸合金虽具有较高的力学性能，但Cu元素的加入降低了材料的耐蚀性能，压铸制品使用寿命随之大幅下降，且压铸过程易产生偏析、开裂，因此应用范围较小。与Al-Si系压铸合金相比，Al-Mg系压铸合金铸造性能差、力学性能波动和壁厚效应大、压铸过程易开裂，且应力腐蚀倾向较大；Al-Zn系压铸合金虽经自然时效可获得较佳的力学性能，但其耐蚀性差、易出现热裂与应力腐蚀，使用较少。表1所示为目前常用压铸铝合金的牌号、化学成分与力学性能，其中尤以Al-Si-Cu系合金应用最为广泛，诸如AlSi9Cu3（A380）与AlSi11Cu3（ADC12）。如表1所示，压铸铝合金一般多添加Si、Cu、Mg、Mn、Fe、Ni与稀土元素。

由于Si元素的凝固潜热远大于Al元素，添加适量的Si可提高合金的工艺流动性能，降低热裂倾向，提高材料的气密性、耐蚀性与热导率，当添加25%的Si元素时，压铸合金的凝固体收缩率可降至0，可用于制造活塞等尺寸稳定性要求极高的压铸制品^[8]。Fe元素可改善脱模性能，一般添加量需 $>0.6\%$ ，过量Fe元素易形成针状或片状 β -AlFeSi相，降低合金的塑性，可在提高Fe元素添加含量的同时添加适量Mn元素（ $\leq 0.5\%$ ），改善合金的脱模性能^[9]。加入Cu元素可增强合金的耐蚀性、机械强度与导热性能，提高合金

的工艺流动性、抗蠕变性能、耐疲劳强度与机械加工性能；当Cu作为强化相固溶于铝基体或以颗粒状化合物形式存在时，合金的强度、硬度可得到明显提高，但伸长率略有下降；当Cu形成网状化合物时，合金的强度、伸长率均大幅下降。Mg元素可提高合金的耐蚀性与机械强度，粘模倾向也会随之降低，改善合金的机械加工性能。Al-Si-Cu系压铸合金材料通常还会添加0.5%~1.0%的Sm元素细化共晶硅相的尺寸，降低其二次枝晶臂间距，提高合金的强度与塑性；添加适量的Sr元素（0.02%~0.08%）可在改善共晶硅形貌的同时，实现晶粒细化，有效提高压铸合金的综合力学性能。1%~1.5%含量Ni元素的添加可提高合金的强度、硬度与耐蚀性，明显减轻合金对模具的损害^[10]。目前国内最常用的压铸铝合金A380通过提高Si、Mn与Mg含量，降低Fe、Cu含量，添加0.04%Sr与0.05%Be元素，伸长率可提高至5.0%以上。

3 压铸铝合金典型应用

压铸行业的发展与汽车行业密切相关，近年来人们对汽车的要求逐渐趋于高性能、低污染、低能耗等指标，汽车重量对燃料经济性起着决定性作用，车重每降低100 kg，油耗可减少0.7 L/100 km，轻量化设计已成为当前燃油型与新能源车辆设计最关键的指标。20世纪40年代，意大利菲亚特汽车公司研制出了铝合金气缸盖并应用到部分车型上；50年代德国一家汽车公司对低压铸造技术进行改进，生产出了复杂结构的铝合金压铸件，并开始大量生产发动机后盖、空冷缸盖等铝合金压铸件；自60年代后，由于高压压铸技术的发展，压铸铝合金在汽车中的应用大幅增加，逐步取代铸铁，奠定了现代汽车工业广泛采用铝合金压铸件的基础。目前，国内外汽车行业铝合金压铸件应用范围按使用功能分类，已用于结构件、受力件、安全件和装饰件等，主要包括以下几个方面：①动力系统：缸体、缸体盖、缸盖罩、曲轴箱、气缸盖罩盖、油底壳、活塞、泵体、泵盖、进气管、发电机壳体、发动机齿轮室、六座摇臂座、发动机各类支架等（见

表1 常见压铸铝合金的化学成分与力学性能
Table 1 Chemical composition and mechanical properties of conventional die-casting Al alloys

合金系列	GB	ASTM	JIS	主要成分	力学性能
Al-Si	YL101	A360	ADC3	AlSi10Mg (Fe)	$\sigma_b \geq 220\text{MPa}$; $\delta \geq 2.0\%$
	YL102	A413	ADC2	AlSi12 (Fe)	$\sigma_b \geq 279\text{MPa}$; $\delta \geq 2.7\%$
	YL112	A380	ADC10	AlSi9Cu3 (Fe)	$\sigma_b \geq 320\text{MPa}$; $\delta \geq 3.5\%$
Al-Si-Cu	YL113	A383	ADC12	AlSi11Cu3	$\sigma_b \geq 230\text{MPa}$; $\delta \geq 1.0\%$
	YL117	B390	ADC14	AlSi17Cu5Mg	$\sigma_b \geq 220\text{MPa}$; $\delta \geq 1.0\%$
Al-Mg	YL302	518	ADC5	AlMg5Si1	$\sigma_b \geq 220\text{MPa}$; $\delta \geq 2.0\%$

