

L605 离心铸管凝固组织数值模拟及试制研究

寻梦华^{1,2} 骆合力^{1,2} 李尚平² 韩少丽² 张 继^{1,2}

(1.钢铁研究总院高温材料研究所; 2.北京钢研高纳科技股份有限公司)

摘 要 为研究 L605 离心铸管在凝固过程中不同温度梯度下组织的生长规律,利用 ProCAST 软件对管坯内部不同区域的组织进行了数值模拟,并在铸型前端设置感应加热线圈实现在线加热,以消除充型过程中铸型自前端至后端随着金属液充型的进行所增加的温度梯度。结果发现,模拟结果与试制结果吻合较好,可以反映管坯凝固组织中柱状晶和等轴晶的形貌与面积比,为预测其凝固组织生长过程提供了有效依据,得到了适合该离心铸管的较优的铸型温度为 500 ℃。

关键词 离心铸管;凝固组织;铸型温度;数值模拟

中图分类号 TG249.4;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.013 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Numerical Simulation and Trial Production of Solidification Structure of L605 Centrifugal Cast Pipe

Xun Menghua^{1,2}, Luo Heli^{1,2}, Li Shangping², Han Shaoli², Zhang Ji^{1,2}
(1.Institute of High Temperature Materials, Central Iron & Steel Research Institute;
2.Gaona Aero Material Co., Ltd.)

Abstract: In order to investigate the growth law of L605 centrifugal casting pipe under different temperature gradients during solidification, the microstructure of tube blank at different regions was simulated by the ProCAST software, and an induction heating coil was set at the front end of the mold to realize on-line heating, so as to offset the increasing temperature gradient of the mold from the front end to the rear end with the progress of molten metal filling. The results indicate that the simulation results are consistent with the trial production results, which can reflect the morphology and area ratio of columnar crystals and equiaxed crystals in the solidification structure, and provide an effective basis for predicting the growth process of solidification structure. The desirable mold temperature for the centrifugal casting tube was presented as 500 ℃.

Key Words: Centrifugal Cast Pipe, Solidification Structure, Mold Temperature, Numerical Simulation

Co-Cr-W-Ni 合金(L605)是 Co-Cr 基合金中性能较优异的高温合金,因其良好的生物兼容性和射线不可穿透性及较高的抗拉强度,在生物医用领域得到广泛应用,有望成为冠脉药物支架的最佳材料^[1-3]。一般情况下,医用细径薄壁管材需经几十道次冷轧而成,而均匀细小的柱状晶组织不仅可以有效改善成分波动,减少溶质原子偏析,而且对轧管晶粒尺寸和均匀度具有重要影响^[4]。与传统模铸管坯获得的等轴晶铸态组织相比,卧式离心铸造管坯获得的柱状晶组织能提高晶粒的变形协调性,降低晶界应力集中,显著提升合金的变形能力。特别是对于 L605 这种具有应力诱导相变特性的合金,柱状晶组织不仅能够促进形变-相变的交互作用,获得高的相变应变和相变协调性,而且在金属熔体流动时,柱状晶的生长方向向迎流一侧倾斜。柱状晶生长方向是液相流动速率和过冷度的函数,流动速率越高或过冷度越小,则柱状晶偏转角越大。倾斜的晶界与圆管坯的径向呈一定的角度,可以减小轧制过程开裂的可能。另外,熔体流动显著增加形核率,细化晶粒尺寸^[5-8]。综上所述,离心铸管显微组织中柱状晶的大量存在可以显著提高合金的塑性和 L605 管材的成材率^[9-10]。但随着铸型内金属液充型的逐渐完成,铸型温度自前端至后端逐渐增加,越接近铸型后端,管坯径向温度梯度逐渐减小,而管坯温度梯度的减小不利于离心管坯中柱状晶组织的形成,进而引起前后端柱状晶晶粒尺寸的差异增大。

收稿日期:2022-08-30;修改稿收到日期:2022-10-14
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFC1107201)
第一作者简介:寻梦华,男,1994 年出生,博士研究生,北京(100081),E-mail:Xunmh1130@163.com
通信作者:骆合力,男,1964 年出生,教授,北京(100081),E-mail:luohl@cisri.com.cn
引用格式:寻梦华,骆合力,李尚平,等. L605 离心铸管凝固组织数值模拟及试制研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(6):800-804.
XUN M H, LUO H L, LI S P, et al. Numerical simulation and trial production of solidification structure of L605 centrifugal cast pipe[J].
Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6):800-804.

