

深冷处理对压铸铝硅合金力学性能与微观组织的影响

陶 诚^{1, 2}, 程晓农¹, 李志强¹, 许福海¹, 刘光磊¹, 谢树宽², 匡中华², 郭 勇², 吕 鹏¹

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏镇江 212013; 2. 江苏铭利达科技有限公司, 江苏南通 226602)

摘要: 借助Image-Pro Plus辅助分析, 采用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、电子背散射(EBSD)等手段, 研究了深冷处理对压铸铝硅合金微观组织和力学性能的影响。结果表明: 深冷处理可以有效提升压铸铝硅合金的力学性能。随着深冷时间的延长, 深冷处理对合金力学性能的提升作用为先增加后减小的变化规律。与铸态合金相比, 经12 h深冷处理后合金的力学性能获得最大的提升, 抗拉强度为213.2 MPa, 提升了15.4%, 伸长率为8.65%, 提升了36.2%, 硬度HV为106.6, 提升了18.1%。继续延长深冷时间, α -Al相、共晶Si相等开始缓慢长大, 导致力学性能有所下降。深冷处理可以有效细化合金的 α -Al相, 改善共晶Si相和含铁相的尺寸和形貌, 起到了细化组织和位错强化的作用。

关键词: 压铸铝硅合金; 深冷处理; 微观组织; 力学性能; 强化机理

作者简介:

陶 诚 (1975-), 男, 博士, 主要从事铸造与金属材料强化研究。E-mail: zhengqi077@163.com

通讯作者:

程晓农, 男, 教授, 博士。E-mail: chengxiaonong@hotmail.com

刘光磊, 男, 副教授, 博士。E-mail: 106409480@qq.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)09-1152-06

基金项目:

国家自然科学基金青年项目(51801076); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(18KJB430009); 江苏省博士后科研资助计划项目(1601055C); 江苏大学高级人才科研启动(14JDG126)。

收稿日期:

2023-04-11 收到初稿,

2023-06-01 收到修订稿。

汽车是能源消费大户, 碳排放占比达13%以上。据统计^[1-3]车重每减少100 kg, 二氧化碳排放可减少约5 g/km; 同时, 车重每降低10%, 电耗可降低5.5%, 续航里程增加5.5%以及节约20%的日常损耗成本。因此, 减重对汽车工业的发展具有非常重要的意义。铝合金是目前最热门的轻量化材料, 而压铸件具有质量高、力学性能好、效率高、适合大批量生产等优点, 所以铝合金压铸件被广泛应用于汽车车体、轮毂、底盘、防撞梁、电池壳体等^[4-5]。但由于压铸工艺的速度快、时间短, 压铸型腔内的气体很难在短时间逸出, 从而被卷在铸件中, 导致其进行常规热处理时容易产生气孔缺陷, 大大降低了铸件的力学性能, 限制了压铸铝合金的规模化应用^[6-8]。

深冷处理是一种以液氮为介质在-130 ℃以下对材料进行处理的方法, 可以使材料的显微组织产生变化, 进而改善材料的力学性能^[9-11]。目前, 深冷处理作为重要的强化手段在钢铁材料上已经得到了广泛应用^[12-16]。近年来, 受全球节能环保重视程度的影响, 铝合金材料深冷处理工艺方面的研究俨然成为热点和焦点问题。李桂荣等^[17-18]分别对铝基复合材料、铝硅合金进行深冷处理发现, 深冷处理可以促进第二相的析出, 通过阻碍位错运动以提升材料的力学性能。吴志生等^[19]对5A06铝合金焊接接头进行深冷处理发现, 深冷处理后焊接接头组织晶粒得到细化, 孔隙缺陷减少, 基体致密度提高。陈鼎等^[20]对不同成分的铝合金进行深冷处理提出深冷处理诱发的体积收缩效应对力学性能的提升起到了重要作用。杨叶等^[21]对铝硅合金进行深冷处理发现经过深冷处理可以使组织中富铁相钝化, 大大减小了对基体的割裂作用, 有效地提升了铝合金的力学性能。周建忠等^[22]对激光喷丸铝合金进行深冷处理发现, 深冷处理可以抑制位错的动态回复, 在试样中产生高密度的位错进而产生很好的组织强化效果。总之, 深冷处理对不同成分的铝合金的强化效果并不相同, 强化机制尚未达成共识。还有研究^[23-25]将固溶、时效等传统热处理方法与深冷处理复合使用, 发现二者协同能够进一步提升铝合金的力学性能, 但处理工艺更加复杂、处理时间较长。目前关于压铸铝硅合金深冷处理方面的研究较少, 深冷时间对压铸铝硅合金的作用效果、影响规律尚不明确。