图1)；②传动系统：变速器壳体、变速器油路板、离合器壳体、换挡拨叉、变速箱支架等(见图2)；③转向系统：链条盖、齿条壳体与涡轮壳体。④底盘总成：悬置支架与横梁(见图3)；⑤车身：轮毂、骨架与装饰制品；⑥其他：减震器下端盖、压缩机支架、离合器踏板及刹车踏板等^[11]。图4所示为汽车用铝合金压铸件汇总及占比示意图。由图4可知，目前压铸铝合金已在汽车行业得到了大范围的应用^[12]。

4 压铸铝合金组织与性能

压铸时常用的压射比压从几千至几万kPa，最高可达 2×10^5 kPa，压射充型速度约为10~50 m/s，有时甚

至高达100 m/s，因此充型时间很短，一般在0.01~0.2 s之内。压铸与其他铸造工艺相比，工艺特性主要体现在“高速充型与高压凝固”。高速充型下熔体可以快速填充模具型腔，精确复制型腔的尺寸、形状以及表面特征。但高速充型过程液态金属呈紊流状态，易卷气形成孔洞缺陷，且卷入的气体被覆盖有氧化膜(厚度约 $1 \mu\text{m}$)的自由表面所包裹，显著降低合金材料的力学性能^[13]。高压下结合金属型腔的急速冷却，合金熔体可在极短时间内迅速凝固，获得组织均匀、晶粒细小的凝固组织，压铸制品近表面通常为无孔洞的表层组织，最外层是细小的树枝状 α -Al基体组织，自外向内是体积分数不断增高的Al-Si共晶体组织^[14-15]。

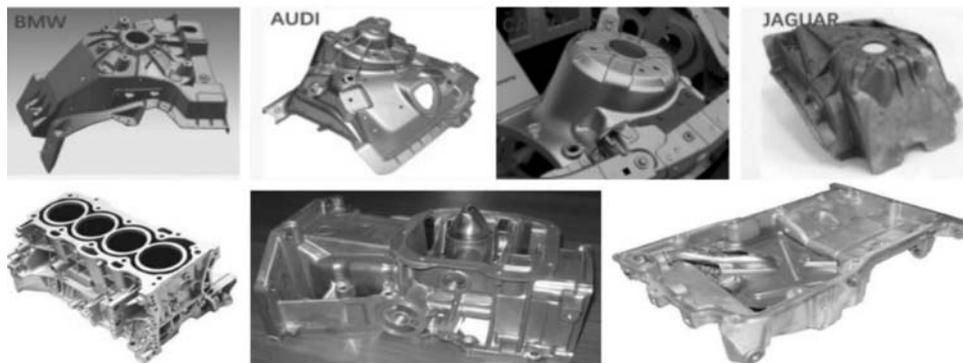


图1 铝合金汽车发动机上、下油壳体与发动机缸体
Fig. 1 Aluminum alloy engine cylinder block and upper/lower oil sump



图2 铝合金汽车后驱动器和转向器
Fig. 2 The rear actuator and steering of automobile

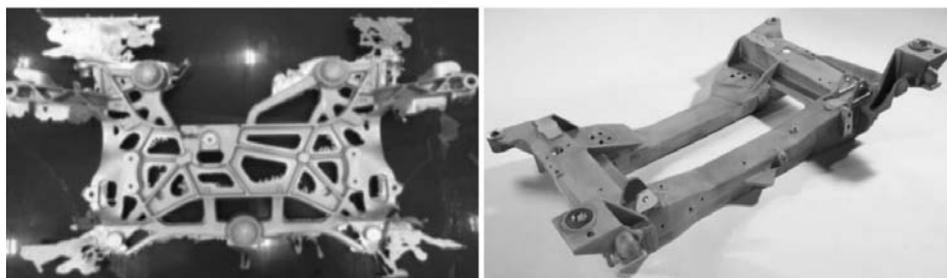


图3 压铸铝合金一体化副车架实物示意图
Fig. 3 Schematic diagram of integrated aluminum die cast sub-frame

