

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.01.007

Sr 变质和鼓风冷却对 Al-Si-Cu 合金的影响

李俭英^{1,2}, 沈以赴³, 孙涛³

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 哈尔滨 150066;
3. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211106)

摘要: 为满足航空发动机高精度、高强度和轻量化发展需要,以现有铝合金熔模精密铸造技术为基础,在熔炼和浇注过程中开展 Sr 变质处理和鼓风冷却工艺的交叉应用对比试验,利用光学显微镜对不同条件下试棒进行显微组织观察,同时使用拉伸机对不同条件下的试棒进行拉伸测试,研究了 Sr 变质处理和鼓风冷却工艺对 Al-Si-Cu 合金组织和性能的影响。结果表明,在 Al-Si-Cu 合金熔模精密铸造过程中,采用 Al-10Sr 中间合金作变质剂和鼓风冷却的组合工艺时,合金组织中 α -Al 晶粒和共晶 Si 相的细化和钝化作用最为明显,力学性能指标也最高,抗拉强度均值可达到 313 MPa,屈服强度均值可达到 246 MPa,延伸率均值可达到 6.9%。

关键词: 熔模精密铸造; Al-Si-Cu 合金; 变质处理; 鼓风冷却; 抗拉强度

中图分类号: TG249.5; TG166.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2025)01-0073-07

Effect of Sr Modification and Blast Cooling on Al-Si-Cu Alloy

LI Jianying^{1,2}, SHEN Yifu³, SUN Tao³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. AECC Harbin Dong'an Engine Co., Ltd., Harbin 150066, China; 3. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to meet the development needs of aero-engine with high precision, high strength and light weight, this paper is based on the existing aluminum alloy investment casting technology, to carry out Sr modification treatment and blast cooling process cross-application comparative test in the process of melting and pouring. The microstructure of the samples under different conditions is observed by optical microscope, and the samples under different conditions are tested by tensile machine, so as to study the influence of Sr modification treatment and blast cooling process on the microstructure and properties of the Al-Si-Cu alloy. The results show that when using Al-10Sr intermediate alloy as a grain refiner and blowing cooling in the Al-Si-Cu alloy investment casting process, the most obvious refinement and dulling effects on the α -Al grains and eutectic Si phases in the alloy microstructure occur, and the highest mechanical property indicators are achieved. The average tensile strength, the average yield strength, and the average elongation reach 313 MPa, 246 MPa, and 6.9%, respectively.

Key words: investment casting; Al-Si-Cu alloy; modification treatment; blast cooling; tensile strength

随着航空发动机制造技术的飞速发展,航空发动机和传动系统零部件的轻量化设计需求与日俱增^[1-2]。熔模精密铸造技术是一种近净成形的液态金属成形工艺,生产的铸件具有尺寸精确、棱角

清晰、表面光滑、接近零件最终形状等特点,在铸件表面光洁度和尺寸精度等方面具有得天独厚的优势^[3-6]。近年来,为了进一步提升铝合金精密铸件的力学性能,多家单位通过合金成分优化等手段,

收稿日期:2024-07-30;修订日期:2024-09-26

通信作者:沈以赴,男,教授,博士生导师,E-mail:shenyifu0501@gmail.com。

引用格式:李俭英,沈以赴,孙涛. Sr 变质和鼓风冷却对 Al-Si-Cu 合金的影响[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(1):73-79. LI Jianying, SHEN Yifu, SUN Tao. Effect of Sr modification and blast cooling on Al-Si-Cu alloy[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(1):73-79.

开展了大量 Al-Si-Cu 合金铸造工艺应用研究,取得了一定成果,并且在航空发动机各类机匣和壳体等铸件上逐渐得到广泛应用^[7-8],但对于 Al-Si-Cu 合金熔炼和浇注工艺方面的研究相对较少,仍存在较大的改善和提升空间。在实际生产中,由于铝合金熔模铸造使用的全硅溶胶陶瓷型壳浇注前需要经过高温预热处理,尤其对于大型复杂铝合金铸件,型壳蓄热量高,散热条件有限,铸件往往凝固速度缓慢,容易出现内部晶粒组织粗大、力学性能偏低等问题,同时也容易出现疏松缺陷^[9]。

本文在 Al-Si-Cu 合金熔模铸造工艺基础上,开展 Sr 变质处理和鼓风冷却工艺应用试验,研究 Sr 变质处理及鼓风冷却对合金组织及力学性能的影响。通过交叉试验验证,最大限度实现 Al-Si-Cu 合金晶粒组织细化和力学性能的进一步提升,为航空发动机制造技术的成熟和发展提供基础保障。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

