

铸造方式对 A356 铝合金组织、热导率和力学性能的影响

曹杨婧¹ 李元东^{1,2} 罗晓梅¹ 毕广利^{1,2} 宋赵熙¹ 李 想¹ 樊博阳¹
(1.兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室;
2.兰州理工大学有色金属合金及加工教育部重点实验室)

摘 要 以商用 A356 铝合金为对象,研究铸造方式(金属型铸造、液态挤压铸造、半固态挤压铸造)对其组织、热导率和力学性能的影响。结果表明,液态和半固态挤压铸造显著减少铸造缺陷,提高合金的致密性。其中,液态挤压铸造制件相较于金属型铸造晶粒明显细化,共晶 Si 相从粗大的板条状转变为长杆状,合金抗拉强度由 179.930 MPa 提高到 209.446 MPa,伸长率从 3.19% 提高到 6.93%,硬度(HB)由 55 提高到 64,热导率由 150.064 W/(m·K) 升高到 153.072 W/(m·K);经半固态挤压铸造后,初生 α -Al 晶粒分布均匀,形状圆整。共晶 Si 相尺寸减小,边界圆钝,偏析消除。合金抗拉强度为 223.514 MPa,伸长率达到 13.68%,硬度(HB)为 71,热导率提高到 160.220 W/(m·K)。

关键词 A356 铝合金;半固态挤压铸造;热导率

中图分类号 TG146.21;TG249.9 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.11.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Casting Methods on Microstructure, Thermal Conductivity and Mechanical Properties of A356 Aluminum Alloy

Cao Yangjing¹, Li Yuandong^{1,2}, Luo Xiaomei¹, Bi Guangli^{1,2}, Song Zhaoxi¹, Li Xiang¹, Fan Boyang¹
(1.State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology; 2.Key Laboratory of Nonferrous Metal Alloy and Processing, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology)

Abstract: The effects of casting methods (permanent mould casting, liquid squeeze casting, semi-solid squeeze casting) on microstructure, thermal conductivity and mechanical properties of commercial A356 aluminum alloy were investigated. The results indicate that liquid and semi-solid squeeze casting can significantly reduce defects of casting, increasing the densification of alloy. Thereinto, the grain of the liquid squeeze castings is obviously refined compared with the permanent mould casting ones, where the eutectic Si phase is converted from the coarse lath shape to the long rodlike shape. The tensile strength of the alloy is increased from 179.930 MPa to 209.446 MPa, the elongation from 3.19% to 6.93%, the hardness (HB) from 55 to 64, and the thermal conductivity from 150.064 W/(m·K) to 153.072 W/(m·K). After semi-solid squeeze casting, the primary α -Al grains are evenly distributed with round shape. The size of eutectic Si phase with round and blunt boundary is also decreased, and segregation is eliminated. The tensile strength, elongation, hardness (HB) and thermal conductivity of the alloy reach 223.514 MPa, 13.68%, 71 and 160.220 W/(m·K), respectively.

Key Words: A356 Aluminum Alloy, Semi-solid Squeeze Casting, Thermal Conductivity

铸造铝合金由于具有优异的铸造性能,良好的耐腐蚀性能,比强度高,生产成本低而广泛应用于汽车制造和航空工业等领域^[1~3]。A356 铝合金是常用的铸造 Al-Si 合金,因其流动性和气密性好、收缩率和热裂倾向小,通常用来制造汽车发动机缸盖、滑块构件及轮毂等

具有复杂结构的铸件。随着汽车行业的发展,其应用范围的扩大对零件的力学性能、散热能力等提出了更高的要求。金属型铸造 A356 铝合金的抗拉强度约为 180 MPa,伸长率约为 5.0%,室温下热导率约为 150.7 W/(m·K)^[4]。影响铸造铝合金力学性能的主要因素包

收稿日期:2021-04-22;修改稿收到日期:2021-05-20
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB2001800)
第一作者简介:曹杨婧,女,1997 年出生,硕士研究生,兰州(730050),E-mail: yangjing_cao@163.com
通信作者:李元东,男,1971 年出生,教授,兰州(730050),E-mail: liyd_lut@163.com
引用格式:曹杨婧,李元东,罗晓梅,等. 铸造方式对 A356 铝合金组织、热导率和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(11):1 424-1 430.
CAO Y J, LI Y D, LUO X M, et al. Effects of casting methods on microstructure, thermal conductivity and mechanical properties of A356 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11):1 424-1 430.

