

# 挤压成形及热处理对过共晶 Al-15Si 合金组织和性能的影响

刘 涛, 游志勇, 赵薛生, 马振星, 于 杰, 王 彬

(太原理工大学材料科学与工程学院, 山西太原 030024)

**摘要:** 采用金属型铸造及挤压铸造两种工艺制备了过共晶Al-15Si合金, 再经过固溶时效热处理(T6), 观察其组织与性能。结果表明, 挤压铸造及T6热处理均可改善并提高该合金的组织与性能。相比金属型铸造, 挤压铸造后, 合金微观组织中各相均得以不同程度的细化, 且出现了初生 $\alpha$ -Al枝晶, 合金抗拉强度由255 MPa提升到278 MPa, 硬度由HV81.7提高到HV93.7。T6热处理后, 合金微观组织形貌趋于圆整化, 金属型合金抗拉强度提升至315 MPa, 硬度提高至HV96.2, 而挤压合金抗拉强度提升至341 MPa, 硬度值提高到HV107.3。

**关键词:** 挤压铸造; 热处理; 组织; 性能; 过共晶Al-Si合金

铝硅合金作为铝合金中比重最小的一类合金无疑成为轻量化铝合金材料发展的重点之一。过共晶铝硅合金较亚共晶、共晶铝硅合金有着更为优异的低膨胀性、高耐磨性、高温性能、低比重等性能, 在内燃机活塞、汽车涡轮增压器等零件上有着更好的应用前景<sup>[1-3]</sup>。常规金属型铸造下, 过共晶铝硅合金微观组织中粗大、棱角尖锐的块状初生硅和片层状共晶硅, 在受到应力作用时, 会严重割裂铝基体, 使得合金综合性能变差, 应用受限<sup>[4]</sup>。采用变质处理可以有效改善过共晶铝硅合金组织及性能, 目前常用的变质元素主要是P和Sr等。P对初生硅有着很好的细化作用<sup>[5]</sup>, P加入合金熔体中可生成AlP粒子, AlP粒子可作为初生硅的异质形核核心, 提高初生硅的形核率, 从而细化初生硅<sup>[6]</sup>。Sr对共晶硅有着很好的变质效果<sup>[7]</sup>, Sr可以吸附在共晶硅的固液生长界面台阶处, 抑制共晶硅的生长, 从而改变共晶硅的生长方式, 产生变质效果<sup>[8]</sup>。但仅靠变质来改善过共晶铝硅合金的组织与性能已经满足不了人们对材料性能愈来愈高的要求, 还需在制备工艺上对合金进行优化, 挤压铸造独有的低速充型和高压补缩凝固的特点, 兼具了铸造和锻造的优势, 是一种先进的金属制备工艺<sup>[9]</sup>。

本文中, 我们选用P+Sr复合变质, 采用金属型铸造和近液相线法+挤压铸造两种工艺制备了Al-15Si合金, 然后对合金进行了T6热处理, 大幅改善了合金的微观组织, 并提高了其力学性能。为高性能过共晶Al-Si合金的制备提供一种新的工艺与理论依据, 对扩大过共晶Al-Si合金市场应用具有一定的实践意义。

## 1 试验材料及方法

采用ZL109为原材料, Si、Cu、Ni、Mn元素分别以Al-30Si、Al-50Cu、Al-20Ni、Al-20Mn中间合金形式添加, Mg以纯镁方式添加, Al以纯铝方式添加, 变质元素P、Sr分别以Cu-8P、Al-10Sr中间合金方式添加。试验合金Al-15Si化学成分见表1。

表1 试验合金Al-15Si化学成分  
Table 1 Chemical composition of the Al-15Si alloy

Si	Cu	Mg	Ni	Mn	Al
14~16	0.8~1.2	0.8~1.2	0.8~1.2	0.5~0.7	余量

作者简介:

刘涛(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高性能铝合金及成形工艺。E-mail: 2386326156@qq.com

通讯作者:

游志勇, 男, 副教授, E-mail: youzhiy1486@163.com

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

10-1235-05

收稿日期:

