

挤压铸造及热处理对 Al-Si 系合金组织及性能的影响进展

薛利文 周文强 朴一男 赵海冬 张梦娜 贾海龙 马品奎 宋家旺 查 敏 王慧远
(吉林大学材料科学与工程学院, 汽车材料教育部重点实验室)

摘 要 Al-Si 系合金具有良好的铸造性能和加工性能,且经过变质处理和热处理后,力学性能和抗蚀性能可进一步提高,是应用较为广泛的铸造铝合金。然而,轨道交通、航空航天等领域的快速发展对 Al-Si 系合金的强塑性能提出了更高要求。挤压铸造铝合金零部件具有各向异性弱、铸造缺陷少和力学性能好等特点,在轨道交通、航空航天等领域的应用前景广阔。对 Al-Si 系合金(半固态)挤压铸造工艺参数及热处理工艺参数对组织和性能的影响进行了归纳总结,为挤压铸造高性能 Al-Si 系合金的应用提供借鉴。

关键词 挤压铸造; Al-Si 系合金; 半固态; 热处理; 力学性能

中图分类号 TG146.21; TG249.2⁺8 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Progress in Effects of Squeeze Casting Process Parameters and Heat Treatment
on Microstructure and Properties of Al-Si Alloy

Xue Liwen, Zhou Wenqiang, Piao Yi'nan, Zhao Haidong, Zhang Mengna, Jia Hailong,
Ma Pinkui, Song Jiawang, Zha Min, Wang Huiyuan
(Key Laboratory of Automobile Materials of Ministry of Education,
School of Materials Science and Engineering, Jilin University)

Abstract: Al-Si alloys have excellent casting properties and good processing properties. After modification and heat treatments, the mechanical properties and corrosion resistance of Al-Si alloys can be further improved, which are widely used casting aluminum alloys. However, the rapid development of rail transportation and aerospace has put forward higher requirements for the performance of Al-Si alloys. Squeeze casting Al alloy parts have the advantages of weak anisotropic, fewer casting defects and good mechanical properties, etc., which have broad prospects for application in rail transportation and aerospace. The effects of (semi-solid) squeeze casting process parameters and heat treatment parameters on microstructural evolution and performance of squeeze casting Al-Si alloys were reviewed, which provided a reference for the preparation of high performance Al-Si alloys by squeeze casting in the future.

Key Words: Squeeze Casting, Al-Si Alloys, Semi-solid, Heat Treatments, Mechanical Properties

挤压铸造作为一种优质、高效的铸造成形技术,是轨道交通、航空航天等领域实现轻量化发展的重要技术手段之一^[1]。该工艺集合了传统铸造和锻造的优势,使金属液在机械压力下缓慢充满模具型腔,在高压下凝固的同时伴有微量塑性变形,可获得终形或近终形零件^[2]。相较于普通铸造,挤压铸造可制备组织更加致密的复杂铝合金铸件,并可通过热处理工艺进一步提高其力学性能。

Al-Si 系合金具有优良的铸造性能,即流动性好、收

缩小、热裂倾向小。此外,经过变质处理和热处理后,Al-Si 系合金具有优良的力学和加工性能。因此,Al-Si 系合金得到广泛的应用。其中,亚共晶 Al-Si 合金具有较高的强度和良好的塑韧性,而过共晶 Al-Si 合金具有热膨胀系数小、比强度高、耐磨性好等特点,是制造汽车活塞、汽缸体、斜盘等零件的理想材料^[3]。本课题针对 Al-Si 系合金,从挤压铸造工艺参数、(半固态)挤压铸造和热处理工艺参数等方面进行了归纳总结,为开发高性能挤压铸造 Al-Si 系合金铸件提供参考。

收稿日期:2020-10-22;修改稿收到日期:2020-11-28
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFB2006501);国家自然科学基金青年基金资助项目(52001133)
第一作者简介:薛利文,男,1994 年出生,硕士研究生,长春(130025),E-mail: xuelw20@mails.jlu.edu.cn
通信作者:贾海龙,男,1988 年出生,副教授,长春(130025),E-mail: jiahailong@jlu.edu.cn
引用格式:薛利文,周文强,朴一男,等. 挤压铸造及热处理对 Al-Si 系合金组织及性能的影响进展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):842-848.
XUE L W, ZHOU W Q, PIAO Y N, et al. Progress in effects of squeeze casting process parameters and heat treatment on microstructure and properties of Al-Si alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):842-848.

1 挤压铸造对 Al-Si 合金组织性能的影响

挤压铸造工艺参数对 Al-Si 系合金的组织性能有较大的影响,包括挤压铸造压力、铸造温度、模具预热温度、保压时间等。

1.1 挤压铸造压力

挤压铸造压力具有过冷效应,且可减少金属液中气泡尺寸甚至去除气泡,影响合金晶粒尺寸和次级枝晶臂间距^[4]。李峰等^[5]和 ABOU E L 等^[6]研究发现,适当的挤压压力可细化 Al-Si 系合金中的 α -Al 晶粒和共晶 Si。LIN C 等^[7]研究了挤压铸造压力对 Al-17Si(质量分数,%)合金组织的影响(见图 1)。结果表明,随着挤压压力增加,Al-17Si 合金中 α -Al、 β -Al₅FeSi 相和 δ -Al₄FeSi₂ 相尺寸显著减小。YU B S 等^[8]发现,随着挤压铸造压力从 0 增加到 75 MPa,合金的微观组织显著细化(枝晶臂间距从 914 μ m 减小到 313 μ m,二次枝晶间距从 39 μ m 减小到 18 μ m),共晶组织体积分数从 22.5% 增加到 41.36%,孔隙率从 4.91% 降低到 1.23%。