针对铸管凝固组织,研究人员对浇注设备及工艺进行了改进,并采用数值模拟的方法对晶粒组织演化规律进行研究分析。王兴雷^[11]研发的离心铸造型筒下方的加热系统和冷却系统可以在离心铸造管段生产时控制铸造钢水与离心铸造型筒之间的温度梯度,从而确保离心铸造炉管的柱状晶组织的比例以及降低前后端晶粒尺寸的差异性。侯自兵等^[12]利用所建数学模型计算得到连铸坯柱状晶区凝固组织晶粒的真实生长方向,有助于精细化控制凝固组织及减轻铸坯缺陷,改善连铸坯及最终产品的品质。吴士平等^[13]通过 ProCAST 软件模拟研究了钛合金薄壁复杂铸件在立式离心场下不同浇注工艺条件下的凝固组织特征,获得了凝固组织随工艺参数的变化。本研究采用 ProCAST 中的显微组织分析 CAFE 模块,对 L605 离心铸管不同区域铸态组织进行仿真模拟,仿真过程中耦合了温度场,考虑了溶质扩散、过冷度和各向异性等重要因素的影响。一旦液体中的过冷度达到一定程度,随机模型就会确定新的晶粒位置和取向,从而获得凝固过程中枝晶生长后的形态、大小和数量,然后与试制结果相对照,调整铸型温度,得到较为准确的数值模拟参数,为其应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料及制备

试制 L605 离心铸管的化学成分见表 1,凝固组织数值模拟时合金元素含量按照表 1 中实测值进行设置。针对离心铸管各位置降温速度不一致的特点,应用 ProCAST 软件模拟凝固过程,并在离心铸管前端、中间及尾部管壁的中部位置取 3 条温度变化曲线,见图 1。

表 1 L605 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of L605 alloy									%
成分	w _B								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	W	Co
实测值	0.10	0.11	1.05	0.001	0.000 8	20.18	10.14	15.06	余量
标准值	0.05~	0.1~	1.0~	<	<	19.0~	9.0~	14.0~	余量
	0.15	0.4	2.0	0.006	0.006	21.0	11.0	16.0	

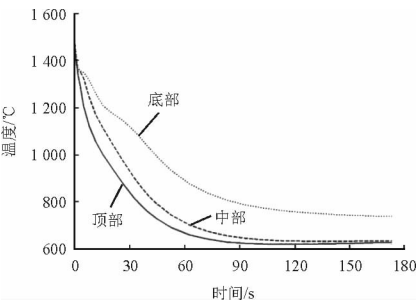


图 1 离心铸造数值模拟的凝固曲线

Fig.1 Solidification curves of numerical simulation of centrifugal casting

底部、中部、顶部分别表示距浇口 0~<200 mm,200~<400 mm,400~500 mm。可以看出,离心铸管顶部与中间位置之间的温度差别较小,底部与顶部之间的温度差别较大。曲线温度变化速度的不同,在单元体中造成相应的温度梯度,形成了不同温度梯度条件下的凝固组织。

1.2 凝固组织数值模拟

以外径为 50 mm,内径为 10 mm,长 500 mm 的 L605 离心铸管为研究对象,首先利用 UG 软件建立模型,生成 stp 文件后导入到 ProCAST 软件中。采用 ProCAST 软件的 CAFE 模块进行组织模拟分析。采用外径为 150 mm,内径为 50 mm,长 520 mm 的 H13 钢铸型,铸型内表面涂覆有高温抗烧蚀、耐磨损涂料。直径为 16 mm。离心铸管与铸型之间的传热系数为 500 W/(m²·K),铸型与外界环境传热系数为 25 W/(m²·K),环境温度为 25 ℃,钢水温度设置为 1 580 ℃,与实际浇注温度保持一致。在模拟中需要设置 KGT 模型中的生长参数 $a_2=3.6\times10^{-7}$ 、 $a_3=9.1\times10^{-7}$ 。离心铸造模型网格划分见图 2。网格为四面体网格,设定网格的大小为 5,网格总数为 535 576 个,钢水自直径为 $\phi 16$ mm 的浇口浇注,进入铸型中的金属液在铸型高速旋转作用下贴内壁运动,并在铸型的快速凝固条件下凝固成铸管。铸管最终成品规格通过钢水品质进行控制,使用的材料为 L605 合金。