2022-03-07 收到初稿,

2022-04-14 收到修订稿。

合金熔炼过程：计算配料，称重，打磨去皮，在电阻炉中进行熔炼，将石墨坩埚预热到500~600℃，加入预先称量且预热好的ZL109和Al-30Si，升温到880℃待其熔化，后加入预热后的中间合金适当搅拌至熔融态，随即加入0.4%的 $C_2Cl_6$ 精炼剂进行精炼扒渣，随后控温到850℃加入0.15%P变质40 min，降温到750℃加入0.06%Sr变质30 min，最后降温到690℃保温5~10 min，精炼扒渣后浇注到200℃的铜模中得到金属型铸造合金。挤压铸造合金前期熔炼步骤同上，最后降温至640℃保温30 min，精炼扒渣后，快速转移至实验室自制模具中进行挤压，挤压力150 MPa，保压时间60 s，模具预热温250℃，挤压铸造成形模具示意图如图1所示。最后，对金属型铸造合金和挤压铸造合金进行T6热处理，T6热处理工艺为485℃×8 h+20~70℃水淬+185℃×8 h。

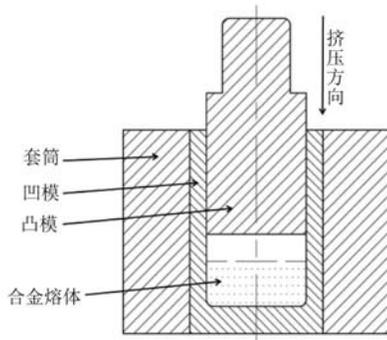


图1 挤压铸造成形模具示意图

Fig. 1 Schematic diagram of forming die of the squeeze casting

使用X射线衍射仪（EMPYREANDY 2589型）对合金进行物相分析；使用金相显微镜（Leica 6000M型）和扫描电镜（Gemini SEM 300型）对合金显微组织进行观察分析；使用Image Pro Plus 6.0图像处理软件对合金显微组织中初生硅的平均晶粒尺寸及圆整度进行测量；通过万能拉伸试验机（DNS 100型）对合金拉伸性能进行测试，拉伸速率为0.05 mm/s；通过华银维

氏硬度仪（HVS-1000A型）对合金硬度进行测量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 挤压铸造及热处理对 Al-15Si 合金组织的影响

在Al-15Si合金的平衡凝固过程中，合金液中先析出初生硅，随后温度降到共晶温度发生共晶反应析出共晶硅和 $\alpha$ -Al相。Cu、Mg元素部分固溶进Al基体中起到固溶强化作用，部分生成 $Al_2Cu$ 、 $Mg_2Si$ 等相，在固溶时效过程中弥散析出提高合金力学性能。由于原材料中含有约0.3%的Fe元素，加之后续熔炼过程中不可避免的混进Fe元素，采用Mn元素来中和Fe元素形成的 $\alpha$ -Fe带来的不利影响。Ni元素则与Al、Cu元素形成 $Al_3CuNi$ 等三元高温稳定相以提高合金的高温性能。

采用X-Ray衍射及扫描电镜SEM结合EDS对Al-15Si合金微观组织相进行分析，最后确定Al-15Si合金的微观组织由初生硅、共晶硅、 $\alpha$ -Al、 $Al_2Cu$ 、 $Mg_2Si$ 、 $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ 、 $Al_4(Fe, Mn)Si_2$ 和 $Al_3CuNi$ 组成。图2为Al-15Si合金的XRD图谱，图3为Al-15Si合金的SEM及EDS能谱分析。

图4为金属型铸造和挤压铸造两种工艺及T6热处

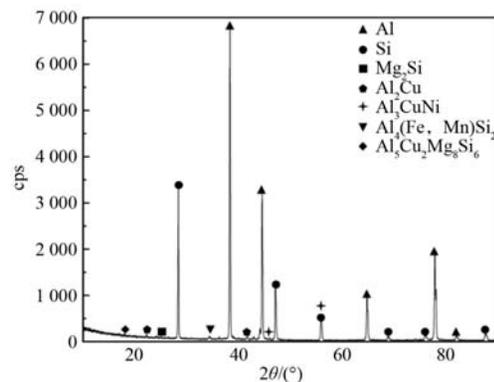
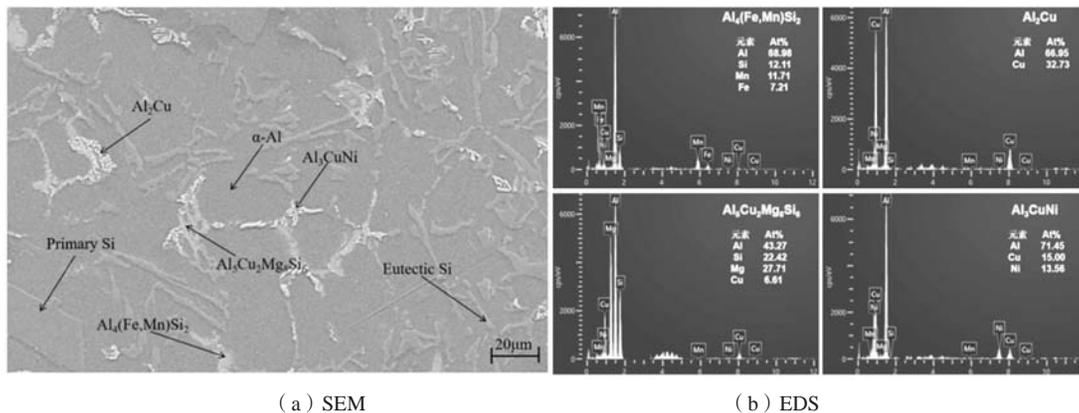