本文以压铸铝硅合金为研究对象，通过对比分析不同时间深冷处理试样的力学性能和微观组织变化规律，深入分析了深冷处理对压铸铝硅合金的强化机理，揭示了提高压铸铝硅合金性能的最佳深冷处理工艺，为进一步完善深冷处理在铸造铝合金领域的应用提供理论基础。

1 试验材料及方法

试验材料为压铸铝硅合金，用德国布鲁克S1-

TITAN型手持光谱仪测试其成分如表1所示。试验试样共分5组，具体处理工艺及试样编号如表2所示。采用线切割的方法将铸锭加工成10 mm × 10 mm × 5 mm 的立方体和如图1所示的拉伸试样。深冷处理在液氮深冷罐中进行。利用MTS-DDL100型电子万能试验机测试各组试样的力学性能，试验条件：室温，拉伸速率为1 mm/min，每组试样测试3次取平均值。利用FM-ARS900型显微硬度计测量显微硬度，每组试样测试5个点并取其平均值。

表1 压铸铝硅合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of the die casting Al alloys

Al	Si	Cu	Zn	Fe	Mg	Mn	Ni	Cr	其他元素
84.90	10.42	2.10	0.99	0.93	0.23	0.20	0.06	0.05	余量

表2 压铸铝硅合金深冷处理工艺方案
Table 2 Cryogenic treatment processes of the die casting Al alloy

分组	试样状态	工艺过程
A	铸态	无
B	深冷-6 h	深冷 (-196 °C - 6 h)
C	深冷-12 h	深冷 (-196 °C - 12 h)
D	深冷-24 h	深冷 (-196 °C - 24 h)
E	深冷-48 h	深冷 (-196 °C - 48 h)

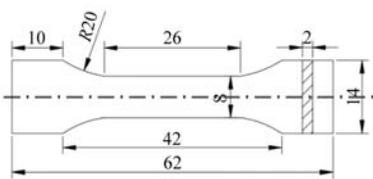


图1 拉伸试样的形状及尺寸
Fig. 1 Shape and size of tensile test sample

金相试样打磨抛光后用体积分数0.5%的HF试剂对其表面进行腐蚀，采用 Observer.Z1m 型Zeiss光学显微镜 (OM)、HitachiSU-1510型扫描电子显微镜 (SEM) 和电子背散射 (EBSD) 对试样进行显微组织观察。采用Image-Pro Plus图像分析软件对压铸铝硅合金的组成相进行统计分析。其中，α-Al相的平均粒径计算方法如图2和公式(1)所示。

计算方法如公式(1)所示：

$$D = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} L_i \quad (1)$$

式中： L_i 是穿过质心的直径尺寸。 D 为平均粒径：在任意晶粒中，以 2° 为间隔穿过晶粒质心的90条线段的平均长度。

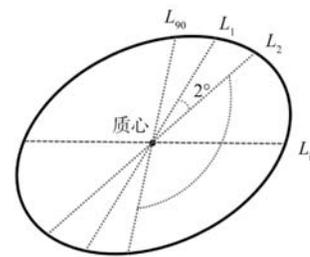


图2 平均粒径的计算方法示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the calculation method of the average particle size

2 试验结果

2.1 深冷处理对力学性能的影响

图3是不同深冷处理工艺下压铸铝硅合金的力学性能。铸态时，合金的抗拉强度为184.8 MPa，伸长率为6.35%，硬度为HV 90.3。深冷处理能够有效提升压铸铝硅合金的力学性能，经不同时间深冷处理后，合金的力学性能呈现先增加后降低的变化规律。当

