

挤压铸造参数对 B390 合金组织和性能的影响

王 彬 游志勇 马振星 于 杰
(太原理工大学材料科学与工程学院)

摘 要 以 B390 合金为原料,采用控制变量法研究了挤压铸造工艺参数对过共晶 Al-Si 合金组织和性能的影响。结果表明,挤压压力和浇注温度对合金组织、孔隙率和力学性能影响明显,压射速度的影响较小,但对铸件表面质量影响较大。综合考虑,认为 B390 铸件最佳挤压工艺参数:铸造压力为 150 MPa,浇注温度为 740 ℃,压射速度为 0.05 m/s,此时铸件室温抗拉强度和硬度(HB)分别为 232 MPa 和 143.4。

关键词 B390 合金;挤压铸造;初生 Si;孔隙率

中图分类号 TG249.2;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Squeeze Casting Parameters on Microstructure and Properties of B390 Alloy

Wang Bin, You Zhiyong, Ma Zhenxing, Yu Jie

(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology)

Abstract: The effects of squeeze casting process parameters on the microstructure and properties of supereutectic B390 alloy were investigated. The results reveal that the squeezing pressure and pouring temperature have obvious effects on the microstructure, porosity and mechanical properties of the alloy, while the injection velocity has little effect, which has great effect on the surface quality of the casting. It is concluded that the desirable squeezing parameters of B390 casting are presented as follows: casting pressure of 150 MPa, casting temperature of 740 ℃, and injection velocity of 0.05 m/s, where the tensile strength and hardness of the casting at room temperature reach up to 232 MPa and 143.4 HB, respectively.

Key Words: B390 Alloy, Squeezing Casting, Primary Si, Porosity

收稿日期:2023-01-26;修改稿收到日期:2023-04-14

第一作者简介:王彬,男,1998 年出生,硕士研究生,太原(030000),E-mail:2973156146@qq.com

通信作者:游志勇,男,1971 年出生,副教授,太原(030000),E-mail:13603511486@163.com

引用格式:王彬,游志勇,马振星,等.挤压铸造参数对 B390 合金组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 636-1 640.

WANG B, YOU Z Y, MA Z X, et al. Effects of squeeze casting parameters on microstructure and properties of B390 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 636-1 640.

的变形量。对 Cu-2Ag 合金进行稀土微合金化,可显著降低材料中的杂质元素含量、抑制富 Ag 相在晶界处析出、细化晶粒,这有利于提高 Cu-2Ag 合金力学性能和导电性能。然而 Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 试样的抗拉强度和电导率相对 Cu-2Ag 仅略微提高,而伸长率略微降低,这是因为稀土 Y 和 La 微合金化可能过量,在材料中形成了一些对伸长率不利的富稀土第二相,抵消了稀土微合金化对伸长率的有利作用。

3 结 论

(1)较 Cu-2Ag 合金,大变形加工至 $\phi 2.6$ mm 的 Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 合金组织更细小,且存在尺寸在 1~5 μm 、分布较均匀的富稀土相和富 Ag 相。

(2)较 Cu-2Ag 合金,大变形量加工至 $\phi 2.6$ mm 的 Cu-2Ag-0.075Y 和 Cu-2Ag-0.075La 合金试样抗拉强度和电导率均略微提高,但伸长率略微降低,拉伸断口的韧窝更多、更细、更深。

参 考 文 献

- [1] 苏华光. 导体铜及铜合金的应用和加工工艺综述[J]. 电线电缆, 2022(5): 22-29, 33.
- [2] 宋克兴,周延军,米绪军,等.铜基丝线材制备和组织性能研究进展[J].中国有色金属学报, 2020, 30(12): 2 845-2 874.
- [3] 代雪琴,贾淑果,范俊玲,等.高强高导铜合金的强化机理与研究热点[J].材料热处理学报, 2021, 42(10): 18-26.
- [4] 张道琦,张林,郭晓,等. Cu-Ag 高强高导合金的研究现状与进展[J].材料导报, 2023(37): 189-194.
- [5] 李龙健,于风云,李仁庚,等.高性能铜合金研究现状及发展趋势[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41(3): 293-298.
- [6] HUP H, ZHANG S H, CHEN S F, et al. Effect of La addition on Ag-rich phase formation and mechanical properties of Cu-2Ag alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022(18): 998-1 008.
- [7] 李桂荣,王宏明,赵玉涛,等.稀土钇对 7055 铝合金熔炼和凝固过程的作用机制[J].稀有金属材料与工程, 2010, 39(1): 80-84.
- [8] 孔令宝,周延军,宋克兴,等.拉拔变形和热处理对铜银合金组织性能的影响[J].特种铸造及有色合金, 2020, 40(10): 1 160-1 163.
- [9] 杜靖文,安佰灵,张林,等.预变形对 Cu-6Ag 合金时效析出及性能的影响[J].稀有金属材料与工程, 2023, 52(1): 403-408.
- [10] 陈俭兰,赵莫迪,韩福生.退火对冷轧 Cu-Ag 合金组织及性能的影响[J].金属热处理, 2022, 47(8): 129-134.

