

精密铸造 Be-Al 合金复杂支架铸件

杨一群 李军义 王东新 刘兆刚 谢 焱
(西北稀有金属材料研究院宁夏有限公司, 稀有金属特种材料国家重点实验室)

摘 要 以某航天卫星 Be-Al 合金支架为研究对象,设计其精密铸造工艺。基于华铸 CAE 软件对铸件的充型、凝固过程进行模拟,预判缩孔、缩松缺陷区域,分析缺陷原因。采用添加导气管与建立局部补缩通道,并控制型壳预热温度与浇注温度的方案,消除了裂纹、冷隔缺陷,减少了缩松缺陷。研究表明,当型壳预热温度为 775 ℃、浇注温度为 1 300 ℃时,采用优化浇注系统得到的铸件品质良好,无明显缺陷,铸态下铸件的抗拉强度为 248.6 MPa,屈服强度为 191.8 MPa,伸长率为 2.10%,符合标准要求。

关键词 支架;Be-Al 合金;铸造缺陷

中图分类号 TG249.5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.01.028 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Be-Al Alloy Complex Bracket by Investment Casting
Yang Yiqun, Li Junyi, Wang Dongxin, Liu Zhaogang, Xie Yao
(State Key Laboratory of Rare Metal Special Material, Northwest Rare Metal Material Research Institute Ningxia Co., Ltd.)

Abstract: Taking the Be-Al alloy bracket of a certain aerospace satellite as the research object, the precision casting process was designed. The filling and solidification process of the casting was simulated by CAE software to predict the shrinkage cavity and shrinkage defect area, and the origination of the defects were analyzed. By adding air duct and setting up local feeding passage, controlling the preheating temperature and pouring temperature of the shell, cracks and cold insulation defects can be eliminated and the shrinkage defects can be reduced. The results indicate that when the preheating temperature of the shell is 775 ℃ and the pouring temperature is 1 300 ℃, the quality of the castings is desirable with absence of obvious defects. The tensile strength, yield strength and elongation of the castings in as-cast state are 248.6 MPa, 191.8 MPa and 2.10%, respectively, meeting the requirements.

Key Words: Bracket, Be-Al Alloy, Casting Defects

Be-Al 合金因其优异的性能已在国防、航空航天及民用领域得到广泛应用^[1~4]。在航空领域,Be-Al 合金可以部分替代树脂基复合材料,不仅降低了产品自重,而且提高产品性能,已经成功应用于 RAH-66COMANCH 型军用直升机、爱国者 PAC3 型导弹系统、F-15 和 F-22 战斗机上。在航天领域,Be-Al 合金已应用于 ORB-COMM 型低轨道卫星上。在民用方面也应用于硬盘驱动器、高尔夫球棒、焊接机和精密仪器的移动部件。随着技术发展,Be-Al 合金铸件薄壁化、轻量化成为发展方向,但 Be-Al 合金铸件易产生铸造缺陷,废品率较高。为解决 Be-Al 复杂铸件的铸造缺陷,本课题以 Be-Al 合金支架为对象,研究不同浇注条件并结合模拟软件分析,从缺陷形成机理及铸造工艺角度出

发,设计新的铸造工艺,以减少裂纹、冷隔及缩松等铸造缺陷的产生,并取得了良好的应用效果,经验证工艺可行,为铸态 Be-Al 合金的应用提供参考。

1 试验材料与方法

试验合金为 Be-Al 合金,其主要成分(质量分数):60%~65%的 Be、30%~35%的 Al,并加入少量 Ag、Co、Ge。经压制蜡模、组树、制壳后,在 100 kg 真空中频炉中熔炼与浇注。

2 铸造工艺

2.1 合金的工艺特性

Be-Al 合金是一种新型铸造合金,强化元素多,晶

收稿日期:2021-02-26;修改稿收到日期:2021-05-08
基金项目:中央引导地方科技发展专项基金资助项目(2020);中国有色集团科技计划资助项目(2018KJJH05);宁夏回族自治区产业创新重点任务揭榜攻关资助项目(20200108)
第一作者简介:杨一群,男,1990 年出生,工程师,宁夏石嘴山(753000),E-mail:690912396@qq.com
引用格式:杨一群,李军义,王东新,等.精密铸造 Be-Al 合金复杂支架铸件[J].特种铸造及有色合金,2022,42(1):129-132.
YANG Y Q, LI J Y, WANG D X, et al. Be-Al alloy complex bracket by investment casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(1):129-132.

