

Ti-6Al-4V 合金铸件拉伸性能差异原因分析

张亮, 程琴

(北京百慕航材高科技股份有限公司, 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: **目的** 研究 Ti-6Al-4V 合金两种不同结构铸件产品之间, 拉伸性能存在着较大差异的原因。方法分别对同批次母合金浇注的两种熔模精密铸件进行化学成分分析、金相组织检查和拉伸试棒宏观断口形貌观察。**方法** 分析发现, 肋板和支承座铸件两者化学成分没有明显差异, 断口表面未见明显冶金缺陷。金相组织检查表明: 肋板的原始 β 晶粒尺寸和晶粒内部的 α 片层间距均, 小于支承座的原始 β 晶粒尺寸和晶粒内部 α 片层间距。**结论** 分析结果表明, 拉伸性能数据存在差异主要与其晶粒度和晶内片层间距差异有关, 该组织差异主要由铸造工艺中不同的冷却速度引起的。通过改变取样位置, 试样的拉伸强度可获得明显提高。

关键词: 钛合金; 铸件; 拉伸性能; 显微组织; 断口形貌

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.01.008

中图分类号: TG146.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)03-0040-06

Tensile Property Difference of Ti-6Al-4V Alloy Castings

ZHANG Liang, CHENG Qin

(BAIMTEC material Co., Ltd., AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: The paper aims to research causes for tensile property difference in two Ti-6Al-4V titanium castings prepared by the same batch of parent alloy ingot. Two investment castings of the same batch were taken to carry out chemical component analysis, metallurgical structure examination and micro fracture surface observation of tensile test bar. Chemical components of lib and supporting holder had no apparent difference. There was no apparent metallurgical defect on the fracture surface. The metallurgical structure examination showed that the β grain size and the α lamellar spacing in grain of the lib was uniform, and was less than that of the supporting holder. Difference of tensile property is mainly because that the grain size and lamellar spacing in grain is different. This difference is mainly caused by the cooling speed in different casting technologies. Changing the sampling position might improve the tensile property obviously.

KEY WORDS: titanium alloy; casting; tensile property; microstructure; fracture morphology

由于钛及其合金具有的独特优异性能, 航空航天工业中一些具有复杂形状的重要零部件, 常采用 Ti-6Al-4V 作为主要的铸造钛合金材料。航空航天领域使用的钛合金铸件 98% 以上均采用钛合金熔模精密铸造工艺生产^[1], 国外宇航铸件产品的化学成分和力学性能必须满足客户的合格验收标准要求。一般以附铸试棒的拉伸性能作为评价熔模精密铸件力学性

能的标准方法, 常规的拉伸性能包括抗拉强度、屈服强度、伸长率和断面收缩率。拉伸试样分附铸试样和切取试样两种, 本例中均采用同一尺寸规格要求的附铸试样作为评价熔模精密铸件力学性能的标准。

现有两种国外宇航类 Ti-6Al-4V 钛合金, 产品名称分别为支承座铸件和肋板铸件^[1]。支承座是在航空发动机内部将其他结构件安装支撑在发动机主轴上

收稿日期: 2018-04-19

基金项目: 北京市科委基金 (Z171100002217012)

作者简介: 张亮 (1973—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为铸造钛合金成分和性能关系。

的重要部件，肋板铸件为发动机吊挂部位用于发动机和机翼连接的重要结构零件。在具体实际生产实践中发现，支承座的抗拉强度不能达到客户的标准要求，屈服强度勉强合格。

文中运用失效分析方法，通过对比两种铸件拉伸试棒的化学成分、断口宏微观观察、金相组织分析和铸造工艺方面的差异^[2]，找到该铸件附铸拉伸试棒抗拉强度较低和拉伸性能差异的原因，通过工艺调整改善，达到客户产品验收的力学性能标准要求，为解决其他类似情况下的熔模精密铸件产品拉伸强度不达标的情况提供参考，提高铸件性能合格率。

