DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4132

立式离心铸造钛合金薄壁复杂铸件宏观偏析研究

徐　琴[1],王　星[1],姚　佳[1],吴士平[2]
(1. 河南工业大学 机电工程学院,河南 郑州 450001;2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘　要:立式离心铸造过程中,由于离心压力在铸件不同半径处有梯度性,会形成严重的宏观偏析。以立式离心铸造 TC4 钛合金薄壁复杂铸件为研究对象,阐明铸型转速、离心半径及壁厚对铸件宏观偏析的影响规律。结果表明,提高铸型转速会加重钛合金铸件的宏观偏析。当离心半径较小时,钛合金铸件中钒和铝的含量较高;当离心半径较大时,钒和铝的含量较低,形成负偏析。钛元素含量的分布正好与此相反,形成正偏析。离心半径为 71 mm 时,铸件薄壁部位钛、铝、钒含量为 88.1%、8.1%和 4.1%;离心半径增加到 143 mm 时,钛、铝、钒含量为 89.9%、7.7%和 3.6%(质量分数)。在铸件厚壁部位,其冷却速度比薄壁部位大,合金元素的升高或降低趋势更明显,偏析更严重。整体而言,该薄壁复杂钛合金铸件的偏析不严重。

关键词:离心铸造;钛合金;薄壁铸件;宏观偏析
中图分类号:TG249.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)10-0953-06

Study of the Macrosegregation of Thin-walled and Complicated Titanium Alloy Castings Produced via the Vertical Centrifugal Casting Process

XU Qin[1], WANG Xing[1], YAO Jia[1], WU Shiping[2]
(1. School of Mechanic and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Macrosegregation usually occurs during the vertical centrifugal casting process because of the pressure gradient at different positions during casting. TC4 alloy castings with complicated shapes were produced via a vertical centrifugal casting process, and the effects of the mold rotational speed, centrifugal radius and casting wall thickness on the macrosegregation of the castings were investigated. The results show that macrosegregation in castings produced by the vertical centrifugal casting is greatly enhanced by increasing the rotational speed of the mold. The contents of V and Al in the TC4 castings with smaller centrifugal radii are greater, whereas they are lower in those with larger centrifugal radii, further promoting positive segregation. The distribution of Ti is different from that of V and Al, and it results in negative segregation. The contents of Ti, Al and V at a radius of 71 mm are 88.1 wt.%, 8.1 wt.% and 4.1 wt.%, respectively, and those at a radius of 143 mm are 89.9 wt.%, 7.7 wt.% and 3.6 wt.%, respectively. Element macrosegregation is much more obvious in castings with greater wall thicknesses than in those with thin wall thicknesses because of the lower cooling rates. Overall, the segregation of TC4 alloy castings with complicated shapes is not substantial.

Key words: centrifugal casting; titanium alloy; thin-walled casting; macrosegregation

钛合金是航空航天领域的一种重要结构材料,具有优异的常温和高温性能,比强度和比刚度高,抗裂纹扩展能力和抗蠕变性能好,抗腐蚀性能优异[1-3]。某些钛合金的最高工作温度为 550 ℃,预期可达 700 ℃,是火箭等航空航天器的主要制造材料,被誉为“21 世纪金属”[4]、“宇宙金属”[5-6]。由于钛合金的高比强度,可以用来替代空间受限的铝合金及钢构件,如苏 -27 超音速战斗机的起落架臂等。钛合金产量中约 80%用于航空和宇航工业,20 世纪 80 年代中期以后,国外不仅军用飞机大量采用了钛合金

收稿日期:2024-07-11
基金项目:国家自然科学基金(52001114);河南省高校科技创新人才支持计划(23HASTIT022);材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题(P2023-005);河南省高等学校青年骨干教师(2021GGJS064)
作者简介:徐　琴,1983 年生,博士,副教授.研究方向为先进结构材料与性能、特种凝固理论与技术.Email: xuqin@haut.edu.cn
通讯作者:吴士平,博士,教授,博导.研究方向为凝固过程多场多尺度数值模拟、特种液态成型理论与技术.Email: spwu@hit.edu.cn
引用格式:徐琴,王星,姚佳,吴士平.立式离心铸造钛合金薄壁复杂铸件宏观偏析研究[J].铸造技术,2024,45(10): 953-958.
XU Q, WANG X, YAO J, WU S P. Study of the macrosegregation of thin-walled and complicated alloy titanium castings produced via the vertical centrifugal casting process[J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 953-958.