粒得到细化,经热等静压处理后可获得很高的强度、比刚度。但该合金结晶温度范围宽,不易实现顺序凝固,凝固时的过冷熔体中会出现亚稳态的混溶间隙组织^[5]。

2.2 支架铸件的结构特点

支架铸件的结构见图 1。该铸件形状复杂,尺寸精度要求较高。壁厚变化明显,特别是圆环形壁较厚,而与之相连的圆环凹陷处较薄,小窗口两侧是由小方格组成的薄壁侧板。

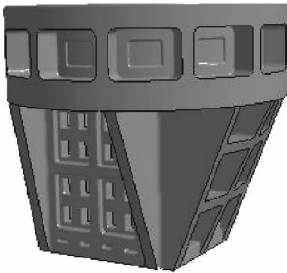


图 1 支架结构图

Fig.1 Structure diagram of bracket

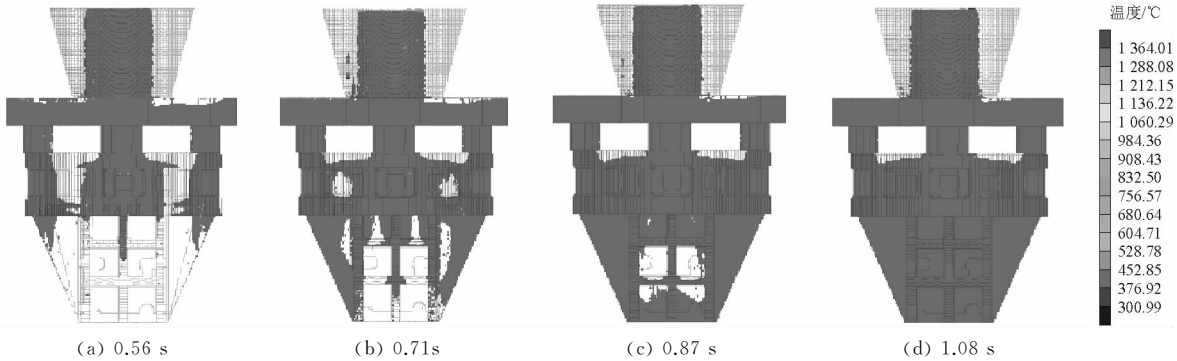


图 2 充型过程模拟

Fig.2 Simulation of filling process

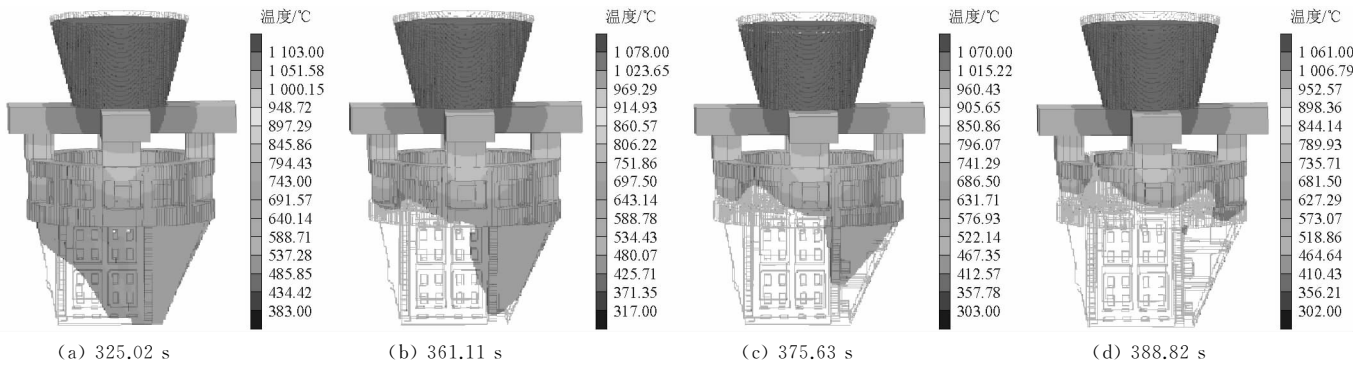


图 3 凝固过程模拟

Fig.3 Simulation of solidification process

体模数 R_m 计算如下:

$$R_m = \frac{R_v}{R_a}$$

式中, R_v 为残余熔体体积; R_a 为残余熔体表面积。

Be 在 900 °C 以上晶粒长大速度非常快,而冷却速度慢,因此 Be 相的晶粒粗大。同时,Be 相和 Al 相的凝固温度差为 527 °C,Be 相凝固后枝晶阻挡了 Al 相凝固