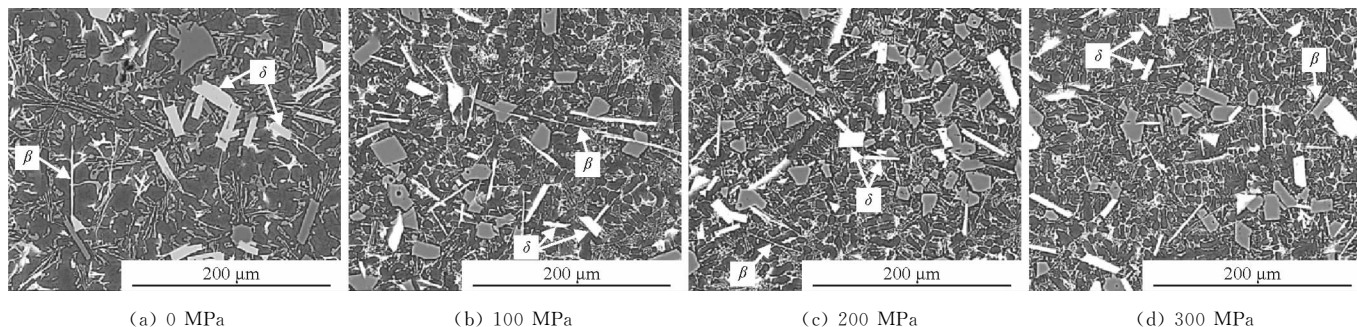


图 1 挤压铸造 HPRC Al-17Si 合金在不同压力下的显微组织^[7]

Fig.1 Microstructures of the squeezing casting HPRC Al-17Si alloys at different pressures^[7]

关常数; C_H 和 m 为 H_v 和 γ 之间的相关常数。

1.2 浇注温度和模具预热温度的影响

挤压铸造的浇注温度和模具预热温度对合金力学性能影响显著。唐全波等^[13]发现,在 700 $^{\circ}$ C 以上浇注时,液态 ADC12 合金吸气、氧化现象明显;当浇注温度低于 660 $^{\circ}$ C 时,金属液粘度小,容易挤入凸模和凹模之间的空隙中,形成飞边,增大模具间摩擦力,损伤模具。MALEKAI A 等^[14,15]的研究表明,随着熔体或模具温度下降,LM13 合金中 α -Al 相的二次枝晶臂间距和共晶 Si 颗粒的平均长宽比略有下降。LEE J 等^[16]发现,随着浇注温度升高(600~800 $^{\circ}$ C),B390 合金中初生 Si 颗粒细化,金属间化合物的形貌由骨架状变为汉字状,压缩屈服强度由 226 MPa 提高到 305 MPa。

1.3 其他影响因素

挤压铸造件壁厚等其他因素也会影响其力学性能。PASTIRČÁK R 等^[17]发现,对于 Al-12Si 和 Al-7Si-

MAHALLAWY N E 等^[9]发现,适当的挤压力能够减小 Al-7Si 合金的孔隙尺寸和缩松缺陷的体积分数。

此外,挤压力也会影响铸件的偏析和冷却速率。RØLLAND T 等^[10]发现挤压力使 Al-0.9Si 合金共晶成分中的 Si 含量高于正常平衡凝固时的 Si 含量,导致铸件中线附近有明显的宏观偏析。BARHOUMI H 等^[11]发现,冷却速率从 5 $^{\circ}$ C/min 提高至 99 $^{\circ}$ C/min 可使二次枝晶臂间距由 137.66 $\pm$ 1 μ m 降至 71.74 $\pm$ 2 μ m。BOSCHETTO A 等^[12]研究了冷却速度对挤压铸造合金的屈服强度、硬度的影响,冷却速率对挤压铸造合金晶胞尺寸及屈服强度、维氏硬度影响的计算如下。

$$\lambda = B\gamma^n \quad (1)$$

$$\sigma_Y = \sigma_0 + C_Y v^m, \text{ 其中 } \begin{cases} C_Y = K_Y B^{-1/2} \\ m = -\frac{n}{2} \end{cases} \quad (2)$$

$$H_v = H_{v_0} + C_H v^m, \text{ 其中 } C_H = K_H B^{-1/2} \quad (3)$$

式中, σ_Y 为屈服强度; H_v 为维氏硬度; σ_0 、 K_Y 、 H_{v_0} 和 K_H 为常数; λ 为平均枝晶晶胞尺寸; v 为冷却速率; B 、 n 为 λ 和 γ 之间的关系常数; C_Y 和 m 为 σ_Y 与 v 之间的相

关常数; C_H 和 m 为 H_v 和 γ 之间的相关常数。0.3Mg 合金,挤压铸造过程中铸件壁厚对合金组织和力学性能的影响不同。当铸件壁厚在 3.15~8.00 mm 范围时,对于结晶温度范围较大的 Al-7Si-0.3Mg 合金,厚度越大则压力影响熔体的时间就越长,铸件的抗拉强度和伸长率越高;而对于 Al-12Si 合金,壁厚的变化对抗拉强度和伸长率的影响并不明显。GOKHALE A M 等^[18]研究发现,挤压铸造 A356 铝合金的伸长率 δ 和断裂面上缺陷的面积分数 f 之间存在如下关系。