(编辑:刘晨辉)

目前,环境和能源问题已成为制约汽车等行业发展的关键性因素,以铝代钢进行轻量化已成为发展趋势^[1-2]。过共晶 Al-Si 合金具有强度高、耐磨性好和热膨胀系数低等特点,是制造汽车活塞、离合器等关键零部件的理想材料^[3-4]。然而,高 Si 合金易产生缩孔等缺陷和大量脆硬 Si 相,极大影响了合金的铸造性能和力学性能,因此铝合金的高强韧化得到研究者重视^[5-6]。

挤压铸造技术高压、低速的特点使合金组织细化、致密的同时还可以通过 T6 热处理对合金进行强化,已成为制造高性能铝合金零部件的重要技术^[7-8]。万里等^[9]研究了挤压参数对 A390 合金组织和性能的影响,发现压力和浇注温度对合金组织具有重大影响,挤压铸造后组织得到细化,力学性能显著提高。BIN S B 等^[10]研究了挤压铸造参数对 Al-9Si-3Cu 合金抗拉强度和伸长率的影响,发现参数对力学性能的影响程度从大到小依次为:压力、压射速度、模具温度、浇注温度。本研究以 B390 合金为材料,通过挤压铸造制备铸件,优化 B390 铝铸件的工艺参数,为后续探索 T6 热处理最佳工艺参数提供参考。

1 试验方法

1.1 合金制备

本试验采用 B390 过共晶 Al-Si 合金,材料成分见表 1。

表 1 B390 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of B390 aluminum alloy %									
w_B									
Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Ni	Ti	其他	Al
16.76	4.02	0.570	0.343	0.734	0.647	0.063 2	0.070 1	0.092 7	余量

保温炉温度升至 760~780 ℃,将 1.2%~1.8% (质量分数,下同)的 Al-4.5P 变质剂和 0.7% 的 TCB 细化剂加入炉内,静置 20 min 后通入 N₂ 气并开启除气机进行除气,除气时间为 15 min,除气机转速为 500 r/min,除气后使用扒渣勺将铝渣清理干净并静置 40 min 以上,待金属液温度降至浇注温度后准备浇注。

1.2 试验方法

铸件在 SCV-400 立式挤压铸造机上成形,使用模温机将模具温度控制在 200 ℃,保压时间设为 10 s。主要通过控制变量法研究压力、浇注温度和压射速度对铸件质量和性能的影响,具体试验方案见表 2。

拉伸试样采用本体取样,试样尺寸见图 1。拉伸试验在 WDW-200E 微机控制电子万能试验机上进行,拉伸速率为 0.5 mm/min,每种工艺取相同位置 5 个试样测试,结果取平均值。

表 2 B390 铸件挤压铸造试验方案

Tab.2 Experimental scheme of squeezing casting for B390

工艺编号	压力/MPa	castings	
		浇注温度/℃	压射速度/(m·s ⁻¹)
1	110	740	0.05
2	130	740	0.05
3	150	740	0.05
4	150	720	0.05
5	150	760	0.05
6	150	740	0.10
7	150	740	0.15