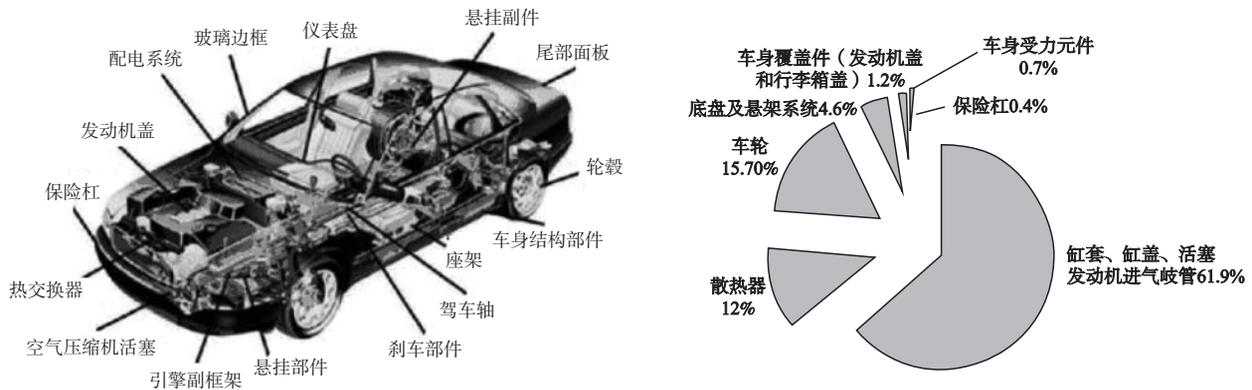


图4 汽车用铝合金压铸件汇总及占比

Fig. 4 Summary of automotive aluminum alloy die-casting parts and their proportion

对于压铸铝合金，通常可通过添加稀土元素细化合金中的初生 α -Al基体相与Si相，同时实现共晶Si相的硅相变质，提高合金材料的强度与塑韧性。稀土元素在压铸铝合金中的存在形式主要为三种，分别是固溶在 α -Al基体中、偏聚在相界、晶界和枝晶界处，以及固溶在化合物中或以化合物形式存在。添加合适含量稀土元素后，凝固时稀土元素易在固液界面前沿富集而使前沿液相的浓度梯度增大，从而产生成分过冷；当过冷度大于形核所需的临界过冷度时，就会大大提高合金的液相形核率，减小合金的二次枝晶间距，细化熔体，从而使得团簇增多变小，延长晶粒生长时间，枝晶搭接时间也随之延迟，改善合金材料的流动性能。

ADC12压铸铝合金添加1.0%Sm元素后，共晶Si相由粗大针状转变为短棒状与细小的球状组织，SDAS由51 μm 减至15 μm ，平均晶粒尺寸由90 μm 降至40 μm ，图5所示为添加不同含量Sm元素时A380压铸铝合金的微观组织。添加微量La元素经固溶时效热处理后，合金组织中的粗大块状多边形初晶硅消失，共晶硅形貌由长针状转变为短棒状且弥散分布，有害化合物形态得到改善，且固溶温度越高，有害的金属间化合物溶解越多，晶粒越细小，见图6所示。当La元素添加量在0~0.15%时，合金抗拉强度、硬度与冲击韧性随添加量的增加而连续上升，且在0.15%添加量时取得力学性能峰值；当La元素添加量超出0.15%时，易形成针状的富稀土相，恶化材料的力学性能^[16]。压铸铝硅合金中添加适量的Fe元素（>0.6%）可显著改善压铸模具的粘模现象，但当Fe元素添加含量过高时，易形成大量的 Al_3Fe 、 Al_7Fe_2 、Al-Si-Fe片状组织相，割裂 α -Al基体组织，恶化合金材料的塑韧性；当Fe元素添加量超出1.0%时，过量的Fe元素易在坩埚中产生比重偏析，压铸合金表面易形成大量硬质点，降低压

铸制品的表面质量。通常在压铸铝硅合金中添加微量（0.2~0.45%）的Ni元素，压铸制品经抛光处理即可获得光洁的表面，提高压铸产品的表面质量^[17]。在含铜和硅的压铸铝硅合金中加入 $\leq 3.0\%$ 的Zn元素，有助于改善压铸铝硅合金材料的力学性能^[14]。

Cr元素可在合金中形成大量尺寸为0.01~0.1 μm 的弥散相，抑制合金的再结晶和晶粒长大，起到晶粒细化的作用，改善合金的韧性。当Cr元素添加量在0~0.1%时随着添加量的增加，合金材料的强度和伸长率随之下降；当Cr元素添加范围在0.1%~0.2%时随着添加量的增加，合金材料的强度和伸长率不断上升，且在0.2%添加含量时取得最佳值^[16]。Mg元素添加含量一般不超过1.0%，可在合金中生成适量的 Mg_2Si 强化相，同时细化共晶Si相且不偏聚，提高合金的强度。添加微量的Sc元素可有效细化晶粒组织，大幅延长材料的低周疲劳寿命。通常在压铸铝合金中添加适量的Cu元素，可使粗大树枝晶端部发生钝化且变为细小的花朵状晶粒，合金晶粒形态发生改变，减轻合金的微观偏析。 α - Al_2Cu 金属间化合物凝固前期弥散析出可阻碍晶界迁移降低晶粒的长大速度，在快冷条件下细化枝晶组织，晶粒分布更加均匀，合金致密性随之提高，且Cu元素可显著降低合金的液相线温度，促使晶体分枝形成细的缩颈，易于产生晶体增殖，显著细化晶粒组织，图7所示为不同Cu元素添加含量时ADC12压铸铝合金的微观组织^[18]。