1 实验方法

支承座和肋板这两种铸件均采用熔模精密铸造工艺，将一定数量的力学拉伸试样毛坯尺寸的蜡模焊接在蜡模浇注系统上（见图 1），经涂料和脱蜡焙烧工序制备成精密铸造氧化锆耐火材料型壳，使用同一批次 Ti-6Al-4V 合金在 100 kg 真空凝壳炉上进行重熔离心浇注，浇注完成后炉冷，出炉清理型壳得到的力学试棒铸造毛坯，经热等静压处理（HIP，高纯氩气 120 MPa，910 ℃，2 h），对附铸试棒毛坯车取试末，按 HB 7716.13—2002 方法进行化学成分测试，并加工成 $\phi 5\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ （标距）力学拉伸试样。拉伸试

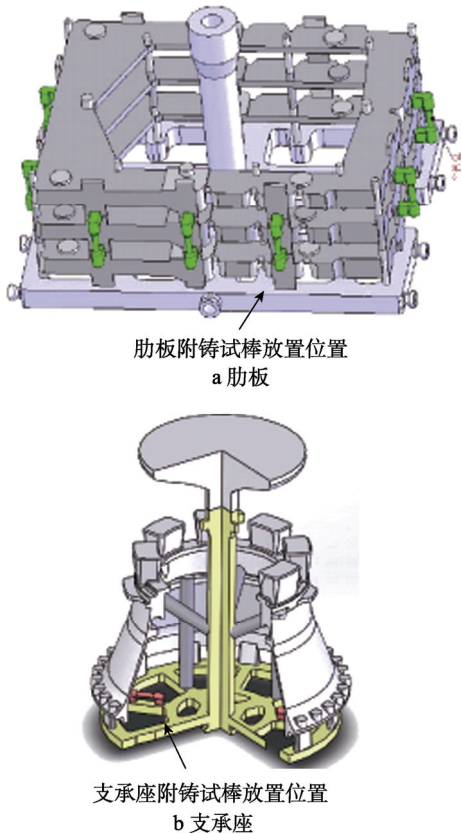


图 1 铸件模组和铸造试棒位置

Fig.1 Gating system and specimen location of two castings

验在 Instron-4507 型试验机上进行，测试其室温下拉伸抗拉强度、屈服强度和伸长率、端面收缩率。采用 JSM-5600LV 型扫描电镜对拉伸断口进行微观观察。在靠近断口位置截取金相试样，磨抛腐蚀后采用 OLYPUS PMES3 型光学显微镜对试样进行显微组织观察。

2 实验结果

2.1 化学成分分析

两种铸件的化学成分符合标准要求，由于均采用的同批次 Ti-6Al-4V 母合金进行浇注，从表 1 可以看出，两者化学成分水平没有明显差异。

表 1 两种铸件的化学成分
Tab.1 Chemical compositions of two castings

铸件名称	Al	V	Fe	C	O	N	H
肋板	6.49	4.12	0.04	0.006	0.16	0.021	0.0017
支承座	6.53	4.14	0.04	0.006	0.16	0.021	0.0018
标准要求	5.5~6.7	3.5~4.5	≤0.30	≤0.10	≤0.20	≤0.050	≤0.010

2.2 拉伸性能和断口检测

两种铸件的附铸试样测试的室温拉伸性能见表 2，主要是拉伸强度数据有较大差距，抗拉强度和屈服强度分别相差 60 MPa 和 70 MPa 以上，

表 2 两种铸件的拉伸性能
Tab.2 Tensile properties of two castings

铸件名称	拉伸试样数量	抗拉强度平均值/MPa	屈服强度平均值/MPa	伸长率平均值/%
肋板	7	919	838	9.3
支承座	10	852	761	9.1
国外宇航铸件拉伸性能要求		≥860	≥760	≥5.0