熔模使用 F28-44B 商品模料,型壳使用全硅溶胶工艺制备,粘结剂为硅溶胶,面层和二层粉料为刚玉粉,砂料为刚玉砂,背层粉料为煤矸石粉,砂料为煤矸石砂,制备好的拉伸试棒型壳如图 1 所示。

使用的 Al-Si-Cu 合金参照 MIL-A-21180D《高强度铝合金铸件军用规范》对 A357 合金元素含量的规定,在 ZL114A 预熔合金基础上,加入电解铜,添加后形成的 CuAl_2 相可起到固溶强化的作用^[10-11],形成典型的 Al-Si-Cu 合金。其中使用的 ZL114A 预熔合金的化学成分见表 1,Cu 的添加量占总熔化重量的 0.15%,熔炼过程中选用 Al-10Sr 中间合金作为长效变质剂,Sr 的添加量占总熔化质量的 0.03%^[12]。



图 1 拉伸试棒型壳

Fig.1 Stretched test bar shell

表 1 ZL114A 预熔合金化学成分

Table 1 Chemical composition of ZL114A pre-melted alloy

| 元素 | Si | Mg | Ti | Mn | Fe | Zr | Be |
|---------|-----|-----|-------|-------|-------|-----|-------|
| 质量百分数/% | 6.6 | 0.6 | 0.094 | 0.078 | 0.015 | 0.1 | 0.002 |

1.2 试验方法

使用 25T MPI 高压压蜡机压制熔模,采用机械手自动制壳线进行型壳制备,共涂制 6 层,第六层为封浆层,干燥后使用高温蒸汽脱蜡釜脱蜡,并经燃气炉高温焙烧。

使用地坑式熔化炉进行合金熔化,每炉按 180 kg 进行配料,熔化炉设置加热温度为 750 °C,当预熔合金熔化后向第二炉内加入 Al-10Sr 中间合金,用搅拌勺搅拌 5 min,然后转移坩埚至保温浇包内,采用 Ar 旋转除气精炼,通入 Ar 流量 8 L/min,转子转速 500 r/min,除气时间 25 min。浇注前使用燃气炉预热 4 组型壳至 550 °C,保温 30 min,当合金液温度降至 720 °C 时开始按表 2 试验方案进行浇注,其中经 Sr 变质处理记为 SrM,未经 Sr 变质处理记为 NM,经鼓风冷却记为 FA,未经鼓风冷却记为 NA。FA+NM 和 FA+SrM 状态两组试棒型壳预热后需直接转移至鼓风冷却装置的工作平台上,其余两组转移至附近地面,4 组进行连续浇注,浇注结束后立即启动鼓风冷却装置,调节工作平台风速至 15 m/s,鼓风时间为 5 min,鼓风冷却装置工作原理如图 2 所示^[13-14]。

表 2 Sr 变质处理与鼓风冷却交叉对比试验方案

Table 2 Cross-comparison experiment schemes of Sr modification and blast cooling

| 编号 | 鼓风冷却 | Al-10Sr 变质/% | 状态 |
|----|------|--------------|--------|
| S1 | NA | NM | NA+NM |
| S2 | NA | SrM | NA+SrM |
| S3 | FA | NM | FA+NM |
| S4 | FA | SrM | FA+SrM |

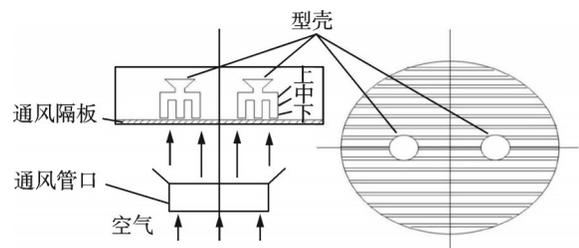


图 2 鼓风冷却原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of blast cooling principle

为了更好地研究鼓风冷却的冷却效果,浇注前在 NA+NM 和 FA+NM 两种状态试棒上、中、下 3 个位置预挂热电偶,位置如图 2 所示,通过智能数据采集器记录未鼓风和鼓风冷却试棒凝固过程中温度随时间变化情况。浇注后的 4 组试棒经除壳、切割工序后,所有试棒均按试验编号进行标印,同炉进行热处理,参照 HB5480《高强度铝合金优质铸件》中 ZL114A T6 状态进行热处理,热处理参数如下:固溶处理温度为 540 °C,保温时间为 12 h,采

用水冷,水温为 30 ℃,时效处理温度为 160 ℃,保温 8 h 后空冷^[15]。

热处理前后分别取 4 种状态拉伸试棒各 1 根,分别切取中间位置拉伸段,使用光学显微镜进行微观组织形貌观察,分析显微组织特征。然后取热处理后 4 种状态拉伸试棒各 6 根,尺寸如图 3 所示(按 GB1177—1991),使用电子拉伸试验机(型号为 CMT5105)进行拉伸性能测试。