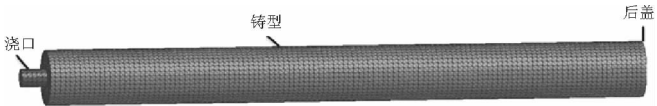


图 2 卧式离心铸管有限元数学模型

Fig.2 Finite element mathematical model of horizontal centrifugal cast pipe

2 试验结果与讨论

2.1 凝固组织模拟结果

在数学模型建立完成后,首先对浇注速度(1~10 kg/s)及转速(2 000~3 000 r/min)进行优化。L605 离心铸管主要用于医用细径薄壁管的制备,对合金纯净度要求极高。因此,为了去除和减少金属液中的夹杂,可以采用提高浇注温度,加大离心力等措施^[14]。尽可能选择较高的离心转速,但是由于 3 000 r/min 时产生的离心力过大,金属液飞溅,流体在铸型末端发生涡流,并不能顺序稳定充型,过高的转速还会导致熔体充填量的降低^[15],夹杂物并不能在离心铸管中均匀分布,因此选取的最佳离心转速为 2 800 r/min。在此基础上,对浇注速度进行优化,结果见图 3。可以看出,当浇注速

度为2 kg/s时,由于入口金属液量较小,离心力的作用导致铸型中金属液发生断流,不能满足离心铸管连续充型的需求。当浇注速度为 5 kg/s 时,金属液可以从前端至后端稳定顺序充型,并获得壁厚均匀的离心铸管。当浇注速度为 8 kg/s 时,充型过程中呈现出了比较明显的螺旋线,金属液容易出现卷渣行为,并影响离心铸管的表面品质。根据离心铸管充型顺序的变化,得出持续稳定的充型流场所对应的最佳离心转速为 2 800 r/min,浇注速度为 5 kg/s。

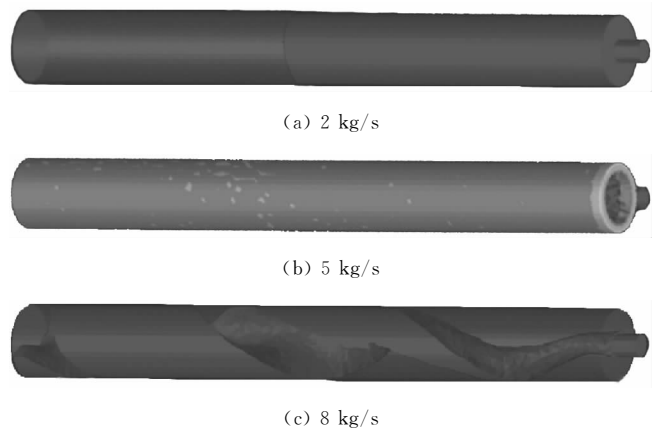


图 3 不同浇注条件下 L605 离心铸管充型过程
Fig.3 Filling process of L605 centrifugal cast pipe under different pouring conditions

离心铸管浇注温度为 1 580 ℃,浇注温度的提高可以使熔体中固溶的 O、N 通过发生过饱和生成 O₂ 和 N₂ 而挥发排出,还可以降低钢水粘度,在离心力作用下有利于夹杂物分离。针对离心铸管尺寸较长,浇注温度较高的特点,铸型温度应适当提高。为了控制长度为 500 mm 的铸型前端至后端的温度分布呈 3~6 ℃/cm 的线性下降趋势以及控制型筒浇注尾端温度在 200 ℃ 以上,铸型前端线圈加热温度需高于 400 ℃,但不宜太高,以免影响管坯凝固过程中柱状晶的形成。然而在模

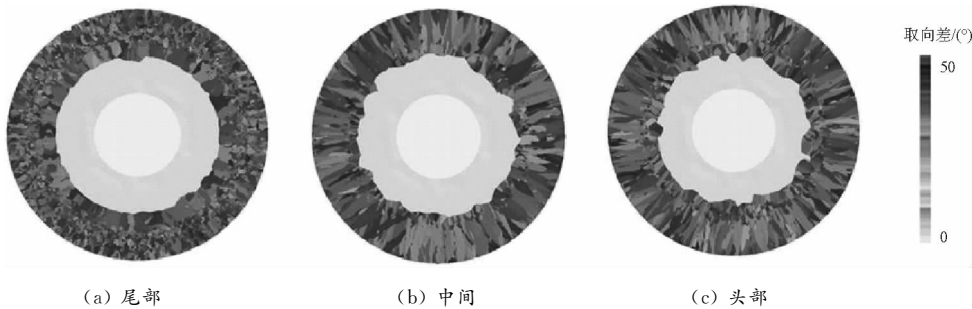


图 5 L605 离心铸管在 500 ℃ 铸型温度条件下 ProCAST 模拟组织形貌
Fig.5 ProCAST simulated microstructure of L605 centrifugal cast pipe at mold temperature of 500 ℃