$$\delta = \delta_0 [1 - f]^n \quad (4)$$

式中, δ_0 为具有相同的平均微观结构和化学性质的无缺陷铸件的伸长率; n 为对应幂指数。

LEE C D^[19,20]对式(4)中 f 进行了进一步研究,发现合金的缺陷敏感性实际上取决于 Si 颗粒断裂损伤形成的不连续面积分数与微孔面积分数之和。

$$f_0 = f_1 + f_2 \quad (5)$$

式中, f_0 为材料内部缺陷的总有效面积分数; f_1 为 Si 颗

粒断裂损伤形成的不连续区域面积分数; f_2 为材料预先存在的微孔洞造成的微孔面积分数。

1.4 最佳挤压铸造工艺参数的选择

根据合金成分,铸件形状尺寸和性能要求,优化出较佳的挤压铸造工艺参数,对挤压铸造的应用和发展具有重要意义。在多因素影响下,田口法和正交试验法是选择较佳工艺参数的重要方法。HASSASI S A 等^[21]使用田口法获得了 A390 铝合金较佳的挤压铸造参数,即挤压压力为 90 MPa 时,液态合金过热温度为 100 ℃,模具预热温度为 200 ℃。SENTHIL P 等^[22]用田口

法得到 AC2A 铝合金最佳的工艺参数:挤压压力为 100 MPa,模具温度为 200 ℃,保压时间为 60 s;采用遗传算法获得的最佳工艺参数:挤压压力为 124.9 MPa,模具温度为 244 ℃,保压时间为 15 s。VIJIAN P 等^[23]发现采用田口法获得的 LM24 铝合金最佳的挤压铸造工艺参数:挤压压力为 106 MPa,模具预热温度为 150 ℃。赫英杰^[24]对挤压铸造 AC8C 铝合金支架的最佳工艺参数进行了研究,获得最佳工艺参数:浇注温度为 630 ℃,压射速度为 0.1 m/s,挤压压力为 180 MPa,模具温度为 250 ℃,保压时间为 15 s。表 1 为部分 Al-Si 合金在特定挤压铸造工艺参数下的力学性能。图 2 为 B390 合

表 1 挤压铸造 Al-Si 系铝合金的力学性能
Tab.1 Mechanical properties of squeeze casting Al-Si aluminum alloy

合金成分	熔体处理/热处理(固溶温度/℃)×(时间/h)+(时效温度/℃)×(时间/h)	(挤压力/MPa)/(浇注温度/℃)/(模具温度/℃)	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %
Al-5Si-3Cu-0.5Mg-0.02Sr ^[42]	未处理/T6(500×5+170×7)	120/720/200	—	360	4.5
Al-6Si-0.3Mg ^[6]	未处理/T6(540×4+170×32)	160/750/250	190	208	8
Al-6.5Si-0.34Mg-0.15Fe ^[43]	电磁搅拌/T6(535×5+155×12)	120/630/—	255	320	15
Al-6.5Si-0.45Mg ^[28]	熔平衡法/T6(540×3+160×9)	—	201	283	8
Al-6.5Si-0.45Mg ^[28]	未处理/T6(540×3+160×9)	—	201	257	13
Al-7.01Si-0.4Mg-0.2Fe ^[44]	未处理/T6(530×5+170×6)	100/680/—	229	287	13.6
Al-7.2Si-0.43Mg-0.19Fe ^[29]	间接超声振动/T6(530×6+170×7)	100/650/300	220	338	8
Al-9Si-1Cu-1Zn-0.45Mg-0.15Ti-0.05Ce/La-0.025Sr ^[40]	未处理/T6(530×3+180×8)	50/—/—	269.67	357.04	6.8
Al-9Si-0.85Cu-0.33Mg-0.2Fe ^[34]	未处理/T6(535×2+175×8)	135/680/250	—	350	—
Al-9.23Si-0.25Mg-0.5Mn ^[32]	气体诱导法/铸态	100/575/250	—	248.9	7.61
Al-9.23Si-0.25Mg-0.5Mn ^[32]	气体诱导法/T6(535×3+175×10)	100/575/250	—	312.6	6.65
Al-9.32Si-0.3-Mn-0.24Mg-0.2Zn-0.2Fe ^[31]	电磁搅拌/T6(535×3+175×10)	100/575/250	—	305	6
Al-10Si-2Cu-0.4Mg-0.87Zn ^[20]	未处理/T6(550×8+150×72)	60/680/200	—	263.2	1.9
Al-10Si-2.5Cu-1.38Mg ^[45]	未处理/T6(530×6+220×7)	130/680/280	—	342	4.2
Al-10.7Si-2.25Cu-0.56Mg ^[41]	未处理/T6(540×4+180×8)	—	295	426.2	6.3
Al-11.1Si-0.29Fe-0.15Zn ^[39]	未处理/T6(540×8+160×4)	70/750/250	170	292	—
Al-11.88Si-0.89Fe-Cu-1.62 0.22Mn ^[35]	气体诱导/T6(520×8+170×6)	80/680/300	—	210	—
Al-14Si-2Cu-2Fe-1Ni-0.4Mg-0.8Mn ^[33,46]	超声波振动/铸态	200/700/200	—	270	2.63
Al-17Si-1.5Fe ^[7]	超声波振动/铸态	300/650/200	—	250	0.9