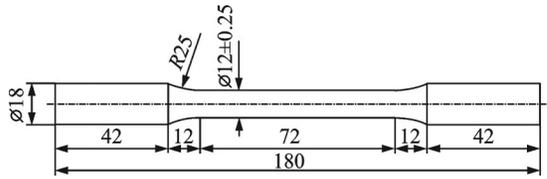


图 3 拉伸试棒尺寸图

Fig.3 Size diagram of tensile test rod

2 结果与讨论

2.1 冷却曲线分析

在 NA+NM 状态和 FA+NM 状态的试棒组上、中、下 3 个位置预埋测温热电偶,使用智能数据采集器进行温度采集,连续浇注后对 FA+NM 状态的试棒组立即鼓风,得到的冷却曲线如图 4 所示。NA+NM 状态和 FA+NM 状态试棒下方的起始温度约为 650 ℃,中间和上方起始温度约为 600 ℃,由此可以看出,合金液充型过程中温度存在变化,试棒下方的合金液温度要比试棒中间和上方高 50 ℃左右。

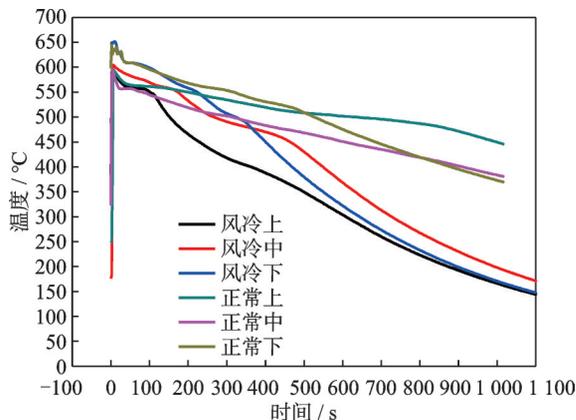


图 4 试棒凝固过程中温度随时间变化曲线

Fig.4 Temperature change curves with time during solidification of test rod

对比 NA+NM 状态和 FA+NM 状态试棒温度变化,NA+NM 状态下方合金液降低至 556 ℃需要 320 s,FA+NM 状态下方合金液降低至 556 ℃需要 220 s,NA+NM 状态上方合金液降低至 556 ℃需要 200 s,FA+NM 状态上方合金液降低至 500 ℃需要 100 s,NA+NM 状态合金液降低

至 500 ℃需要 80 s,FA+NM 状态合金液降低至 500 ℃需要 170 s。由此可见,经鼓风冷却的试棒,上、下两个位置的冷却速度均加快,凝固时间缩短约 100 s,但试棒中间部位凝固时间却有所增加,主要因为流动风与试棒底部存在热交换,热风流动到试棒中间部位,散热条件发生变化。因此,采用鼓风冷却工艺可以改变 Al-Si-Cu 合金铸件上、中、下部位的凝固顺序,对于整体高度不高、壁厚较厚的铸件优势更加明显。

此外,试棒中间位置为最薄位置,凝固时间也相应较短,约 100 s 即可达到凝固状态。由此可见,采用鼓风冷却工艺浇注的铸件,铸件壁厚越薄,越应控制从浇注到启动鼓风冷却时间,否则薄壁位置很容易快速达到凝固状态,起不到加快冷却速度的目的。

2.2 铸态组织分析

图 5 展示了不同 Sr 变质处理和冷却工艺下铸态组织的低倍形貌特征。铸态组织主要由白色的 α -Al 基体和分布在其周围深色块状的共晶 Si 相组成,分别对比 NA+NM 和 NA+SrM 状态,FA+NM 和 FA+SrM 状态,发现合金经过 Sr 变质处理后,铸态组织中枝晶的形状和数量未发生明显改变,晶粒的尺寸变化也很细微。而对比 NA+NM 和 FA+NM 状态,NA+SrM 和 FA+SrM 状态,可以看出,经鼓风冷却的铸态组织的枝晶臂间距约为空冷铸态组织的 60% 左右,晶粒尺寸明显得到了细化。