压铸铝合金除可通过成分设计进行力学性能优化外，针对固溶强化型的压铸铝合金还可通过调整热处理工艺参数来调控压铸合金材料的强度与塑韧性，同时结合低压速、高压力的压铸工艺参数实现合金组织的致密化，有效提高压铸制品的力学性能。对于Al-Mg系压铸铝合金，主要通过控制Fe元素含量，调整Si、Mg元素添加比例改善合金的工艺流动性、线收缩率与

热裂敏感性。上海交通大学丁文江研究团队通过调控Mg、Mn元素含量，添加少量RE元素，解决了Al-Mg-Si-Mn-Cu-Nd-La压铸合金的粘模问题，实现了合金材料的高韧性与自强化。西安理工大学张银帅研究指出，添加0.85%的Y元素可明显改善ADC12压铸合金的伸长率与冲击韧性，经520℃保温8h的T4热处理后抗拉强度可达到225 MPa，冲击韧性可达10.8 J/cm²；当Ce元素添加量为1.07%时，可明显改善ADC12压铸合金的铸造流动性能^[19]。压铸铝合金充型压射过程易卷入气体，高冷速压铸形成了较高的过饱和固溶度，选用常规热处理工艺易发生变形和鼓包，因此一般多选用低温时效热处理工艺。压铸铝合金低温时效温度一般多选择在150~175℃，随着时效时间的增加合金材料的强度连续上升，塑性不断下降，低温时效时间一般不超出12h^[20-21]。北京科技大学罗文博研究了热处理对流变压铸A356铝合金力学性能的影响，采用T51热处理

人工时效选择3h时合金强度可达290 MPa，伸长率达8.5%；当采用T6热处理人工时效1h后，合金抗拉强度与伸长率分别增至310 MPa、16.5%；随着人工时效时间的延长，当时效保温时间选择为4.5h时，抗拉强度取得峰值335 MPa，伸长率降至10.5%^[22]。

5 压铸铝合金缺陷成因与应用评价

铝合金压铸制品存在的缺陷主要是气孔缺陷，产生原因主要包括以下几类：①合金熔体纯净度不够，气体含量较高，在压铸过程保留在铸件内部；②压铸模具排气不畅产生气孔；③压铸工艺参数设置不当造成卷气产生气孔、缩孔缺陷；④产品壁厚差异过大引起气孔^[13]。为了解决压铸制品内部存在的气孔与缩孔缺陷，有效提高压铸制品的冶金质量与力学性能，国内外研究人员已提出真空压铸、半固态压铸和挤压压铸等先进技术，以获得高强、高致密性、可焊接、

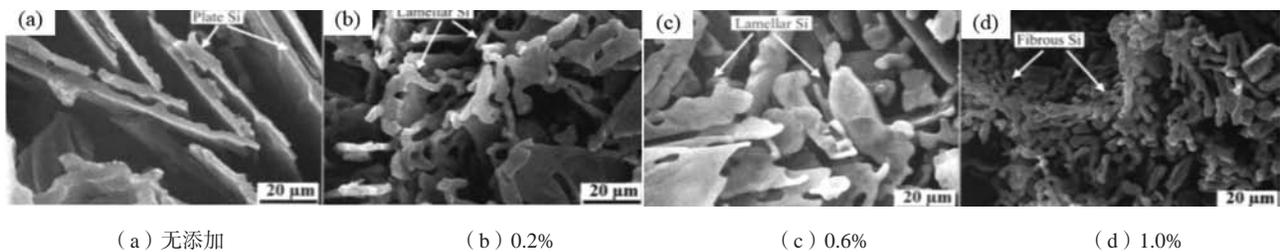


图5 不同Sm含量压铸A380合金的微观组织
Fig. 5 Microstructure of A380 die-casting alloy with varying Sm content