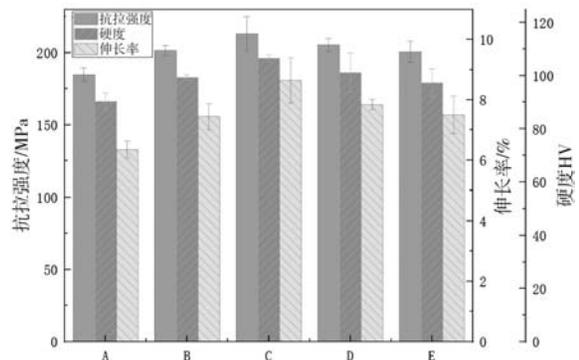


图3 不同深冷处理工艺下压铸铝硅合金的力学性能
Fig. 3 Mechanical properties of the die casting Al alloys under different cryogenic treatment processes

深冷处理时间为12 h时,合金的力学性能获得最大的提升,抗拉强度为213.2 MPa,伸长率为8.65%,硬度为HV106.6。与铸态合金性能相比,抗拉强度提升了15.4%,伸长率提升了36.2%,硬度提升了18.1%。继续延长深冷处理时间,虽然合金力学性能的提升程度逐渐减小,但仍高于铸态铝硅合金的力学性能。当深冷处理时间为48 h时,合金的抗拉强度为200.6 MPa,伸长率为7.5%,硬度为HV97.4,已经低于深冷处理6 h后合金的力学性能。从节能环保和生产效率的角度出发,继续增加深冷处理时间以改善压铸铝硅合金的力学性能意义不大。

2.2 深冷处理对 α -Al相的影响

图4是不同深冷处理工艺下压铸铝硅合金 α -Al相的形貌。对于铸态压铸铝硅合金,如图4a所示, α -Al相较为粗大,柱状晶较多。利用Image-Pro Plus分析测得平均粒径为27.22 μm 。图4b是深冷处理6 h后的组织, α -Al相得到了细化且粗大的柱状晶减少,但仍存在部分团聚现象,平均粒径为24.42 μm 。随着深冷时间的延长, α -Al相得到进一步细化。当深冷时间为12 h时, α -Al相最为细小,平均粒径为22.41 μm 。继续增加深冷时间,与深冷12 h试样相比, α -Al相平均粒径略有增加,但其大小仍低于铸态合金。总之,深冷处