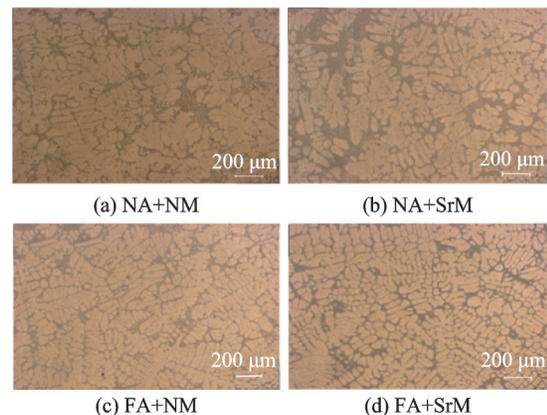


图 5 Al-Si-Cu 合金铸态组织低倍形貌特征

Fig.5 Al-Si-Cu alloy as-cast microstructure and low-growth morphology characteristics

图 6 展示了不同 Sr 变质处理和冷却工艺下铸态组织的细观形貌特征,对比 NA+NM 状态和 FA+NM 状态,发现 NA+NM 状态的共晶 Si 相呈现粗大的针片状,边角尖锐,这将对基体产生切割作用,严重影响合金的力学性能。FA+NM 状态的共晶 Si 相虽然也呈现针片状,但尺寸明显更加

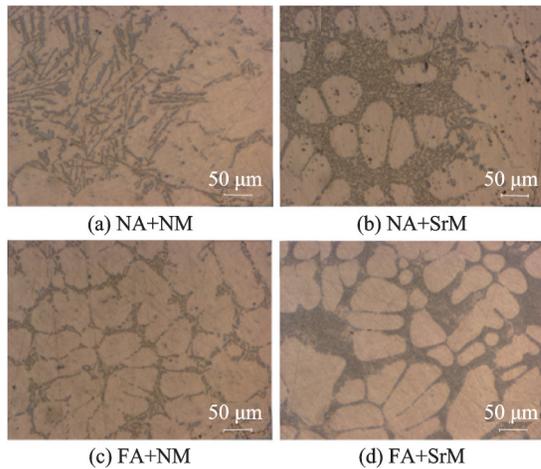


图6 Al-Si-Cu合金铸态组织的微观形貌特征

Fig.6 Microstructural characteristics of Al-Si-Cu alloy as-cast

细小,约为NA+NM状态的50%,且边角的尖锐程度有所缓和。由此可见,鼓风冷却工艺不仅对基体晶粒具有显著的细化作用,对共晶Si相也具备有效的细化作用,且能够在一定程度上钝化Si相边角的尖锐程度,这将有效地减少共晶Si相对基体组织的切割作用。

对比NA+NM状态和NA+SrM状态,NA+SrM状态的共晶Si相不仅产生了一定的细化效果,呈现大钝角边界的蠕虫状和颗粒状形态。对比FA+NM状态和FA+SrM状态,共晶Si相同样呈现此种演化规律。

对比NA+SrM状态和FA+SrM状态,经过鼓风冷却后,共晶Si相的细化和等轴化效果进一步加强,尺寸减小至约800 nm,形貌由蠕虫状和颗粒状的混合形貌进一步转变为细小弥散的球状形态。由此可见,Sr变质处理和鼓风冷却工艺均能够大幅度细化共晶Si相,但相比之下,鼓风冷却工艺对 α -Al有一定程度的细化作用,促进等轴晶的形成,而Sr变质处理作用则体现在对共晶Si相产生了强烈的细化和钝化效应。

2.3 热处理态组织分析

图7展示了不同Sr变质处理与冷却工艺下Al-Si-Cu合金的固溶和时效处理后的显微组织形貌。对比图6和图7可以看出,经过热处理后,组织中的 α -Al晶粒尺寸均有所增大,这是因为固溶加热540 $^{\circ}$ C,保温12 h过程中, α -Al晶粒发生一定程度的长大,固溶冷却后不发生固态相变,时效时的温度又较低,所以,晶粒尺寸不发生变化;但组织中的共晶Si相的尺寸发生了细化且数量也有所降低,相比于铸态均产生了明显的细化效应,其中部分针片形态转变成短棒状或颗粒状形态,这是由于在固溶加热过程中发生一定程度的溶解,不仅提