将肋板和支承座铸件拉断后的试棒分别标记为 1[#]、2[#]和 3[#]、4[#]，在体式显微镜下观察各断口及断口侧面（见图 2 和 3）。

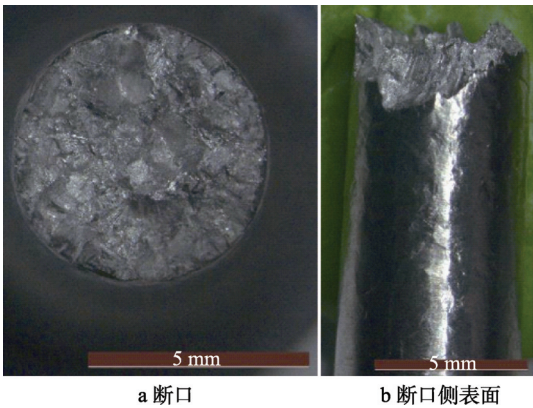


图 2 肋板 1[#]断口及断口侧表面宏观形貌

Fig.2 Macro morphology of lib 1[#] fracture and lateral surface of fracture

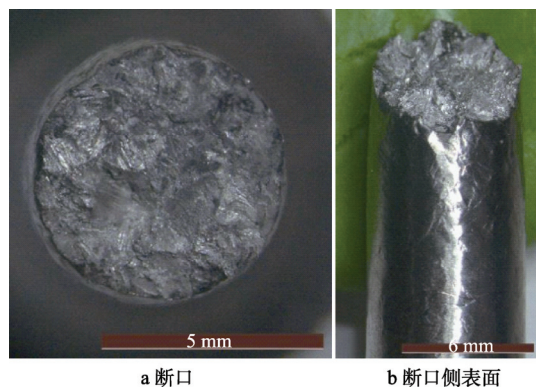


图3 支承座 3#断口及断口侧表面宏观形貌
Fig.3 Macro morphology of supporting holder 3# fracture and lateral surface of fracture

断口整体形貌未见明显差异,整体均较粗糙,断面高度差较大,由纤维区、放射区和剪切唇区组成。中部为粗糙的纤维区和扩展区,没有明显的分界线,

断口呈现银灰色,断口未见明显的颈缩变形。

两种铸件拉伸试棒的断口的微观形貌基本相同,均呈现沿晶与穿晶的混合型断口特征(见图4和5)。断口纤维区由不同的平面和韧窝组成,存在沿晶界的二次裂纹。接近试样断口边缘呈韧窝特征。断口表面未见明显的冶金缺陷。

2.3 金相检查

分别在肋板和支承座上的夹持段横向截取以及靠近断口附近纵向截取金相试样,磨制抛光腐蚀后观察其金相组织形貌。

图6所示为肋板和支承座低倍形貌。肋板和支承座纵向试样可见断口呈沿晶和穿晶断裂的混合特征,肋板的晶粒大小未见明显差异,支承座的晶粒大小未见明显差异,但1#和2#肋板的晶粒相对3#和4#支承座的晶粒更细小。