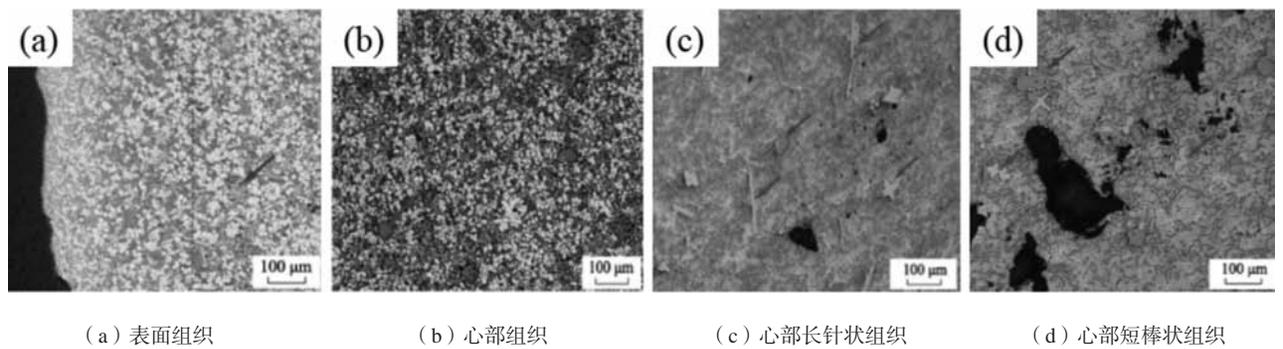


图6 La元素对压铸合金表层与心部组织硅相变质效果对比

Fig. 6 Comparison of silicon phase modification effect in the microstructures of the surface and core of La metamorphism die-casting aluminum alloy

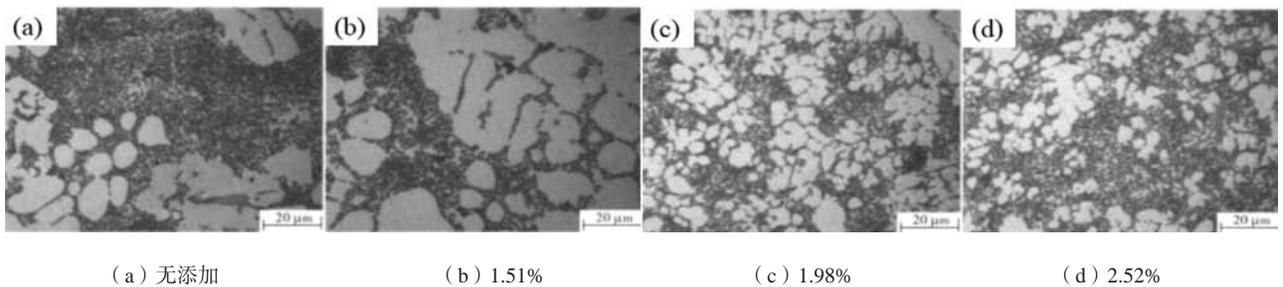


图7 不同Cu元素含量的ADC12合金材料微观组织
Fig. 7 Microstructure of ADC12 die-casting alloy with varying Cu content

热处理和扭曲的压铸制品。真空压铸是指将型腔内气体抽空或部分抽空,降低型腔内的气压,便于充型和排除熔体内的气体,从而获得致密压铸件的方法。相对于普通压铸工艺,真空压铸基体更致密、内部气孔小且分散,在固溶处理过程不易合并长大,同时氢气孔的奥斯瓦尔德熟化效应表现较弱,真空压铸工艺可有效延迟压铸制品固溶处理过程表面起泡,且起泡核心距离表面越远,核心尺寸越小及表面致密度、强度越高,表面起泡所需时间越长^[15]。目前,典型的高真空压铸工艺方法主要有德国的Vacural法、MFT (Minimum Fill Time)法和日本的Vaccum Golve Box法,近几十年来,瑞士的方达瑞压铸、德国的索尼尔和美国的哥德哈默是对该技术研究和应用比较成熟的企业^[14, 23]。目前使用高真空压铸工艺生产的铝合金汽车零部件已经得到了极大的发展,比如:AM60B镁合金汽车轮毂就是运用真空压铸工艺进行生产的,AM60B镁合金汽车方向盘就是运用真空压铸工艺在2940 kN热压室压铸机上生产的,伸长率是普通压铸镁合金方向盘的2倍以上^[1]。