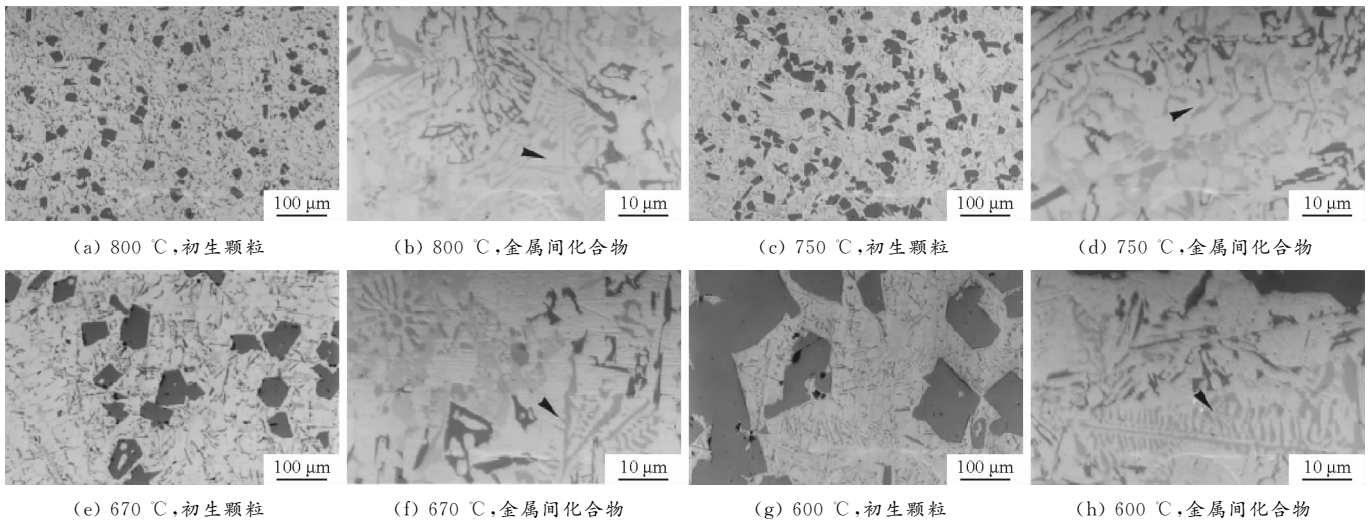


图 2 不同浇注温度下 B390 合金的显微组织^[16]

Fig.2 Microstructure of B390 alloy at different casting temperatures^[16]

金的显微组织随浇注温度的变化^[16]。

2 半固态挤压铸造 Al-Si 系合金

半固态挤压铸造是将半固态加工和挤压铸造相结合的一种加工技术。半固态挤压铸造分为两步:①在金属液凝固初期,对其进行剧烈搅拌、扰动,或通过其他方式改变初生固相的形核和生长过程,形成具有一定球形固相的金属液浆料;②将半固态浆料填充到模具中,并在压力下凝固。半固态金属熔体含气量低、夹杂少,铸件表面粗糙度低,组织致密,力学性能更好,并且可进行热处理。制备半固态合金浆料的方法有电磁搅拌法、超声波振动法、斜坡法、气体诱导法等。此外,WANG S Z 等^[25,26]还开发了近液相线挤压铸造工艺。近液相线挤压铸造工艺是在近液相线浇注温度下,不需要制备半固态浆料或坯料,就能形成球状组织。

半固态挤压铸造与常规挤压铸造的最大区别在于初生凝固组织不同。林贞^[27]研究发现,半固态挤压铸造 A319 铝合金的初生 α -Al 相呈球状均匀分布,而共晶 Si 呈细小的球形分布于 α -Al 基体中。A356.2 合金半固态挤压铸造显微组织为接近球状或莲座状的 Al-Si 共晶相,而在常规挤压铸造合金中为 α -Al 枝晶、Al-Si 共晶相和块状 Mg_2Si 相^[28]。LÜ S L 等^[29]研究发现,相较于传统挤压铸造,流变挤压铸造 A356 合金中 α -Al 相更加细化且共晶 Si 颗粒的分布更加均匀。流变挤压铸造 A356 合金经热处理后的抗拉强度为 338 MPa,而常规挤压铸造为 270 MPa。GUAN R G 等^[30]对振动斜坡法制备的 A356 半固态浆料进行挤压铸造,发现传统挤压铸造工艺中常见的共晶相偏析和区域偏析现象得到消除,晶粒明显细化(见图 3)。振动斜坡法半固态+挤压铸造 A356 合金的抗拉强度和伸长率分别达

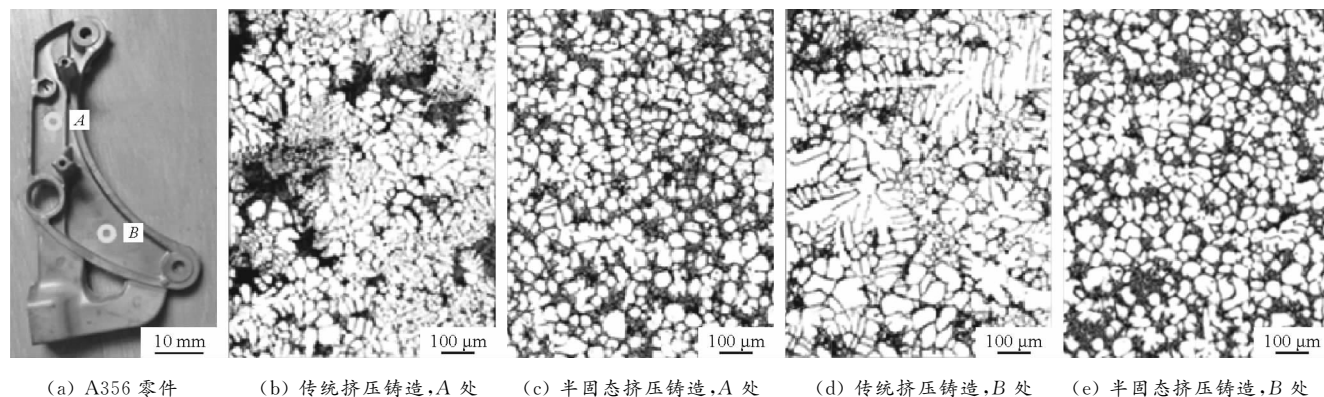


图 3 传统挤压铸造和半固态挤压铸造 A356 合金铸件的显微组织比较^[30]

