

固溶温度对 Ti-5.5Al-2.0Zr-1.5Sn-1.5Nb-0.5Mo 合金组织及性能影响

谭 聪 张 静 董英杰 段志宏 陈映志 冉瑞强
(攀枝花航友新材料科技有限公司)

摘 要 以一种新型耐蚀钛合金 Ti-5.5Al-2.0Zr-1.5Sn-1.5Nb-0.5Mo 为研究对象,将其热轧板材进行不同温度的固溶时效热处理,研究了固溶时效工艺对新型耐蚀钛合金板材微观组织、力学性能的影响。结果表明,当固溶温度从 900 ℃ 升高到 930 ℃ 时,组织呈现等轴化趋势, β 转变组织明显增多;当在 960 ℃ 进行固溶时,组织为魏氏组织形貌。随着固溶温度不断升高,板材的抗拉强度、屈服强度和洛氏硬度随之升高,而伸长率随之下降。

关键词 耐蚀钛合金;固溶;组织演变;力学性能

中图分类号 TG166.5;TG146.23 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Solution Temperature on Microstructure and Properties of Ti-5.5Al-2.0Zr-1.5Sn-1.5Nb-0.5Mo Alloy

Tan Cong, Zhang Jing, Dong Yingjie, Duan Zhihong, Chen Yingzhi, Ran Ruiqiang
(Panzhihua Hangyou New Material Technology Co., Ltd.)

Abstract: The hot-rolled plates of a novel corrosion-resistant Ti-5.5Al-2.0Zr-1.5Sn-1.5Nb-0.5Mo alloy were subjected to solution aging heat treatment at different temperatures, and the influence of solution aging process on the microstructure and mechanical properties of alloy sheet was investigated. The results indicate that as the solution temperature increases from 900 ℃ to 930 ℃, the microstructure tends to be equiaxed, and the β -transition microstructure is significantly increased, which presents Widmannstatten morphology under solid solution of 960 ℃. With increasing in solution temperature, the tensile strength, yield strength and rockwell hardness of the sheet are increased, while the elongation is decreased.

Key Words: Corrosion-resistant Titanium Alloy, Solution, Microstructure Evolution, Mechanical Properties

钛及钛合金具有高比强度、高耐腐蚀性、无磁等特点,是一种优异的海洋材料^[1~4]。但目前海洋工程装备用钛合金普遍存在强度和耐油气腐蚀能力不足的问题,而且其生产制造难度比普通钛合金大。随着国家海洋强国战略的实施以及海洋资源开发利用力度加大,对先进高性能海洋工程装备的需求逐渐扩大,开发应用于先进船舶、海洋工程装备等领域的高强耐蚀钛合金是当前钛合金的研究热点^[5~7]。

一般可通过合金成分设计、加工方式和热处理等改善耐蚀钛合金的性能和显微组织。CHENG Y C 等^[8]设计开发的 Ti-24Nb-4Zr-7.9Sn 钛合金与纯钛、Ti-6Al-4V 合金相比,在各种模拟环境下均具有良好的耐腐蚀

性能,但其强度偏低。GORNAKOVA A S 等^[9]研究了成分、退火温度和高压扭转对 Ti-V 和 Ti-V-Al 合金组织和硬度的影响,发现 Al 的加入完全抑制了 ω -Ti 相的形成,同时可以增加其硬度,且高压扭转后合金的硬度随热处理温度的升高而提高。LIN C 等^[10]依据电子浓度理论分析了钛合金中添加合金元素对形成 α' 相和 α'' 相的影响,发现高铝当量利于形成 α' 相,而较高的 Zr、Mo 和 Nb 含量有利于形成 α'' 相。固溶时效热处理是一种改善金属材料微观组织和力学性能的工艺,常用来提高钛合金强度^[11,12]。鲁媛媛等^[13]研究了不同固溶处理温度对 TC4 钛合金显微组织和性能的影响,发现固溶处理有效提高了钛合金的强度,但却伴随着塑性的降

收稿日期:2022-02-24;修改稿收到日期:2022-03-30

第一作者简介:谭聪,男,1995 年出生,硕士研究生,四川攀枝花(617000),E-mail:1392054911@qq.com

通信作者:张静,男,1979 年出生,高级工程师,四川攀枝花(617000),E-mail:15388903@qq.com

引用格式:谭聪,张静,董英杰,等. 固溶温度对 Ti-5.5Al-2.0Zr-1.5Sn-1.5Nb-0.5Mo 合金组织及性能影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(1):111-115.