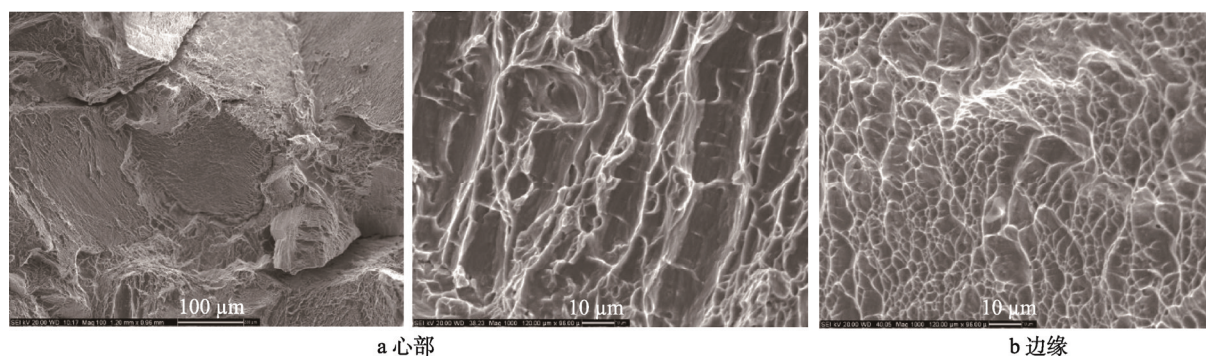


图4 肋板 1#断口微观形貌
Fig.4 Micro morphology of lib1# specimen Fracture surface

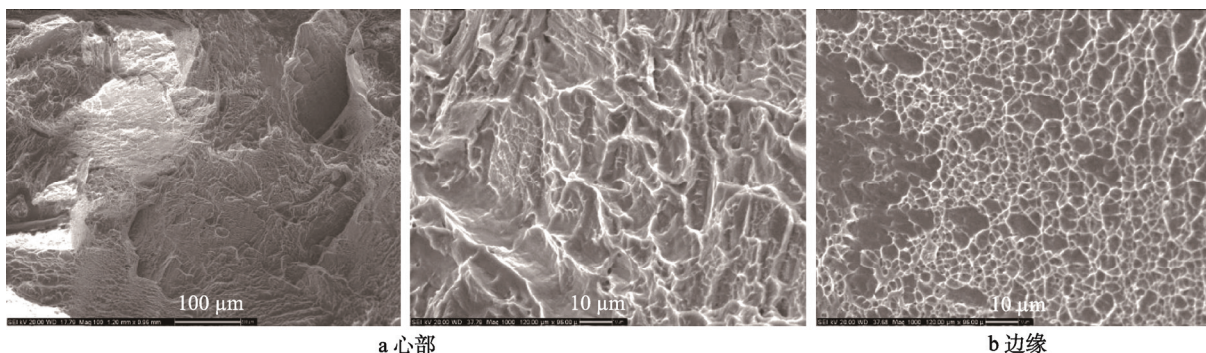