2.3 数值模拟分析

利用华铸 CAE 软件模拟软件对支架的充型过程和凝固过程进行模拟^[6,15,16],型壳材料主要为莫来石,热物性参数从华铸 CAE 软件数据库中选取。浇注前,型壳在炉体中热区被加热到 775 °C,其中型壳厚度为 8 mm,当合金熔体温度到达 1 360 °C 后开始浇注,浇注完成后采用风冷(结束条件为凝固 100%)。型壳在热区时,其边界条件:环境温度为 775 °C,辐射散热系数为 0.5。铍铝合金主要物性参数见表 1,模拟过程见图 2 和图 3。

表 1 Be-Al 合金的热物性参数

Tab.1 Thermo-physical parameters of Be-Al alloy

密度/ (g · cm ⁻³)	热导率/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	液相线 温度/K	固相线 温度/K	粘度/ (mPa · s)	凝固收 缩比/%
2.05~2.15	95~105	1 355	919	1.17~1.83	0.7

利用华铸 CAE 的残余熔体模数判断出产生缩孔、缩松的敏感区域,分析产生缩松和裂纹的原因。残余熔

过程中熔液的补缩和流动通道,在合金中易出现缩松。支架内部平台处壁厚差较大,金属液流程较长,薄壁处先凝固,内浇道不能对平台充分补缩,中心处热辐射较大,同时由于冒口处先凝固收缩,阻碍补缩,因而平台中心处出现了严重的缩松,见图 4。支架上半部加强筋因壁厚较薄,在合金凝固冷却时厚薄壁温差大,壁厚处未完全凝固,尚处于糊状区,此时受周围收缩的拉应力影

响。高熔点的 Be 相首先凝固,随着温度降低,Al 相凝固。Be 大的比热容,使其在凝固过程中冷却较慢,因此形成大量柱状晶和大的枝晶及大的热应力,使 Be 相冷却过程中容易产生热裂。当应力达到该温度下的强度极限时,将会产生微裂纹,在后续凝固冷却过程中由于拉应力的进一步积累,微裂纹扩展,形成了明显裂纹;支架窗口深度逐渐加深,凝固时得不到充分的补缩,导致严重缩松。

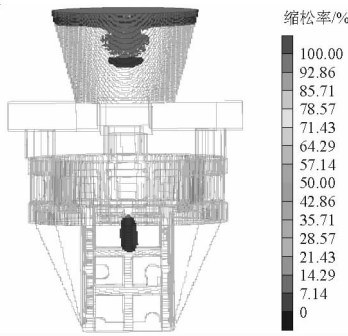


图 4 铸造缺陷模拟
Fig.4 Casting defect simulation

2.4 浇注系统优化

为解决上述问题,对浇注系统进行优化^[7~10]。采取了以下措施:①将平台处设置暗冒口,增加补缩作用,同时将内浇道改成椭圆形;②为了减小凝固收缩时筋条所受的拉应力,在每条筋上方设置导气管连接冒口上边缘;③在支架窗口设置长 40 mm 盲管。

优化后的浇注系统试验结果表明,中间位置筋条处未见裂纹出现,平台处设置暗冒口,对平台处起到了有效补缩,避免了缩松缺陷产生。在浇注温度降低时,边缘部位加强筋处出现的冷隔可以通过控制浇注温度来消除。

2.5 浇注工艺参数

由于铸件尺寸大且壁厚不均,为确保铸件顺利充型,型壳预热时采用电阻丝加热并用保温棉将包裹,以避免型壳受热不均匀而导致的铸造缺陷^[11~14]。

Be-Al 合金中 Be 和 Al 的固相在很宽的温度范围内基本上不互溶,共晶点处 Be 在 Al 中的固溶度非常低(小于 2%),没有金属间化合物生成。Be 相和 Al 相的凝固温度差为 527 ℃,在结合支架的结构特点和浇注系统基础上选取了 3 组工艺参数进行试验,发现当型壳预热温度为 775 ℃,浇注温度为 1 300 ℃时的浇注工艺效果较好。