括合金中相的种类、尺寸及形貌,铸造缺陷的性质、数量和分布。挤压铸造过程中由于压力的作用,对晶粒具有细化作用,并使得组织致密度提高,从而提高铸件的力学性能。液态挤压铸件抗拉强度可达 208.975 MPa、伸长率可达 8.58%^[5]。另外,随着铸造压力提高,合金热导率显著提高^[6]。但液态挤压铸造由于金属液充型速度较快,会裹挟气体造成铸造缺陷。制备半固态浆料后进行挤压铸造,提高浆料粘度,能最大限度地消除铸造缺陷。朱亮^[7]采用半固态挤压铸造制备 A356 铝合金墩粗试样,由于显微组织中 α -Al 的球化以及共晶 Si 的细化,力学性能得到提升,较连续铸造的抗拉强度提升了 7.8%,伸长率提高了 350%。

本课题分别采用金属型铸造 (Permanent Mould Casting,PMC)、液态挤压铸造 (Liquid Squeeze Casting,LSC)和半固态挤压铸造 (Semi-solid Squeeze Casting,SSC)方式制备 A356 合金试样,观察其显微组织及共晶 Si 相形貌,并对其热导率和力学性能进行测试分析,以拓展 A356 铝合金的应用领域。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验材料采用商用 A356 铝合金,其成分见表 1。

表 1 A356 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of A356 aluminum alloy %						
w_B						
Si	Mg	Fe	Ti	Cu	Zn	Al
7.06	0.27	0.115	0.097	0.001	0.01	余量

1.2 试验方法及设备

试验分别采用 PMC、LSC 和 SSC 等 3 种不同的铸造方式。其中,PMC 使用 SG-7.5-10 井式坩埚电阻炉将 A356 铝合金重新熔化,当温度升至 720 ℃后,加入质量分数为 1%的 C_2Cl_6 进行精炼(除气、除渣)后静置,再浇入 250 ℃预热的金属型中得到铸件。采用 6 000 kN卧式挤压铸造机,射压力为 784 kN,比压为

101 MPa,保压 15 s。铝合金液在精炼扒渣静置后浇入预热至 250 ℃的挤压铸造机料筒中,再将合金浆料顶入预热至 250 ℃的模具中挤压。而 SSC 则是将熔炼好的 A356 铝合金熔液浇入滚筒式半固态制浆料机内制浆后(出口温度 590 ℃),再注入挤压机料筒中挤压成形^[8]。成形件尺寸为 160 mm×170 mm×8 mm。

不同铸造方式试样经粗磨、细磨至表面磨平并抛光后,采用 0.5%的 HF 溶液腐蚀 20 s。在金相显微镜 (4XG-MS)下观察 3 种铸件的显微组织。采用扫描电镜 (QUANTA450)观察共晶 Si 相和拉伸断口。使用 X 射线衍射仪 (D/max-2400)进行物相分析, 2θ 为 20°~90°,并利用 Jade5.0 软件分析晶格常数。采用 LFA457 激光法导热分析仪测量热扩散系数,测试温度为 25 ℃,试样尺寸为 $\phi 12.7\text{ mm}\times 5\text{ mm}$;用 STA449C 同步热分析仪测试比热容并计算热导率:

$$\lambda = \alpha \cdot \rho \cdot c \tag{1}$$

式中, α 为热扩散系数, mm^2/s ; ρ 为密度, g/cm^3 ; c 为比热容, $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 。

使用线切割机制备拉伸试样(见图 1),利用 WDW-100D 型电子万能材料试验机对其进行拉伸测试,并记录试样的抗拉强度及伸长率。采用 HB-3000B 型布氏硬度计进行合金硬度的测试。

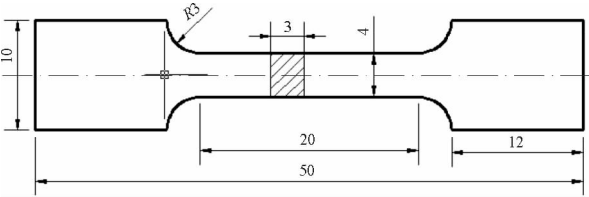


图 1 拉伸试样

Fig.1 Dimension of tensile specimen

2 试验结果分析

2.1 对显微组织的影响

图 2 为 PMC、LSC、SSC 3 种铸造方式所得试样的显微组织。可以看出,合金组织主要为初生 α -Al 及共

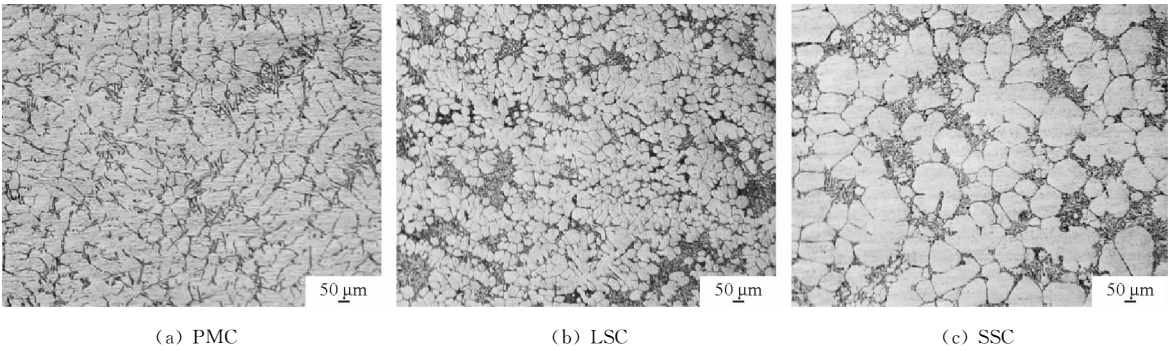


图 2 不同铸造方式制备 A356 铝合金试样的显微组织

Fig.2 Microstructure of A356 aluminum alloy specimen prepared by different casting methods