2.2 试制离心铸管组织

依据前期模拟结果及试制经验确定铸型温度为 500 ℃,试制获得的 L605 合金离心铸管两端及中间晶粒组织见图 6。比较图 5 和图 6 可以发现,在该模拟参

拟过程中 ProCAST 软件并不能在铸型上设置温度梯度,只能设置铸型的整体温度,而头部铸型温度最贴近实际生产过程中的温度梯度,因此设置铸型温度为 500、600 和 700 ℃ 进行模拟,以离心铸管头部组织形貌来确定最佳铸型温度,结果见图 4。可以看出,当铸型温度为 600 ℃ 时,离心铸管头部柱状晶组织有明显粗化趋势,见图 4a,当达到 700 ℃ 时,柱状晶晶粒粗化严重,晶粒尺寸分布不均匀,见图 4b。图 5 为 L605 离心铸管在 500 ℃ 铸型温度条件下 ProCAST 模拟组织形貌,图中不同颜色代表了晶粒不同的晶体学取向。可以看出,数值模拟结果呈现了试验模拟组织中的细晶区、柱状晶区、柱状晶向等轴晶转变区域。由图 5c 可见,而当铸型温度为 500 ℃ 时,可以获得均匀细小的柱状晶组织。因此选择 500 ℃ 作为离心铸管的最佳铸型温度。

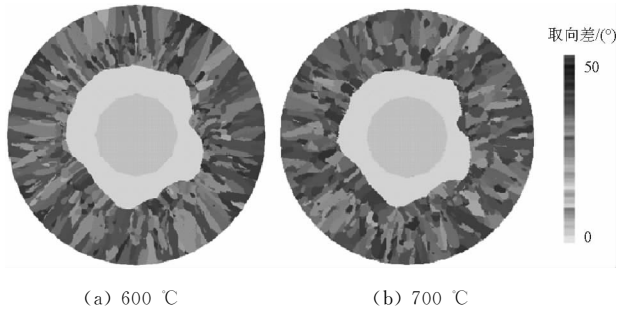


图 4 L605 离心铸管在不同铸型温度条件下 ProCAST 模拟头部组织形貌

Fig.4 ProCAST simulated head microstructure of L605 centrifugal cast pipe at different mold temperatures

由图 5 还可以发现,头部柱状晶组织较细,离心铸管显微组织由外表面至内表面,分别为占比 80% 的柱状晶和 20% 左右的细小等轴晶,柱状晶宽度在 1~2 mm,仍有改善空间,见图 5c,随着距离增加,柱状晶尺寸变大,见图 5b;尾部柱状晶组织比例减少,等轴晶区大量增加,见图 5a。

数下模拟结果与试制结果较一致。由于在金属液充型过程中,金属液首先接触至铸型前端,距离浇口位置 100~200 mm 位置范围内,充型钢水温度快速下降,因此铸型前端钢水自管坯内部至外部的温度梯度较大,散

热性能好,铸型壁面的晶粒生长速度在整个管坯中最大,晶粒间存在较大的竞争生长机制,以极快的速度生长并吞并了其他偏离垂直型壁方向的晶粒。前端金属熔体流动显著从而增加形核率,造成了晶粒尺寸的细化,另外晶粒生长过程中因离心力的作用晶界与圆管坯的径向成一定的角度,见图 6c。随着铸型内金属液充型逐渐完成,铸型温度自前端至后端逐渐增加,越接近铸型后端,管坯径向温度梯度逐渐减小,而管坯温度梯度的减小不利于离心管坯中柱状晶组织的形成,从而导致柱状晶区逐渐减小,等轴晶区逐步扩大,见图 6b。随着温度梯度降低,管坯尾部温度梯度达到整个管坯的最小值,并且由于尾部散热性能较差,柱状晶前沿液体达到形核过冷度时,中心液体同时形核,形成中心等轴晶。从图 6a 还可以看出,离心铸管组织在径向发生明显分层,出现了大量细小的等轴晶组织。这是由于晶粒生长过程中,前沿的液体局部区域过冷度达到一定程度时可在柱状晶前沿出现大量的形核质点。随着凝固进行,柱状晶尺寸明显变短,这是由于形核质点长大,形成等轴晶并阻碍柱状晶的继续长大,从而发生柱状晶向等轴晶的转变,进而引起前后端柱状晶晶粒尺寸的差异增大^[9,16-20]。因此,为了使离心铸管前后端温度梯度均匀一致,将感应加热线圈集中分布于铸型前端,从而进一步控制铸型前端至后端的温度分布呈 3~6 °C/cm 的线性下降趋势,以抵消充型过程中铸型自前端至后端增加的温度梯度,使前后端铸型温度在充型过程中均匀一致,进而尽可能地提高柱状晶组织所占比例,满足其后续直接塑性加工的需求。