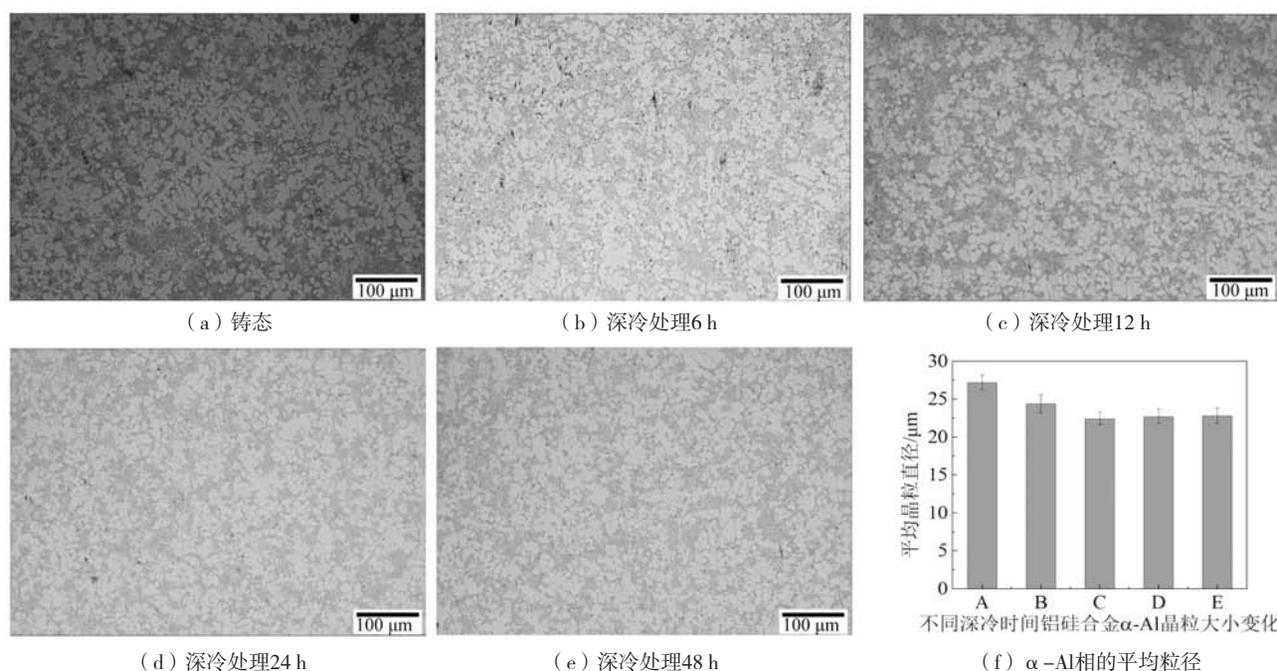


图4 不同深冷处理工艺下压铸铝硅合金 α -Al相的组织形貌

Fig. 4 Microstructures of α -Al phase in the die casting Al alloys under different cryogenic treatment processes

理能够起到晶粒细化的作用,减少柱状晶和 α -Al相的团聚,促使组织结构分布更加均匀。

2.3 深冷处理对共晶Si相的影响

图5是不同深冷处理工艺下压铸铝硅合金共晶Si相的形貌。铸态合金的共晶Si相多为片状、条状如图5a所示。经深冷处理后,共晶Si相开始变短、变细,向颗粒状转变。当深冷时间为12 h时,共晶Si相得到显著细化,且趋于圆形,如图5c中箭头所示。继续增加深冷时间,共晶Si相再次开始缓慢长大,如图5d和e所示。

2.4 深冷处理对含铁相的影响

图6是铸态、深冷12 h态压铸铝硅合金含铁相的形貌。铸态合金中含有多边形块状的AlFeMnSi相和长针状的 Al_3FeSi 相,如图6a所示。经深冷处理后, Al_3FeSi

相发生收缩钝化,其轮廓变得圆滑。而棱角分明的AlFeMnSi相同样趋于圆整化,如图6b中箭头所示。经过深冷处理,压铸铝硅合金中含铁相尺寸变小及其形貌的变化大大降低了对铝基体的割裂作用。

3 分析讨论

铝硅合金在深冷处理作用下产生体积收缩,使得材料内部产生微观应力,促使材料发生塑性变形。图7为深冷过程产生组织细化进程示意图。深冷处理前,合金中位错零散分布,密度较低,如图7a所示;深冷处理开始阶段,如图7b所示,微观应力较小,晶粒内部的位错会在局部聚集并形成位错墙;随着深冷处理的进行,应力累积增加,位错聚集成为小角度晶界,使得晶粒得到细化,如图7c所示;合金中的Si、Fe等溶