晶 Si 相。从图 2a 可以看出, α -Al 相呈较为粗大的树枝晶, 取向无明显规律, 且由于 α -Al 相晶粒尺寸粗大, 分布杂乱, 其晶界处析出的共晶 Si 相也存在明显的偏析集聚现象。从图 2b 看出, α -Al 相较于 PMC 中明显细小, 呈蔷薇状或等轴晶。组织更加致密, 排布更加均匀, 但晶间析出相的偏析现象未能消除。从图 2c 看出, 经过半固态制浆, 初生 α -Al 相凝固时从蔷薇状逐渐演化成形状较为圆整的类球状, 气孔、缩孔等铸造缺陷和微观偏析现象明显减少, 晶粒最为圆整, 组织最为均匀。

用 Image-pro Plus 6.0 软件对基体晶粒尺寸统计分析, 结果见图 3。PMC 过程凝固过冷度小, α -Al 晶粒为粗大的树枝晶, 平均晶粒尺寸为 137.807 μm 。挤压铸造过程明显改善铸型与铸件间的热交换条件, 且在挤压作用下, 合金熔点相较于传统铸造时升高, 增大了合金熔体凝固时的初始过冷度^[9]。LSC 过程中合金的凝固潜热较快释放, 阻碍合金熔体中原子的扩散, 抑制初生 α -Al 相的长大, 使晶粒尺寸细小, 平均晶粒尺寸降至 43.512 μm 。过冷度作为凝固的驱动力, 其增加使临界形核半径减小, 形核率上升^[10], 使晶粒数量增多。SSC 制浆时, 熔体在滚筒的搅拌作用下产生对流, 使晶粒之间产生碰撞, 抑制粗大树枝晶的生成, 将枝晶臂打断, 形成许多细小的晶粒。随着温度降低, 这些细小的晶粒无明显取向的均匀长大, α -Al 相整体形貌比较圆整, 平均

晶粒尺寸为 64.824 μm 。

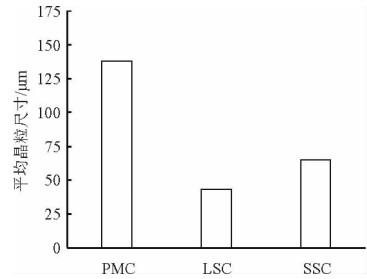


图 3 不同铸造方式制备 A356 铝合金中 α -Al 晶粒尺寸
Fig.3 Grain size of α -Al in A356 aluminum alloy prepared by different casting methods

Al-Si 共晶通常被认为是不规则共晶, 其生长方式以小平面生长^[12], 用扫描电镜对共晶 Si 相进行进一步观察, 见图 4。从图 4a 可以看出, 由于 α -Al 基体不规律、不均匀的排布, 使得析出在其晶界上的共晶 Si 也明显存在偏析和集聚的问题。共晶 Si 相呈现出的是尺寸较大的板条状或片状, 分布在基体晶界处, 严重割裂基体。LSC 试样的共晶 Si 晶粒得到了较大程度的细化, 转变为小片状和长杆状(图 4b), 但偏析现象依然存在^[11]。转变浆料状态为半固态后, 见图 4c, SSC 试样中的共晶 Si 相的尺寸明显减小, 边缘明显圆钝, 整体形状弯曲, 呈现出蠕虫状的形貌, 说明 SSC 过程中共晶 Si 相产生了一定程度的球化。

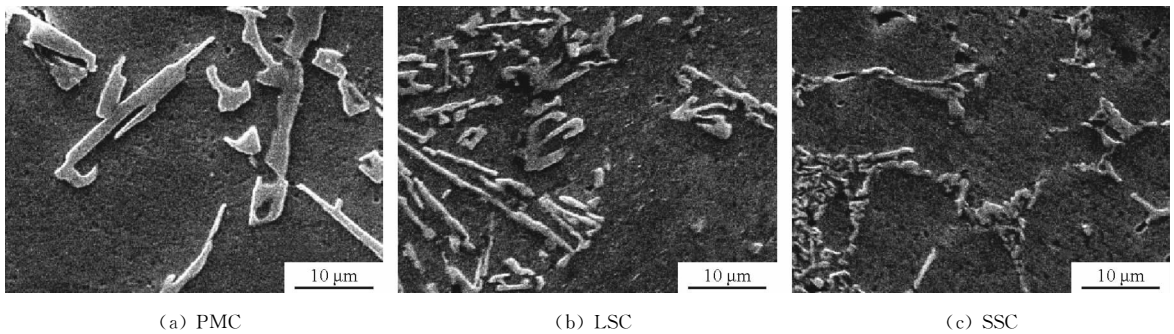


图 4 不同成形方式制备 A356 铝合金的共晶 Si 相形貌

Fig.4 Eutectic Si morphology in A356 aluminum alloy prepared by different forming methods