图2 Al-15Si合金的XRD图

Fig. 2 XRD patterns of the Al-15Si alloy



(a) SEM

(b) EDS

图3 Al-15Si合金的SEM及EDS

Fig. 3 SEM and EDS of the Al-15Si alloy

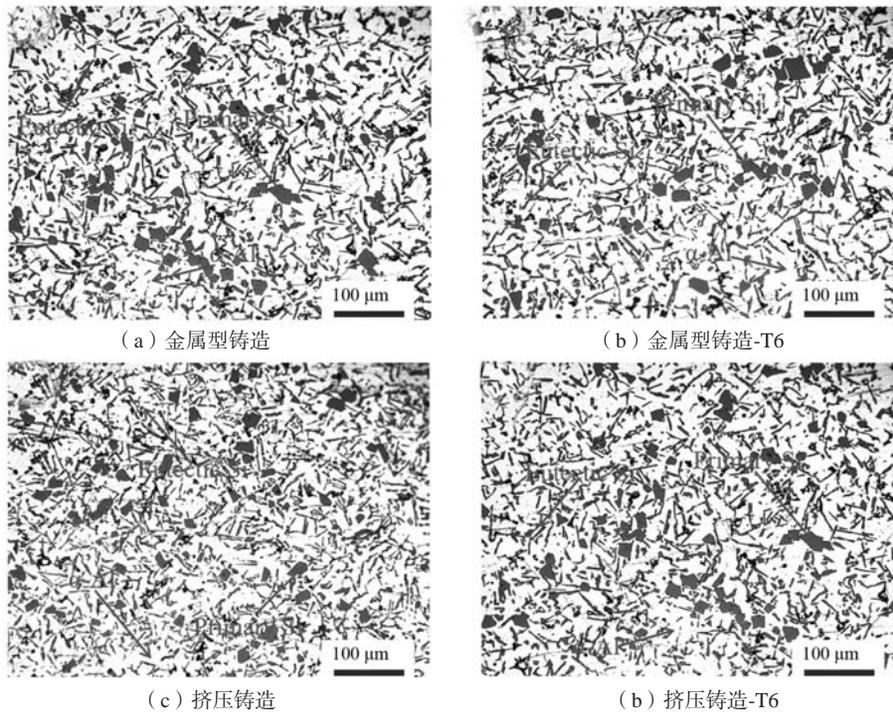


图4 不同工艺及T6热处理后Al-15Si合金的OM显微组织图

Fig. 4 OM microstructures of the Al-15Si alloys after different processes and T6 heat treatment

理后Al-15Si合金的显微组织。对比图4a、c可知，挤压铸造工艺制备的Al-15Si合金组织中初生硅、共晶硅的尺寸略有减小。原因是，与金属型铸造相比，挤压铸造过程中的压力使得金属液与模具之间的间隙减小，增大了换热系数，加快了合金液的凝固速度，增大了形核过冷度，提高了形核率，使晶粒细化，且较低的近液相线浇注温度缩短了初生硅凝固温度区间，抑制了初生硅的长大，初生硅来不及长大，温度便已经降到共晶温度开始形成共晶组织，最终使初生硅细化。挤压铸造工艺制得的Al-15Si合金组织中还出现了初生 $\alpha$ -Al枝晶。原因是，挤压过程中的压力改变了Al-Si合金相图<sup>[10]</sup>，使得共晶点沿高硅高温方向移动，加上较快的凝固速度，近共晶合金发生非平衡凝固，组织中出现了少量的初生 $\alpha$ -Al枝晶。