3 模拟结果分析

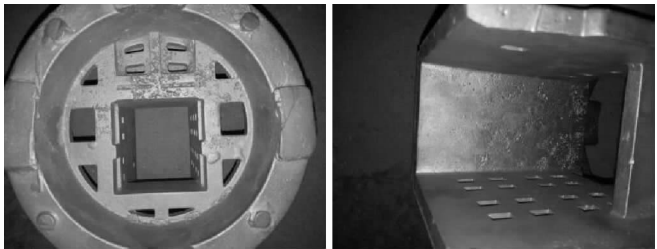
3.1 宏观组织分析

试验方案及结果见表 2。图 5 和图 6 为优化前后支架外观。可以看出,优化浇注系统、采用合适的浇注

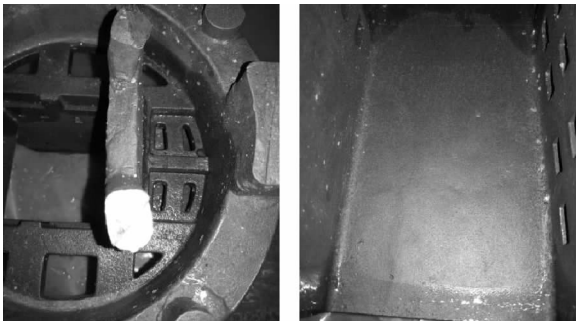
工艺(型壳预热温度为 775 ℃,浇注温度为 1 300 ℃),可以有效减少合金的铸造缺陷,提高产品品质。X 光无损检测结果见图 7,可见小窗口两侧的薄壁侧板以及平

表 2 不同方案铸件的熔铸参数
Tab.2 Investment casting parameters of castings in different schemes

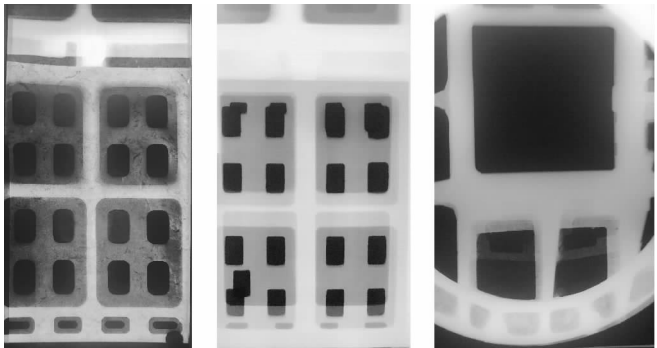
方案	型壳预热温度/℃	浇注温度/℃	缺陷程度		
			裂纹	缩松	冷隔
方案 1	750	1 290	一般	一般	较多
	750	1 300	较少	一般	一般
	750	1 310	较少	一般	较少
方案 2	775	1 290	无	一般	较少
	775	1 300	无	较少	无
	775	1 310	较少	一般	无
方案 3	800	1 290	无	一般	无
	800	1 300	较少	一般	无
	800	1 310	较少	较多	无



(a) 支架平台 (b) 支架侧壁
图 5 优化前支架外观
Fig.5 Appearance of bracket before optimization



(a) 支架平台 (b) 支架侧壁
图 6 优化后支架外观
Fig.6 Appearance of bracket after optimization



(a) 优化前支架侧壁 (b) 优化后支架侧壁 (c) 优化后支架平台
图 7 优化前后支架 X 光无损检测
Fig.7 X-ray non-destructive inspection of bracket before and after optimization

台处铸造缺陷得到明显改善。

3.2 微观组织分析

优化前后支架缩松 OM 见图 8。通过图 8a 可看出,缩孔多出现在晶界上,并且缩孔周围富集较多 Al 相,主要是 Be 相和 Al 相比较大的凝固温度差所导致,Be 在凝固过程中得不到充分补缩时,后凝固的 Al 将对其进行少量补缩,故产生缩孔周围富集 Al 相的现象。优化后缺陷显著降低,缩孔缺陷较少,但出现 Al 偏析的现象,少量 Al 偏析对铸件性能的影响较小,见图 8b。

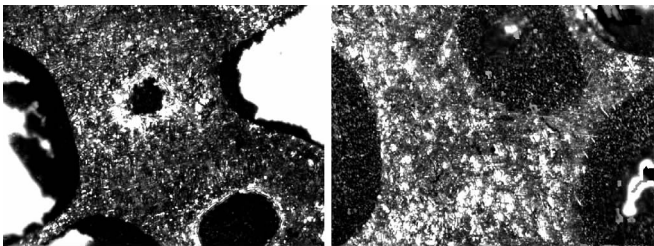


图 8 优化前后支架缩松 OM

Fig.8 OM images of shrinkage porosities before and after optimization

图 9 为铸造 Be-Al 合金支架工艺优化前后微观组织 SEM 图。由图 9a 可知,黑色孔隙为铸造缩松缺陷,使得组织致密度降低,导致铸件性能差。对比图 9a 可得,优化后铸造缩松缺陷明显降低,铝偏析现象略微增加,主要由于平台处暗冒口的设置改变了热场,凝固时暗冒口对其进行补缩。工艺优化后组织致密度提高,使得支架力学性能得以改善。