Fig.3 Comparison of microstructures of A356 alloy parts produced by traditional squeeze casting and semi-solid squeeze casting^[30]

到 232 MPa 和 7%,比传统挤压铸造分别提高了 12% 和 21%。同样,对于 ZL104 合金连杆,采用振动斜坡法半固态挤压铸造法要比传统液态挤压铸造的抗拉强度和伸长率高 22% 和 17%^[31]。

DAO V L 等^[32]研究了压力、浇注温度和模具温度对半固态挤压铸造 Al-9Si-Mg 连杆组织和力学性能的影响。发现增加挤压力(25~100 MPa)会使 α -Al 晶粒的尺寸减小;浇注温度(570~580 °C)和模具温度的升高(200~300 °C),都会使 α -Al 晶粒的尺寸增大。LIN C 等^[7]发现,在相同压力下,高压流变挤压铸造 Al-17Si-1.5Fe 合金的抗拉强度比常规挤压铸造工艺提高了 4.6%。类似的,当挤压力为 300 MPa 时,与常规挤压铸造相比,半固态挤压铸造 Al-14Si-2Fe-0.8Mn 合金的抗拉强度提高 7.1%^[33]。

综上所述,半固体挤压铸造与常规挤压铸造相比,铸造合金组织更加均匀,力学性能更好。半固态浆料的制备是半固体挤压铸造的关键,因此开发稳定、高效的半固体浆料制备方法是其发展的方向。

3 挤压铸造 Al-Si 系合金的热处理工艺

3.1 固溶和时效对挤压铸造 Al-Si 合金组织的影响

固溶和时效处理会明显改善挤压铸造 Al-Si 系合金的显微组织。CHENG L 等^[28]发现,随着固溶温度升高(510~540 °C),A356.2 合金中共晶 Si 颗粒圆整度提高,同时分布更加均匀。在 540 °C 固溶 1 h 后, Mg_2Si 相完全溶解,3 h 后共晶 Si 完成球化。WEI L 等^[34]研究了热处理对挤压铸造 Al-9Si-Cu-Mg 合金组织的影响。发现在 535 °C 下进行 2 h 以上的固溶处理,可使共晶 Si 颗粒粗化和聚结(见图 4)。对于 ADC12 铝合金,在 520 °C 下进行 8 h 固溶热处理后,合金的共晶 Si 颗粒呈球形并均匀分布^[35]。赫英杰^[24]发现,固溶温度为 500 °C 时,析出相呈球状并均匀分布于基体中。固溶温度为 510 °C 时,合金出现过烧现象。

李润霞等^[36]和曹学阳^[37]研究发现,挤压铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金的时效脱溶顺序与常规铸造一致,顺序

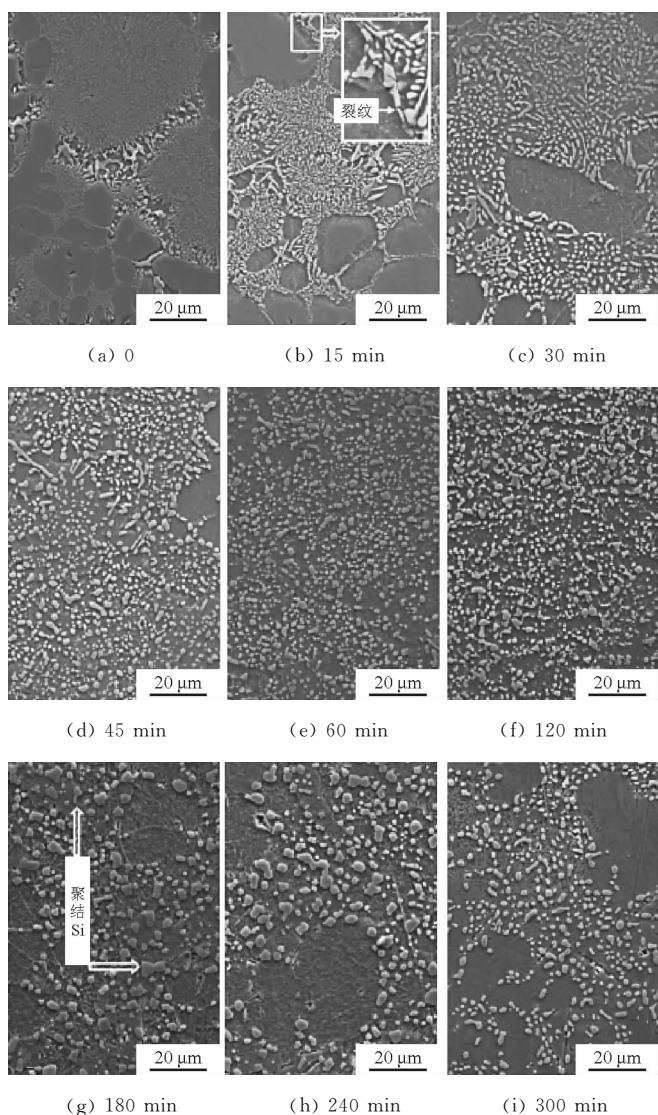


图 4 Al-9Si-Cu-Mg 合金中共晶 Si 在不同固溶处理时间下的形貌^[34]

Fig.4 Morphology of eutectic Si in Al-9Si-Cu-Mg alloy under different solution treatments^[34]

