

挤压铸造 Al-Si 系合金成分优化、孕育变质及其复合材料的 研究进展

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 系合金具有铸造流动性和耐腐蚀性良好、比强度高以及热膨胀系数低的特点而广泛应用。随着汽车、航空航天等领域轻量化发展,对 Al-Si 系合金的强塑性提出了更高要求。挤压铸造铝合金可成形复杂薄壁铸件,且其组织致密、表面品质高、力学性能好,在汽车、航空航天等领域有着广阔的应用前景。针对挤压铸造合金元素、孕育变质剂对 Al-Si 系合金组织和性能的影响以及挤压铸造铝基复合材料进行了归纳总结,为挤压铸造制备高性能 Al-Si 系合金提供参考。

关键词 挤压铸造; Al-Si 系合金; 合金元素; 孕育变质; 组织性能

中图分类号 TG146.21; TG249.2; TB331 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.01.005 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Research Progress in Composition Optimization, Inoculation Modification and Composites of Squeeze Casting 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 the advantages of good fluidity, corrosion resistance, high specific strength, and low thermal expansion coefficient, which are widely used in cast aluminum alloys. Due to the development demand for lightweight in the automobile field, the higher requirements were put forward for the improvement of strength and ductility of Al-Si alloys. Squeeze casting can produce complex thin-walled aluminum alloy castings with compact structures, high surface quality, and good mechanical properties, showing a broad application prospect in the field of automobile parts. The effects of alloying elements, inoculation modification on microstructure evolution and performance of squeeze casting Al-Si alloy composites were reviewed, which provide a reference for the preparation of high performance Al-Si alloy by squeeze casting in the future.

Key Words: Squeeze Casting, Al-Si Alloys, Alloying Elements, Inoculation Modification, Mechanical Properties

挤压铸造过程中合金液在一定压力和相对低速下充型,得到的铸件气孔率低、组织致密,同时伴有微量塑性变形^[1,2]。挤压铸造可制备形状复杂、强韧性较高的终形或近终形薄壁铝合金铸件,在汽车、航空航天领域具备广阔的应用前景。

Al-Si 系合金的铸造性能良好、比强度高、耐磨性好、可热处理、成本低,是研究最早、开发种类最多、应用范围最广合金之一。Al-Si 系合金中, Si 质量分数为 2%~12.6% 的亚共晶 Al-Si 合金具有高的强度和较高的塑韧性,而 Si 含量高于 12.6% 的过共晶 Al-Si 合金则

具有抗压性能好、耐磨性能强、热膨胀系数低等特点,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 系合金及其复合材料,从合金成分设计及孕育变质剂等方面进行归纳总结,为开发高性能挤压铸造 Al-Si 系合金提供参考。

1 合金元素对 Al-Si 系合金组织及性能的影响

1.1 Si 元素的影响

挤压铸造 Al-Si 系合金主要类型有:亚共晶 Al-

收稿日期:2021-07-18;修改稿收到日期:2021-08-20
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 Al-Si 系合金成分优化、孕育变质及其复合材料的研究进展[J].特种铸造及有色合金,2022,42(1):22-31.
XUE L W, ZHOU W Q, PIAO Y N, et al. Research progress in composition optimization, inoculation modification and composites of squeeze casting Al-Si alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(1):22-31.

(4~8)Si 系(I)、共晶 Al-(9~13)Si 系(II)和过共晶 Al-(14~22)Si 系(III)。

图 1 为 Al-Si 系合金的力学性能。可以看出,Al-(4~8)Si 系挤压铸造合金的抗拉强度略低于 Al-(9~

13)Si 系合金,而伸长率明显高于 Al-(9~13)Si 系合金;Al-(9~13)Si 系合金,抗拉强度达到 287 MPa,伸长率为 5.3%;过共晶 Al-(14~22)Si 系合金的抗拉强度只有 183 MPa,平均伸长率为 3.2%。造成上述现象的原因是,随着 Si 含量(<12.6%)增加,合金中共晶 Si 含量增加,挤压铸造压力使得其在基体中均匀分布,从而改善了合金的强度^[4];当 Si 含量继续增加(>12.6%)时,合金中初生 Si 的数量开始增加,合金耐磨性提高的同时强度和塑性开始下降^[5]。

1.2 Mg 和 Cu 的影响

Mg、Cu 对 Al-Si 系合金的组织 and 力学性能有明显影响。徐松等^[26]研究发现,随着 Mg 含量从 1% 增加到 2%,挤压铸造 Al-10Si-2.5Cu-xMg 合金中共晶 Si 相的形貌由针条片状转变为细小颗粒状。当 Mg 含量为 1.5% 时,合金的抗拉强度达到最大值(约 290 MPa)。JIANG B 等^[27]也得到相似的研究结果,即随着 Mg 含量(0.2%~2.6%)增加,挤压铸造 Al-10Si-2.5Cu-0.8Fe-xMg 合金中共晶 Si 的形貌由片状转变为纤维状,富 Fe 相由棒状变为细小片状,再转变到棒状;当 Mg 含量为 1.38% 时,合金的抗拉强度达到最大值 289 MPa,其组织演变见图 2。

LIU H J 等^[28]研究发现当 Cu 含量为 2.25%,且

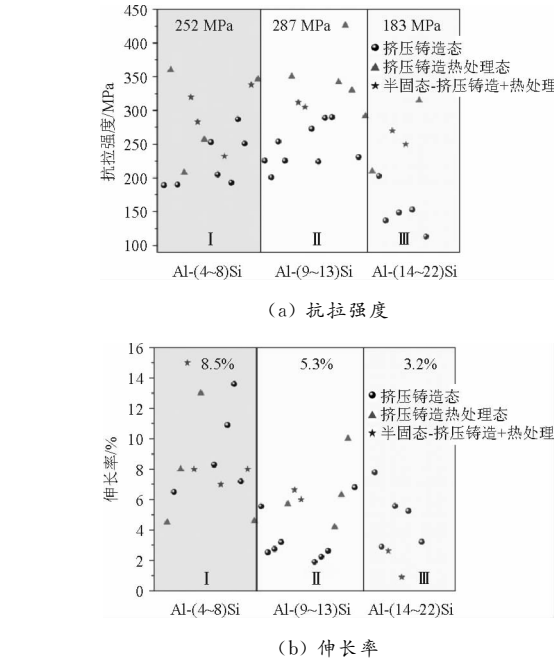


图 1 Al-Si 系合金力学性能统计^[4~36]

Fig.1 Statistics of mechanical properties of Al-Si alloy^[4~36]