TAN C, ZHANG J, DONG Y J, et al. Effects of solution temperature on microstructure and properties of Ti-5.5Al-2.0Zr-1.5Sn-1.5Nb-0.5Mo alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1):111-115.

低,且随着固溶温度升高 β 相逐渐向 α 相转变。LI C L等^[14]研究了固溶时效处理对Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al钛合金组织和性能的影响,发现其力学性能显著提高。YANG X W等^[15]通过固溶时效处理,改善了Ti-6Al-4V钛合金的组织和耐蚀性能,微观组织由片层组织转变为网篮组织。此外,腐蚀电流密度明显降低,提高了耐腐蚀性能。对于铝当量较高的近 α 合金,难以将亚稳 β 相保留至时效温度,因此合金不具备时效强化效果。通过固溶处理可以获得并调控马氏体显微组织结构,一方面可有效提高合金的室温塑性,另一方面也能间接改善合金的时效强化效果,最终实现合金加工及使用性能的提升^[16]。

目前,关于耐蚀钛合金成分设计、加工方式和热处理手段对其显微组织和性能的研究报道较少。本课题以新设计开发的Ti-5.5Al-2.0Zr-1.5Sn-1.5Nb-0.5Mo耐蚀钛合金^[17]为研究对象,依次经过3次真空自耗电弧炉熔炼、开坯锻造、热轧、固溶时效处理等过程,研究不同的固溶温度对钛合金板材组织、力学性能的影响,以期改善耐蚀钛合金组织和性能提供参考。

1 试验材料及方案

试验材料名义成分为Ti-5.5Al-2.0Zr-1.5Sn-1.5Nb-0.5Mo(以下简称Ti55211),选用0级海绵钛、海绵锆、钛锡、铝铌、铝钼中间合金等作为原材料,在真空自耗电弧炉中进行3次熔炼,采用化学分析法检测钛合金铸锭的化学成分,见表1。将Ti55211钛合金3次铸锭进行开坯、锻造,然后运用两辊可逆轧机热轧成板材,再进行固溶时效热处理。热轧工艺为将坯料加热至960℃后保温60 min进行一火热轧;回炉加热至950℃后长宽换向进行二火热轧;二火轧制板材再次回炉加热至940℃进行三火轧制,最后空冷至室温,板材的最终厚度为8 mm,终轧温度为820℃^[18]。经HSDSC101差示扫描量热仪测得Ti55211钛合金热轧板材的相变温度为950℃,据此制定固溶时效热处理工艺,见表2。

表1 热轧Ti55211板材的化学成分

Tab.1 Chemical composition of hot-rolled Ti55211 sheet %								
w_B								
Al	Zr	Sn	Mo	Nb	C	O	N	Ti
5.57	2.14	1.46	0.45	1.38	0.016	0.078	0.014	余量

表2 Ti55211钛合金热处理制度^[15]

Tab.2 Heat treatment regime of Ti55211 titanium alloy						
试样	固溶温度/℃	固溶时间/min	冷却方式	时效温度/℃	时效时间/h	冷却方式
1	900					
2	930	30	水冷	580	3	空冷
3	960					