为: $\alpha_{ss} \rightarrow \text{G.P.区}$ 的形成 $\rightarrow \text{G.P.区的溶解} \rightarrow \theta'$ 的形成 $\rightarrow \theta$ 的形成, $\alpha_{ss} \rightarrow Q'$ 的形成 $\rightarrow Q$ 的形成。王玉柱^[38]对 A356 铝合金进行了双级时效处理,结果表明,一级低温时效处理形成的 G.P.区,可为后续的二级时效处理提供形核条件。但是,若时效时间过长,析出相颗粒开始积聚并长大,会发生过时效现象^[24]。

3.2 固溶和时效对挤压铸造 Al-Si 合金力学性能的影响

固溶和时效热处理会在一定程度上提高挤压铸造 Al-Si 系合金的力学性能。T6 态挤压铸造 Al-11Si 合金,由于球状共晶 Si 颗粒和破碎的 β 相颗粒均匀分布于铝基体中,其屈服强度由 121 MPa 提高至 170 MPa,抗拉强度由 231.2 MPa 提高至 292 MPa,伸长率由 6.8% 提高至 11%^[39]。挤压铸造 Al-7.35Si-0.45Mg-0.14Ti 合金经 T6 热处理后,抗拉强度提高了 12.23%,

伸长率提高了 5.4%^[40]。LIU H J 等^[41]发现,当 Cu、Mg 质量比为 4 时,与挤压铸造态相比,T6 态挤压铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金的抗拉强度由 340 MPa 提高至 426.2 MPa,屈服强度由 225 MPa 提高至 295 MPa,伸长率由 3.1% 增至 6.3% [见图 5,其中 M1 为 $w(\text{Cu})/w(\text{Mg})=1$,M2 为 $w(\text{Cu})/w(\text{Mg})=2$,M3 为 $w(\text{Cu})/w(\text{Mg})=4$]。部分挤压铸造 Al-Si 合金在特定 T6 热处理工艺条件下的力学性能见表 1。

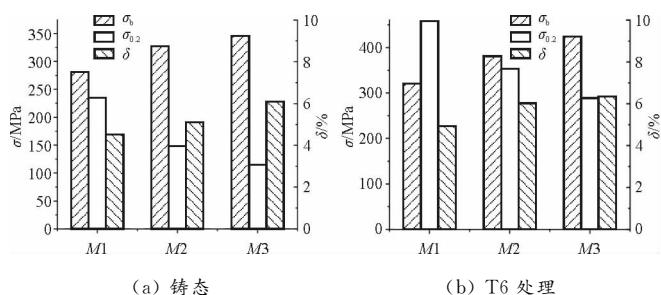


图 5 M1、M2 和 M3 合金的力学性能^[41]

Fig.5 Mechanical properties of M1, M2 and M3 alloys^[41]

AKHIL M G 等^[42]和 LEE C D^[20]发现,与重力铸造相比,挤压铸造 Al-5Si-3Cu 合金达到时效峰值所需的时间缩短(挤压铸造合金为 7 h,重力铸造为 12 h)。同样,曹学阳^[37]研究发现,挤压铸造 A354 合金固溶时效时间缩短,使生产周期加快。

4 结语与展望

高强塑铝合金是轨道交通、航空航天等领域的实现轻量化的重要材料。挤压铸造是制备高性能零部件的有效技术手段,具有广阔的应用前景。Al-Si 系合金(半固态)挤压铸造技术的发展可以从以下几个方面开展。

(1) 挤压铸造工艺参数对 Al-Si 系合金的生产至关重要。挤压压力是挤压铸造工艺的重要参数,而不同合金体系对浇注温度和模具温度的要求也不尽相同,同时模具壁厚等其他生产因素也会对合金性能有着显著的影响。因此,根据 Al-Si 系合金的具体成分,探究最佳的挤压铸造工艺参数,对 Al-Si 系合金实际生产具有重要意义。

(2) 与常规挤压铸造相比,半固态挤压铸造组织更加均匀,力学性能更好,而半固态合金浆料的制备是半固态挤压铸造技术的关键,开发稳定、高效的半固态浆料制备方法是未来发展的方向。

(3) 挤压铸造 Al-Si 系合金在合适的热处理后,组织更加均匀,力学性能更加优异。所以,根据合金成分,优化固溶温度和时间,以及相应的时效温度和时间,同时兼顾能耗与时间成本,对挤压铸造 Al-Si 系合金的进一步应用和发展有着重要意义。