A356 铝合金属于亚共晶 Al-Si 合金, 在凝固时首先析出初生 α -Al 相, Si 相在共晶时析出, 分布在 α -Al 基体晶粒的晶界处, 因此共晶 Si 相的形貌一定程度上受到基体晶粒的影响, 共晶反应的结束也标志着凝固过程的结束^[12]。统计并计算共晶 Si 相等积圆直径、长径比和形状因子见图 5。PMC 试样中共晶 Si 相尺寸分布较为分散, 仅存在极少量直径为 2~3 μm 的小尺寸晶粒, 平均直径为 4.40 μm , 最大达 8.32 μm ; 长径比为 7.92, 形状因子为 0.34。LSC 试样由于挤压力对晶粒的细化作用, 共晶 Si 相尺寸分布较 PMC 也有所集中, 尺寸显著减小, 平均等积圆直径下降到 2.05 μm , 最大直径降为 4.11 μm ; 长径比为 6.48, 形状因子为 0.398。

SSC浇注温度较低而充型后冷却速度较快, 使共晶Si

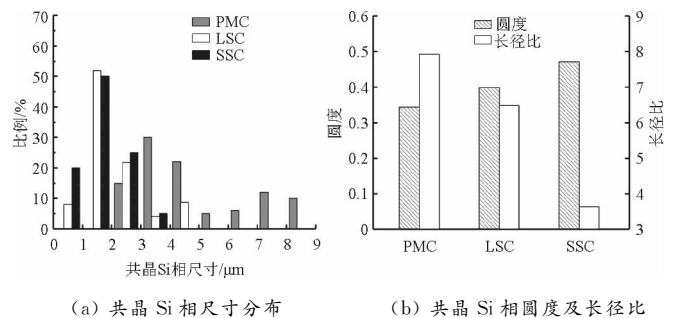


图 5 不同铸造方式制备 A356 铝合金共晶 Si 的尺寸分布及形状变化
分布及形状变化

Fig.5 Size distribution and shape of eutectic Si in A356 aluminum alloy prepared by different casting methods

尺寸进一步减小,形貌发生变化^[13],多数晶粒半径小于 2 μm,平均直径降至 1.61 μm,最大半径仅为 3.5 μm;长径比下降至 3.64,形状因子上升至 0.472。

图 6 为不同铸造方式铸件的 X 射线衍射图谱。可以看出,成形方式并不会改变合金的相组成,3 种方式铸造的试样组织中主要相组成均为 α-Al 和 Si 相,同时存在强化相(Mg₂Si)和富 Fe 相(Al₂Fe₃Si₄)^[14]。由于挤压力的存在加快了凝固速率,可能使少量基体中的

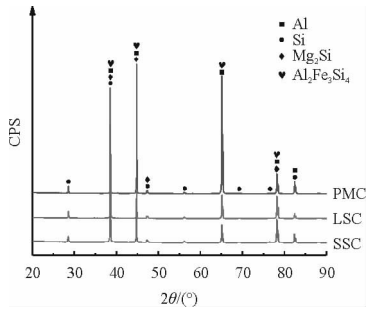


图 6 不同铸造方式制备 A356 铝合金的 XRD 图谱
Fig.6 XRD patterns of A356 aluminum alloy prepared by different casting methods

Fe 和 Mg 原子固溶在基体内形成固溶体,来不及扩散析出并相互结合形成第二相(Mg₂Si)和富 Fe 相(Al₂Fe₃Si₄)。

2.2 对热导率的影响

图 7 为不同铸造方式铸件的热导性能。可以看出,铸造方式对合金热导率与热扩散系数具有明显的影响。PMC 试样的热导率最低,LSC 试样的热导率比 PMC 提高了 2.0%,SSC 试样的热导率最高,较 PMC 试样提高了 6.7%,见表 2。

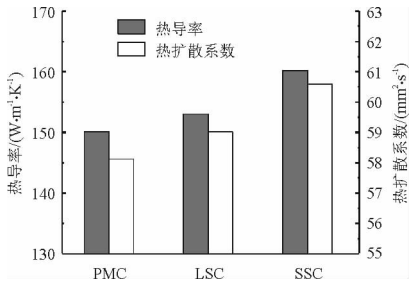


图 7 不同铸造方式制备 A356 铝合金的导热性能
Fig.7 Thermal conductivity of A356 aluminum alloy prepared by different casting methods

表 2 不同铸造方式制备 A356 铝合金中共晶 Si 相形貌和合金导热性能

铸造方式	共晶 Si 相形貌		合金导热性能			
	形状因子 F	长径比	热扩散系数/(mm ² ·s ⁻¹)	提高比例/%	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	提高比例/%
金属型铸造	0.344	7.92	58.120	—	150.064	—
液态挤压铸造	0.398	6.48	59.012	1.5	153.072	2.0
半固态挤压铸造	0.472	3.64	60.603	4.2	160.220	6.7