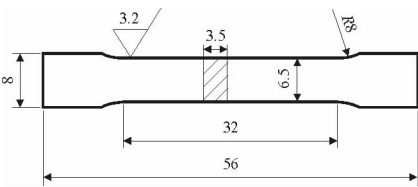


图 1 拉伸试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen

采用 HBS-3000V 布氏硬度计进行硬度测试,每组试样于同一区域选 10 个点进行测试,结果取平均值。于铸件同一位置截取金相试样,经过打磨、抛光后,使用体积分数为 0.5% 的 HF 溶液腐蚀 10 s 左右,在 Leica 6000M 型金相显微镜上进行金相组织观察,通过 Photoshop 和 Image-Pro Plus 软件统计初生 Si 的尺寸和形状因子。铸件孔隙率通过 YXLON UX20 型 CT 机进行测量,统计其最大值。

2 试验结果和分析

2.1 压力对铸件组织和性能的影响

图 2 是浇注温度为 740 ℃、压射速度为 0.05 m/s、不同压力下铸件的金属组织(OM)图、初生 Si 平均晶粒度和形状因子。可以看出,α-Al 基体主要呈蔷薇状或树枝晶状,初生 Si 呈块状,共晶 Si 呈长杆状或纤维状团聚于一块。由 OM 图可知,随着压力增加,α-Al 枝晶明显细化,逐渐向细小的等轴晶转化;块状初生 Si 明显细化,形貌愈发圆整。由图 2d 可知,随着挤压压力增大,初生 Si 尺寸明显减小,并圆整化,150 MPa 时初生 Si 晶粒尺寸最小,为 19.6 μm,形状因子最大,为 0.55。

压力对 B390 组织的细化通常是因为压力使熔体与模具接触更加紧密,增大了接触面积,提高了传热系数,从而提高了熔体的冷却速度,导致组织更加致密^[11];压力使金属液熔点升高,凝固时过冷度提高,促进了合金的形核,晶粒得到细化^[12]。通常认为,温度高于凝固温度时以热交换为主、过冷效应为辅,温度低于凝固温度时以过冷效应为主、热交换为辅。

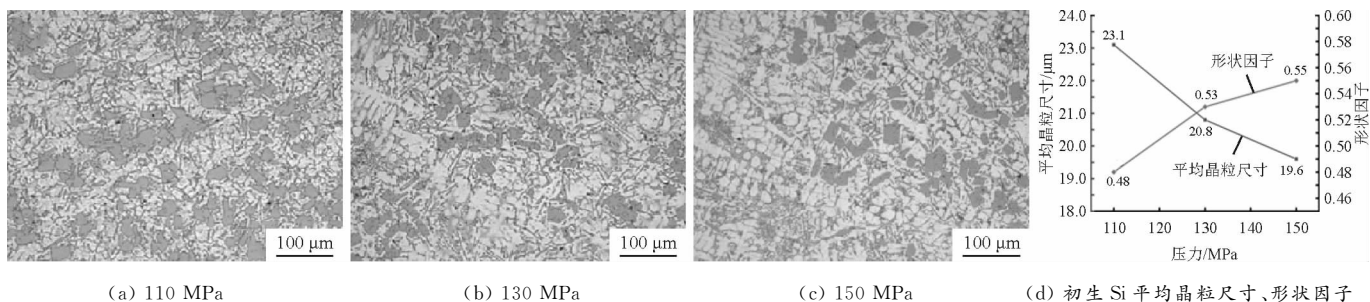


图 2 不同压力下铸件的 OM 图、初生 Si 平均晶粒尺寸和形状因子

Fig.2 OM images, average grain size and shape factor of primary Si in the B390 alloy under different pressures

图 3 是浇注温度为 740 $^{\circ}\text{C}$ 、压射速度为 0.05 m/s、不同压力对铸件孔隙率和力学性能的影响。由图 3a 可知,随着压力增大,铸件孔隙率明显下降,压力为 150 MPa 时组织最为致密,孔隙度降为 0.46%。孔隙通常以缩孔、缩松和气孔的形式出现,因为压力的缘故挤压铸造中孔隙主要为气孔。通常认为气体在金属液凝固过程中无法析出、无法溶解而形成气泡,气泡包裹着夹杂物和氧化物形成孔隙。挤压铸造过程中,压力可以提高气体的溶解度并阻止气泡形核长大,从而阻止孔隙的形成^[13]。