参 考 文 献

- [1] GHOMASHCHI M R, VIKHROV A. Squeeze casting: an overview[J]. J. Mater. Process. Technol., 2000, 101(1): 1-9.
- [2] LI Y Y, ZHANG W W, ZHAO H D, et al. Research progress on squeeze casting in China[J]. China Foundry, 2014, 11(4): 239-246.
- [3] 武玉英, 刘相法, 戴勇. 硅相形态及含量对 Al-Si 合金线膨胀系数的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(5): 688-692.
- [4] DHANASHEKAR M, KUMAR V S. Squeeze casting of aluminum metal matrix composites-An overview[J]. Procedia Engineering, 2014, 97: 412-420.
- [5] 李峰, 刘向东, 王文印. 挤压铸造对 A356 铝合金组织的影响[J]. 铸造, 2008, 59(4): 347-349.
- [6] ABOU E L, KHAIR M. Microstructure characterization and tensile properties of squeeze-cast AlSiMg alloys[J]. Materials Letters, 2005, 59(8-9): 894-900.
- [7] LIN C, WU S S, LÜ S L, et al. Effects of high-pressure rheo-squeeze casting on the Fe-rich phases and mechanical properties of Al-17Si-(1, 1.5) Fe alloys[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2018, 25(9): 1 018-1 026.
- [8] YU B S, XING S M. Effect of the pressure on microstructure of A380 aluminum alloy prepared by squeeze casting[J]. Key Engineering Materials, 2017: 59-62.
- [9] MAHALLAWY N E, TAHA M, ZAMZAM M L. On the microstructure and mechanical properties of squeeze-cast Al-7% Si alloy[J]. J. Mater. Process. Technol., 1994, 40(1-2): 73-85.
- [10] RÖLLAND T, SCHMIDT R, ARNBERG L, et al. Macrosegregation in indirectly squeeze cast Al-0.9Si[J]. Materials Science and Engineering, 1996, A212(2): 235-241.
- [11] BARHOUMI H, SOUISSI S, AMAR M B, et al. Study on the effect of pressure and cooling rate on the solidification Characteristics and mechanical properties of Al-11Si cast alloy[J]. J. Mater. Environ. Sci., 2019, 10(8): 696-705
- [12] BOSCHETTO A, COSTANZA G, QUADRINI F, et al. Cooling rate inference in aluminum alloy squeeze casting[J]. Materials Letters, 2007, 61(14-15): 2 969-2 972.
- [13] 唐全波, 杜力. 铝合金连杆的液态模锻成形工艺[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(3): 12-15.
- [14] MALEKI A, SHAFYEI A, NIROUMAND B. Effects of squeeze casting parameters on the microstructure of LM13 alloy[J]. J. Mater. Process. Technol., 2009, 209(8): 3 790-3 797.
- [15] MALEKI A, NIROUMAND B, SHAFYEI A. Effects of squeeze casting parameters on density, macrostructure and hardness of LM13 alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2006, A428(1-2): 135-140.
- [16] LEE J, WON C, CHO S, et al. Effects of melt flow and temperature on the macro and microstructure of scroll compressor in direct squeeze casting[J]. Materials Science and Engineering, 2000, A281(1-2): 8-16.
- [17] PASTIRČÁK R, BRŮNA M, BOLIBRUCHOVÁ D. The influence of different wall thicknesses of the casting in the direct squeeze casting[J]. Archives of Foundry Engineering, 2019, 19(1): 19-24.
- [18] GOKHALE A M, PATEL G R. Quantitative fractographic analysis of variability in tensile ductility of a squeeze cast Al-Si-Mg base alloy[J]. Mater. Charact., 2005, 54(1): 13-20.
- [19] LEE C D. Effect of damage evolution of Si particles on the variability of the tensile ductility of squeeze-cast Al-10Si-2Cu-0.4Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2010, A527(13-14): 3 144-3 150.
- [20] LEE C D. Variability in the tensile properties of squeeze-cast Al-Si-Cu-Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2008, A488(1-2): 296-302.
- [21] HASSASI S A, ABBASI M, HOSSEINIPOUR S J. Parametric investigation of squeeze casting process on the microstructure characteristics and mechanical properties of A390 aluminum alloy[J]. International Journal of Metalcasting, 2019, 14(1): 69-83.
- [22] SENTHIL P, AMIRTHAGADESWARAN K S. Experimental study and squeeze casting process optimization for high quality AC2A aluminium alloy castings[J]. Arab J. Sci. Eng., 2013, 39(3): 2 215-2 225.
- [23] VIJIAN P, ARUNACHALAM V P. Optimization of squeeze casting process parameters using Taguchi analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 33(11-12): 1 122-1 127.
- [24] 赫英杰. 挤压铸造 AC8C 铝合金支架开发研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [25] WANG S Z, JI Z S, SUGIYAMA S, et al. Formation and growth mechanism of globular crystal of ADC12 aluminum alloy by near-liquidus squeeze casting[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015(6): 1-9.
- [26] WANG S Z, JI Z S, SUGIYAMA S, et al. Segregation behavior of ADC12 alloy differential support formed by near-liquidus squeeze casting[J]. Materials & Design, 2015, 65: 591-599.
- [27] 林贞. 半固态挤压铸造 A319 铝合金热处理特性的研究[D]. 福州: 福州大学, 2015.
- [28] CHENG L, LU H X, ZHU Q, et al. Evolution of microstructure and mechanical properties of semi-solid squeeze cast A356.2 aluminum alloy during heat treatment[J]. Solid State Phenomena, 2019, 285: 139-145.
- [29] LÜ S L, WU S S, DAI W, et al. The indirect ultrasonic vibration process for rheo-squeeze casting of A356 aluminum alloy[J]. J. Mater. Process. Technol., 2012, 212(6): 1 281-1 287.
- [30] GUAN R G, ZHAO Z Y, LI Y D, et al. Microstructure and properties of squeeze cast A356 alloy processed with a vibrating slope[J]. J. Mater. Process Technol., 2016, 229(6): 514-519.
- [31] WANG Y F, ZHAO S D, ZHANG C Y. Microstructures and mechanical properties of semi-solid squeeze casting ZL104 connecting rod[J]. Trans. Nonferrous Metal Soc. China, 2018, 28(2): 235-243.
- [32] DAO V L, ZHAO S D, LIN W, et al. Effect of process parameters on microstructure and mechanical properties in AlSi9Mg connecting-rod fabricated by semi-solid squeeze casting[J]. Materials Science and Engineering, 2012, A558: 95-102.
- [33] LIN C D, WU S S, LÜ S L, et al. Influence of high pressure and manganese addition on Fe-rich phases and mechanical properties of