2.3 对力学性能的影响

图 8 为不同铸造方式试样的力学性能。可以看出,PMC 试样的抗拉强度为 179.930 MPa,伸长率为 3.19%,硬度(HB)为 55,LSC 试样的抗拉强度为 209.446 MPa,伸长率为 6.93%,硬度(HB)升高到 64;而 SSC 试样的抗拉强度提高至 223.514 MPa,伸长率为 13.68%,硬度(HB)提高至 71。

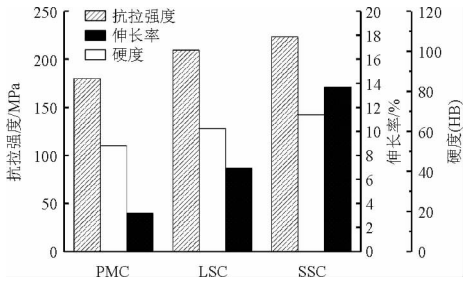


图 8 不同铸造方式制备 A356 铝合金的力学性能
Fig.8 Mechanical properties of the A356 aluminum alloy prepared by different casting methods

实现^[15],由一定的温度梯度作为驱动力,电子在沿温度梯度下降的方向定向移动的过程中通过不断碰撞将所携带的能量由高温区域传递到低温区域完成导热。由 Wiedemann-Franz 定律表示如下:

λσ = LT (2)

式中,λ 为热导率;σ 为电导率;L 为洛伦兹数;T 为热力学温度。即非低温条件下,金属材料的 λ 与它的 σ 之比约为常数。故从导电性入手,探究合金的导热机理。

由 Bloch 定理推论,铝合金中电子的平均自由程受到晶体结构完整程度的限制^[16]。温度梯度一定时,铝合金的晶体结构越完整,平均自由程越长,导电能力就越强。由 Matthiessen 定律,合金电阻具体构成为:

ρ = ρ_T + ρ_R (3)

式中,ρ_T为合金的基础电阻,仅与温度有关;ρ_R为杂质电阻,其构成为:

ρ_R = ρ_p + ρ_{ss} + ρ_d + ρ_{gb} (4)

式中,ρ_p、ρ_{ss}、ρ_d和 ρ_{gb}分别为析出相、固溶度、位错和晶界对合金原子所引起的电阻。

对电子运动的影响程度主要取决于位移、晶界、合金元素固溶和晶间析出相等缺陷的数量和结构。位错

3 分析与讨论

3.1 导热性能

铝合金导热的物理过程主要依靠自由电子的迁移

密度和晶界面积越大,散射的电子越多,合金的热导率越低;合金中的元素固溶度越高,引起基体的晶格畸变就越严重,破坏铝基体中原子的有序程度和原有周期性电场的分布,产生缺陷和应力场;晶间析出相的数量越多,尺寸越大,对电子的散射作用越强,电子平均自由程减小,导致合金导热性能下降。

室温下,低密度空位和位错对电阻率的影响甚小^[17],且在仅改变铸造方式而未进行塑性变形及退火的情况下,不同试样之间的位错密度并无明显差异,故可忽略其对热导率的影响。冷却速率的变化会一定程度上改变 Al 基体晶粒尺寸和晶界的总面积^[18],LI B C 等^[19]也指出,晶粒尺寸的变化对热导率的影响微乎其微,热导率并未随晶粒的显著细化而明显下降。

对 Al-Si 合金而言,Si 和 Al 形成置换固溶体^[20],但 Si 在 Al 中固溶度很小,最大饱和固溶度仅为 1.65%,而室温下仅为 0.05%,其余的 Si 会以单质形式与 Al 一起形成 Al-Si 共晶组织。A356 铝合金中 Si 质量分数约为 7.06%,仅有极少量固溶在 Al 基体内,而更多的是以 Al-Si 共晶形式析出。Si 原子半径(0.134 nm)与 Al(0.143 nm)十分接近,Si 原子固溶引起的 Al 基体晶格畸变很小,因此基体中固溶的 Si 对 Al 的热导

率影响不大,主要是晶界处析出的共晶 Si 带来的影响。李斌等^[21]也认为当 Si 质量分数为 7.0%~12.8%时,Al 基体的晶格畸变程度很小,且随 Si 含量的变化不明显。

晶间析出相对基体的割裂是导致 A356 铝合金热导率较纯 Al 下降的主要原因。依照 3 种铸造方式试样中共晶 Si 相的 SEM 照片绘制其对电子迁移的阻碍作用见图 9。PMC 试样中共晶 Si 相为尺寸粗大的板条状,集聚分布,电子难以通过或绕过共晶 Si 晶粒完成能量的传输。在机械挤压力的作用下,合金致密度提高,原子间距缩短,基体连接性增强,自由电子自由程增大,对合金热导率起到了提升作用。LSC 在细化 α -Al 基体晶粒时难免增大了晶界面积,但同时也完成了对共晶 Si 晶粒显著的细化作用,使其变为长杆状,面积大幅缩小,拓宽了电子输运的通路,整体上表现为能量输运效率的提高,即热导率上升;SSC 试样晶间共晶 Si 相得到了一定的破碎和球化,边缘变得圆钝,整体变为蠕虫状。钝化的共晶相边缘能降低散射作用发生的概率,其机制主要包括减小散射面积、改散射碰撞为切过和增加电子在基体中的自由程并改变散射方向几种途径,见图 10。可见共晶 Si 相的球化将很大程度上减弱其对自由电子迁移的阻碍作用,改善 A356 铝合金的导热性能^[22]。