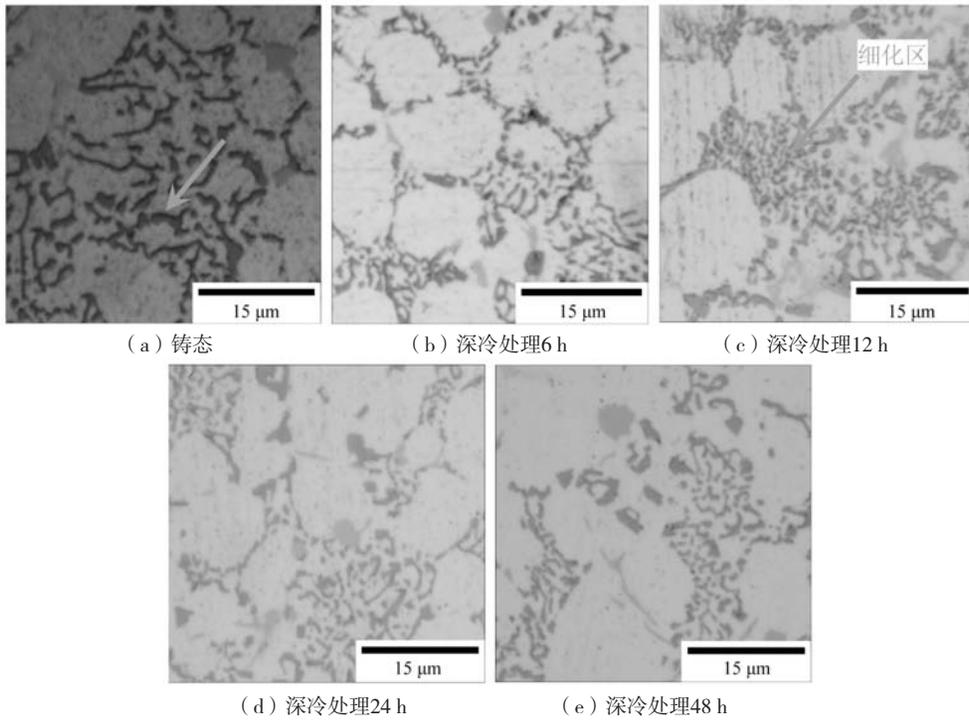


图5 不同深冷处理工艺下压铸铝硅合金共晶Si相的微观组织

Fig. 5 Microstructures of eutectic Si phase in the die casting Al alloys under different cryogenic treatment processes

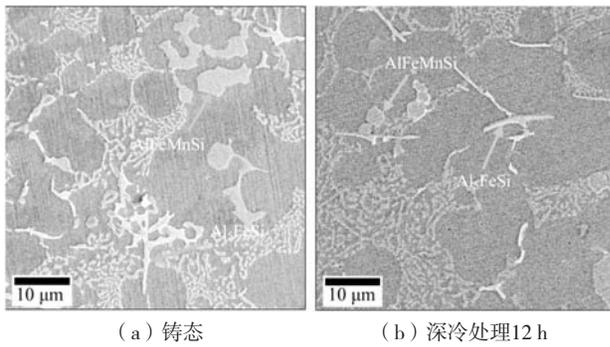


图6 铸态和深冷12 h态压铸铝硅合金含铁相的组织形貌

Fig. 6 Microstructures of Fe phase of the die casting Al alloys in the as-cast and cryogenic 12 h states

质原子在铝基体中的溶解度降低，溶质原子将向晶界附近位错密集处偏聚。随着深冷时间的延长，Si相和富铁相在晶界处析出，如图7d所示，这些析出相更为细小均匀且形貌圆整，钉扎晶界，阻碍位错运动，对铝合金力学性能的提升具有显著作用。图8为铸态和深冷12 h态两种试样EBSD晶粒大小分布示意图。在深冷处理作用下，铝硅合金确实产生了许多细晶组织，如图中箭头所示。根据Hall-Petch公式：

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中： σ_s 为多晶体的屈服强度； d 为晶粒的平均直径； σ_0 为晶内对变形的阻力，相当于单晶的屈服强度； K

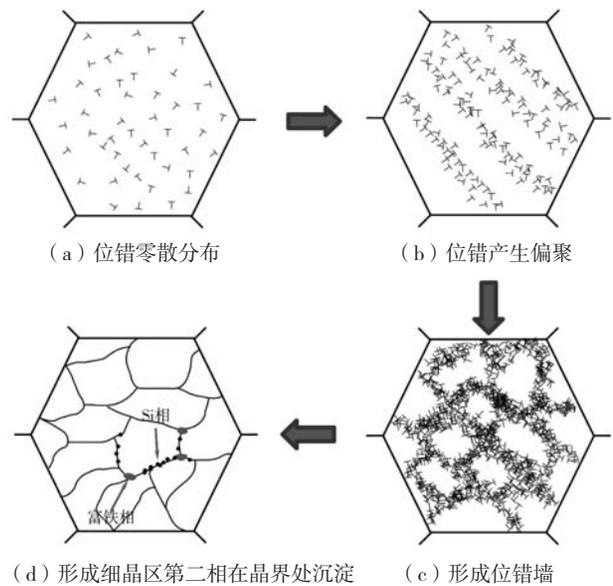
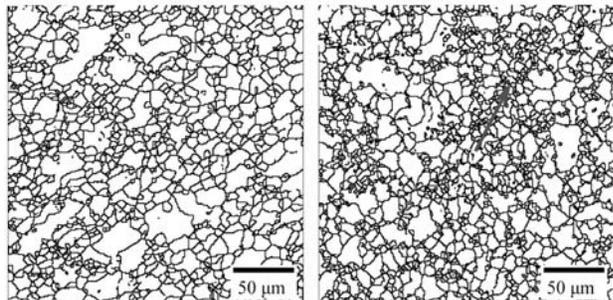