将固溶时效后的Ti55211钛合金板材切割为10 mm×10 mm×8 mm的试样进行研磨、抛光,金相腐蚀采用Kroll试剂(HF、HNO₃、H₂O体积比为1:2:7),采用Nikon ECLIPSE MA200倒置显微镜观察试样的金相组织;采用SHT4605微机控制电液伺服万能试验机进行板材单向室温拉伸性能,试样尺寸见图1;采用ZEISS EVO18扫描电镜观察试样断口形貌;采用TH320型洛氏硬度计检测试样硬度,载荷为1 471 N,加载时间为10 s,每个试样测5次取平均值。

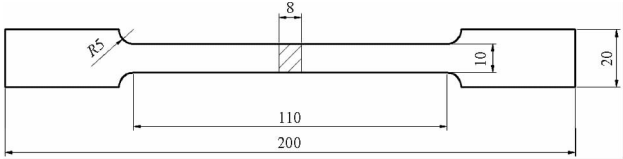


图1 拉伸试样尺寸
Fig.1 Dimension of tensile specimen

2 试验结果与讨论

2.1 Ti55211钛合金固溶时效板材的微观组织

Ti55211钛合金固溶时效后的板材显微组织见图2。由图2a~图2c可以看出,900℃时Ti55211钛板材的纵、横、轧制3个面组织均由 α 相、 β 相和少量的 β 转变组织构成,但 β 相呈现弥散无规则分布状态,且 β 转变组织尺寸普遍偏小。经Image pro软件计算,轧制面 α 相的体积分数约为83.47%。由图2d~图2f可以看出,930℃时板材的纵、横、轧面的组织由 α 相、 β 相和 β 转变组织构成,但 β 转变组织较900℃下固溶时效组织存在明显变大的趋势,且纵截面和轧制面的组织呈现明显等轴化趋势,其原因是固溶处理温度930℃在Ti55211钛合金的 $\alpha+\beta$ 两相区,在 α 相转变为 β 相时发生了再结晶,但由于温度不高,没有形成完全等轴的 α 相,在此过程中 β 转变组织发生长大变粗。经软件计算,轧制面 α 相的体积分数约为86.11%,较900℃时的体积分数有所增加。由图2g~图2i可以看出,960℃下板材的纵、横和轧面的组织发生显著变化,与低温固溶时效板材的组织不同,其组织为魏氏组织形貌,存在清晰的晶界 α 相和粗大的 β 晶粒,主要是因为960℃固溶时,超过了Ti55211钛合金的相变点温度,大部分 α 相得以转变为 β 相,在淬火时保留下来,经计算,轧制面 α 相的体积分数约为46.37%。由图2c、图2f和图2i可知,当在相变点之前进行固溶处理时,随着固溶温度升高,Ti55211钛合金板材轧制面的组织由不规则弥散分布的组织变为等轴组织;当在相变点之后进行固溶处理时,组织变为魏氏组织^[18~21]。