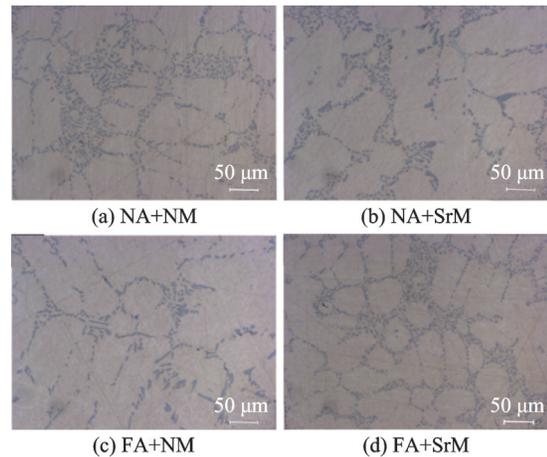


图7 Al-Si-Cu合金组织经固溶和时效处理后的显微组织形貌

Fig.7 Microstructure of Al-Si-Cu alloy after solution and aging treatment

高了 α -Al中Si的固溶度,而且使得共晶Si相的尺寸发生了细化和形貌发生钝化,导致相对数量也有所降低。

对比NA+SrM和FA+NM状态的热处理后组织,可以直观地发现共晶Si相的尺寸及形貌几乎相似,但FA+NM状态的组织晶粒度更小,也就是说鼓风冷却工艺对于改善组织的效果要优于Sr变质处理。对比FA+SrM状态和FA+NM状态的热处理后组织,FA+SrM状态的组织更加细化,这是由于FA+NM状态的组织只是细化了 α -Al晶粒和共晶Si相的尺寸,而经鼓风冷却又经Sr变质处理的FA+SrM状态的合金,不仅细化了 α -Al晶粒和共晶Si相的尺寸,而且使得共晶Si相的尖角发生了钝化。所以,如果鼓风冷却和Sr变质处理工艺同时组合应用,合金的组织改善效果最佳。

2.4 力学性能分析

力学性能是微观组织在宏观尺度的表象,也是调控微观组织的最终目的。为了进一步研究不同Sr变质处理和冷却方式对Al-Si-Cu合金力学性能的影响,分别取4种不同状态试棒各6根进行拉伸测试。图8展示了不同Sr变质处理和冷却方式下试棒热处理后的室温拉伸性能。图9为不同状态下室温拉伸性能的均值,经对比,FA+SrM状态的抗拉强度、屈服强度、延伸率均值最高,抗拉强度均值可达到313 MPa,屈服强度均值可达到246 MPa,延伸率均值可达到6.9%。

从图8可以看出,NA+NM状态和NA+SrM状态的试棒热处理后的力学性能相近,但从显微组织层面分析,如图7(a)和(b)所示,NA+SrM状态应优于NA+NM状态,但这力学性能测试结果有

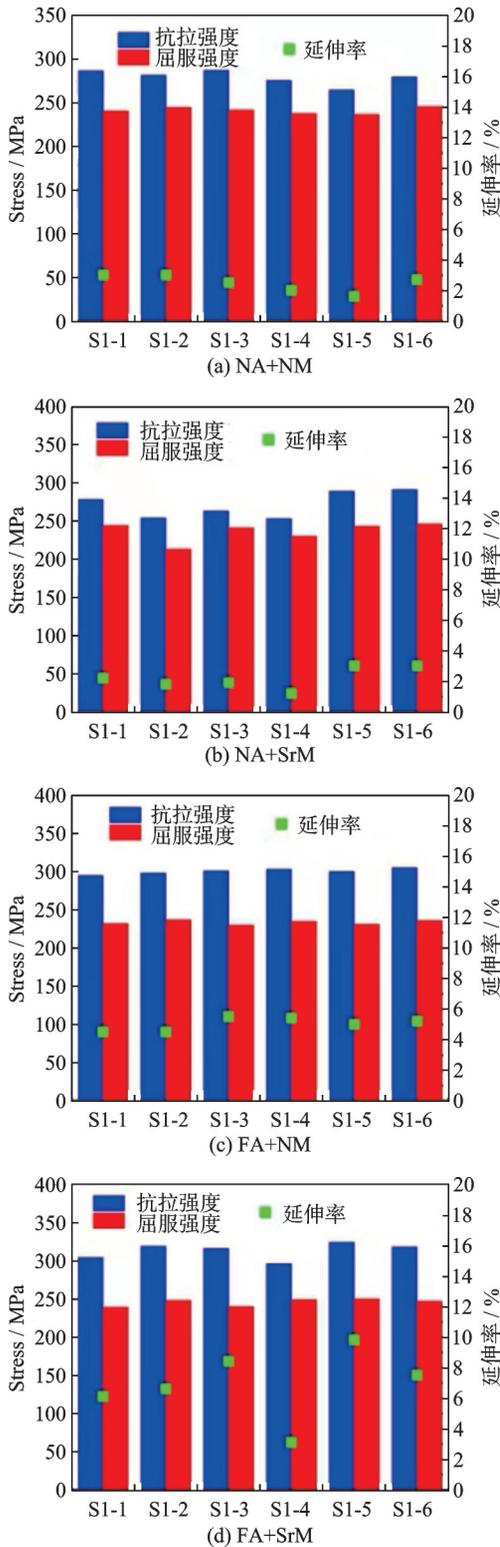


图 8 不同 Sr 变质处理和冷却工艺下试棒热处理后的室温瞬时拉伸性能
Fig.8 Instantaneous tensile properties of test rods at room temperature after heat treatment under different Sr metamorphic treatment and cooling processes