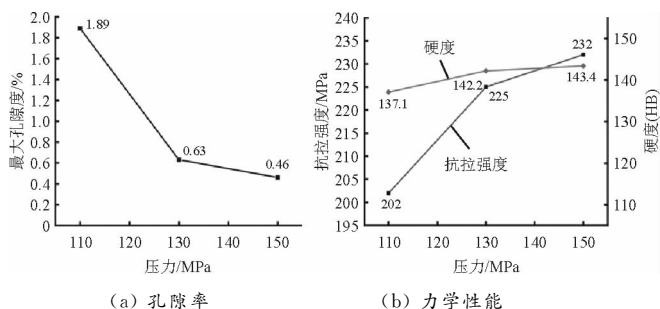


图 3 不同压力对铸件孔隙率和力学性能的影响

Fig.3 Effects of different pressures on porosities and mechanical properties of the castings

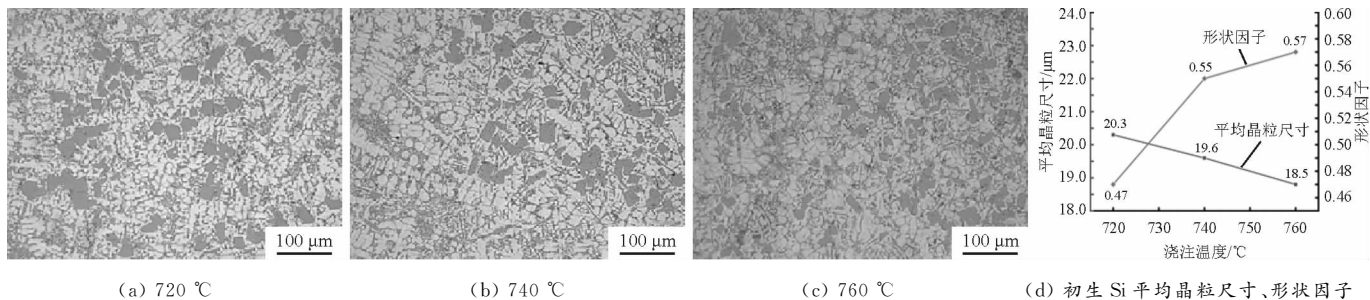


图 4 不同浇注温度下铸件的 OM 图、初生 Si 平均晶粒尺寸和形状因子

Fig.4 OM images, average grain size and shape factor of primary Si in the B390 alloy at different pouring temperatures

图 5 是压力为 150 MPa、压射速度为 0.05 m/s、不同浇注温度下铸件的孔隙率和力学性能。由图 5a 可知,随着浇注温度提高,铸件孔隙率提高。浇注温度为 720 $^{\circ}\text{C}$ 时铸件组织最为致密,浇注温度达到 760 $^{\circ}\text{C}$ 时铸件孔隙度最高,为 0.96%。金属液温度对气体的溶解度具有较大影响,气体溶解度与温度呈正相关。金属液温

由图 3b 可见,铸件的抗拉强度和硬度与压力呈正相关,压力为 150 MPa 时铸件的力学性能最佳,抗拉强度和硬度(HB)分别为 232 MPa 和 143.4。随着压力提高,铸件的传热系数和过冷度增大,形核率更高、冷却速度更快,合金组织得到细化,同时压力的增大阻碍了铸件中孔隙的形成,组织更加致密,因此抗拉强度和硬度明显提高。

2.2 浇注温度对铸件组织和性能的影响

图 4 是压力为 150 MPa、压射速度为 0.05 m/s、不同浇注温度下铸件的 OM 图、初生 Si 平均晶粒尺寸和形状因子。可以看出,随着浇注温度提高, α -Al 基体中树枝状晶逐渐减少,基体组织主要呈蔷薇状。由图 4d 可知,初生 Si 尺寸和形貌随浇注温度的上升得到了明显改善:浇注温度为 760 $^{\circ}\text{C}$ 时,初生 Si 平均晶粒尺寸降为 18.8 μm ,形状因子提高到 0.57。这是因为金属液和模具接触位置因为激冷效果形成硬壳层,导致凝固过程中压力出现损耗^[14]。浇注温度直接影响硬壳层的厚度,浇注温度较低时,较大的层厚使得金属液的有效承压大幅降低。随着浇注温度提高,金属液的流动性得到提高,压力损耗较少,晶粒得到细化。