综上,当固溶温度从900℃升到930℃时,Ti55211

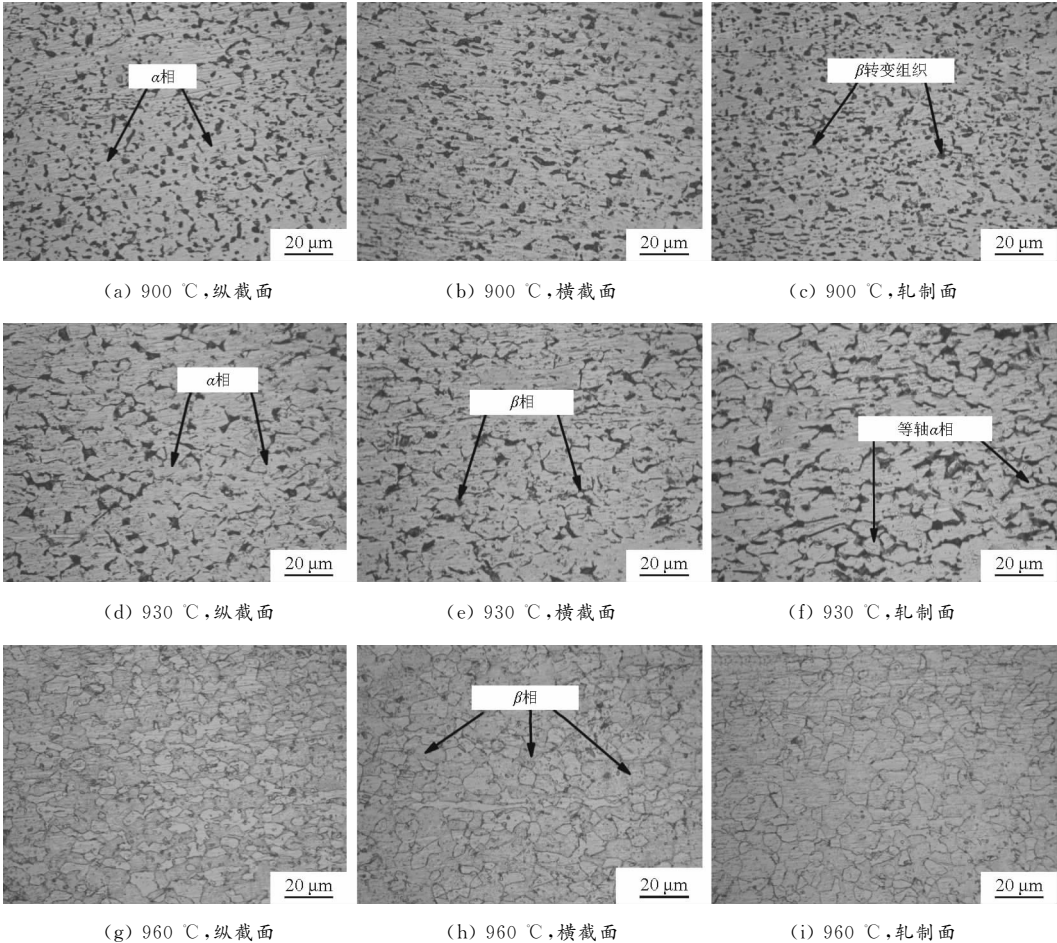


图 2 Ti55211 钛合金固溶时效板材的显微组织

Fig.2 Microstructure of solution aging sheets of Ti55211 titanium alloy

钛合金组织呈现等轴化， α 相体积分数逐渐增加，从 83.47% 增至 86.11%，表明 α 相发生了部分动态再结晶， α 相聚集球化， β 转变组织也长大变粗；当在 960 °C 固溶时，组织为魏氏组织， α 相含量大幅降至 46.37%，等轴状 α 相减少。

2.2 Ti55211 钛合金固溶时效板材的力学性能

图 3 为 Ti55211 钛合金板材在不同固溶温度下的力学性能。Ti55211 钛合金固溶时效前板材的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 1 001 MPa、842 MPa 和 5.5%。可以看出，板材在 900 °C 固溶时效后，其抗拉强度、屈服强度以及伸长率分别为 855 MPa、779 MPa 和 14.5%，较固溶时效前抗拉强度降低了 14.58%，伸长率提高了 163.6%。其原因是热轧板材的组织分布不均， α 、 β 相的尺寸各异，而在固溶时效后这一现象得到明显改善，内部由于轧制变形造成的应力集中在时效过程得到释放，其伸长率大幅增加。板材在 930 °C 固溶时效后，其抗拉强度、屈服强度以及伸长率分别为 886 MPa、791 MPa 和 14.0%，抗拉强度较固溶时效前降低了 11.49%，伸长率提高了 154.5%。板材经 960 °C 固溶时效后，其抗拉强度、屈服强度以及伸长率分别为