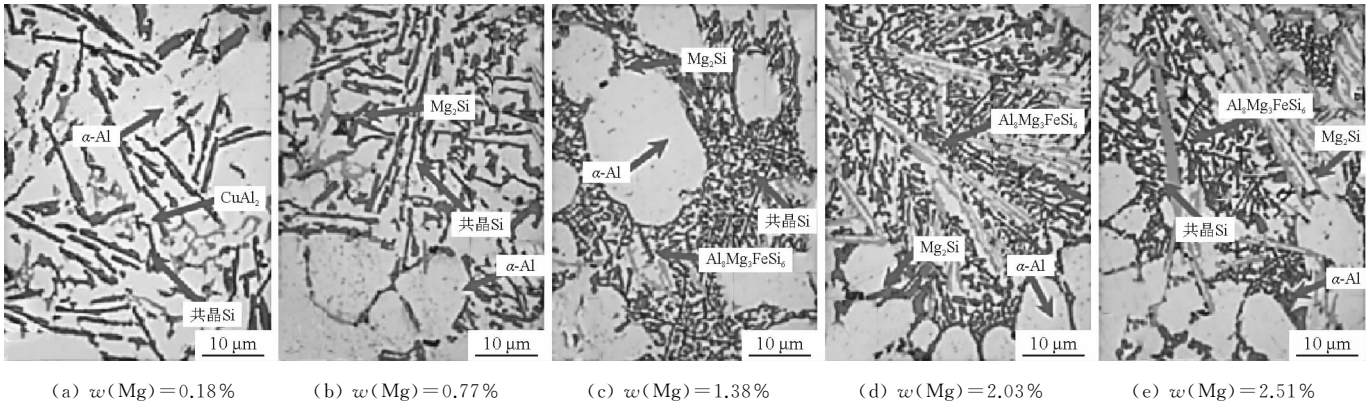


图 2 挤压铸造 Al-10Si-2.5Cu-0.8Fe-xMg 合金光镜(OM)组织^[27]

Fig.2 OM images of the squeeze casting Al-10Si-2.5Cu-0.8Fe-xMg alloys^[27]

$w(\text{Cu})/w(\text{Mg})$ 为 4 时,热处理态挤压铸造 Al-10.7Si-2.25Cu-0.56Mg 合金中强化相由 $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ 变为 Mg_2Si 、 $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ 和 $Q\text{-Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 相,其抗拉强度增至 426 MPa。LIN C 等^[33~35]研究发现,添加 Cu、Mg 后,挤压铸造 Al-17Si-2Cu-0.4Mg-1.5Fe 合金的抗拉强度为 225 MPa,比挤压铸造 Al-17Si 合金的抗拉强度提高了 47%。MAENG D 等^[36]进一步添加 Cu、Mg 后,发现挤压铸造 Al-17.48Si-4.25Cu-0.6Mg 的抗拉强度可达 315 MPa。因此,加入适量的 Cu 和 Mg,可以显著改善合金的力学性能。

1.3 Ce、Sc 和 Ni 的影响

AO X H 等^[18]探究了 Ce 对挤压铸造 A380 合金中共晶 Si 及其力学性能的影响。发现当比压为 100 MPa、Ce 含量在 0.1%~0.5% 内时,其改性效果明显,共晶 Si 平均长度从 24.82 μm 减小到 10.87 μm ,且 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Ce}$ 相数量的增加使合金抗拉强度从 210 MPa 增加至 254 MPa。CHANYATHUNYAROJ K 等^[14]研究发现,当 Fe 含量低于 0.2%、Sc 含量为 0.2% 时,Al-7Si-0.3Mg-Fe 合金中可形成少量小而圆的富 Sc 的金属间化合物,且共晶 Si 变得细小,从而使合金硬度、屈服

强度和抗拉强度提高的同时又能保持良好的伸长率。当 Sc 含量为 0.4% 时,富 Sc 的金属间化合物数量增加,合金伸长率下降,其组织形貌见图 3。FANG L 等^[19]

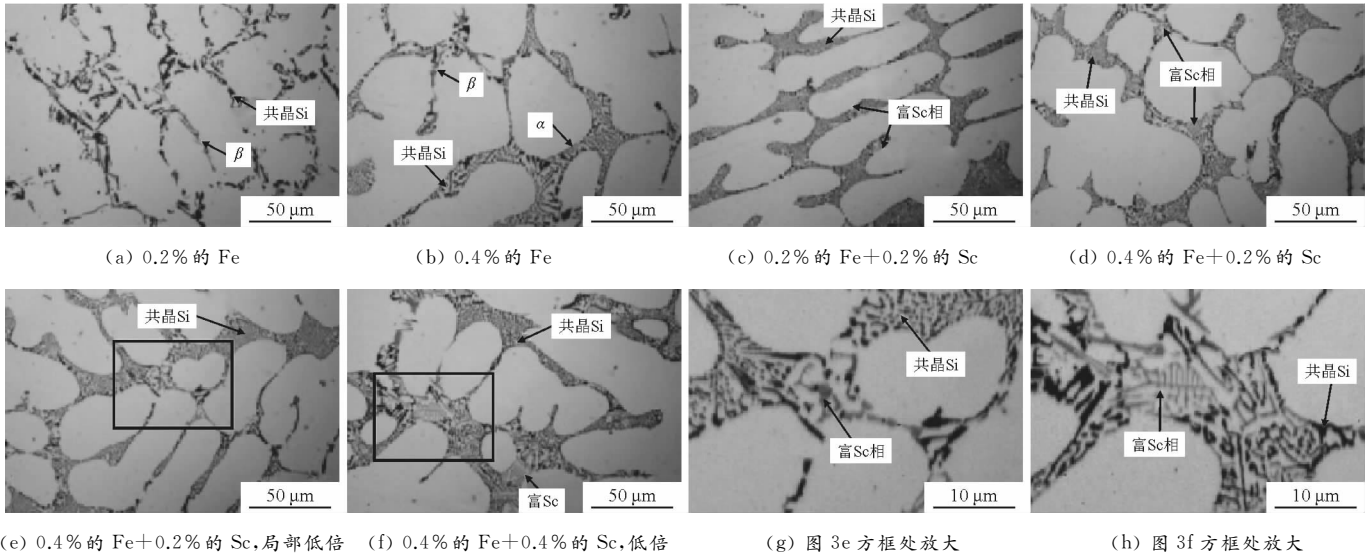


图 3 挤压铸造 Al-7Si-0.3Mg-xFe-ySc 合金光学(OM)组织^[14]
Fig.3 OM images of the squeeze casting Al-7Si-0.3Mg-xFe-ySc alloys^[14]

2 熔体处理及孕育变质对 Al-Si 系合金组织及性能影响

2.1 熔体处理

常见的熔体净化方法有熔剂法、浮游法和过滤法。万兵兵^[37]开发了一种新型的铝合金精炼剂(NaCl-KClKF-AlF₃-K₃AlF₆-KAIF₄),可使 ADC12 铝合金熔体除氢率达 79.31%,氧含量由 16×10⁻⁴% 下降至 3×10⁻⁴%,残渣降低率达 97.68%。沈刚等^[38]采用氩气旋转气泡浮游法对 Al-10Si 合金进行处理,发现浮游法比熔剂精炼法具有更强的除渣和除气能力。黄全^[39]采用玻璃纤维过滤网可有效控制铝锭表面的氧化渣,提高合金品质。

此外,常见的熔体处理方法还包括超声处理、真空

研究发现,随 Ni 含量从 0 增加到 2.0%,挤压铸造 A380 合金中含 Ni 的金属间化合物的体积分数增加,合金屈服强度和抗拉强度分别增加了 39% 和 13%。