度较高时,大量的 H_2 和 O_2 被吸入,温度降低时,气体溶解度显著下降,无法析出的气体汇聚形成气泡,凝固时形成孔隙。因此,随着浇注温度提高,铸件含气量增大,铸件孔隙率变大,组织致密度随之下降。

由图 5b 可知,随着浇注温度提高,铸件的抗拉强度和硬度随之提高。浇注温度为 740 $^{\circ}\text{C}$ 时,铸件的抗拉强

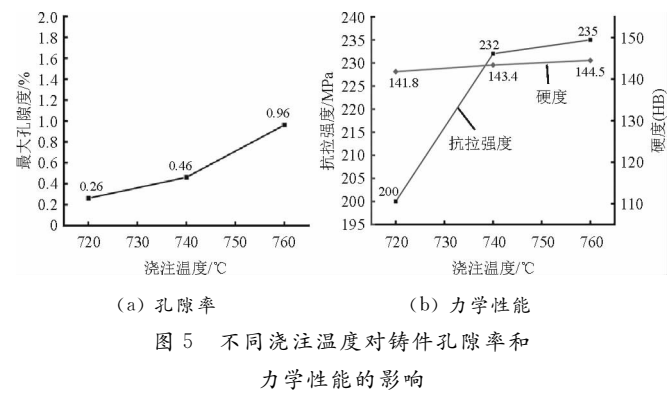


图 5 不同浇注温度对铸件孔隙率和力学性能的影响

Fig.5 Effects of different pouring temperatures on porosities and mechanical properties of the castings

度为 232 MPa,当浇注温度提高至 760 ℃,铸件抗拉强度为 235 MPa,相比 740 ℃时提高不明显。随着浇注温度从 720 ℃提高到 760 ℃,铸件硬度稍有提高。浇注温度过低,较厚的硬质层降低了铸件的有效承压,组织粗化且易出现缩孔、缩松等缺陷。过高的浇注温度易产生

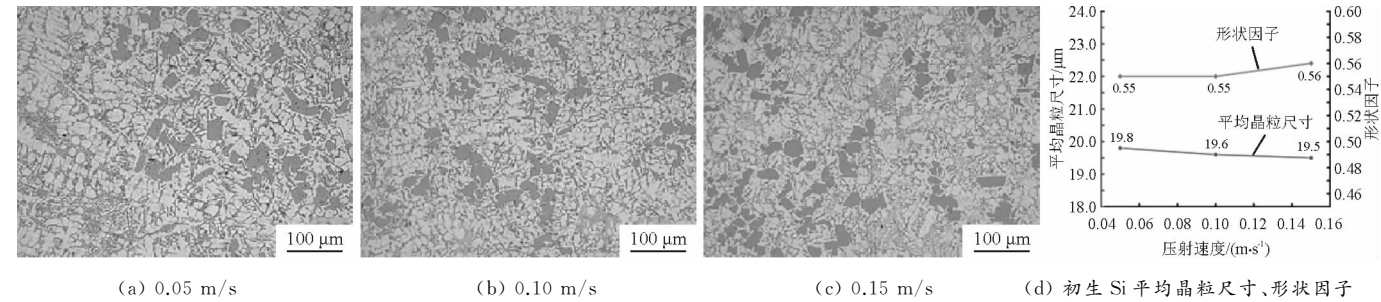


图 6 不同压射速度下铸件的 OM 图、初生 Si 平均晶粒尺寸和形状因子

Fig.6 OM images, average grain size and shape factor of primary Si in B390 alloy at different injection velocities