中国知网 https://www.cnki.net

铸件，而且民用飞机也开始采用钛合金铸件作为结构材料[7-8]。如美国 B1-B 轰炸机的机体结构材料约有 21%是钛合金材料，主要用于机身、机翼、蒙皮和承力构件。另外，美国的 F-22 空中歼击机采用了占总质量 7%的钛合金铸件，约 70 多个钛合金精铸件且机翼的 50%是由钛合金铸件构成[9]。目前，钛合金已经取代航空发动机上的铝、镁合金及钢构件，应用在先进发动机的压气机盘、压气机叶片和风扇叶片及机匣等部位，先进发动机压气机已经实现全钛化方案[10]。

立式离心精密铸造技术通过高速旋转获得离心力来增大合金熔体在铸型型腔内的加速度，进而提高合金的充型能力，同时利用熔模铸造成形尺寸精度高的特点，可以实现大尺寸、复杂、薄壁铸件的近净成形，是实现大型钛合金薄壁复杂铸件近净成形的有效手段[2,11]。铸件在立式离心铸造过程中，熔体质点受到离心力的作用，在不同半径处具有梯度性[12-13]，使铸件形成宏观偏析[14-15]。宏观偏析是铸件中大范围化学成分的不均匀性，其存在使得铸件的显微组织不一致，从而影响了铸件力学性能的一致性，对成品的性能产生极大危害。

研究表明，离心铸造的工艺参数[16-18](如合金熔体的浇铸温度、铸型温度、铸型转速等)、铸件的冷却速率[19-20]等均对铸件的宏观偏析形成具有重要作用。Halvaee 等[21]的研究表明，立式离心 C92200 合金浇注温度的升高会导致偏析加重，高的铸型旋转速度也会加重偏析程度，但是铸型冷却速度的提高可以消除铸件偏析。符寒光等[22] 指出离心铸造过程中，高速钢熔体形成具有不同密度的原子团簇，造成元素偏析，且铸型转速越大偏析越严重。Balout 等[23]指出，增加立式离心铸造 ZA8 锌铝合金的冷却速率可降低铸件的偏析程度。陈刚等[24]对离心铸造 ZL27 合金的研究表明，浇注时间越长，铸型温度越低，ZL27 合金的宏观偏析程度越低。杨玉厚等[25]的研究表明，重力系数越大、合金元素含量越高和冷却速率越慢时，合金元素宏观偏析越严重。此外，学者们认为合金元素的偏析受到元素之间密度差的影响，通过分析合金元素的物理化学性能可以获得元素的偏析规律[24, 26-27]。

目前，对离心铸件偏析的研究仅限于厚大铸件的研究，对于具有复杂结构的薄壁铸件的研究还很少，特别是关于钛合金铸件离心铸造偏析的研究也鲜有报道。本文以立式离心铸造钛合金薄壁复杂铸件为研究对象，研究其在立式离心场下的宏观偏析，并对形成机理进行了探讨。

1 实验材料与方法

实验用原料是马氏体型 α/β 两相 Ti-6Al-4V(TC4)钛合金，其化学成分的实测结果为6.5% Al、4.08% V、0.19% Fe、0.120% O、0.006 4% H、0.007 1% N(质量分数)。铸型型壳主体材料为 ZrO_2 陶瓷耐火材料，采用二氧化锆胶体为黏结剂。为了提高熔模铸型的稳定性，在铸型材料中加入质量分数约为 5%~10%的 Y_2O_3 粉末。采用 ZrO_2 陶瓷耐火材料作为造型材料的主要目的是降低熔融钛合金熔体与陶瓷铸型之间的物理和化学反应，提高铸件的尺寸精度和表面粗糙度。如图 1 所示为包括浇注系统的钛合金薄壁复杂铸件示意图，该铸件是一个轴对称铸件，其最大轮廓尺寸为 ϕ159 mm×110 mm，内径为 64 mm，最大壁厚为 16 mm，最小壁厚为 3 mm。铸件由如下几部分组成：2 个大圆环(壁厚为 16 mm)、2 个小圆环(壁厚为 16 mm)、1 个外环形薄壁圆环体(壁厚为 3 mm)、1 个内环形薄壁圆环体(壁厚为 3 mm)和 8 个薄壁长方体筋板(壁厚为 3 mm)、8 个厚壁长方体加强筋(壁厚为 12 mm)。