图7 深冷过程晶粒变化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of grain change in the cryogenic process

为晶界对变形的影响系数，与晶界结构相关。由此可知：晶粒越小，屈服强度越大，位错难以运动。这是深冷12 h后，合金抗拉强度与塑性均得到提升的主要原因。



(a) 铸态 (b) 深冷处理12 h

图8 铸态与深冷12 h后EBSD晶粒尺寸示意图

Fig. 8 Schematic diagram of EBSD grain sizes after casting state and cryogenic for 12 h

4 结论

(1) 深冷处理可以显著地提升铸造铝硅合金的力学性能。随着深冷时间的延长,提升作用呈现先增加后减小的变化规律。当深冷时间为12 h时,其提升作用达到最佳。

(2) 与铸态合金相比,深冷12 h后,压铸铝硅合金的抗拉强度由184.8 MPa变为213.2 MPa,提升了15.4%,伸长率由6.35%变为8.65%,提升了36.2%,硬度由HV90.3变为HV106.6,提升了18.1%。

(3) 深冷处理会引起压铸铝硅合金体积收缩产生塑性变形,并降低元素在铝中的溶解度,导致 α -Al相和共晶Si相组织细化,促使含铁相形貌变得圆整化,起到了细晶强化和位错强化的作用。

参考文献:

- [1] ZHENG Y, LUO B, XIE W, et al. Microstructure evolution and precipitation behavior of Al-Mg-Si alloy during initial aging [J]. China Foundry, 2023, 20 (1): 57-62.
- [2] 刘贞山, 李英东, 赵经纬, 等. 汽车轻量化用铝合金材料及应用技术的研究 [J]. 中国材料进展, 2022, 41 (10): 786-795, 807.
- [3] LEWIS G M, BUCHANAN C A, JHAVERI K D, et al. Green principles for vehicle light weighting [J]. Environmental Science & Technology 2019, 53 (8): 4063-4077.
- [4] ZHAN H, XU Y, WANG P, et al. Effects of magnesium and copper additions on tensile properties of Al-Si-Cr die casting alloy under as-cast and T5 conditions [J]. China Foundry, 2023, 20 (1): 12-22.
- [5] 樊振中, 袁文全, 王端志, 等. 压铸铝合金研究现状与未来发展趋势 [J]. 铸造, 2020, 69 (2): 159-166.
- [6] LI N, MAO W, GENG X, et al. Microstructure, segregation and fracture behavior of 6061 aluminum alloy samples formed by semi-solid or traditional high pressure die casting [J]. Materials Today Communications, 2022, 31: 103418.
- [7] NIU Z, LIU G, LI T, et al. Effect of high pressure die casting on the castability, defects and mechanical properties of aluminium alloys in extra-large thin-wall castings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 303: 117525.
- [8] 金延竹, 孙树臣, 王文权, 等. 铝合金电机壳低压砂型铸造工艺设计 [J]. 铸造, 2022, 71 (2): 198-202.
- [9] SINGH G, PANDEY K N. Effect of cryogenic treatment on properties of materials: a review [J]. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part E-Journal of Process Mechanical Engineering, 2022, 236 (4): 1758-1773.
- [10] GAO Q, JIANG X, SUN H, et al. Effect mechanism of cryogenic treatment on ferroalloy and nonferrous alloy and their weldments: a review [J]. Materials Today Communications, 2022, 33: 104830.
- [11] JOVICEVIC-KLUG Patricia, PODGORNIK Bojan. Review on the effect of deep cryogenic treatment of metallic materials in automotive applications [J]. METALS, 2020, 10 (4): 434.
- [12] JOVIČEVIĆ-KLUG P, JENKO M, JOVIČEVIĆ-KLUG M, et al. Effect of deep cryogenic treatment on surface chemistry and microstructure of selected high-speed steels [J]. Applied Surface Science, 2021, 548: 149257.
- [13] VILLA M, SOMERS M A J. Cryogenic treatment of an AISI D2 steel: The role of isothermal martensite formation and "martensite conditioning" [J]. Cryogenics, 2020, 110: 103131.
- [14] 王金亮, 王晨充, 黄明浩, 等. 低应变预变形对变温马氏体相变行为的影响规律及作用机制 [J]. 金属学报, 2021, 57 (5): 575-585.
- [15] FUNK Paul A, KANAAN Ahmed, SHANK Christine, et al. Quantifying deep cryogenic treatment extent and its effect on steel properties [J]. International Journal of Engineering Science, 2021, 167: 103521.
- [16] 刘轩之, 顾开选, 翁泽钜, 等. 铝合金深冷处理研究进展 [J]. 材料导报, 2020, 34 (3): 178-183.
- [17] 李桂荣, 崔玉华, 王宏明, 等. 深冷时效循环处理铝基原位复合材料的显微组织和力学性能 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25 (5): 1168-1175.