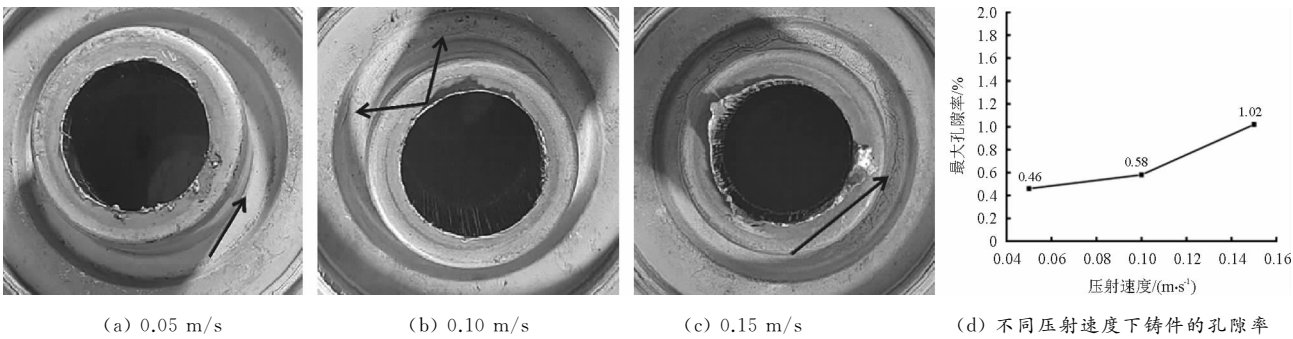


图 7 不同压射速度下铸件的缺陷情况

Fig.7 Defects of castings at different injection velocities

现象,减小压射速度,铸件表面冷隔明显减少。当压射速度降到 0.05 m/s,铸件表面良好,冷隔现象完全消失。这是因为随着压射速度增大,金属液容易产生紊流,从而形成卷气。薄厚过渡区为最后充型位置,由于气体无法排出而形成背压,最后凝固时阻止液体完全融合,从而产生了冷隔。由图 7d 可知,随着压射速度降低,铸件孔隙率随之降低。当压射速度为 0.05 m/s 时,铸件致密度最佳,孔隙率最小为 0.46%。这是因为压射速度较高时,液体形成紊流,型腔中的气体无法及时排

大量氧化物夹渣,形成大量缺陷,导致铸件报废,且过高的浇注温度易导致铸件与模具难以分离,使模具产生裂纹等缺陷^[15-16]。因此,综合考虑,认为 740 ℃为铸件最佳浇注温度。

2.3 压射速度对铸件组织和性能的影响

图 6 是挤压压力为 150 MPa、浇注温度为 740 ℃、不同压射速度条件下铸件的 OM 图、初生 Si 平均晶粒度和形状因子。可以看出,压射速度对 α-Al 基体和初生 Si 尺寸和形貌影响不明显。从图 6d 可以看到,随着压射速度提高,初生 Si 稍微细化,形状因子几乎不变。这主要是因为随着压射速度提高,金属液更快完成充型,相对更高的温度使金属液流动性更好,减小了压力损耗的同时使得补缩效果更佳,铸件组织得到细化。

图 7 是挤压压力为 150 MPa、浇注温度为 740 ℃、不同压射速度下铸件的缺陷情况。可以看出,压射速度为 0.15 m/s 时,铸件薄厚过渡区表面存在严重的冷隔

出型腔,金属液含气量变大,凝固时气体形成孔隙,导致孔隙率增大^[17]。压射速度较低时,液体流动更加平稳,型腔中的气体通过溢流槽和渣包排出,金属液含气量减少,导致合金中孔隙率减少。

图 8 是铸造压力为 150 MPa、浇注温度为 740 ℃、不同压射速度下铸件的力学性能。可以看出,铸件的抗拉强度和硬度与压射速度呈负相关,压射速度为 0.05 m/s 时铸件力学性能最好,抗拉强度和硬度(HB)分别为 232 MPa 和 143.4。原因是压射速度的改变对

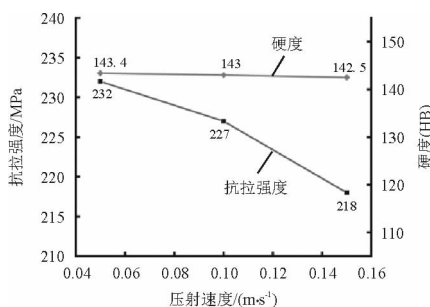


图 8 不同压射速度下铸件的力学性能
Fig.8 Mechanical properties of castings at different injection velocities

基体和初生 Si 大小及形貌影响不大,研究认为压射速度主要通过改变铸件孔隙率对力学性能产生影响。通过综合分析,认为 0.05 m/s 为铸件最佳压射速度,此时铸件表面无冷隔,铸件致密性最好,力学性能最佳。

3 结 论

(1)随着压力增加, α -Al 基体和初生 Si 显著细化、形貌圆整,铸件孔隙率显著减小,力学性能不断提高。随着浇注温度升高,初生 Si 明显细化、形貌圆整,但铸件孔隙率增大,740 °C 后力学性能提高不明显。