磁悬浮处理、熔体过热处理、电磁搅拌处理和电脉冲处理等。夏峰等^[40]研究发现,超声处理可提高 Al-Si 合金熔体中初生 Si 和共晶 Si 相的析出温度,致使合金中 Al 相细小圆整,初生 Si 相由粗大不规则的形状变得细小且分布更加均匀(见图 4)。张亮等^[41]采用真空磁悬浮熔炼 A356 合金,发现与常规熔炼相比,共晶 Si 相由细长针状变为短小的片状,且其密度提高 1.14%,组织更为致密。党博等^[42]研究发现,当过热温度低于 960℃ 时,随着过热温度升高,过共晶 Al-25Si 合金中的初生 Si 相以小平面生长的趋势增大;当过热温度高于 960℃ 时,随过热温度升高,初生 Si 相以小平面生长的趋势减弱。苗龙^[43]采用电磁搅拌制备 Al-20Si 合金,发现随着搅拌电压增加,初生 Si 在试样的边缘偏聚现象更加明显。张广安等^[44]对 Al-7Si-Mg 合金采用了电脉冲孕

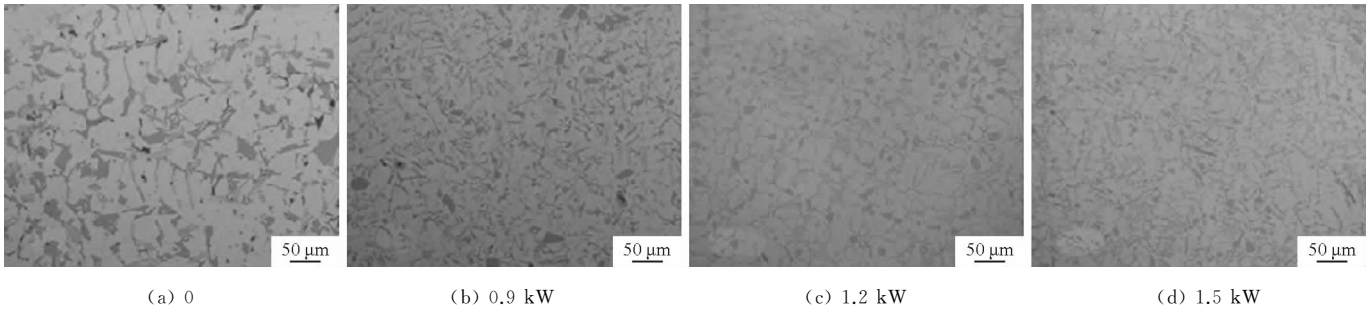


图 4 不同超声功率下 Al-20Si 合金组织形貌
Fig.4 Microstructure of Al-20Si alloy under different ultrasonic power

育处理后,发现柱状 Al 相变成了近球状,晶粒细化作用十分明显。

2.2 Al-Ti-B 细化剂

孕育变质剂广泛应用于重力铸造、高压铸造铝合

金中。其中,Al-Ti-B 晶粒细化剂在铝合金中使用最为广泛^[45]。Al-5Ti-1B 合金对于变形铝合金有效,但对铸造 Al-Si 合金(Si 质量分数大于 5%)却不能起到很好的细化作用,这种现象被称为“硅中毒效应”^[46]。YANG L 等^[47]发现“硅中毒效应”主要是 Si 掺杂 TiAl₃ 2DC(TiAl₃ 二维化合物)引起的,合金“硅中毒”示意图见图 5。BIROL Y^[48]发现,当 Al-Ti-B 细化剂中的 Ti 含量较高时 $[\omega(\text{Ti}) : \omega(\text{B}) > 2.2]$,Ti 与合金中 Si 可形成 Si 化物,严重影响 TiB₂ 和 Al₃Ti 颗粒的性

能,对合金晶粒细化效果不佳;当 B 含量较高时 $[\omega(\text{Ti}) : \omega(\text{B}) < 2.2]$,会形成(Al,Ti)B₂或 AlB₂不溶性颗粒,对合金晶粒具有显著的细化作用。基于传统的 Al-Ti-B 细化剂研制的新型 Al-Ti-Nb-B 晶粒细化剂,在熔体中通过 Ti/Nb 的协同作用形成 B₂(Ti,Nb)颗粒,可促进合金熔体形核,细化晶粒效果明显^[49,50](见图 6)。为了避免 Al-5Ti-1B 的硅中毒效应,DONG X 等^[51]和ZHANG Y H 等^[52]分别开发了 Al-3Ti-3B 和 Al-3V-1B 及 Al-3Ti-1B 细化剂,都使得“硅中毒效应”

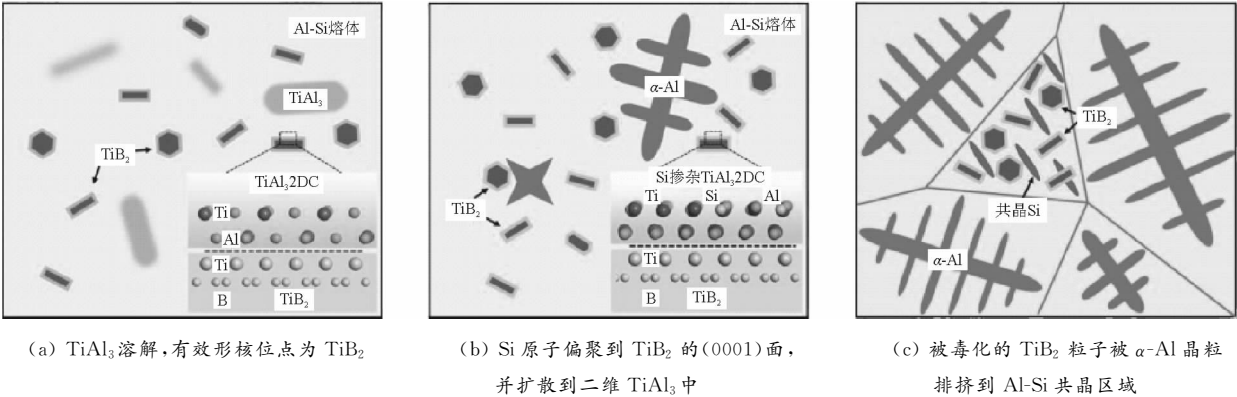


图 5 铸造铝合金中引起 Al-5Ti-1B 细化剂硅中毒的机理示意图^[47]

Fig.5 Schematic diagram of the Si-poisoning mechanism of Al-5Ti-B refiner in casting aluminum^[47]