采用真空压铸工艺后,铸件内部气孔率显著降低、微观组织更细小、力学性能更高,且可进行热处理强化,进一步提高压铸合金材料的强韧性。高真空压铸技术的核心是控制型腔保持在真空状态,现阶段一般采用的方法是将熔化炉与升液管和压射室连接,将熔化炉中的空气抽空在熔化炉达到真空状态时再将合金熔体填充至压射室中,当压射室实现真空条件时再进行压铸^[5]。常规压铸铝合金伸长率一般不超过4%,而选用高真空压铸制造工艺,压铸结构部件的伸长率一般可达到8%左右。自20世纪90年代以来,德国、日本等研究人员以Vacural法、MFT法或独自开发的高真空技术为基础,展开了对高真空压铸铝合金材料的研究和开发,目前,成熟应用于高真空压铸工艺的铝合金成分见表2。由表2可知:目前国外开发的适用于高真空压铸的合金材料主要为Al-Si系合金,该系合金铸造工艺性好、强度高,可用于成形制造结构形状复杂的一体化构件,其中尤以AlSi10MnMg合金的用量最为广泛,通过增加Si含量提高工艺流动性,降低Cu、Fe元素含量避免产生热裂和恶化材料力学性能,添加Ti、Sr元素进行硅相变质与晶粒细化。Niklas研究表明当AlSi10MnMg合金中的Fe含量在0.47%~0.6%时,合金强度与伸长率均随Fe含量增加而连续下降,当合金中的Mn/Fe元素比控制在2/3时,通过选用合理的热处理工艺,合金的伸长率可稳定控制在8%左右。采用高压射压力可提高充型阶段合金熔体的致密性,减少卷入性气孔的数量与尺寸,减轻铸件内部的疏松缺陷严重程度;低压铸速度可以改善模具型腔的排气效果,有效防止压室卷气,同时又避免了压室温度下降过快,

A380压铸合金在66.7 MPa压铸压力与0.1 m/s压铸速度下抗拉强度可达365 MPa,伸长率保持在4.2%^[24]。广东鸿图科技有限公司周海军等人采用超点冷技术完成了压铸模具的优化设计,减少了压铸过程卷入铸件内部的气体含量,有效改善了疏松、缩孔等冶金缺陷^[25]。结合计算机仿真计算手段,采用数值模拟对充型过程合金熔体的流速与压力分布进行预测,可对模具设计进行优化,将型腔内卷入的气体进行合理的排除;借助温度场计算结果可对高速压射过程合金熔体的凝固收缩进行精准预测,优化浇注系统,提高压铸产品的冶金质量^[26]。陕西法士特汽车有限公司传海军研究了压射速度对A380压铸铝合金性能的影响,研究指出压铸时设定适当的低压射速度对合金组织的细化有明显的提高,且能明显改变金属间化合物的形态,压铸组织更加致密,非树枝晶组织呈球态分布,可明显提高压铸制品的力学性能^[27]。对于存在严重疏松缺陷的压铸制品,可通过真空加压浸渗加以改善,即在一定条件下将浸渗剂渗透至压铸制品微孔隙中,经固化处理使渗入微孔隙中的填料与铸件孔隙内壁连成一体,堵住微孔隙,以满足压铸产品使用要求^[28]。

在高真空压铸合金材料体系选择上,与Al-Si系合金相比,选用Al-Mg系合金无需经固溶处理即可获得优良的抗拉强度与伸长率,但Mg元素的添加给合金的熔炼及压铸控制带来了一定的难度,主要用于成形制造一些对力学性能要求不高的压铸件。德国Rheinfelden Gm-bH公司开发的Magsimal-59 (AlMg5Si2Mn)高强度高真空压铸合金铸态伸长率可达15%以上,屈服强度超出120 MPa,近年来大量应用于新能源汽车行业。为避免压铸过程脱模剂高温气化油雾随液流卷入压铸产品内部,在电镀与其他表面处理过程产生铸巢气泡,可在脱模剂中添加适量的细小SiC颗粒,细化压铸制品的表层晶粒,降低晶粒间缝隙尺度,改善产品的表面质量^[29]。国内胡祖麟等通过控制Mg含量,结合时效热处理工艺参数优化对AlMg5Si2Mn合金进行了优化改进,铸态强度与伸长率可达324 MPa与8.31%,经250 °C时效1 h处理抗拉强度与伸长率高达369 MPa与8.47%,已广泛应用于汽车副车架的批量化生产^[6]。重庆大学贾从波研究了热处理对真空压铸Al-9.0Si-3.0Cu-1.2Fe-1.0Zn-0.3Mg汽车发动机缸体力学性能与微观组织的影响,指出经500 °C固溶处理,共晶硅形貌不断球化且在4 h达到最佳球化效果,随着保温时间的持续增加,共晶硅形貌分布随之恶化;经500 °C保温0.5 h固溶处理与150 °C保温5 h处理,合金材料的抗拉强度均值、抗拉强度稳定性,伸长率稳定性最高^[15]。

半固态压铸是指在一定的冷速下获得约50%甚至更高固相组分的浆料,通过压铸使浆料成形的技术,主要包括流变成形与触变成形两种工艺,国内北京有

表2 高真空压铸铝合金化学成分
Table 2 Chemical composition of high vacuum die-casting aluminum alloys