- hypereutectic Al-Si alloy with rheo-squeeze casting[J]. Trans. Nonferrous Metal Soc. China, 2019, 29(2): 253-262.
- [34] WEI L, HAN B, YE F, et al. Effects of solidification pressure and heat treatment on the microstructure and micro-hardness of AlSi9CuMg alloy[J]. Materials, 2019, 12(14): 1-12.
- [35] CANYOOK R, UTAKRUT R, WONGNICHAKORN C, et al. The effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of rheocasting ADC12 aluminum alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(3): 9 476-9 482.
- [36] 李润霞, 李荣德, 杨秀英. 高强度铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金时效特性的研究[J]. 铸造, 2003(6): 390-394.
- [37] 曹学阳. 挤压铸造 A354 铝合金固定夹热处理工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [38] 王玉柱. A356 铝合金轮毂热处理工艺及冲击失效分析研究[D]. 河北秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [39] BARHOUMI H, SOUISSI S, BEN AMAR M, et al. Investigation of the microstructure and mechanical properties of squeeze cast Al-11Si alloy heat treated[J]. Kovove Mater., 2016, 54: 249-256.
- [40] 张东城. 高强韧铝硅合金的挤压铸造组织和性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [41] LIU H J, LI L J, NIU J W, et al. Effect of Mg and Cu additions on microstructure and mechanical properties of squeeze casting Al-Si-Cu-Mg alloy[J]. Materials Science Forum, 2016: 511-518.
- [42] AKHIL M G, PREENU S, HARI S, et al. Effect of heat treatment on the mechanical properties of squeeze-cast Al-5Si-3Cu alloy for automotive applications[J]. Trans. Indian Inst. Met., 2019, 72(5): 1 129-1 132.
- [43] MAO W M, ZHENG Q, ZHU D P. Rheo-squeeze casting of semi-solid A356 aluminum alloy slurry[J]. Trans. Nonferrous Metal Soc. China, 2010, 20(9): 1 769-1 773.
- [44] LEE K, KWON Y N, LEE S. Effects of eutectic silicon particles on tensile properties and fracture toughness of A356 aluminum alloys fabricated by low-pressure-casting, casting-forging, and squeeze-casting processes[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 461(1-2): 532-541.
- [45] 徐松, 吉泽升, 许红雨. 镁含量对挤压铸造 Al-10Si-2.5Cu-xMg 合金显微组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(4): 10-14.
- [46] LIN C, WU S S, LÜ S L. Effects of high pressure on Fe-rich phases and mechanical properties of Al-14Si alloys with rheo-squeeze casting[J]. Solid State Phenomena, 2019: 57-62.

(编辑: 张正贺)

对标国际先进标准, 伊之密发布全新 LEAP 系列压铸机

7月6日, LEAP系列压铸机新品发布会在上海卓美亚酒店举行。本次活动涵盖了新品发布会、圆桌论坛等诸多精彩活动。发布会上, 伊之密董事总经理甄荣辉提到, 在全球化的浪潮中, 伊之密立足中国、放眼世界, 经过近二十年的苦心经营, 在注塑机、压铸机等传统领域跃居国内前列。在汽车上游产业, 伊之密围绕金属材料和高分子材料成型提供解决方案, 亦取得了不俗成绩。

在分析压铸行业将要面临的挑战, 以及介绍伊之密近年来的发展历程之余, 甄荣辉还给伊之密压铸机定了一个战略目标——成为世界级压铸机品牌。

"成为世界级的压铸机品牌, 需要具备……"在发布会上, 伊之密压铸及金属成型首席战略官史蒂芬·费睿泽分析了当前压铸行业的市场趋势。同时, 他指出, 伊之密的目标是让使用伊之密机器的客户获得更高的设备综合效率(OEE), 拥有较高的市场竞争力。

为此, 伊之密积极与国际伙伴、行业专家合作提供世界一流水平的产品的同时, 还改变了产品开发方式, 通过 IPD 研发流程着重了解客户的需求、痛点和实现关键指标, 以得出解决方案。

作为压铸和自动化解决方案提供者, 伊之密积极部署, 明确了组织和产品开发的4个重点领域: 智能机器、智能单元、智能生产、智能服务。通过不断打破技术与产品边界, 为成为世界级压铸机品牌做好准备。

在发布会上, 压铸机产品与市场管理部经理王博解读了产品的核心性能及亮点。他指出, 新推出的 LEAP 系列压铸机采用全封闭式钣金设计, 相比传统压铸机外观有很大的提升。

自主研发的 Yi—cast 压射系统, 对标国际知名品牌压铸机性能, 全面满足铝合金、镁合金和半固态压铸工艺的要求, 适用于发动机缸体、变速箱壳体、结构件等复杂零件的生产。

全系列机器的最大空压射速度可以达到 10 m/s, 而且全系列机器的加速度大于 50 g, 以 1250T 机型为例, 它的加速度可以达到 60 g 以上, 适合需要高填充速度的零件, 比如结构件, 大型 5G 通讯件等。它的低速性能可以达到 0.02 m/s, 适合于半固态等工艺; 它的增压性能可以达到 20 ms 以内, 完全满足汽车动力总成类零件的要求, 比如说发动机缸体、变速箱壳体等。

LEAP 系列创新的伺服+补偿驱动系统, 可以在开合模的时候, 伺服泵的转速可以达到 3 000 转, 补偿泵为伺服系统供油, 确保伺服泵可以提供大的油量给系统进行开合模。此外, 控制系统 ORCA, 可以轻松有效地管理关键生产参数, 实现压射工艺过程的数字化, 从而提升机器的使用效率和工艺质量。

(伊之密供稿)