927 MPa、851 MPa 和 12.5%，抗拉强度较固溶时效前降低了 7.39%，屈服强度提高了 1.07%，伸长率提高了 127.27%。

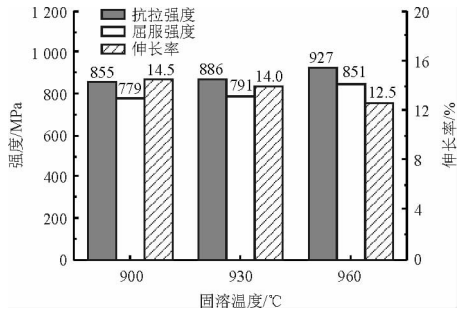


图 3 Ti55211 固溶时效后板材的力学性能

Fig.3 Mechanical properties of solution aging sheets of Ti55211 titanium alloy

随着固溶温度升高，Ti55211 钛合金板材的抗拉强度和屈服强度提高，而伸长率降低。在 930 °C 固溶时效后板材较 900 °C 时效后板材的 β 转变组织数量更多、尺寸更大，因而强度较 900 °C 时效时更高；当 960 °C 固溶时效后，组织为魏氏组织，有大量粗大的 β 晶粒，强度进一步提高，而原有的等轴 α 相减少导致塑性下降。另外，在 930 °C 固溶时效后具有最高的强塑性，说明在该

固溶时效下的 Ti55211 钛合金板材综合力学性能最佳。

2.3 Ti55211 钛合金固溶时效板材的断口形貌

图 4 为 Ti55211 钛合金在不同固溶温度处理后试样的室温拉伸断口形貌。可以看出,在 900、930 和 960 ℃固溶时效后试样的断口形貌均由大量的韧窝组成,断

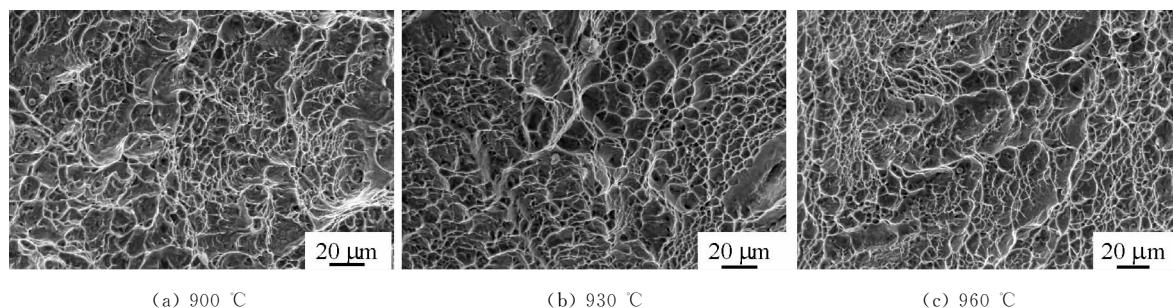


图 4 Ti55211 合金在不同温度固溶时效后板材拉伸试样断口形貌

Fig.4 Fracture morphologies of solution aging sheets of Ti55211 titanium alloy at different temperatures

成,属于韧性断裂。

2.4 Ti55211 钛合金固溶时效板材洛氏硬度分析

图 5 为 Ti55211 钛合金板材在不同固溶温度下保温 30 min,在 580 ℃下时效 3 h 后的硬度(HRC)。可以看出,随着固溶温度增加,其洛氏硬度随之增加,与抗拉强度和屈服强度的变化趋势一致,与伸长率变化趋势相反。固溶时效板材的洛氏硬度(HRC)较热轧板材的硬度(29.22)均出现了一定幅度的下降,说明固溶时效热处理对 Ti55211 钛合金热轧板材存在一定的软化效果,其原因可能是固溶处理改善了热轧后原本不规则的组织,时效过程又释放了变形产生的应力。

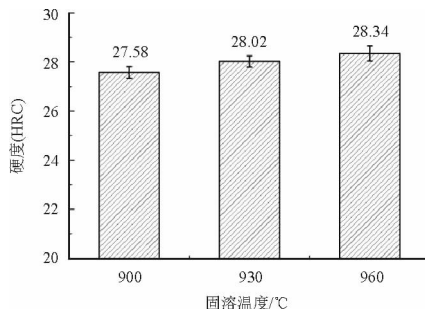


图 5 Ti55211 钛合金不同温度固溶时效后板材的硬度

Fig.5 Hardness of solution aging sheets of Ti55211 titanium alloy at different temperatures