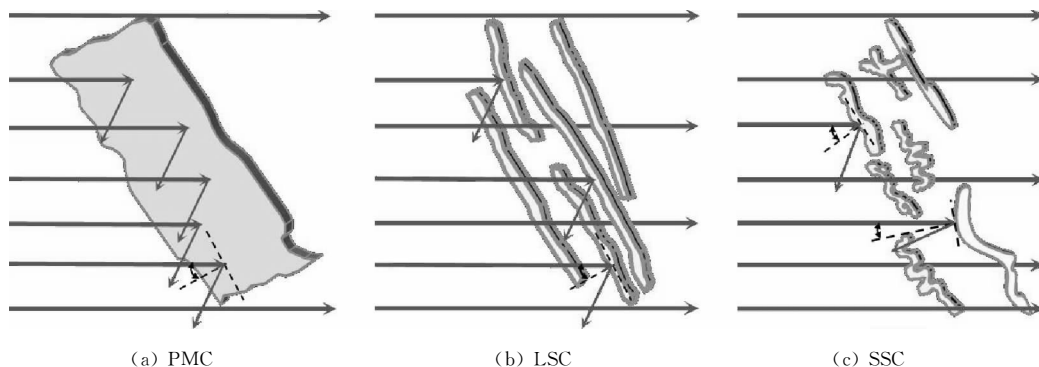


图 9 自由电子在共晶 Si 相上散射原理示意图

Fig.9 Schematic diagram showing scattering principle of free electrons over eutectic Si phase

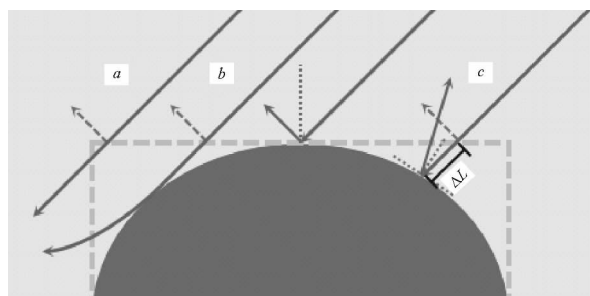


图 10 晶粒边界形状对电子散射的影响

Fig.10 Effect of grain boundary shape on electron scattering

3.2 力学性能

挤压铸造的试样力学性能高于金属型铸造的,是由于在机械压力的作用下晶粒得到明显细化,根据 Hall-

Petch 公式^[5],试样强度随晶粒尺寸的减小而提高,即完成细晶强化。同时,晶界增多且其间分布的共晶 Si 和少量的强化相 Mg_2Si 对 α -Al 基体中的位错也具有钉扎作用。此外,铸造缺陷极大地影响着合金的伸长率,而挤压铸造的外加压力能减少铸件内部的铸造缺陷,使得铸件组织致密度提高,宏观表现为试样强度的提高。

面心立方结构的 α -Al 基体,在受到与滑移面垂直方向的载荷时会开动滑移系,发生滑移而非解理,基本上不存在解理断裂^[23]。进一步拍摄并观察不同铸造方式试样的断口形貌,见图 11。从图 11a 中看出,共晶 Si 在晶界处形貌为狭长的片状,易产生裂纹并沿着晶界扩展,但晶粒取向杂乱、尺寸粗大,裂纹的延展在晶界处受阻,随着应力的累积被撕裂,并留下明显的撕裂棱、层次