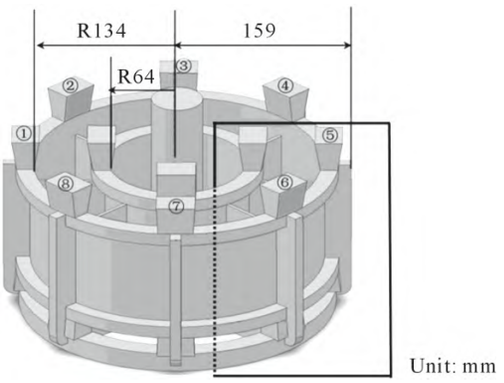

图 1 钛合金薄壁复杂铸件及浇注系统示意图
Fig.1 Schematic of the thin-walled titanium casting

TC4 钛合金薄壁复杂整体铸件浇注实验利用从德国引进的水冷铜坩埚真空感应熔炼/离心浇注设备来完成，其熔炼浇铸过程如下：首先检查和清理坩埚，用砂纸把坩埚的法兰盘、内壁和底部都打磨光滑，并用棉纱擦干净；将预先配置好的原料称好并装入电磁水冷铜坩埚中，关闭炉门。用机械泵将炉体内抽真空至压力小于 0.1 Pa。为顺利起弧，必须把空载电压提高到 70 V，在空载电压下，电极与起弧料接触造成瞬间短路，缓慢拉开起弧。引弧结束后，逐步增加熔炼电流，降低熔炼电压，增大加热功率，转入正常熔炼阶段。待炉料完全熔化后对熔体保温 3~5 min。同时，打开旋转装置，使铸型在钛合金熔体浇注前就进入平稳的旋转状态。然后旋转坩埚，将钛合金熔体通过导流槽浇注到平稳旋转的铸型中。陶瓷型钛合

中国知网 https://www.cnki.net

金薄壁复杂铸件的浇注工艺参数为：铸型转速为300 r/min，钛合金熔体浇注温度为1 750 ℃，陶瓷铸型的预热温度为室温(20 ℃)。

对浇铸得到的立式离心铸造钛合金复杂铸件按照图1和图2所示的试样分布示意图，利用线切割机床进行线切割加工，并对试样进行编号，其中编号为10、12、13、15试样的壁厚为16 mm，编号为11、4、5、6、14试样的壁厚为3 mm。将切割的不同试样采用180#~2000#金相砂纸进行粗磨、细磨。并利用分析纯进行超声波清洗，用德国Bruker公司的S4-explorer型X射线荧光光谱仪(X-Ray fluorescence spectrometer)对每个试样的化学成分进行测试。本文借助ProCAST数值模拟软件对该TC4钛合金薄壁复杂铸件的充型凝固过程进行模拟，以获得实验条件下铸件不同部位的温度分布情况，基于RGL准则得到铸件不同部位的冷却速度，研究其对铸件宏观偏析的影响规律。