所反差。从图 9 可以看出, FA+SrM 状态的抗拉强度、屈服强度、延伸率的均值相比 FA+NM 状态分别提升 10 MPa、13 MPa 和 3.5%。强度略有提升, 延伸率提升显著, 达到 6.3%, 这得益于 FA+

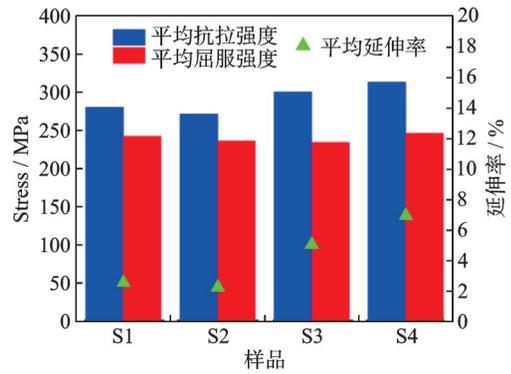
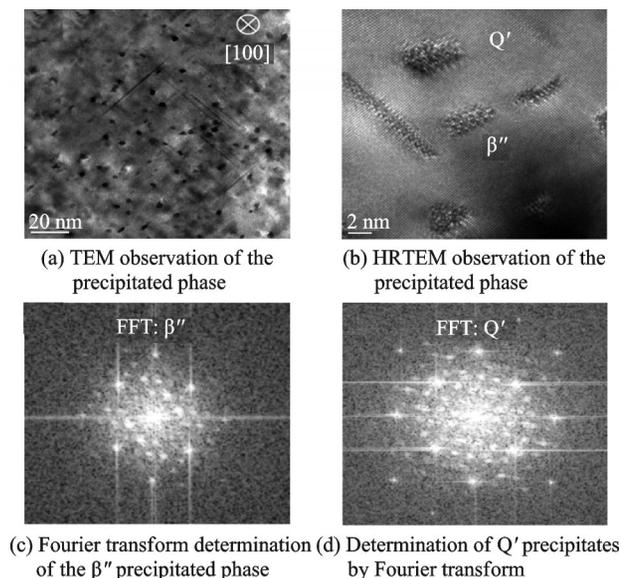


图 9 不同 Sr 变质处理和冷却工艺下试棒热处理后的室温瞬时拉伸性能均值
Fig.9 Average instantaneous tensile properties of test rods at room temperature after heat treatment under different Sr metamorphic treatment and cooling processes

SrM 状态下更为细小球状共晶 Si 相。

为进一步研究 FA+SrM 状态组织强化机制, 采用透射电镜 (Transmission electron microscopy, TEM) 对 FA+SrM 热处理后组织进行观测, 使用 TEM 在 [100] 取向向下可以观测析出相, 如图 10(a) 所示, 析出相为典型的 β'' 棒状析出相, 此外, 在视野中心出现长度约为 20 nm 的针状析出相。为进一步开展析出相分析, 通过 HRTEM 进行观测, 如图 10(b) 所示, 合金中析出相直径约为 3 nm, 析出相密度也较高。对 HRTEM 图像进行傅里叶变换确定, 如图 10(c, d) 所示, 可以得出, Al-Si-Cu 合金热处理后组织内既含有 β'' 相 (Mg_2Si), 还观测到较多较大尺寸的 Q' 相 ($Al_5Cu_2Mg_8Si_6$), Q' 相尺寸普遍大于 β'' 相, 析出相的形成使 Al-Si-Cu 合金具有更加显著的强化效果。



(c) Fourier transform determination of the β'' precipitated phase (d) Determination of Q' precipitates by Fourier transform
图 10 透射电镜观测 FA+SrM 状态热处理后组织
Fig.10 Microstructure of FA+SrM after heat treatment observed by TEM

图 11 展示了试棒热处理后的力学性能各指标的离散性方差, NA+SrM 状态下的方差远高于 NA+NM 状态下的方差, 这说明此时 NA+SrM 状态下显现着相对不稳定力学性能状态。从铸造角度来讲, 产生上述显微组织与力学性能不相匹配的异常现象的可能原因在于变质处理相对增加了引入铸造缺陷的概率, 从而对力学性能产生不利影响。FA+SrM 状态下的方差远大于 FA+NM 状态下的方差, 这与对比 NA+NM 和 NA+SrM 状态时发现异常现象相同, 即考虑 Sr 变质处理在一定程度上会增加引入铸造缺陷的概率, 从而造成力学性能相对不稳定的现象。