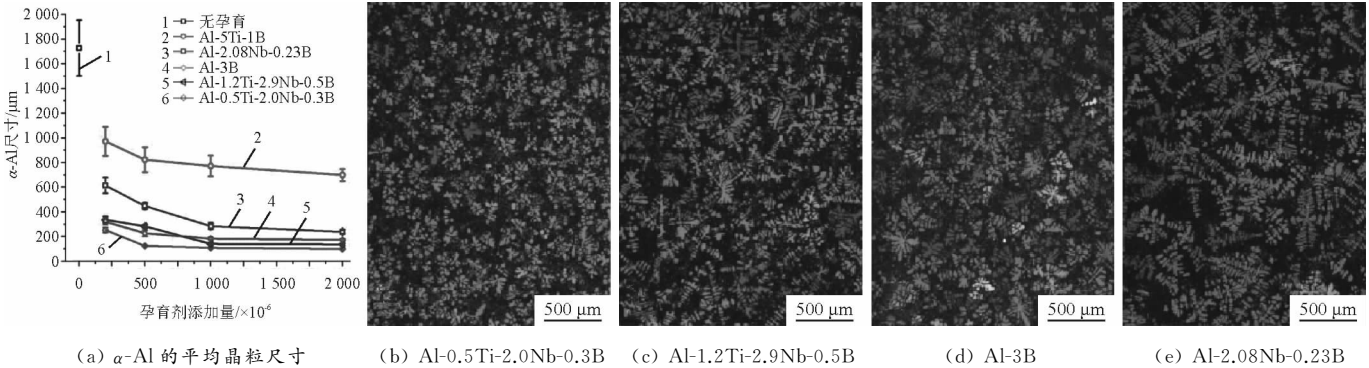


图 6 不同种类晶粒细化剂对 Al-10Si 合金的晶粒细化作用效果^[50]

Fig.6 Effects of different kinds of grain refiners on grain refinement of Al-Si alloys^[50]

明显改善。

2.3 Al-P 变质剂

Al-P 类中间合金变质剂具有变质效果好且稳定、无污染、吸附性强、成本低等特点^[53,54]。LUDWIG T H 等^[55]研究发现,P 对亚共晶 Al-Si 合金中的共晶 Si 形核起到关键作用。AlP 与 Si 相晶格错配度小于 1%,使其成为共晶 Si 的良好形核位点,促进共晶 Si 在较低的过冷度下的形核。张广安等^[56]发现,A390 合金经过 Al-P 变质剂短时间孕育变质后,共晶 Si 平均尺寸减小到 22 μm ,细化作用明显。此外,采用 Al-P-Ti-TiC-Y 和 Al-P-Ti-TiC-Nd₂O₃ 细化剂,可将共晶 Si 细化到 20 μm ^[57]。

2.4 含 Sr 变质剂及复合变质

含 Sr 类变质剂具有变质效果好、有效作用期长、可回收、污染小的特点^[58]。汪勇等^[59]发现,Sr 含量为 0.06% 时,Al-7Si 合金中共晶 Si 的形貌由长针状变成短针状。MANICKARAJ J 等^[60]发现,Sr 并不会影响共晶 Si 的双平面凹角生长机制,而是在共晶反应过程中,在共晶 Si 和铝晶粒的边界处形成起变质作用的 Al₂Si₂Sr 相。之后进一步研究发现,熔体中形成的 Al₂Si₂Sr 团簇会增加共晶 Si 形核所需的过冷度^[61],同时也会影响共晶 Si 孪晶生长方式进而改性共晶 Si^[62~64]。未变质和 Sr 变质后合金显微组织区别明显,见图 7。

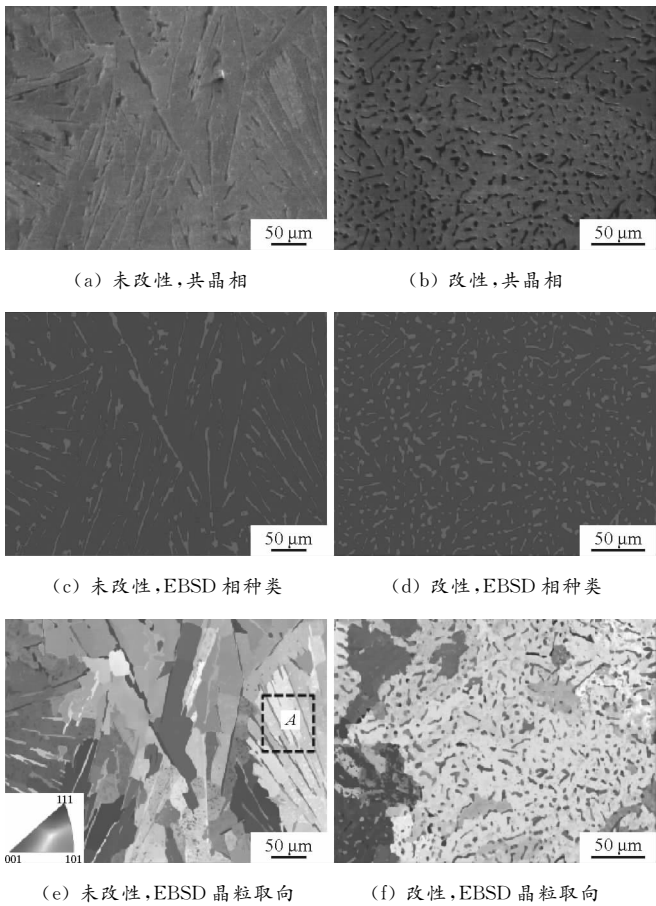


图 7 未改性和 Sr 改性 Al-12.7Si 合金的显微组织^[62]

Fig.7 Microstructures of unmodified (left) and Sr-modified (right) Al-12.7Si alloys^[62]

Al-Si 合金中添加 Sr 作为变质剂会使共晶 Si 的形态从粗大的板状或针状转变为细小纤维状。然而,添加 Sr 可导致长柱状的树枝状 Al 相(纵向尺寸比较大的 Al 相)的形成,因此添加其他元素改变长柱状的树枝状 Al 相也是十分必要的。LIAO H C 等^[65,66]研究发现,在 Al-13.0Si 合金中,当 Al-5Ti-1B 加入量高于 0.82% 时,会对 Sr 的变质作用产生不利的影响。随后将 Al-5Ti-1B 合金替换为 Al-1B 中间合金,发现合金中除共晶 Si 的尺寸明显下降外,Al 枝晶尺寸明显减小,且复合处理后的合金具有良好的力学性能。HAGHAYEGHI R 等^[67]在过共晶 A390 合金 (Al-17.4Si-5Cu) 中复合添加 Sr、Sb 元素细化初生 Si,发现 Sb 通过孪晶和增加层错密度来细化初生 Si,而 Sr 则通过扭结的形成对初生 Si 产生细化作用,这两种作用共同细化了共晶 Si (见图 8)。CHO Y 等^[68]在亚共晶 Al-Si 合金中添加 P 和 Sr 元素,发现合金中 Al_2Si_2Sr 相会包围在合金中的 AlP 相附近,导致这两种具有细化共晶 Si 的相中毒或失活,致使同时添加这两种元素的 Al-Si 合金中共晶 Si 粗大。

表 1 为挤压铸造 Al-Si 系合金不同状态的力学性能。由此可见,合金元素种类和含量及处理状态对挤压铸造 Al-Si 系合金力学性能有重要影响,研究主、微合金元素种类及其含量等对高性能挤压铸造 Al-Si 合金制备具有重要意义。