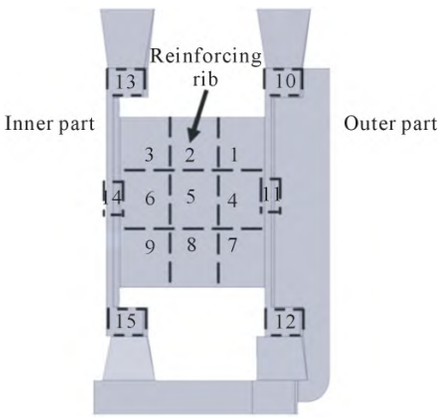

图2　铸件取样示意图

Fig.2　Schematic diagram of the sampling process for casting

2　实验结果及讨论

2.1　钛合金复杂铸件的元素分布

图3所示为立式离心铸造钛合金复杂铸件壁厚分别为16和3 mm时不同部位的合金元素含量及其与旋转轴之间距离的分布规律。图中的正方形标记为壁厚3 mm部位的合金元素含量，而圆形标记为壁厚16 mm部位的合金元素含量，图中直线为铸件薄壁部位各点元素含量的拟合直线。可以看出，在钛合金复杂铸件的薄壁部位，随着与铸件旋转中心距离的增加，不同部位的钛元素含量增加，形成正偏析(图3a)。当离心半径为71 mm时，钛元素含量(质量分数，下同)为88.1%；当离心半径为143 mm时，钛元素含量增加到89.9%。不同部位铝元素的含量则随着与旋转中心距离的增加有所降低，但是变化幅度很小，形成轻微负偏析(图3b)。当离心半径为71 mm时，铝元素的含量为8.1%，而当离心半径为143 mm时，铝元素的含量下降到7.7%。不同部位钒元素含量也随着与旋转中心距离的增加而降低，形成负偏析(图3c)。当离心半径为71 mm时，钒元素的含量为4.1%，而当离心半径为143 mm时，钒元素的含量下降到3.6 %。

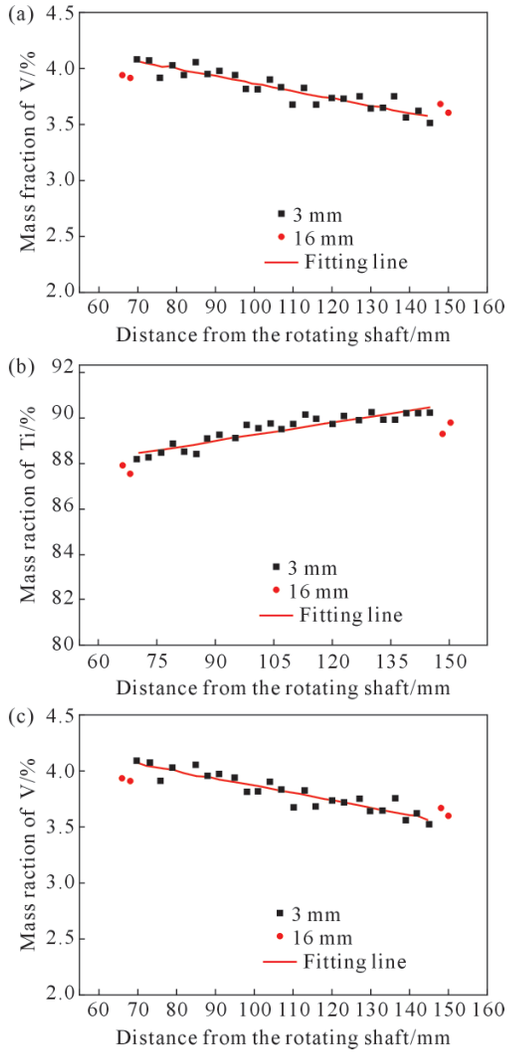

图3　钛合金薄壁铸件中合金元素的分布规律：(a) Ti; (b) Al; (c) V

Fig.3　Distribution of elements in thin-walled titanium casting: (a) Ti; (b) Al; (c) V

铸件厚壁部位合金元素的分布与薄壁部位有着相同的趋势，即当测试点所在位置与旋转中心距离较小时，钒元素和铝元素的含量较高；当与旋转中心距离较大时，钒元素和铝元素的含量较低。钛元素含量的分布正好与此相反。壁厚为16 mm的部位在该薄壁复杂TC4钛合金铸件中不连续，分别位于离心半径的最大端和最小端。当位于小半径端时，钛元素含量为87.6%，铝元素含量为8.1%，钒元素含量为3.9%。当位于大半径端时，钛元素含量为89.1%，铝元素含量为7.6%，钒元素含量为3.7%。此外，将位于两端的圆形标记分别相连，可以看出，圆形标记部