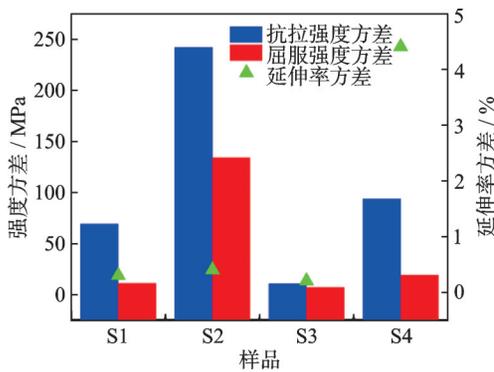


图 11 不同 Sr 变质处理和冷却方式下热处理后试棒力学性能离散性方差

Fig.11 Discrete variance of mechanical properties of test rods after heat treatment under different Sr metamorphic treatment and cooling methods

为进一步证实推测的准确性, 对 4 种状态下试棒的拉伸断口扫描形貌进行分析, 如图 12 所示。拉伸断口检测结果均以 FA+NM、FA+SrM、NA+NM、NA+SrM 的顺序逐渐严重化, FA+NM 状态下的显微缺陷最少, FA+SrM 和 NA+NM 次之, NA+SrM 状态下最为严重, 存在着大量的针孔、孔洞等缺陷, 这与力学性能测试结果反映出的规律相符, 验证了变质处理会在一定程度上增加铸造缺陷的引入概率。所以, 在熔体处理阶段要关注 Sr 变质剂的加入量, 防止由其带来的负面影响。值得注意的是, NA+SrM 状态和 FA+SrM 状态同样经历了变质处理, 但是 FA+SrM 状态的冶金质量要优于 NA+SrM 状态, 这得益于鼓风冷却工艺的优势。

此外, 对比 FA+NM、NA+NM 和 NA+SrM 状态下的力学性能可以发现, FA+NM 状态下的拉伸性能均在一定程度上或优于或相近, 这与由图 7(b)和(c)试棒热处理后的组织对比分析结果相符。强度及延伸率的提升得益于鼓风冷却工艺下获得的优质原始铸造组织, 如晶粒更为细小的基体组织、相

对细小弥散的共晶 Si 相、过饱和度的凝固固溶组织等, 这些优质原始铸造组织为后续热处理提供显著组织优势, 从而最后以细晶强化、析出相强化、固溶强化等方式对合金产生了有效的强化效果。由此可见, 这种 Al-Si-Cu 合金热处理后, 采用鼓风冷却工艺但未经 Sr 变质处理即可达到不低于未经鼓风冷却但经 Sr 变质处理工艺的组织及力学性能效果。

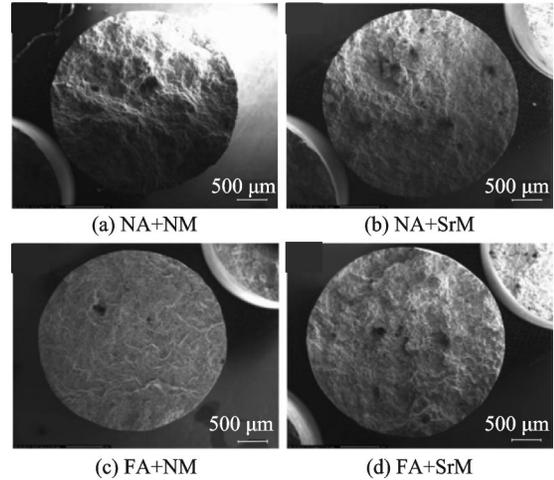


图 12 不同 Sr 变质处理和冷却方式下热处理后试棒的拉伸断口扫描形貌

Fig.12 Tensile fracture scanning morphology of test rods after heat treatment under different Sr metamorphic treatment and cooling methods

3 结 论

(1) 试棒浇注后下方合金液温度要比中间和上方位置高约 50°C , 采用鼓风冷却工艺可以改变铸件上、中、下位置的凝固顺序, 且为了保证鼓风冷却工艺的效果, 应严格控制浇注后到启动鼓风时间。

(2) Sr 变质处理和鼓风冷却工艺均能够明显细化 Al-Si-Cu 合金中共晶 Si 相, 但相比之下, 鼓风冷却工艺对 $\alpha\text{-Al}$ 有一定程度的细化作用, 而 Sr 变质处理作用则体现在对共晶 Si 相产生强烈的细化和钝化效应。

(3) 经过固溶和时效处理后, 共晶 Si 相比于铸态均产生了明显的细化效应, 且经鼓风冷却状态的显微组织细化和等轴化更为明显, 能够使共晶 Si 相锐角发生明显钝化。