(a) 尾部 (b) 中间 (c) 头部

图 6 L605 合金钢真空离心铸造工艺柱状晶形貌

Fig.6 Columnar crystal morphologies of L605 alloy during vacuum centrifugal casting process

3 结 论

(1)当将 L605 离心铸管浇注温度提高至 1 580 °C 时,可以降低有害气体含量和金属液粘度,有利于离心力场下夹杂物分离。根据离心铸管充型顺序的变化规律和模拟结果,可以得到持续稳定的充型流场所对应的最佳离心转速为 2 800 r/min,浇注速度为 5 kg/s。

(2)利用 ProCAST 软件显微组织分析 CAFE 模块对 L605 离心铸管头部组织进行了数值模拟,从而确定

最佳铸型温度,然后对该温度条件下前后端显微组织进行模拟并与试制结果相对照,发现实际离心铸管前后端显微组织结果与数据模拟吻合,验证了模拟结果的有效性。结果表明适合该 L605 离心铸管较优的铸型温度为 500 °C。

(3)在铸型温度优化的基础上,通过在铸型前端设置感应加热线圈实现在线加热以抵消充型过程中铸型自前端至后端随着金属液充型的进行所增加的温度梯度,从而尽可能地提高柱状晶组织比例。

参 考 文 献

- [1] 李崇崇,王硕,万辰杰,等.国产生物可吸收冠状动脉支架的研究现状[J].北京生物医学工程,2021,40(1):95-100.
- [2] 皇甫强.生物支架用金属细径薄壁管材研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
- [3] UEKI K, YANAGIHARA S, UEDA K, et al. Improvement of mechanical properties by microstructural evolution of biomedical Co-Cr-W-Ni alloys with the addition of Mn and Si[J]. Materials Transactions, 2021, 62(2): 229-238.
- [4] LOU J, SUO H B, LIU J R, et al. Tensile properties of rapidly solidified TC18 titanium alloy with columnar crystal structure by electron-beam deposition[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(6): 110-115.
- [5] 梁增辉,申勇,何齐书,等.浅谈离心铸造的应用及其特点[J].中国设备工程,2020,36(21):232-234.
- [6] LI F, WANG D, JIANG Y, et al. Effect of centrifugal casting process on mold filling and grain structure of K418B turbine guide [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(12): 3 065-3 072.
- [7] 祝苏明,张俊善,王来,等.柱状晶方向对离心铸造 HK40 炉管蠕变裂纹扩展行为的影响[J].钢铁,1994,41(7):50-54.
- [8] 祝美丽,李海英,张俊善,等.电磁搅拌对 HK40 钢离心铸管显微组织及蠕变性能的影响[J].机械工程材料,2004,28(8):18-20,48.
- [9] MIRONOV V, KASYANOV V, MARKWALD R R, et al. Bioreactor-free tissue engineering: Directed tissue assembly by centrifugal casting[J]. Expert Opinion on Biological Therapy, 2008, 8(2): 143-152.
- [10] 任陈峰,仲红刚,赵坚,等.基于 ProCAST 软件模拟不同温度梯度条件下 30Cr2Ni4MoV 钢的凝固组织[J].热加工工艺,2015,44(19):97-99.
- [11] 王兴雷.炉管柱状晶组织形成方法及温度控制装置:中国专利, CN105499529A[P]. 2016-04-20.
- [12] 侯自兵,陈哈,奚超超,等.计算品种钢连铸坯柱状晶区凝固组织真实生长方向的方法:中国专利, CN104439127B[P]. 2016-02-03.
- [13] 吴士平,张军,徐琴,等.钛合金铸件立式离心铸造凝固组织的数值模拟研究[J].中国体视学与图像分析,2010,15(2):134-140.
- [14] 隋艳伟.钛合金立式离心铸造缺陷形成与演化规律[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [15] 历长云,王狂飞,许磊,等.离心场下钛合金熔体充填及凝固过程中铸型转速的确定[J].稀有金属材料与工程,2011(S2):417-420.
- [16] SALEH B, JIANG J, MA A, et al. Review on the influence of different reinforcements on the microstructure and wear behavior of functionally graded aluminum matrix composites by centrifugal casting[J]. Metals and Materials International, 2020, 26(7): 933-960.