- [18] ZHANG Wenda, BAI Peikang, YANG Jing, et al, Tensile behavior of 3104 aluminum alloy processed by homogenization and cryogenic treatment [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 (8) : 2453–2458.
- [19] 吴志生, 高珊, 刘翠荣, 等. 5A06铝合金焊接接头深冷强化机理研究 [C]//中国机械工程学会焊接学会及压力焊专业委员会, 2011: 50–54.
- [20] 陈鼎, 黎文献. 铝和铝合金的深冷处理 [J]. 中国有色金属学报, 2000 (6) : 891–895.
- [21] 杨叶, 李润霞, 张文华, 等. 深冷处理对铸造Al-Si-Cu-Mg合金组织与性能的影响 [C]//中国机械工程学会. 2014: 512–517.
- [22] 田绪亮, 周建忠, 李京, 等. 深冷激光喷丸强化对2024-T351铝合金微观组织的影响 [J]. 中国激光, 2019, 46 (9) : 103–111.
- [23] DENG Yanjun, HUANG Guangjie, CAO Lingfei, et al. Improvement of strength and ductility of Al-Cu-Li alloy through cryogenic rolling followed by aging [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27 (9) : 1920–1927.
- [24] 李茂军, 刘光磊, 蒋文辉, 等. 深冷+固溶+时效复合处理对A356合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (1) : 100–106.
- [25] HE Guoai, LI Kai, YANG Yong, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of cryogenic rolling 2195 Al-Cu-Li alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 822: 141682.

Effect of Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties and Microstructure of Die Casting Al-Si Alloys

TAO Cheng^{1, 2}, CHENG Xiao-nong¹, LI Zhi-qiang¹, XU Fu-hai¹, LIU Guang-lei¹, XIE Shu-kuan², KUANG Zhong-hua², GUO Yong², LÜ Peng¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Minglida Technology Co., Nantong 226602, Jiangsu, China)

Abstract:

The effect of cryogenic treatment on the mechanical properties and microstructure of die casting Al-Si alloys was investigated using optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and tensile testing with the aid of Image-Pro Plus-assisted analysis. The results showed that the cryogenic treatment could effectively improve the mechanical properties of the die casting Al-Si alloys. With the extension of cryogenic time, the degree of enhancement of the mechanical properties of the alloy by the cryogenic treatment showed an increasing and then decreasing pattern of change. Compared to the as-cast alloy, when the cryogenic time was 12 h, the tensile strength of the alloy was 213.2 MPa increased by 15.4%, the elongation was 8.65% increased by 36.2%, and the hardness was HV 106.6 increased by 18.1%. At this time, the mechanical properties of the alloy reached the best. Continue to extend the deep cold time, α -Al phase and eutectic Si phase began to grow slowly, which led to the decline of the mechanical properties. The cryogenic treatment can effectively refine the α -Al phase of the alloy, improve the size and morphology of the eutectic Si and Fe-containing phases, and play a role in refining the microstructure and dislocation strengthening.

Key words:

die casting Al-Si alloys; cryogenic treatment; microstructure; mechanical properties; strengthening mechanism