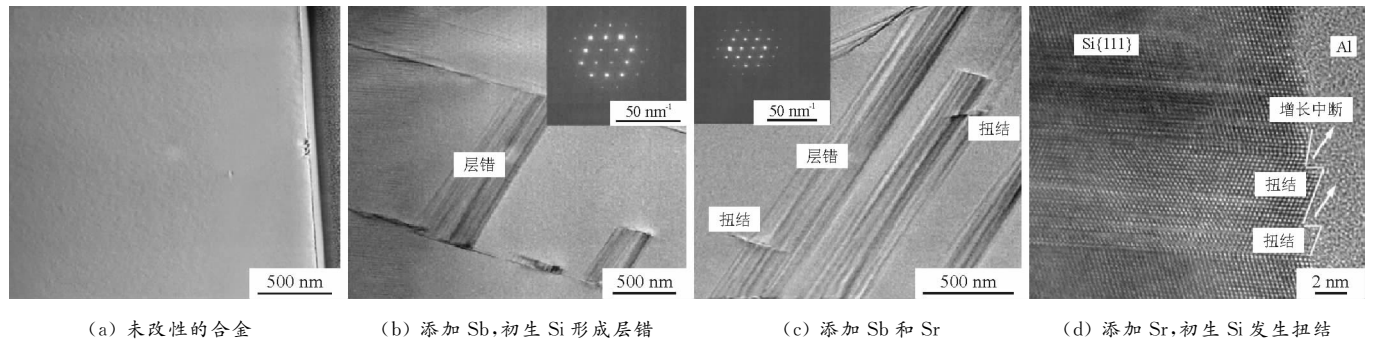


图 8 添加变质剂对 $[101]_{Si}$ 初生 Si 颗粒的影响

Fig.8 The effect of modifier addition on primary Si particles with zone axis $[101]_{Si}$

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	熔体处理/热处理(固溶温度/℃×时间/h,时效温度/℃×时间/h)	挤压铸造参数(挤压比压/MPa,浇注温度/℃,模具温度/℃)	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
Al-4.8Si-3.7Cu-0.24Fe ^[6]	未处理/铸态	100,700,200	181	189	—
Al-5Si-3Cu-0.5Mg-0.02Sr ^[7]	未处理/T6(500×5,170×7)	120,720,200	—	360	4.5
Al-6Si-0.3Mg ^[8]	未处理/铸态	160,750,250	114	132	6.5
Al-6Si-0.3Mg ^[8]	未处理/T6(540×4,170×32)	160,750,250	190	208	8
Al-6.5Si-0.34Mg-0.15Fe ^[9]	电磁搅拌/T6(535×5,155×12)	120,630,—	255	320	15

续表 1

合金	熔体处理/热处理(固溶温度/℃×时间/h,时效温度/℃×时间/h)	挤压铸造参数(挤压比压/MPa, 浇注温度/℃,模具温度/℃)	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %
Al-6.5Si-0.45Mg ^[10]	熔平衡法/T6(540×3, 160×9)	—	201	283	8
Al-6.5Si-0.45Mg ^[10]	未处理/T6(540×3, 160×9)	—	201	257	13
Al-7Si-1.4Mg-1Cu ^[11]	未处理/铸态	70、707、500	150	253	—
Al-7Si-0.3Mg ^[12]	未处理/铸态	30、740、150	—	205	8.3
Al-7Si-0.34Mg-0.2Fe ^[13]	斜坡法/铸态	—、690、—	—	232	7
Al-7Si-0.3Cu-0.2Sc-0.2Fe ^[14]	未处理/铸态	75、720、250	153.07	193.46	10.9
Al-7.01Si-0.4Mg-0.2Fe ^[4]	未处理/T6(530×5, 170×6)	100、680、—	229	287	13.6
Al-7.19Si-5.1Cu-0.3Mn-0.2Mg ^[15]	未处理/铸态	90、693、200	120	251	7.19
Al-7.2Si-0.43Mg-0.19Fe ^[16]	间接超声振动/T6(530×6, 170×7)	100、650、300	220	338	8
Al-8.3Si-3.4Cu-0.7Fe ^[17]	未处理/铸态	75、700、220	—	249	2.53
Al-8.3Si-3.3Cu-0.7Fe-0.3Ce ^[18]	未处理/铸态	100、715、250	201	254	2.75
Al-8.5Si-3.5Cu-0.1Mg-1.3Fe-2Ni ^[19]	未处理/铸态	90、700、300	125	225.4	2
Al-9Si-1Cu-1Zn-0.45Mg-0.15Ti-0.05Ce/La-0.025Sr ^[20]	未处理/T6(530×3, 180×8)	50、—、—	269.67	357.04	6.8
Al-9Si-0.85Cu-0.33Mg-0.2Fe ^[21]	未处理/T6(535×2, 175×8)	135、680、250	—	350	—
Al-9.23Si-0.25Mg-0.5Mn ^[22]	气体诱导法/铸态	100、575、250	—	248.9	7.61
Al-9.23Si-0.25Mg-0.5Mn ^[22]	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 ^[23]	电磁搅拌/T6(535×3, 175×10)	100、575、250	—	305	6
Al-9.5Si-3Cu-3Mg ^[24]	未处理/铸态	106、—、150	—	273	—
Al-10Si-2Cu-0.4Mg-0.87Zn ^[25]	未处理/铸态	60、680、200	—	224.1	1.9
Al-10Si-2Cu-0.4Mg-0.87Zn ^[25]	未处理/T6(550×8, 150×72)	60、680、200	—	263.2	1.9
Al-10Si-2.5Cu-1.38Mg ^[26]	未处理/铸态	130、680、280	—	289	2.23
Al-10Si-2.5Cu-1.38Mg ^[26]	未处理/T6(530×6, 220×7)	130、680、280	—	342	4.2
Al-10Si-2.5Cu-0.8Fe-1.38Mg ^[27]	未处理/铸态	135、675、—	—	290	2.03
Al-10.55Si-0.002Cu-0.31Mg ^[28]	未处理/铸态	—	215	330	10
Al-10.7Si-2.25Cu-0.56Mg ^[28]	未处理/T6(540×4, 180×8)	—	295	426.2	6.3
Al-11Si ^[29]	未处理/铸态	110、750、250	134	231	6.8
Al-11.1Si-0.29Fe-0.15Zn ^[30]	未处理/T6(540×8, 160×4)	70、750、250	170	292	—
Al-11.88Si-0.89Fe-Cu-(1.62~0.22)Mn ^[31]	气体诱导/T6(520×8, 170×6)	80、680、300	—	210	—
Al-12Si ^[12]	未处理/铸态	50、740、150	—	203	7.8
Al-13.5Si-0.12Mg-0.4Fe ^[32]	未处理/铸态	62、690、200	101	137	2.9
Al-14Si-2Cu-2Fe-1Ni-0.4Mg-0.8Mn ^[33,34]	超声波振动/铸态	200、700、200	—	270	2.63
Al-15Si ^[5]	未处理/铸态	600、750、300	—	149.3	5.75
Al-17Si-1.5Fe ^[35]	超声波振动/铸态	300、650、200	—	250	0.9
Al-17.48Si-4.25Cu-0.6Mg ^[36]	未处理/铸态	100、800、200	—	315	—
Al-17.5Si ^[5] 、Al-22Si ^[5]	未处理/铸态	600、750、300	—	153	5.25