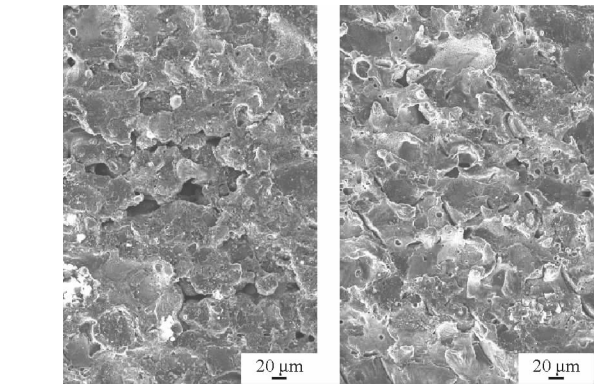


图 9 优化前后的支架的缩松 SEM

Fig.9 SEM images of shrinkage porosities before and after optimization

3.3 力学性能

铸件的力学试样检测结果见表 3。可以看出,经过工艺优化后铸件的抗拉强度提高了 23.7%、屈服强度提高了 0.5%、弹性模量提高了 40.4%,但伸长率改善不明显,仍需进一步研究。铸件的力学性能和铸造品质已达到标准,且缩孔和气孔的单个孔洞的深度均不超过该处

壁厚的 1/4。

表 3 铸件的力学性能
Tab.3 Mechanical properties of castings

	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	弹性模量/ GPa
工艺优化前	200.9	184.7	1.86	138.9
工艺优化后	248.6	191.8	2.10	195
客户要求	≥210	≥165	≥1.5	≥170

4 结 论

对工艺优化后,确定支架浇注温度为 1 300 ℃、型壳预热温度为 775 ℃,支架缩松缺陷降低,消除了下方主筋及平台中部裂纹、冷隔缺陷,并且经 X 光无损检测,支架内部铸造品质满足使用要求。支架抗拉强度为 248.6 MPa,屈服强度为 191.8 MPa,伸长率为 2.10%,可应用于支架的批量生产。

参 考 文 献

[1] 刘孝宁,马世光.铍铝合金的研究与应用[J].稀有金属,2003,27(1):62-65.

[2] 马玲,赵双群.粉末冶金铍铝合金拉伸性能的有限元模拟[J].宁夏工程技术,2009(1):55-57.

[3] 王战宏,王莉,买学锋,等.铍铝合金结构材料制造研究[J].采矿技术,2006,6(4):16-18.

[4] 李军义,王东新,刘兆刚,等.铍铝合金的制备工艺与应用进展[J].稀有金属,2017,41(2):203-210.

[5] CARTER D H. Deformation of A Beryllium-Aluminum Composite [D]. Santa Barbara: University of California, 1999.

[6] 王军锋.铝合金熔模精密铸造工艺研究[D].杭州:浙江工业大学,2010.

[7] 王金太,金吉琰.铝合金压铸件中的气孔分析[J].铸造技术,2008,29(1):134-136.

[8] 李世光.铝合金压铸模具设计与使用[J].铸造技术,2007,28(12):1600-1602.

[9] 张健康,栾新刚,王战宏,等.高铍铸造铍铝合金伸长率的评价指标[J].理化检验,2016,52(6):376-378.

[10] 许德美,李峰,王战宏,等.粉末热等静压和铸造 Be-Al 合金的室温拉伸断裂机理[J].中国有色金属学报,2009,19(12):2128-2135.

[11] DOU Z Y, MA C, ZHAO Y W, et al. Elevated temperature compressive behavior of a beryllium-aluminum casting alloy[J]. Materials Letters, 2018, 229(10): 89-92.

[12] WANG Z H, WANG J, YU L B, et al. Numerical simulation and process optimization of vacuum investment casting for Be-Al alloys[J]. International Journal of Metal Casting, 2019, 13(1): 74-81.

[13] YU L, WANG J, QU F, et al. Effects of scandium addition on microstructure, mechanical and thermal properties of cast Be-Al alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 737(15): 655-664.

[14] YU L, WANG Z, WU J, et al. Microstructure and properties of vacuum cast sc-containing Be-Al alloys[J]. International Journal of Metal Casting, 2018, 13(2): 201-212.

[15] 吴健,王晶,苏斌,等.铍铝合金支撑座熔模铸造数值模拟[J].铸造,2020,69(4):407-411.

[16] 谢秋峰,薛鑫,吴亚夫,等.基于 ProCAST 涡壳体铸件精铸过程数值模拟研究[J].铸造,2015,64(7):647-652.

(编辑:刘晨辉)