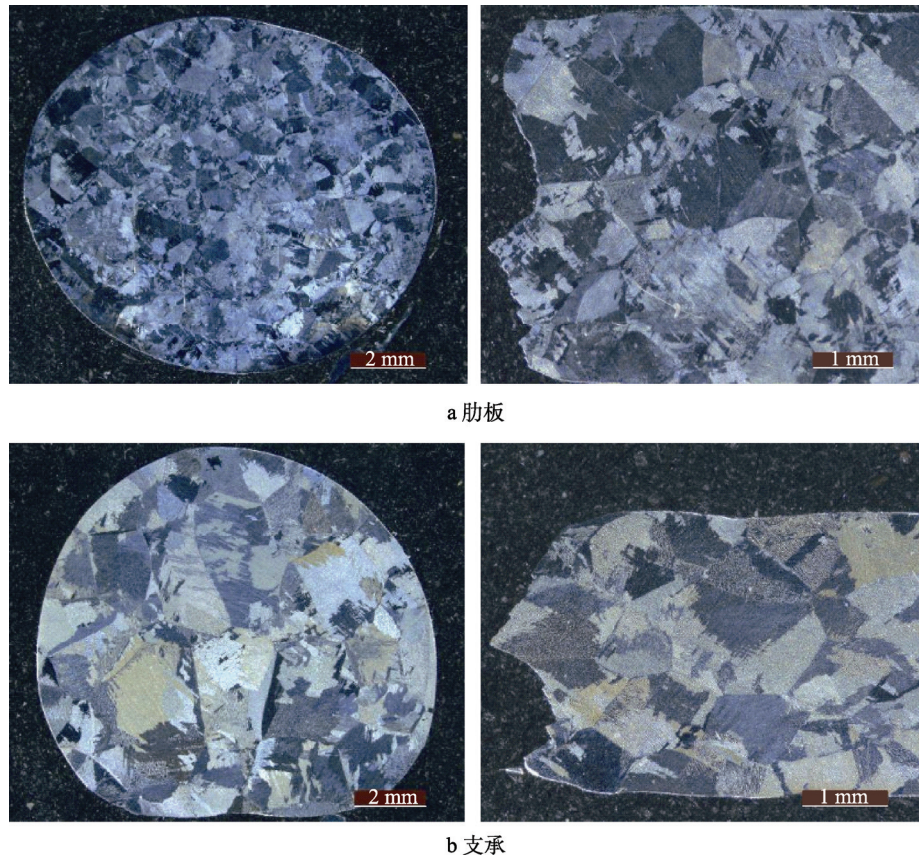
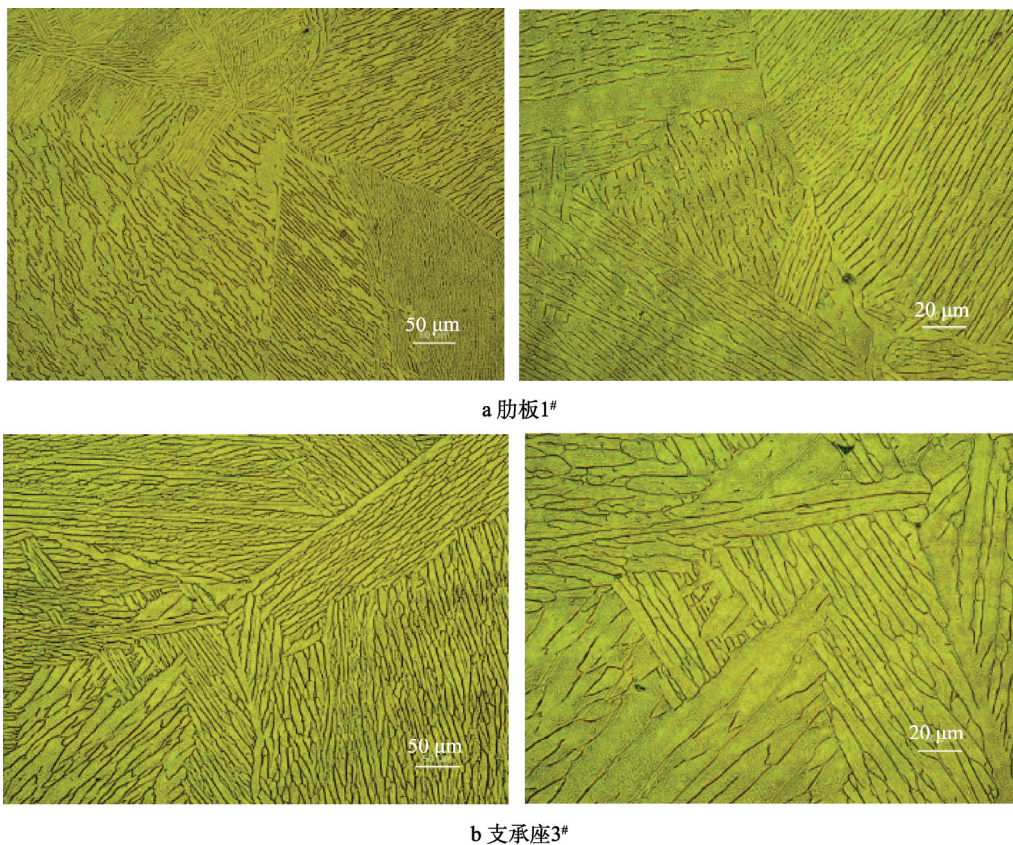


图5 支承座 3#断口微观形貌
Fig.5 Micro morphology of supporting holder 3# specimen fracture surface