3 挤压铸造 Al-Si 系合金复合材料

相对于传统材料,金属基复合材料比强度高、耐磨性好、零部件质量轻、高温强度稳定^[69]。在众多加工工

艺中,挤压铸造是制造高性能金属基复合材料的有效方法^[70~72]。

3.1 无机非金属 Al-Si 基复合材料

通常用来与铝合金复合的无机非金属材料有:碳化

硼(B_4C)、氧化铝(Al_2O_3)、金刚石、碳化硅(SiC)。在这些材料中, SiC 增强铝基复合材料力学性能较好,且制造成本较低。GURUSAMY P 等^[73]研究了挤压铸造压力对 SiC_p/Al 金属基复合材料组织和力学性能的影响。发现在挤压铸造压力为 100 MPa 时,含有 SiC 颗粒的复合材料的孔隙率较低,抗拉强度提高了 300%,硬度提高了 51%。GURUSAMY P 等^[74]和 ARULRAJ M 等^[75]发现,当浇注温度和冲头温度分别为 850 $^{\circ}C$ 和 350 $^{\circ}C$ 时, SiC_p/Al 复合材料中颗粒分布最均匀,抗拉强度达到最大值(245 MPa)。但是, SiC 颗粒附近的应变集中使铝合金的塑性降低^[76]。

MANU K S 等^[77]通过挤压铸造制备了微米 SiO_2 增强铝基复合材料,由于 SiO_2 颗粒均匀地分布在基体

中,其具有更好的力学和耐腐蚀性能。CHOU S N 等^[78,79]研究了挤压铸造 $Al_2O_3/A356$ 复合材料的力学性能。发现当 A356 合金的含量从 5% 增加到 40% 时,复合材料的硬度(HV)从 227 下降到 109,断裂强度从 492.5 MPa 下降到 457 MPa。KRISHNAN P K 等^[80]使用废铝合金为基体代替 Al-7Si-Mg 合金,用炼油厂废料中的废氧化铝催化剂替代 Al_2O_3 作为增强材料,在保证抗拉强度下降不明显的前提下大幅降低了复合材料的生产成本(见图 9)。JIANG L 等^[81]还研究了挤压铸造法高导热金刚石/铝复合材料的界面特性。结果表明,板条状 Al_4C_3 在金刚石/铝合金界面上按梯形台阶的机制生长,板条状 Al_4C_3 尖端界面为粗糙界面,以连续生长模式迁移。

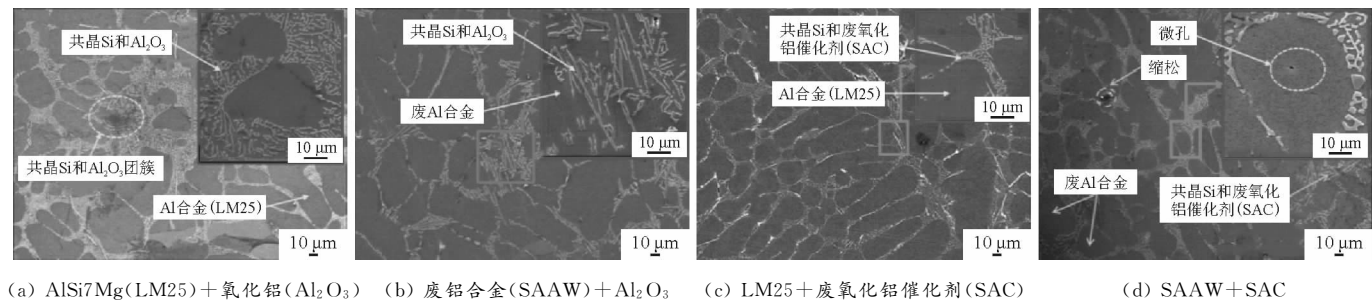


图 9 AlSi7Mg 基和 SAAW 复合材料 SEM 图像^[80]

Fig.9 SEM images of the AlSi7Mg matrix and SAAW composites^[80]

3.2 铝-铝双金属复合材料

铝-铝双金属复合材料在满足汽车和航空等领域的高性能和高效生产需求方面具有独特优势^[82]。其中 6101 铝合金具有高强度,极好的导热性和导电性,而 A356 铝合金有良好的铸造性能,具有高抗拉强度和疲劳性能。采用复合挤压铸造技术制备的 A356/6101 铝合金双金属复合材料可以将两者的优势结合。

LIU T 等^[83]研究了压力对挤压铸造 A356/6101

双金属复合材料的组织和力学性能的影响。发现随压力增加,A356 铝合金基体抗拉强度增加,而双金属复合材料的抗拉强度与施加压力无关。LIU G 等^[84]发现,热处理后的挤压铸造 A356/6101 双金属复合材料中,A356 铝合金的基体和过渡区均有明显的硬化现象,且其中 Si 颗粒的球化现象明显(见图 10)。此外,两基体间溶质的相互扩散加快,界面剪切强度由 76.7 MPa 提高到 102.7 MPa。

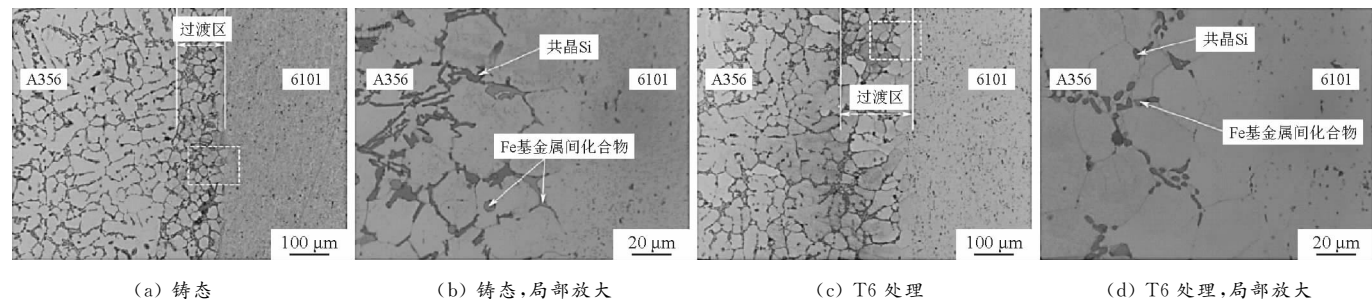


图 10 6101/A356 双金属复合材料的界面处金相图片^[84]

Fig.10 OM of interface of the 6101/A356 bimetal composites^[84]

4 结 语

挤压铸造可形成复杂铝合金薄壁铸件,且零部件组织致密、表面品质高、力学性能好,在汽车零件制备等领域有着广阔应用前景。Al-Si 系合金挤压铸造技术的发

展可以从 3 个方面开展。

(1) Al-Si 系合金成分需进一步优化。Cu、Mg 的适量添加可大幅提高 Al-Si 合金的强度;Ce、Sc 和 Ni 等的添加可明显改善合金组织。因此,通过对合金中主、微合金元素含量的优化,有望开发出高强、高塑、高韧挤压