合金	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Zn	Ti	Sr	其他	Al
Silafont-36	9.5 ~ 11.5	0~0.03	0.1 ~ 0.5	0~0.15	0.5 ~ 0.8	0.1~0.5	0.04 ~ 0.15	0.01 ~ 0.015	0.1~0.25	余量
Castasil-37	8.5 ~ 10.5	0~0.05	0~0.06	0~0.15	0.35 ~ 0.6	0~0.07	0~0.15	0.006 ~ 0.025	0~0.1	余量
Aural-2	9.5 ~ 11.5	0~0.03	0.27 ~ 0.33	0~0.22	0.45 ~ 0.55	—	0~0.08	0.01 ~ 0.16	0~0.03	余量
Aural-3	9.5 ~ 11.5	0~0.03	0.4 ~ 0.6	0~0.22	0.45 ~ 0.55	—	0~0.08	0.01 ~ 0.16	0~0.03	余量
367.0	8.5 ~ 9.5	0~0.25	0.3 ~ 0.5	0~0.25	0.25 ~ 0.35	0~0.1	0~0.2	0.05 ~ 0.07	0.05~0.15	余量
368.0	8.5 ~ 9.5	0~0.25	0.1 ~ 0.3	0~0.25	0.25 ~ 0.35	0~0.1	0~0.2	0.05 ~ 0.07	0.05~0.15	余量

色研究总院、北京科技大学、清华大学等高校在坯料制备、流变学等方面开展了一部分的研究工作，目前尚未完全进入工程化生产研制^[30-35]。挤压压铸又称液态金属模压，该工艺铸件致密性好、力学性能高且无浇冒口，具有良好的工艺优势，可替代传统的压铸和真空压铸工艺，目前整体仍处于理论研究阶段^[36-38]。

6 压铸铝合金未来发展趋势

电动新能源汽车行业近年来对动力性、安全性、舒适性、轻量化等技术指标要求的不断提高，所需铝合金制品逐渐向薄壁、高强、低成本与一体化集成结

构方向发展，为压铸技术的发展提供了应用基础与源动力。近年来，铝合金压铸技术的发展总体而言，就是通过对合金材料成分进行不断优化调整，结合高真空压铸技术与热处理工艺参数调控，充分发挥合金材料的工艺特性，借助高压注射与低速充型不断提高压铸合金材料的综合力学性能。随着军民融合的不断深入，大量环筒类弹箭结构制品由于对疲劳性能要求不高，根据结构集成一体化轻量设计，可采用压铸工艺进行批量化生产研制，缩短产品的研制周期、降低其生产成本，为压铸铝合金的推广应用提供了发展基础。

参考文献:

- [1] 雷衡兵. 真空压铸铝合金副车架铸造工艺仿真与疲劳寿命研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [2] 项文杰, 佟志国. 铝合金压铸件设计要点 [J]. 工业技术, 2017 (27): 102-104.
- [3] 孙钰, 许善新, 汤杰, 等. 汽车铝合金副车架挤压铸造工艺设计和产品开发 [J]. 铸造, 2015, 64 (1): 17-21.
- [4] 王化喜, 郭丙征. 汽车压铸及铸造铝合金 [J]. 建筑论坛, 2017 (11): 1944-1944.
- [5] 刘云志, 曹帅兵. 浅析汽车压铸及铸造铝合金研究 [J]. 建筑机械, 2018 (7): 941-941.
- [6] 董显明, 蹇超. 铝合金压铸标准现状及展望 [J]. 铸造, 2017, 66 (10): 1122-1124.
- [7] 张百在, 万里, 黄志垣, 等. 大型复杂铝合金汽车动力部件的压铸技术开发 [J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29 (11): 1030-1032.
- [8] 穆妍君. 压铸铝合金中合金元素的作用及应用 [J]. 新材料, 2013 (163): 139-140.
- [9] 陈志超. 高硅压铸铝合金拔叉断裂原因分析 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (2): 96-100.
- [10] 梁涛. 压铸铝合金中合金元素的作用及应用 [J]. 硅谷, 2012 (2): 150-151.
- [11] 文浩, 罗斌, 谢达明. 压铸铝合金在汽车上的应用及发展 [J]. 世界有色金属, 2017 (7): 269-271.
- [12] 黄正华, 张银帅, 宋东福, 等. 压铸铝合金的应用及研究进展 [J]. 材料研究与应用, 2017, 11 (1): 1-5.
- [13] 董普云, 赵海东, 王芳. ADC12压铸件卷入氧化膜特征的研究 [J]. 铸造技术, 2011, 32 (8): 1139-1142.
- [14] 梁鹏. 真空压铸铝合金发动机缸体缺陷与热处理研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [15] 贾从波. 热处理对真空压铸铝合金发动机缸体组织和性能的影响研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [16] 任鑫, 谷永旭, 马琳, 等. La, Cr对压铸铝合金组织和性能的影响 [J]. 金属铸锻焊技术, 2011, 40 (5): 88-89.
- [17] 张军军, 戴悦星, 徐世光. 铁含量对压铸铝合金力学性能的影响 [C] // 2014第五届广东铝加工技术 (国际) 研讨会, 2014: 138-142.
- [18] 陆良宇, 苏勇, 胡南. 合金元素Cu及稀土La对压铸铝合金性能的影响 [J]. 材料研究与应用, 2018, 12 (4): 274-279.
- [19] 张银帅. RE对Al-Si-Cu压铸铝合金组织与性能的影响 [D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [20] 吕航. 低温时效对某些压铸铝合金性能的影响 [J]. 民营科技, 2015 (3): 46-46.
- [21] 黄彩江, 曹志成, 刘洋. 高强度压铸铝合金及其热处理的研究 [J]. 工业技术, 2015 (8): 90-91.
- [22] 陈正周, 宋朝辉, 罗文博. 热处理对流变压铸铝合金力学性能和显微组织的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2018, 28 (3): 518-527.
- [23] 王博. 铝合金压铸的发展趋势 [C] // 2016-第六届铝加工技术 (国际) 论文集, 杭州, 2016: 24-29.
- [24] 王晓梅, 程晓宇. 压铸铝合金工艺与性能研究 [J]. 铸造技术, 2012, 33 (4): 449-451.