3 结 论

(1) Ti55211 钛合金热轧板材在不同温度固溶时效后,组织产生了较大变化。当固溶温度从 900 ℃升高到 930 ℃时,组织呈现等轴化趋势, β 转变组织明显增多;当在 960 ℃进行固溶时,有粗大的 β 晶粒和晶界 α , 其组织为魏氏组织。

(2) 随着固溶温度不断升高,Ti55211 钛合金板材

裂方式属于韧性断裂。其中,图 4a 和图 4b 中的大韧窝中包含有大量小韧窝,深度更深;而图 4c 中的很多韧窝较浅甚至不完整,局部区域存在解理台阶,塑性相对较差,此现象与力学性能一致。综上所述,3 种固溶时效热处理后的 Ti55211 钛合金板材断口形貌均由韧窝构

的抗拉强度、屈服强度和洛氏硬度随之升高,而伸长率随之下降。板材在 930 ℃固溶时效后的抗拉强度、屈服强度以及伸长率分别为 886 MPa、791 MPa 和 14.0%。不同固溶温度+时效热处理后的板材断口形貌均主要由韧窝构成,属于韧性断裂。

参 考 文 献

- [1] BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on titanium science and technology[J]. Acta Mater., 2013, 61(3): 844-879.
- [2] JONES R, RAMAN R K S, ILIOPOULOS A P, et al. Additively manufactured Ti-6Al-4V replacement parts for military aircraft[J]. Int. J. Fatigue, 2019, 124: 227-235.
- [3] YAN S K, SONG G L, LI Z X, et al. A state-of-the-art review on passivation and biofouling of Ti and its alloys in marine environments[J]. J. Mater. Sci. Technol., 2018, 34(3): 421-435.
- [4] BALACHANDRAN S, KUMAR S, BANERJEE D. On recrystallization of the α and β phases in titanium alloys[J]. Acta Mater., 2017, 131: 423-434.
- [5] 常辉,廖志谦,王向东. 海洋工程钛金属材料[M].北京:化学工业出版社,2017.
- [6] 钱江,王怡,李瑶. 钛及钛合金在国外舰船上的应用[J].舰船科学技术,2016,38(11): 1-6.
- [7] 刘强,惠松骁,汪鹏勃,等. 油气开采用钛合金石油管材料耐腐蚀性能研究[J].稀有金属材料与工程,2020,49(4): 1 427-1 436.
- [8] CHENG Y C, HU J, ZHANG C B, et al. Corrosion behavior of novel Ti-24Nb-4Zr-7.9Sn alloy for dental implant applications in vitro[J]. Journal of Biomedical Materials Research, 2013, B101(2): 287-294.
- [9] GORNAKOVA A S, STRAUMAL A B, KHODO S, et al. Effect of composition, annealing temperature, and high pressure torsion on structure and hardness of Ti-V and Ti-V-Al alloys[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 125(8): 082 522.
- [10] LIN C, YING G L, ZHAO Y Q, et al. Analysis of the effect of alloy elements on martensitic transformation in titanium alloy with the use of valence electron structure parameters[J]. Mater. Chem. Phys., 2011, 125(3): 411-417.

MQ200 变速器壳体压铸工艺及模具设计

侯丽彬¹ 王琳琳² 间德海²

(1.大连科技学院机械工程学院;2.大连亚明汽车零部件股份有限公司)

摘 要 通过对 MQ200 变速器壳体结构特点及工艺性分析,并借助 AnyCasting 软件进行 CAE 流场数值模拟分析。基于工艺设计和模拟结果,进行压铸模结构设计。浇注系统采用“Y”型填充结构,搭接式内浇口;型腔设计为拼接结构,便于制造、维修;导向机构采用方导柱导套结构,保证模具在热膨胀下的导向精度。针对填充末端和局部厚大处设计局部增压结构,以减少铸件缩孔缺陷的产生。

关键词 变速器壳体;模拟分析;分型面;浇注系统;局部增压

中图分类号 TG249.2 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Die Casting MQ200 Gear Housing and Its Mould Design

Hou Libin¹, Wang Linlin², Jian Dehai²

(1.School of Mechanical Engineering, Dalian University of Science and Technology;
2. Dalian Yaming Auto Parts Co., Ltd.)