铸造 Al-Si 系合金。

(2)需进一步开发 Al-Si 系合金变质剂。Al-Ti-B 系晶粒细化剂对 Al-Si 合金中 α -Al 相晶粒尺寸有着显著的影响,开发出种类多样、效果显著,且价廉易制的细化剂尤其重要。含 Sr、Sb 和 P 的变质剂对 Al-Si 系合金中初生 Si 和共晶 Si 的颗粒形貌有着明显影响,因此研究更加高效的细化变质剂对提高 Al-Si 系合金的性能具有重要意义。此外,复合使用各类变质剂对提高 Al-Si 系合金性能同样重要。

(3)金属基复合材料是当下发展前景十分广阔的结构材料。金属基复合材料比强度高、耐磨性好、零部件质量轻、高温强度稳定。挤压铸造技术在开发高性能金属基复合材料上具有广阔应用前景。

参 考 文 献

- [1] GHOMASHCHI M R, VIKHROV A. Squeeze casting: an overview[J]. J. Mater. Process Tech., 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] 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.
- [5] LI R, LIU L, ZHANG L, et al. Effect of Squeeze casting on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al- x Si alloys[J]. J. Mater. Sci. Technol., 2017, 33(4): 404-410.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] ABOU EL-KHAIR M. Microstructure characterization and tensile properties of squeeze-cast AlSiMg alloys[J]. Materials Letters, 2005, 59(8-9): 894-900.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] PASTIRCÁK R, BRÜNA M, BOLIBRUCHOVÁ D. The influence of different wall thicknesses of the casting in the direct squeeze casting[J]. Archives of Foundry Engineering, 2019, 19-24.
- [13] 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: 514-519.
- [14] CHANYATHUNYAROJ K, PATAKHAM U, KOU S, et al. Mechanical properties of squeeze-cast Al-7Si-0.3Mg alloys with Sc-modified Fe-rich intermetallic compounds[J]. Rare Metals, 2017, 37(9): 769-777.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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, 735: 59-64.
- [18] AO X H, XING S M, YU B S, et al. Effect of Ce addition on microstructures and mechanical properties of A380 aluminum alloy prepared by squeeze-casting[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2018, 25(5): 553-564.
- [19] FANG L, ZHANG X, REN L, et al. Effect of Ni addition on tensile properties of squeeze cast Al alloy A380[J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2017, 4(2): 200-209.
- [20] 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.
- [21] 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 (Basel), 2019, 12(14): 229-235.
- [22] DAO V, ZHAO S, 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 徐松, 吉泽升, 许红雨. 镁含量对挤压铸造 Al-10Si-2.5Cu- x Mg 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.
- [27] JIANG B, XU S, XU H Y, et al. Effect of Mg addition on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu-Fe alloy with

- squeeze casting[J]. *Materials Research Express*, 2019, 7(1): 511-519.
- [28] 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.
- [29] 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-11% Si cast alloy[J]. *J. Mater. Environ. Sci.*, 2019, 10(8): 696-705.
- [30] BARHOUMI H, SOUISSI S, BEN A M, et al. Investigation of the microstructure and mechanical properties of squeeze cast Al-11%Si alloy heat treated[J]. *Kovove Mater.*, 2016, 54: 249-256.
- [31] 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.
- [32] YANG L J. The effect of casting temperature on the properties of squeeze cast aluminium and zinc alloys[J]. *J. Mater. Process Technol.*, 2003, 140(1-3): 391-396.
- [33] LIN C, 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] 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(1): 57-62.
- [35] 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.
- [36] MAENG D, LEE J, WON C, et al. The effects of processing parameters on the microstructure and mechanical properties of modified B390 alloy in direct squeeze casting alloy in direct squeeze casting[J]. *J. Mater. Process Technol.*, 2000, 105(1-2): 196-203.
- [37] 万兵兵. 再生铝硅合金熔体净化及变质处理技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [38] 沈刚, 徐志锋. 熔体处理对金属型铸造 Al-10Si 合金转向泵性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2013, 33(2): 112-115.
- [39] 黄全. 再生铝合金铸造过程中的双层玻璃纤维漏斗式过滤[A]. 2017(第27届)重庆市铸造年会暨第十一届全国铸件挽救工程技术交流会[C]. 重庆, 2017.
- [40] 夏峰, 闫志义, 梁民宪. 熔体超声处理对 Al-Si 合金组织和力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(3): 60-63.
- [41] 张亮, 司乃潮, 王宏健. 熔体处理对 A356 合金组织和性能的影响[J]. *铸造*, 2017, 66(3): 294-297.
- [42] 党博, 坚增运, 常芳娥. 熔体温度处理对 Al-25%Si 合金凝固特性及组织的影响[J]. *铸造*, 2015, 64(8): 789-795.
- [43] 苗龙. 外场对 Al-20%Si 合金凝固组织的影响[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2012.
- [44] 张广安, 田文彤. 电脉冲孕育处理温度对 AlSi7Mg 合金凝固组织的影响[J]. *热加工工艺*, 2007(9), 36: 47-49.
- [45] 闫敬明, 黎平, 左孝青. Al-Ti-B 晶粒细化剂研究进展: 细化机理及第二相控制[J]. *材料导报*, 2020, 34(9): 9 152-9 157.
- [46] QIU D, TAYLOR J A, ZHANG M X, et al. A mechanism for the poisoning effect of silicon on the grain refinement of Al-Si alloys[J]. *Acta Mater.*, 2006, 55(4): 1 447-1 456.
- [47] YANG L, BIN H, BIN L, et al. Insight into Si poisoning on grain refinement of Al-Si/Al-5Ti-B system[J]. *Acta Mater.*, 2019, 187: 51-65.
- [48] BIROL Y. A novel Al-Ti-B alloy for grain refining Al-Si foundry alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 486(1): 219-222.
- [49] XU J, LI Y, MA K, et al. In-situ observation of grain refinement dynamics of hypoeutectic Al-Si alloy inoculated by Al-Ti-Nb-B alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2020, 187: 142-147.
- [50] LI Y, JIANG Y, HU B, et al. Novel Al-Ti-Nb-B grain refiners with superior efficiency for Al-Si alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2020, 187: 262-267.
- [51] DONG X, ZHANG Y, JI S. Enhancement of mechanical properties in high silicon gravity cast AlSi9Mg alloy refined by Al3Ti3B master alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2017, A700: 291-300.
- [52] ZHANG Y H, YE C Y, SHEN Y P, et al. Grain refinement of hypoeutectic Al-7Si alloy induced by an Al-V-B master alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 812: 152-162.
- [53] 周一帆. Al-P 变质对过共晶 Al-Si 合金组织与力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(13): 51-53.
- [54] JIANG Q, XU C, LU M, et al. Effect of new Al-P-Ti-TiC-Y modifier on primary silicon in hypereutectic Al-Si alloys[J]. *Materials Letters*, 2005, 59(6): 624-628.
- [55] LUDWIG T H, SCHAFFER P L, ARNBERG L. Influence of phosphorus on the nucleation of eutectic silicon in Al-Si alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2013, A44 (13): 5 796-5 805.
- [56] 张广安, 赵兴明, 张明昌. Al-P 变质剂制备及其变质效果研究[J]. *铸造技术*, 2017, 38(11): 2 579-2 581.
- [57] XU C, WANG H, YANG Y, et al. Effect of Al-P-Ti-TiC-Nd₂O₃ modifier on the microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-20 Si alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2007, A452: 341-346.
- [58] 矫鹏飞, 李成栋, 王鹰. 硫化锌-锆复合变质对过共晶铝硅合金组织的影响[J]. *青岛科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(2): 57-62.
- [59] 汪勇, 余申卫, 王成辉. Sr 变质对亚共晶铝硅合金中共晶硅形貌的影响[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(3): 71-73.
- [60] MANICKARAJ J, GORNY A, CAI Z, et al. X-ray nano-diffraction study of Sr intermetallic phase during solidification of Al-Si hypoeutectic alloy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 104(7): 073 102.
- [61] SRIRANGAM P, CHATTOPADHYAY S, BHATTACHARYA A, et al. Probing the local atomic structure of Sr-modified Al-Si alloys[J]. *Acta Mater.*, 2014, 65: 185-193.
- [62] LIU X, ZHANG Y, BEAUSIR B T, et al. Twin-controlled growth of eutectic Si in unmodified and Sr-modified Al-12.7% Si alloys investigated by SEM/EBSD[J]. *Acta Mater.*, 2015, 97: 338-347.
- [63] BARRIRERO J, ENGSTLER M, GHAFOR N, et al. Compari-