(2)随着压射速度提高, α -Al 基体和初生 Si 并无明显变化,孔隙率增大,压射速度为 0.05 m/s 时力学性能达到最佳。同时,随着压射速度增加,铸件表面冷隔越发严重。

(3)综合考虑,认为 B390 铸件最佳挤压工艺参数:压力为 150 MPa,浇注温度为 740 °C,压射速度为 0.05 m/s,此时 B390 铸件的抗拉强度为 232 MPa、硬度(HB)为 143.4。

参 考 文 献

[1] 杜康. 半固态铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金热处理工艺及强化机理研究[D]. 北京:北京有色金属研究总院, 2017.

[2] 王祝堂. 中国发布《节能与新能源汽车技术路线图》[J]. 轻合金加工技术, 2018, 46(12): 60-61.

[3] YE H. An overview of the development of Al-Si-alloy based material for engine applications[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2003, 12(3): 288-297.

[4] PARK H J. Melt filling behaviors and primary Si particle distribution on horizontal centrifugal casting in B390 aluminum alloy[J]. International Journal of Metalcasting, 2017, 11(4): 802-811.

[5] 徐国富, 彭小燕, 段雨露, 等. 新型 Al-Mg-Sc-Zr 和 Al-Zn-Mg-Sc-Zr 合金的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8): 1 577-1 587.

[6] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. Materials & Design, 2014, 56: 862-871.

[7] 张卫文, 赵海东, 张大童, 等. 金属材料挤压铸造成形技术的研究进展[J]. 中国材料进展, 2011, 30(7): 24-32.

[8] 张卫文, 齐丕骧, 朱德智, 等. 铸造技术路线图:挤压铸造[J]. 铸造设备与工艺, 2019(6): 6-10.

[9] 万里, 罗吉荣, 兰国栋, 等. 挤压铸造过共晶 A390 合金的组织与力学性能[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(8): 92-95.

[10] BIN S B, XING S M, TIAN L M, et al. Influence of technical parameters on strength and ductility of AlSi9Cu3 alloys in squeeze casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(4): 977-982.

[11] 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.

[12] FRANKLIN J R, DAS A A. Squeeze casting-a review of the status [J]. Foundryman, 1984, 77: 150-158.

[13] 齐丕骧, 吴岳壹, 齐霖. 挤压铸造合金材料的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(1): 28-31.

[14] 李鲁. 6061 铝合金支架挤压铸造及热处理工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.

[15] 黄胜, 陈晓, 陈淑婉. 浇注温度对 Al-7Zn-2.5Mg-Cu 合金组织和热裂性能的影响[J]. 铸造技术, 2013, 34(1): 4-8.

[16] 姜巨福, 王迎, 肖冠菲, 等. 工艺参数对挤压铸造成形 AlSi7Mg 铝合金构件组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(3): 531-545.

[17] 李真胜. 压射速度对铝合金充型流动状态及孔隙率的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

(编辑:张正贺)

万丰镁合金领域 ISO 国际标准 获批立项

近日,由万丰奥特控股集团(以下简称万丰)主导研制的《镁合金压铸件 Magnesium-alloy die castings》国际标准新工作项目提案,通过了 ISO/TC79/SC5 提案阶段(NP)投票,获得了中国、法国、德国、英国、韩国、意大利等国家的支持并成功立项。这是万丰在镁合金领域首个获批立项的国际标准,标志着万丰镁合金领域国际标准化工作取得新突破。

该标准主要针对镁合金压铸件产品的化学成分、力学性能、洁净度、尺寸、内外部质量、粗糙度、气密性、固有缺陷、防腐蚀等的性能要求及试验方法、检验规则、标志、包装、运输、贮存等进行了规范。

该国际标准的成功立项,填补了我国在镁合金压铸领域国际标准的空白,提升了我国在镁合金压铸领域的国际影响力,也标志着中国镁合金压铸产品国际标准的话语权和主导权,为未来镁及镁合金国际标准化工作奠定了坚实基础。万丰将不断提升镁合金压铸技术的研发和应用水平,致力成为全球汽车金属部件轻量化的推动者和领导者,为全球镁合金产业高质量可持续发展和汽车行业轻量化进程贡献力量。

(摘自中国有色金属报)