Abstract: MQ200 gear-housing characteristics and its process analysis were analyzed and the flow field analysis was performed by the AnyCasting software. According to process design and simulation analysis, die-casting mould structure was designed. The gating system was adopted as “Y” filling way with overlap-joint ingate. According to function requirement to design part of cavity as overlap-joint construction, it was easy to manufacturing and repair. The guide system was set symmetrically as angular guide pillar and sleeve at 4-angles of mould in order to ensure guide accuracy under thermal expansion. Aiming at the end of filling system and part of over-thick area, local pressurized structure was designed to reduce shrinkage porosity defect.

Key Words: Gear-housing, Simulation Analysis, Parting Surface, Gating System, Local Pressurization

随着压铸技术的不断发展,压铸件已广泛应用于汽车、电子、仪器仪表、航天航空等行业。目前汽车发动机缸体、罩盖、油底壳、变速器壳体及电动车上电池壳、电控、电装的壳体箱体,大部分采用铝合金压铸。

以 MQ200 手动变速器壳体为例,对其压铸工艺进行设计并借助 AnyCasting 软件进行 CAE 模拟分析。基于工艺设计和模拟分析结果,对其进行压铸模设计,为类似压铸件的生产提供参考。

收稿日期:2022-03-24;修改稿收到日期:2022-04-25

第一作者简介:侯丽彬,女,1968 年出生,高级工程师,辽宁大连(116036),E-mail:houlubin_dalian@163.com

引用格式:侯丽彬,王琳琳,间德海. MQ200 变速器壳体压铸工艺及模具设计[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(1):115-118.

HOU L B, WANG L L, JIAN D H. Die casting MQ200 gear-housing and its mould design[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1):115-118.

[11] 莫畏,张翥,王群骄,等. 钛的金属学和热处理[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.

[12] 吴崇周. 固溶时效热处理对 TC16 钛合金组织和性能的影响[J]. 金属学报,2002,38(S): 97-100.

[13] 鲁媛媛,马保飞,刘源仁. 固溶处理温度对 TC4 钛合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理,2019,44(6): 153-158.

[14] LI C L, MI X J, YE W J, et al. A study on the microstructures and tensile properties of new beta high strength titanium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 550: 23-30.

[15] YANG X W, DONG X R, LI W Y, et al. Effect of solution and aging treatments on corrosion performance of laser solid formed Ti-6Al-4V alloy in a 3.5% NaCl solution[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2): 1 559-1 568.

[16] 罗文忠,孙峰,赵小花,等. 固溶处理对 Ti60 合金组织及拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(12): 3 967-3 971.

[17] 王妍. 高强耐蚀 Ti-Al-Zr-Sn-Mo-Nb 合金的成分优化及组织性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[18] 丁平,肖寒,陈磊,等. 退火时间对 Ti-6.0Al-3.0Zr-0.5Sn-1.0Mo-1.5Nb-1.0V 钛合金组织及力学性能的影响[J]. 工程科学学报,2022,44(1): 50-58.

[19] 张志强,董利民,杨洋,等. 淬火温度对 TC16 钛合金显微组织及变形行为的影响[J]. 金属学报,2011,47(10): 1 257-1 262.

[20] 权思佳,宋克兴,张斌斌,等. 热处理工艺对 Ti80 合金显微组织的影响[J]. 材料热处理学报,2018,39(5): 44-48.

[21] 黎俊初,王晗,张国光,等. 固溶时效对热等静压制得的 TC4 合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理,2007,36(10): 65-67.

(编辑:刘晨辉)