肋板和支承座的金相组织由集束状片层 α 相、片间 β 和晶界组成,未见明显的成分偏析等冶金缺陷,其中支承座的组织中可见集束状片层 α 相和晶粒晶界明显宽化的现象(见图7)。肋板和支承座金相组织中的 α 片层间距和晶界宽度统计结果见表3,肋板的 α 片层平均间距为5.5~6 μm ,平均晶界宽度约为13~14 μm ,支承座的平均 α 片层间

表3 α 片层间距和晶界宽度统计结果
Tab.3 Statistical results of α lamellar spacing and crystal boundary width

序号	α 片层间距平均值/ μm	晶界宽度平均值/ μm
肋板 1#	6.0	13.3
肋板 2#	5.7	13.7
支承座 3#	11.7	19.2
支承座 4#	11.5	20.3

图 6 肋板 1[#]和支承座 3[#]低倍形貌Fig.6 Low magnification morphology of lib 1[#] and supporting holder 3[#]图 7 肋板 1[#]和支承座 3[#]试样横向金相组织形貌Fig.7 Microstructure of transverse metallographic structure of lib1[#] and supporting holder 3[#] specimen

距约为肋板的2倍,平均晶界宽度比肋板大,约为10~21 μm 。

3 分析与讨论

表2数据表明,肋板和支承座的化学成分差异不大,由此可排除肋板和支承座强度性能数据存在差异与其化学成分有关。

一般情况下,常温下细晶材料比粗晶材料具有更高的力学性能指标,这是因为晶界面是位错运动的障碍,晶粒越细小,晶界越多,位错被阻滞的地方就越多,障碍也就越大,需要加大外力才能使晶体产生滑移,强度指标就越高^[3]。在全部为层片状组织的合金中,根据Hall-Petch方程可知,屈服强度的相关组织参数可能是层片间距^[4]。晶粒内部 α 片层间距越小,在发生变形时具有交错阻碍移动的作用,裂纹形核的尺寸就越大,也有利于提高合金的强度。金相组织检查表明:肋板的原始 β 晶粒尺寸和晶粒内部的 α 片层间距,均小于支承座的原始 β 晶粒尺寸和晶粒内部 α 片层间距。因此,晶粒度和晶内片层组织的差异是造成肋板和支承座的拉伸性能存在差异的主要原因。

从断口形貌上可以看到,断口表面凹凸不平,整体较粗糙,均无明显颈缩现象,中部为粗糙的纤维区和扩展区,没有明显的分界线。纤维区由不同的平面和韧窝组成,存在沿晶的二次裂纹,接近试样断口边缘呈韧窝特征,为混合型断裂。还可以看到大量的长条状断裂平面,经对比分析发现,这些长条状断面与合金显微组织中片层状 α 相对应。断口表面未见明显的冶金缺陷。由此说明肋板和支承座的强度差异与材料本身的缺陷无关。

铸件的力学性能主要由合金种类、化学成分和冷却条件3个因素共同决定^[8]。在同种牌号合金化学成分相同的情况下,铸件的冷却条件是影响铸件晶粒大小和 α 相片层间距的决定性因素。铸件的微观组织尺寸和铸件尺寸、冷却速度有关,随着铸件截面积增加,冷却速度变慢,晶粒度长大^[5]。Ti-6Al-4V的 $\alpha+\beta$ 合金铸态组织受铸件冷却条件的影响,当冷却速度快时,片状 α 变得又长又短又尖,冷却速度慢时,片状 α 变得又宽又短^[6]。 β 晶粒尺寸和 α/β 片层间距随铸件模数的增加或冷却速度的减小而呈增加趋势。抗拉强度随冷却速度的增加而逐渐增加^[7]。这也就是说,同一种合金的化学成分即使相同,但是冷却条件不同,其力学性能也不同。由此可以推断,肋板和支承座附铸拉伸试棒的抗拉强度数据存在差异,主要与其铸件的冷却条件有关。两种铸件铸造工艺均采用耐火陶瓷型壳的精密铸造成形工艺,蜡模和型壳制备工艺相同,铸件模组浇注质量均为100 kg左右,铸件模数基本相同,真空凝壳炉熔炼浇注工艺相同。从图7铸