比较T6热处理前后合金微观组织，可以发现，热处理后部分初生硅棱角、共晶硅尖角处发生钝化，且部分共晶硅尺寸变短。原因是，初生硅的棱角以及共晶硅的尖角处能量高于其他位置，在固溶过程中，初生硅及共晶硅的棱角、尖角处的Si原子优先扩散或向基体中溶解，共晶硅的凹陷、缺陷处受到热扩散作用优先熔断，最终使得初生硅形貌圆整化，共晶硅演变为短棒状及点状。

图5是金属型铸造和挤压铸造两种工艺及T6热处理后Al-15Si合金微观组织中初生硅的平均晶粒尺寸和形状因子K。由图可知，挤压铸造工艺制备的Al-15Si合金

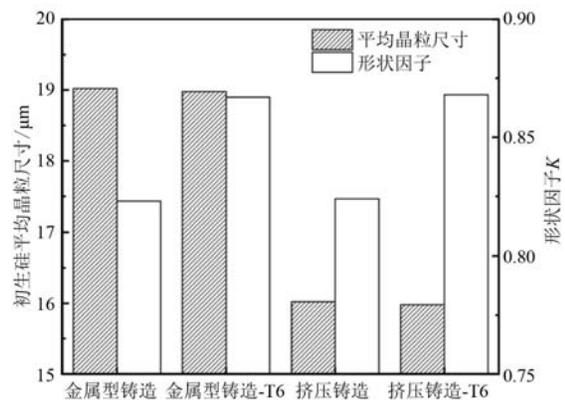


图5 不同工艺及T6热处理后Al-15Si合金的初生硅平均晶粒尺寸和圆整度

Fig. 5 The average grain sizes and roundnesses of the primary silicon of the Al-15Si alloys after different processes and T6 heat treatment

微观组织中初生硅平均晶粒尺寸减小。T6热处理后，初生硅形状因子增大，其形貌更加圆整。

## 2.2 挤压铸造及热处理对 Al-15Si 合金力学性能的影响

图6为金属型铸造和挤压铸造两种工艺及T6热处理后Al-15Si合金的抗拉强度和硬度。由图可得，相比金属型铸造，挤压铸造工艺制备的Al-15Si合金的抗拉强度由255 MPa提高到278 MPa，硬度由HV81.7提升到HV 93.7。T6热处理后，两种工艺制备的Al-15Si合金

抗拉强度均大幅提高,金属型Al-15Si合金抗拉强度由255 MPa提升到315 MPa,硬度由HV81.7提升到HV96.2,而挤压Al-15Si合金抗拉强度由278 MPa提升到341 MPa,硬度由HV93.7提高到HV107.3。

合金的微观组织决定着合金的综合力学性能。在过共晶铝硅合金中,合金的综合力学性能很大程度上决定于初生硅和共晶硅的尺寸、形貌及分布,尺寸越小,形貌越圆整,分布越均匀,合金的综合力学性能就越好。合金在受到拉应力或压应力作用时,硬质硅相尖锐处对基体的割裂效果显著,易产生应力集中,裂纹在该处萌生,在软质基体中快速扩展,微裂纹扩展连接在一起,致使合金断裂失效。通过挤压铸造制备得到的合金微观组织中的初生硅、共晶硅及第二相尺寸均有所减小,小尺寸的硬质相对基体的割裂效果要低,对位错运动的阻碍及钉扎作用效果更好,显著提高了合金的抗拉强度和硬度。此外,挤压铸造所提供的压力还可以增大合金元素在基体中的固溶度,起到了固溶强化合金的作用。

T6热处理后,初生硅和共晶硅尺寸基本无变化,但形貌愈来愈圆整,且分布愈加均匀,形貌的圆钝化提高了硬质相和基体的结合能力;Al<sub>2</sub>Cu、Mg<sub>2</sub>Si等强化相呈小尺寸弥散均匀地分布在基体上,起到了固溶强化和沉淀强化的作用;合金元素分布均匀化,消除了部分成分偏析,改善了应力集中现象。种种原因复合在一起,使得T6热处理后,合金的抗拉强度显著增加,硬度也有些许提高。