(4) 采用 Sr 变质处理和鼓风冷却组合工艺, 合金组织改善和力学性能提升效果最佳, 试棒的抗拉强度均值可达到 313 MPa 、屈服强度均值可达到 246 MPa 、延伸率均值可达到 6.9% 。

(5) Sr 变质处理工艺在一定程度上会增加引入铸造缺陷的概率, 为了保证铸件内部质量, 在熔体处理时要关注 Sr 变质剂的加入量, 以防止由 Sr 变质剂带来的负面影响。

参考文献:

- [1] 薛斌, 许忠斌, 张小岩, 等. 轻量化精密铸造成型技术在航空航天关键部件中的应用[J]. 铸造技术, 2022, 43(4): 290-294.
XUE Bin, XU Zhongbin, ZHANG Xiaoyan, et al. Application of lightweight precision casting technology in aerospace key components[J]. Foundry Technology, 2022, 43(4): 290-294.
- [2] 樊振中. 熔模精密铸造在航空航天领域的应用现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2019, 62(9): 38-52.
FAN Zhenzhong. Application status and development trend of investment casting in aerospace industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(9): 38-52.
- [3] 沈昀, 郑功, 冯辰铭. 熔模精密铸造技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2019, 11(1): 54-62.
SHEN Yun, ZHENG Gong, FENG Chenming. Research progress of investment casting technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(1): 54-62.
- [4] 姜不居, 吕志刚, 周泽衡. 调结构重环保求发展: 中国熔模铸造发展之路[J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(12): 1132-1136.
JIANG Bujū, LYU Zhigang, ZHOU Zeheng. Survey of investment casting at the China[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2009, 29(12): 1132-1136.
- [5] PATTNAIK S, KARUNAKAR D B, JHA P K. Developments in investment casting process: A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(11): 2332-2348.
- [6] 刘国利. 铝合金熔模铸造技术现状及发展[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(1): 72-74, 126.
LIU Guoli. Present status and future of investment casting aluminum alloy castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(1): 72-74, 126.
- [7] AHMED S, MALIK M V, AHMAD B. Surface moderation and composite fabrication of die-cast magnesium alloys via friction stir processing: A review[J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2022, 8(4): 3635-3655.
- [8] DENG L, WANG X Y, JIN J S, et al. Precision forging technology for aluminum alloy[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2018, 13(1): 25-36.
- [9] 陈寅, 陈晓龙, 李翔光. ZL114A 铝合金大型舱体铸件铸造工艺研究[J]. 中国金属通报, 2022(10): 92-94.
CHEN Yin, CHEN Xiaolong, LI Xiangguang. Study on casting technology of ZL114A aluminum alloy large cabin casting[J]. China Metal Bulletin, 2022(10): 92-94.
- [10] BENNY KARUNAKAR D, NARESH RAI R, PATRA S, et al. Effects of grain refinement and residual elements on hot tearing in aluminum castings[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(9): 851-858.
- [11] 李元元, 郭国文, 张卫文, 等. 合金元素对 Al-Cu 合金热裂倾向的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 791-795.
LI Yuanyuan, GUO Guowen, ZHANG Weiwen, et al. Effects of alloying elements on hot tearing trends of Al-Cu alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 791-795.
- [12] 代雨成, 樊自田, 蒋文明, 等. Sr 变质对 ZL114A 合金共晶硅形貌和拉伸性能的影响[J]. 铸造, 2014, 63(3): 221-224, 231.
DAI Yucheng, FAN Zitian, JIANG Wenming, et al. Effects of Sr modification on the eutectic Si particle characteristics and tensile properties of the ZL114A alloys[J]. Foundry, 2014, 63(3): 221-224, 231.
- [13] TZENG Y C, NIEH J K, BOR H Y, et al. Effect of trace Be and Sc additions on the mechanical properties of A357 alloys[J]. Metals, 2018, 8(3): 194.
- [14] 张永, 陈瑞润, 刘传宝, 等. 型壳风冷对精铸 ZL114A 合金组织和性能的影响[J]. 铸造, 2021, 70(12): 1402-1405.
ZHANG Yong, CHEN Ruirun, LIU Chuanbao, et al. Effects of air cooling on the morphology and mechanical properties of investment cast ZL114A alloy[J]. Foundry, 2021, 70(12): 1402-1405.
- [15] 张建兵, 平秀民. 高强度铝合金铸造及热处理工艺[J]. 航天制造技术, 2003(6): 35-38.
ZHANG Jianbing, PING Xiumin. Cast and heat-treatment process of high strength aluminum alloy[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2003(6): 35-38.

(编辑: 胥橙庭)