件模组示意图可以看出,有明显区别的是这两种铸件的附铸拉伸试棒在模组中的放置位置有所不同,肋板的铸造试样放置在铸件浇注系统的外侧,而支承座铸造试样放在了铸件浇注系统的内部。在铸造过程中,当熔融钛金属液浇注充型完成以后,两者的铸造试棒的冷却条件会有明显差别,相比之下,由于支承座的附铸试棒置于铸件近似半封闭形状的内部,同时被厚大的浇道系统围绕,会导致附铸试棒冷却散热条件较差,冷却速度变慢,造成支承座拉伸试棒晶粒度尺寸和晶内组织尺寸粗大,抗拉强度迅速降低,不能较好地代表铸件力学性能水平。因此,为了获得较好的冷却条件和相应的微观组织,在蜡模组模阶段,需要对支承座附铸的拉伸试棒在模组中的放置位置进行改变调整。为了使随炉铸造试棒更准确地反映铸件的力学性能,在蜡模组模阶段,对支承座附铸的拉伸试棒在模组中的放置位置进行了改变调整。通过将试棒放置于铸件形状外侧下部,改变位置后的铸件拉伸性能得到快速明显改善,抗拉强度和屈服强度平均值达到了895和804 MPa,提高了近40 MPa,完全满足了标准要求。

4 结论

通过以上对Ti-6Al-4V钛合金精密成形两种铸件拉伸试样的失效分析,以及拉伸强度性能差异的原因讨论,可以得到以下结论:

- 1) 在铸件成分相同的条件下,晶粒度大小和 α 片层间距的差异是造成肋板和支承座的拉伸性能存在较大差异的主要原因;
- 2) 附铸拉伸试棒在铸件模组中的位置的不同,导致试棒具有不同冷速,最终造成拉伸性能的差异,因此,在蜡模组模阶段,需要考虑附铸试棒的位置以反映铸件真实力学性能。

参考文献:

- [1] 张美娟,南海,鞠忠强,等.航空铸造钛合金及其成型技术发展[J].航空材料学报,2016,36(3):13—19
ZHANG Mei-juan, NAN Hai, JU Zhong-qiang, et al. Aeronautical Cast Ti Alloy and Forming Technology Development[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 13—19
- [2] 张卫方,刘庆琰,陶春虎,等.钛合金损伤和预防的研究发展[J].材料工程,2003(Z1):21—24.
ZHANG Wei-fang, LIU Qing-quan, TAO Chun-hu, et al. Titanium Fracture and Precaution Research Development[J]. Journal of Materials Engineering, 2003(Z1): 21—24.
- [3] 郑增麟.工程材料的力学行为[M].西安:西北工业大学出版社,2004.

- ZHENG Zeng-lin. Mechanical Behaviors of Engineering Materials[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2004.
- [4] C. 莱茵斯, M. 皮特尔斯. 钛与钛合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- LEYENS C, PETERS M. Titanium and Titanium Alloys[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [5] 郗喜望, 殷亚军, 吴国清. ZTC4 钛合金大型复杂铸件组织及性能均匀性[J]. 精密成形工程, 2017, 9(4): 85—89.
- QIE Xi-wang, YIN Ya-jun, WU Guo-qing, et al. Homogeneities of Microstructure and Mechanical Properties of Large Complex Castings of ZTC4 Titanium Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(4): 85—89
- [6] 周彦邦. 钛合金铸造概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- ZHOU Yan-bang. An Introduction to Titanium Alloy Casting[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000.
- [7] 贾丽敏. 钛合金离心精密铸造凝固组织与力学性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- JIA Li-min. Experimental Analyses on Solidified Structures and Mechanical Properties of Centrifugal Precision Titanium Castings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [8] 车顺强. 熔模精密铸造实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- CHE Shun-qiang. The Practice of Precision Investment Casting[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.