- [25] 周海军, 常移迁, 池晓钦. 压铸铝合金汽车油壳缺陷分析与工艺改进 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (7): 58-62.
- [26] 杨诚, 杨兴国, 唐和雍, 等. 铝合金压铸件浇口夹渣的分析及改善 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (11): 1181-1183.
- [27] 傅海军. 低压射速度对A380.0压铸铝合金性能的影响 [J]. 铸造技术, 2010, 31 (5): 625-627.
- [28] 张百在, 常移迁. 浸渗技术在中大型压铸铝合金产品生产中的应用 [C]// 第八届全国铸件挽救工程会议论文集, 西安, 2011: 47-50.
- [29] 丁涛, 金琳, 陶定. 压铸铝合金表层晶粒细化的方法研究 [J]. 铸造技术, 2010, 31 (10): 1314-1316.
- [30] 王海斌. 高真空压铸技术及高强韧压铸铝合金开发和应用的现状及前景 [J]. 黑龙江科学, 2016, (7): 132-143.
- [31] 张俊超, 钟鼓, 邹纯, 等. 高真空压铸铝合金的研究进展 [J]. 材料导报, 2018, 60 (32): 375-378.
- [32] 熊礼明. 压铸铝合金车门设计与性能有限元仿真计算研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [33] SAEED FARAHANY, ALI OURDJINI, Hamid Reza Bakhsheshi-rad. Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Al-Si-Cu-Zn-X (X=Bi, Sb, Sr) die cast alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, (11): 28-38.
- [34] 蹇超, 唐志强, 王少民, 等. 提高EA211压铸铝合金缸体致密性的工艺改进 [J]. 铸造, 2018, 67 (1): 28-31.
- [35] 孙钰, 许善新, 汤杰, 等. 铝合金副车架挤压铸造工艺设计和产品开发 [J]. 铸造, 2015, 64 (1): 17-21.
- [36] 孙浩然, 赵海东, 代航, 等. Si元素对挤压铸造Al-5Mg-xSi合金微观组织的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (3): 266-270.
- [37] 徐贵宝. 数字化智能化铝合金低压金属型绿色铸造系统 [J]. 铸造, 2019, 68 (4): 347-352.
- [38] 陈国恩, 谭小明, 汪学明, 等. CAE分析在压铸铝合金过滤器品质提升中的应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (4): 394-396.

Research Status and Future Development Trend of Die Casting Aluminum Alloys

FAN Zhen-zhong^{1,2}, YUAN Wen-quan³, WANG Duan-zhi³, DONG Chun-yu⁴, YANG Huan⁴, CHEN Jun-zhou^{1,2}

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Beijing Advanced Engineering Technology and Application Research Center of Aluminum Materials, Beijing 100095, China; 3. Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China; 4. Sichuan Aerospace Changzheng Equipment Co., Ltd., Chengdu 610100, Sichuan, China)

Abstract:

The article briefly presents die-casting aluminum alloys' characteristics and classification, expounds their microstructure, mechanical properties and progress of die casting technology as well as the present status of technology research and product application of die casting aluminum alloys. Typical applications of die casting aluminum alloys to automobile and electronic equipment are listed. In the end, the direction of the future development is predicted and the problems needing urgently to be solved are put forward.

Key words:

die casting aluminum alloy; die casting technology; research status; microstructure; mechanical properties