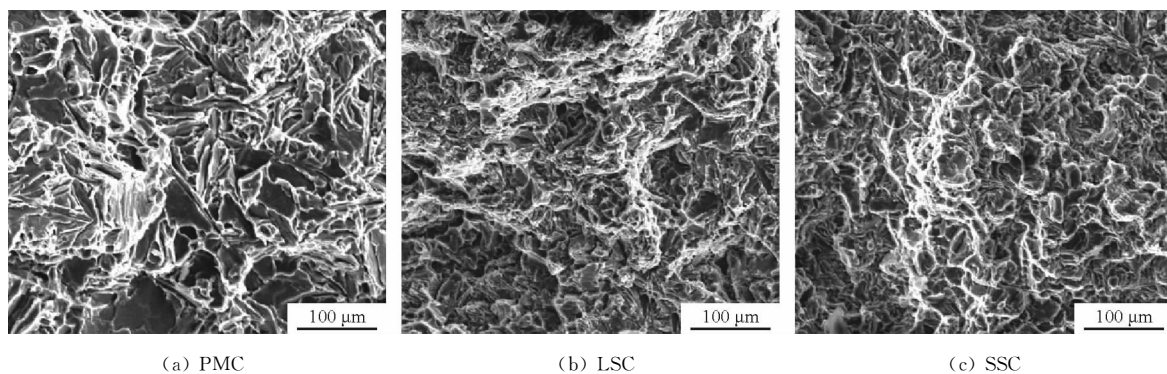


图 11 不同铸造方式铸件的拉伸断口形貌

Fig.11 Tensile fracture morphologies of castings by different methods

清晰的小平面和河流状纹样。其断裂方式为介于脆性断裂和韧性断裂之间的过渡模式,为偏向脆性断裂的准解理断裂。从图 11b 可以看出,LSC 试样拉伸断口中的撕裂棱变窄,密集分布着小而深的韧窝,断口整体无明显层次,未见解离台阶或小平面,因此判断其断裂形式偏向韧性断裂。从图 11c 可以看出,SSC 试样的韧窝尺寸稍大、分布均匀、形状圆整,符合等轴韧窝的特征;同时断口上存在较少的撕裂棱,试样整体表现为韧性断裂。研究发现,试样的伸长率受到枝晶尺寸和共晶 Si 相的长径比控制^[24],因此挤压铸造的试样伸长率较金属型铸造有所改善。且 SSC 试样共晶 Si 相细化,减少了脆性相裂纹源。韧窝尺寸大表明试样中的微孔发生集聚,裂纹的扩展路径增长,宏观上表现为伸长率的大幅上升。

4 结 论

(1)铸造方式显著影响 A356 铝合金的组织形貌。金属型铸造试样的 α -Al 晶粒呈粗大的树枝晶,平均尺寸为 $137.807\ \mu\text{m}$,共晶 Si 相以板条和层片状存在,平均直径为 $4.04\ \mu\text{m}$;经挤压铸造试样中晶粒明显细化,呈细小的胞状晶,平均尺寸仅 $43.512\ \mu\text{m}$,共晶 Si 相变为纤细的长杆状,平均直径下降到 $2.05\ \mu\text{m}$;半固态挤压铸造得到的晶粒平均尺寸为 $64.824\ \mu\text{m}$,较挤压铸造稍有长大,但形状更为圆整,共晶 Si 相平均直径下降到 $1.61\ \mu\text{m}$,变为尺寸细小、形状弯曲、边缘圆钝的蠕虫状。

(2)A356 铝合金热导率对共晶 Si 相形貌最敏感。随着共晶 Si 相尺寸和长径比的减小以及圆度的增加,热导率及热扩散系数呈上升趋势。金属型铸件热导率为 $150.064\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,挤压铸件热导率提升了 2.0%,而半固态挤压铸件中 α -Al 晶粒较大,形状圆整,共晶 Si 尺寸细小,边界钝化,降低其对自由电子的散射概率,热导率达到 $160.220\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,较金属型铸造提升了 6.7%。

(3)通过挤压铸造,能减少 A356 铝合金内部铸造

缺陷,提升其力学性能。金属型铸件的抗拉强度为 $179.930\ \text{MPa}$,伸长率为 3.19%,硬度(HB)为 55,液态挤压铸件抗拉强度达到 $209.446\ \text{MPa}$,伸长率为 6.93%,硬度(HB)升高到 64;半固态挤压铸件抗拉强度达到 $223.514\ \text{MPa}$,伸长率为 13.68%,硬度(HB)提高到 71,较金属型和液态挤压铸件有明显提升。

参 考 文 献

- [1] 潘复生. 铝合金及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [2] 王慧,李元东,罗晓梅,等. 高导热铝合金的开发与研究进展[J]. 铸造, 2019, 68(10): 1 104-1 110.
- [3] 吴孟武,华林,周建新,等. 导热铝合金及铝基复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(9): 1 486-1 495.
- [4] 林钢. 铝合金应用手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [5] 邓腾. A356 铸造铝合金液态模锻成形工艺研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [6] 李俊文,赵海东,吴朝忠. A356 铝合金挤压铸造界面传热系数的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(3): 269-272.
- [7] 朱亮. A356 铝合金半固态坯制备及触变成形工艺研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [8] GUO H M, YANG X J. Rheoforging of wrought aluminum alloys[J]. Solid State Phenomena, 2008, 141-143: 271-276.
- [9] 李想,李元东,樊博阳,等. 不同铸造方法对 7075 铝合金热导率及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(1): 93-98.
- [10] 刘艳华,熊洪森,郭洪民,等. 半固态 A356 铝合金流变挤压铸造工艺[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(2): 122-124.
- [11] 王慧,罗晓梅,李元东,等. 固溶温度对铸造 Al-Si 合金热导率及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(9): 1 016-1 020.
- [12] 李明,李元东,邱谨,等. A356 铝合金自孕育流变压铸过程中的凝固行为[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(11): 2 256-2 266.
- [13] 李明. A356 铝合金半固态流变成形中的凝固行为及组织控制[D]. 兰州:兰州理工大学, 2018.
- [14] 樊博阳,李元东,李想,等. 镁硅质量比对 Al-Mg-Si 合金组织、热学和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(2): 168-173.
- [15] CHOI S W, KIM Y M, LEE K M, et al. The effects of cooling rate and heat treatment on mechanical and thermal characteristics of Al-Si-Cu-Mg foundry alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 617: 654-659.
- [16] 牛艳萍,赵禹凯,王顺成,等. Si 含量对 Al-Si-Mg 合金铸造流动性、热导率和力学性能的影响[J]. 铸造, 2016, 65(4): 366-370.