### 3 结论

(1) 挤压铸造可以改善并提高Al-15Si合金的组

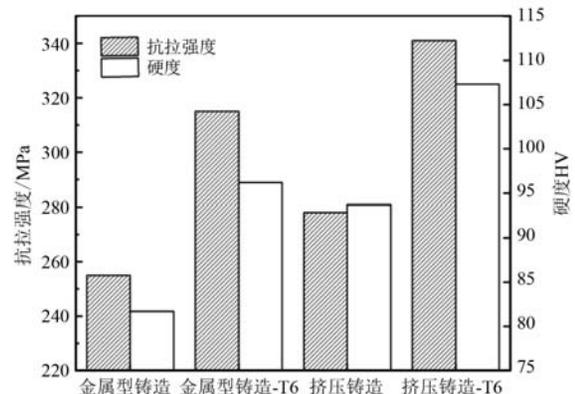


图6 不同工艺及T6热处理后Al-15Si合金的抗拉强度和硬度  
Fig. 6 Tensile strengths and hardnesses of the Al-15Si alloys after different processes and T6 heat treatment

织和性能。相比金属型铸造,挤压铸造工艺制备的Al-15Si合金,其微观组织中初生硅、共晶硅均得以不同程度的细化,且出现了先 $\alpha$ -Al枝晶,其抗拉强度从255 MPa提高到278 MPa,其硬度由HV81.7提升到HV93.7。

(2) T6热处理可以改善并优化Al-15Si合金的组织性能。T6热处理后,两种工艺制备的Al-15Si合金,其微观组织中初生硅、共晶硅的形貌均趋于圆整化,Al<sub>2</sub>Cu、Mg<sub>2</sub>Si等相弥散均匀分布,成分偏析部分消除。金属型铸造工艺制备的Al-15Si合金经T6热处理后,抗拉强度从255 MPa提升到315 MPa,硬度由HV81.7提升到HV96.2。挤压铸造工艺制备的Al-15Si合金经T6热处理后,抗拉强度从278 MPa提升到341 MPa,硬度由HV93.7提升到HV107.3。

#### 参考文献:

- [1] HAGHAYEGHI R, ZOQUI E J, TIMELLI G. Enhanced refinement and modification via self-inoculation of Si phase in a hypereutectic aluminium alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 294-303.
- [2] TIWARI K, GAUTAM G, KUMAR N, et al. Effect of primary silicon refinement on mechanical and wear properties of a hypereutectic Al-Si alloy [J]. Silicon, 2018, 10 (5): 2227-2239.
- [3] 刘洋. 铝硅合金性能研究 [J]. 科技风, 2017 (11): 266-266.
- [4] 蔡宗德, 张连芳, 孙建荣. 过共晶铝硅合金的生产及其应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 1990 (4): 37-39.
- [5] ZHANG H, HAILI D, GUANGJIE S, et al. Microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloy modified with Cu-P [J]. Rare Metals, 2008, 27 (1): 59-63.
- [6] 朱运茂, 王奎, 蒋海燕, 等. 过共晶铝硅合金硅相复合变质的研究进展 [J]. 上海金属, 2019, 41 (5): 97-104.
- [7] 吴永福, 长海博文. Al-Si系合金共晶硅变质处理的研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (9): 31-37.
- [8] LI J H, WANG X D, LUDWIG T H, et al. Modification of eutectic Si in Al-Si alloys with Eu addition [J]. Acta Materialia, 2015, 84: 153-163.
- [9] 张锦升, 罗守清, 霍文灿. 液态模锻工艺与设备 [J]. 锻压机械, 1985 (3): 41-42.
- [10] 张国志, 于溪凤, 王向阳, 等. 超高压凝固Al-Si合金的非平衡组织 [J]. 金属学报, 1999, 35 (3): 285-288.

---

## Effects of Squeeze Casting and T6 Heat Treatment on Microstructures and Properties of Hyper-Eutectic Al-15Si Alloy

LIU Tao, YOU Zhi-yong, ZHAO Xue-sheng, MA Zhen-xing, YU Jie, WANG Bin  
(School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

### Abstract:

Hyper-eutectic Al-15Si alloys were prepared by metal mold casting and squeeze casting, and its microstructure and properties were observed after solution aging treatment (T6). The results showed that both squeeze casting and T6 heat treatment improved the microstructure and properties of the alloy. Compared with the metal mold casting, the microstructure of the alloy was refined to different degrees, and the pre- $\alpha$ -Al dendrite appeared. The tensile strength of the alloy was increased from 255 MPa to 278 MPa, and the hardness was increased from HV81.7 to HV93.7. After T6 heat treatment, the microstructure of the alloy tended to be rounded. The tensile strength of the alloy using the metal mold casting was increased to 315 MPa and the hardness was increased to HV96.2, while the tensile strength of the extruded alloy was increased to 341 MPa and the hardness was increased to HV107.3.

### Key words:

squeeze casting; heat treatment; microstructure; properties; hyper-eutectic Al-Si alloy

---