son of segregations formed in unmodified and Sr-modified Al-Si alloys studied by atom probe tomography and transmission electron microscopy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 611: 410-421.

[64] TIMPEL M, WANDERKA N, VINOD KUMAR G S, et al. Microstructural investigation of Sr-modified Al-15% Si alloys in the range from micrometer to atomic scale[J]. Ultramicroscopy, 2011, 111(6): 695-700.

[65] LIAO H C, SUN Y, SUN G. Effect of Al-5Ti-1B on the microstructure of near-eutectic Al-13.0% Si alloys modified with Sr[J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(16): 3 489-3 495.

[66] LIAO H C, SUN G. Influence of boron on the microstructure and mechanical properties of Al-11.6Si-0.4Mg casting alloy modified with strontium[J]. Materials Science and Technology, 2013, 20(4): 521-527.

[67] HAGHAYEGHI R, TIMELLI G. An investigation on primary Si refinement by Sr and Sb additions in a hypereutectic Al-Si alloy[J]. Materials Letters, 2021, 283: 128-135.

[68] CHO Y, LEE H C, OH K, et al. Effect of strontium and phosphorus on eutectic Al-Si nucleation and formation of β -Al₅ FeSi in hypoeutectic Al-Si foundry alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2008, A39(10): 2 435-2 448.

[69] PRABU S B, KARUNAMOORTHY L, KATHIRESAN S, et al. Influence of stirring speed and stirring time on distribution of particles in cast metal matrix composite[J]. J. Mater. Process Technol., 2006, 171(2): 268-273.

[70] NAHER S, BRABAZON D, LOONEY L. Development and assessment of a new quick quench stir caster design for the production of metal matrix composites[J]. J. Mater. Process Technol., 2005, 166(3): 430-439.

[71] SRIVASTAVA N, ANAS M. An investigative review of squeeze casting: Processing effects & impact on properties[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 1 914-1 920.

[72] SOUNDARARAJAN R, SARAVANAKUMAR P, SENDIL P, et al. Effect of squeeze casting process parameters on surface roughness of A413 alloy and A413-B4C composites[J]. Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev., 2018, 8(2): 1 157-1 166.

[73] GURUSAMY P, PRABU S B. Effect of the squeeze pressure on the mechanical properties of the squeeze cast Al/SiC_p metal matrix composite[J]. International Journal of Microstructure and Materials Properties, 2013, 8(4-5): 299-312.

[74] GURUSAMY P, PRABU S B, PASKARAMOORTHY R. Influence of processing temperatures on mechanical properties and microstructure of squeeze cast aluminum alloy composites[J]. Mater. Manuf. Process, 2015, 30(3): 367-373.

[75] ARULRAJ M, PALANI P. Parametric optimization for improving impact strength of squeeze cast of hybrid metal matrix (LM24-SiC_p-coconut shell ash) composite[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, 40(1): 2-10.

[76] SHALABY E A, CHURYUMOV A Y, SOLONIN A N, et al. Preparation and characterization of hybrid A359/(SiC + Si₃N₄) composites synthesized by stir/squeeze casting techniques[J]. Materials Science and Engineering, 2016, A674: 18-24.

[77] MANU K S, SREERAJ K, RAJAN T, et al. Structure and properties of modified compocast microsilica reinforced aluminum matrix composite[J]. Mater. Design, 2015, 88: 294-301.

[78] CHOU S N, HUANG J L, LII D F, et al. The mechanical properties and microstructure of Al₂O₃/aluminum alloy composites fabricated by squeeze casting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 436(1-2): 124-130.

[79] CHOU S N, HUANG J L, LII D F, et al. The mechanical properties of Al₂O₃/aluminum alloy A356 composite manufactured by squeeze casting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 419(1-2): 98-102.

[80] KRISHNAN P K, CHRISTY J V, ARUNACHALAM R, et al. Production of aluminum alloy-based metal matrix composites using scrap aluminum alloy and waste materials: Influence on microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 784(10): 1 047-1 061.

[81] JIANG L, WANG P, XIU Z, et al. Interfacial characteristics of diamond/aluminum composites with high thermal conductivity fabricated by squeeze-casting method[J]. Mater. Charact., 2015, 106: 346-351.

[82] XU G, LUO A A, CHEN Y, et al. Interfacial phenomena in magnesium/aluminum bi-metallic castings[J]. Materials Science and Engineering, 2014, A595: 154-158.

[83] LIU T, WANG Q, SUI Y, et al. An investigation into aluminum caluminum bimetal fabrication by squeeze casting[J]. Mater. Design, 2015, 68: 8-17.

[84] LIU G, WANG Q, LIU T, et al. Effect of T6 heat treatment on microstructure and mechanical property of 6101/A356 bimetal fabricated by squeeze casting[J]. Materials Science and Engineering, 2017, A696: 208-215.

(编辑:张正贺)

万丰镁瑞丁科技项目获国家科技部国家重点研发计划立项

近日,科技部国家重点研发计划“先进结构与复合材料”重点专项 2021 年度项目正式揭晓,由上海交通大学为项目牵头单位、万丰镁瑞丁为课题牵头单位申报的“高性能镁合金大型铸/锻成形与应用关键技术项目”获立项支持。

该项目以高性能镁合金大型铸/锻件成形及应用为目标,根据新能源汽车、高速列车、航空航天等领域的轻量化需求,从基础研究、关键技术和示范应用 3 个层面开展课题研究,实现大型镁合金铸/锻件在新能源汽车、高速列车、航空航天等重大装备上的考核验证和示范应用,形成工业化规模生产能力。

在该项目中,万丰镁瑞丁主要负责一体化压铸车体结构件关键技术研究板块,公司依托自身在镁合金压铸领域的核心技术优势,通过对后纵梁、掀背门等产品的设计方法与制造关键技术研究,解决大型复杂镁合金结构件的集成设计与铸造技术难题,实现大尺寸规格的镁合金一体化压铸技术突破,推动镁合金超大型一体化铸件在汽车领域的大规模示范应用。

(摘自压铸周刊)