热等静压工艺参数对 TA15 钛合金组织及性能的影响

孙志雨 莫晓飞 李亚峰 丁贤飞 南海
(北京航空材料研究院,北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心)

摘 要 采用热等静压方法成形 TA15 粉末预合金,系统研究了热等静压工艺参数(温度、时间、压力)对合金显微组织及性能的影响。结果表明,TA15 合金的抗拉强度、屈服强度随炉内压力、保温时间与温度的增加均呈现先升高后降低的变化;而伸长率、断面收缩率随压力升高、时间的延长呈先降低后升高的趋势,随温度的升高先升高后降低。当热等静压工艺为 930 ℃×130 MPa×3 h 时,TA15 合金组织为典型的网篮组织,板条间距与等轴 α 晶粒含量较低,其抗拉强度可达 952.3 MPa,伸长率可达 17.1%,屈服强度为 866.3 MPa,断面收缩率为 47.9%,性能接近锻件水平。

关键词 热等静压;TA15 合金;组织;性能

中图分类号 TG146.23;TG156 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.014 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Hot Isostatic Pressing Parameters on Microstructure and Properties of TA15 Titanium Alloy

Sun Zhiyu, Mo Xiaofei, Li Yafeng, Ding Xianfei, Nan Hai
(Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing Institute of Aeronautical Materials)

Abstract: TA15 pre-alloying powder forming was conducted by hot isostatic pressing. The effects of hot isostatic pressing parameters including temperature, time and pressure on microstructure and properties were systematically investigated. The results indicate that tensile strength and yield strength are increased at first and then decreased with the increase of elevated pressure, holding time and temperature, while elongation and reduction of area also presents a contrary tendency with the increase of elevated pressure and holding time, and a similar tendency with the temperature increasing. At the parameter for 930 ℃×130 MPa×3 h, the microstructure of TA15 alloy is characterized by net basket structure with the smaller slat spacing and content of equiaxed α grain, where the average tensile strength, yield strength, elongation and reduction of area are 952.3 MPa, 866.3 MPa, 17.1% and 47.9%, respectively, reaching the level of forgings.

Key Words: Hot Isostatic Pressing, TA15 Titanium Alloy, Microstructure, Property

TA15 钛合金是我国自主研发的一种可在 540 ℃ 下长时间服役的高铝当量的近 α 型钛合金,其名义成分为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V。该合金具有优良的抗蠕变性、耐腐蚀性以及焊接性能,被广泛用于制造各类飞机、发动机及导弹的结构件^[1-5]。粉末冶金热等静压技术可实现钛合金一体化成形,其细晶及无偏析特点可使制件获得优良的组织性能,避免熔炼浇注、开坯锻造等高能耗

工序,通过近净成形可显著提高钛合金的利用率^[6-8]。

关于 TA15 钛合金热等静压研究主要集中在两方面,一方面作为消除铸造 TA15 合金内部冶金缺陷的手段,研究不同热等静压状态下 ZTA15 合金性能及组织的变化规律^[9];另一方面采用粉末冶金方法制备 TA15 合金,通过热等静压工艺成形 TA15 粉末钛合金,研究其组织演变规律及性能变化。目前,关于热等静压参数

收稿日期:2022-08-16;**修改稿收到日期:**2022-10-25
第一作者简介:孙志雨,女,1990 年出生,工程师,北京(100095),E-mail:sunzy525@126.com
引用格式:孙志雨,莫晓飞,李亚峰,等.热等静压工艺参数对 TA15 钛合金组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(6):804-807.
SUN Z Y, MO X F, LI Y F, et al. Effects of hot isostatic pressing parameters on microstructure and properties of TA15 titanium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6):804-807.

[17] 王志刚.钛合金立式离心精密铸造凝固组织数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

[18] 张伯明.离心铸造[M].北京:机械工业出版社,2004.

[19] 侯耀武.42CrMo 立式离心铸造环坯组织预测及控制[D].太原:太原科技大学,2013.

[20] 贺幼良,杨院生,于力,等.电磁离心铸件宏观组织的数值模拟[J].金属学报,2000,36(8):874-878.

(编辑:刘晨辉)