双金属热压缩复合行为及界面组织演变

李宇焕 秦芳诚 刘崇宇 亓海全 王 鑫 翁凯航
(桂林理工大学材料科学与工程学院)

摘 要 采用 ABAQUS 有限元软件对 40Cr/Q345B 双金属在不同变形温度、应变速率和变形量下进行热压缩模拟研究,分析热压缩过程中双金属界面等效应变、残余应力和温度场的变化,探讨变形参数对界面复合效果的影响。结果表明,热压缩温度较高时,双金属界面的回复和再结晶程度增大,有利于界面结合;增大变形量可以增加界面结合程度;减小应变速率使热压缩复合时间增加,界面反应更充分,进而提高界面结合效果;通过正交试验法确定了最佳试验参数,变形温度为 1 150 ℃、应变速率为 0.1 s⁻¹ 和变形量为 65%。结果发现,双金属结合界面元素扩散充分,结合层厚度约为 22 μm,界面冶金结合良好。

关键词 40Cr/Q345B 双金属;ABAQUS;等效应变;界面复合;组织演变

中图分类号 TB331;TG132;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.11.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Hot Compression Compositied Behavior and Interface Microstructure
Evolution of Bimetal

Li Yuhuan, Qin Fangcheng, Liu Chongyu, Qi Haiquan, Wang Xin, Weng Kaihang
(College of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology)

Abstract: The 40Cr/Q345B bimetal was compressed and simulated by ABAQUS finite element software under different deformation temperature, strain rate and deformation. The changing law of equivalent strain, residual stress and temperature distributions in bimetal interface were analyzed, and the effects of deformation parameters on the composited interface were explored. The results indicate that the degree of interface recovery and recrystallization are increased at a higher temperature, which is beneficial to interface bonding, and the degree of interface bonding is enhanced with the deformation strain increasing. As the rate increases, the composited time is prolonged and interface reaction is sufficient, further strengthening the degree of interface bonding. By means of orthogonal tests, the optimum temperature of 1 150 ℃, strain rate of 0.1 s⁻¹ and strain of 65% are provided. The experimental results reveal that the element diffusion in bimetal interface is sufficient with a thickness of 22 μm, achieving desirable metallurgical bonding.

Key Words: 40Cr/Q345B Bimetal, ABAQUS Software, Equivalent Strain, Interface Bonding, Microstructure Evolution

收稿日期:2021-05-18;修改稿收到日期:2021-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875383);广西自然科学基金资助项目(2019GXNSFAA245051,2018GXNSFBA281056)

第一作者简介:李宇焕,男,1999 年出生,本科生,广西桂林(030024),E-mail:2215607630@qq.com

通信作者:秦芳诚,男,1988 年出生,讲师,广西桂林(030024),E-mail:qinfangcheng@glut.edu.cn

引用格式:李宇焕,秦芳诚,刘崇宇,等. 双金属热压缩复合行为及界面组织演变[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(11):1 430-1 435.

LI Y H, QIN F C, LIU C Y, et al. Hot compression composited behavior and interface microstructure evolution of bimetal[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11):1 430-1 435.

[17] GAN J Q, HUANG Y J, WEN C, et al. Effect of Sr modification on microstructure and thermal conductivity of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(11): 2 879-2 890.

[18] 熊敬晨. 高导热低膨胀高硅铝合金的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.

[19] LI B C, HOU L G, WU R Z, et al. Microstructure and thermal conductivity of Mg-2Zn-Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 722: 772-777.

[20] KIM Y, CHOI S, HONG S. The behavior of thermal diffusivity change according to the heat treatment in Al-Si binary system[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 687: 54-58.

[21] 李斌,杨昭,杨续跃,等. 通过测量晶格畸变研究 Si 和 Cu 对 Al-Si 合金电导率的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46 (11): 4 028-4 033.

[22] QI M F, KANG Y L, QIU Q Q, et al. Microstructures, mechanical properties, and corrosion behavior of novel high-thermal-conductivity hypoeutectic Al-Si alloys prepared by rheological high pressure die-casting and high pressure die-casting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 749: 487-502.

[23] 钟群鹏. 断口学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.

[24] 冉广,周敬恩,王永芳,等. 铸造 A356 铝合金的微观组织及其拉伸性能研究[J]. 金属热处理, 2007, 32(3): 13-18.

(编辑:栗万仲)