中国知网　https://www.cnki.net

位的斜率大于正方形标记部位的斜率。因此，在铸件厚壁部位，合金元素的升高或降低趋势更明显。总体而言，该钛合金薄壁复杂铸件的偏析不大。

2.2 钛合金复杂铸件宏观偏析影响因素

2.2.1 铸型转速

铸型转速直接影响到促进质点运动的动力大小。魏伯康等[28]对离心场中第二相质点的运动特点进行了分析。假设质点为圆球形模型，直径为 D，建立了离心铸造过程中熔体质点运动速度的微分方程：

$$m\frac{\mathrm{d}^2\nu}{\mathrm{d}t}+3D\pi\eta(t)\frac{\mathrm{d}\nu}{\mathrm{d}t}[3\pi D\eta(t)-Mw^2]=0 \qquad (1)$$

式中，m 为熔体中质点的质量；ν 为运动速度；$\eta(t)$ 为 t 时刻熔体的黏度；M 为质点的有效质量，可由下式计算得到：

$$M=|\rho-\rho_m|rw^2 \qquad (2)$$

式中，ρ 为质点的密度；ρ_m 为合金熔体的密度。图 4 所示的 ν–t 曲线是 $\rho>\rho_m$ 和 $\rho<\rho_m$ 时方程的解。

当 $\rho>\rho_m$ 时，质点远离铸型旋转中心向外运动。由于质点移动使得质点运动动力 F_m 随着时间的延长而增加，而质点运动阻力 F_r 则随时间增加呈指数增大的趋势。图 4a 中的完整曲线理论上对应的是质点运动距离 S 小于起始位置与外表面之间的距离 S'。若 $S>S'$，则外表面附近的质点将在 $0\sim t_s$ 时间内的某一刻 t'_s 到达外表面而停止运动。然而实际铸件中，总有部分质点满足 $S<S'$，质点移动的最终结果使得外表面附近密度增加，内表面附近密度减小。

当 $\rho>\rho_m$ 时，质点向铸型旋转中心运动。此时，由于质点的移动使得质点运动动力 F_m 随时间延长而减小，F_r 与 $\rho>\rho_m$ 时的规律相同。图 4b 中的完整曲线对应的是质点运动的距离 S 小于起始位置与内表面之间的距离 S''。若 $S>S''$，则质点将在 $0\sim t_s$ 时间内的某一刻 t''_s 到达铸件内表面。若质点到达内表面时的冲击力能够克服界面液相吸附力，则逸出于内表面，否则在内表面聚集。然而实际铸件中，总有部分质点不能满足 $S>S'$。因此，质点移动的最终结果使得外表面附近密度增加，内表面附近密度减小。

对于 Ti-6Al-4V 钛合金而言，铸型转速越高，则合金熔体中质点移动时的驱动力越大，在相同的移动时间内，在图 4 所示的 ν–t 曲线中越向上伸展，则质点的移动距离越大，铸件越容易形成偏析。反之，铸型转速越小，质点移动时的驱动力越小，则铸件越不容易形成偏析。因此，提高铸型转速会加重钛合金铸件的宏观偏析；降低铸型转速，钛合金铸件的宏观偏析程度减小。

2.2.2 初生相中合金元素含量

对立式离心铸造铝铜合金宏观偏析的研究表明[29]，立式离心铸件中合金元素的密度与铸件的偏析程度没有直接关系，使铸件产生宏观偏析的主要因素是合金熔体初生相中合金元素含量与合金熔体中合金元素含量之间的差异。当初生相中合金元素的含量大于初始液相中合金元素的含量时，铸件形成正偏析。而当初生相中合金元素的含量小于初始液相中合金元素的含量时，铸件形成负偏析。

在 Ti-6Al-4V 钛合金中，其初生相为 β(Ti)相，属于富钛相，即 β(Ti)相中钛元素含量高于 TC4 熔体中钛元素含量，且由于初生 β(Ti)相的密度大于 TC4 熔体的密度。因此，在离心力作用下初生的β(Ti)相向着铸件的远半径端迁移，使得钛合金铸件中钛元素的分布随着与旋转中心距离的增加而增加，形

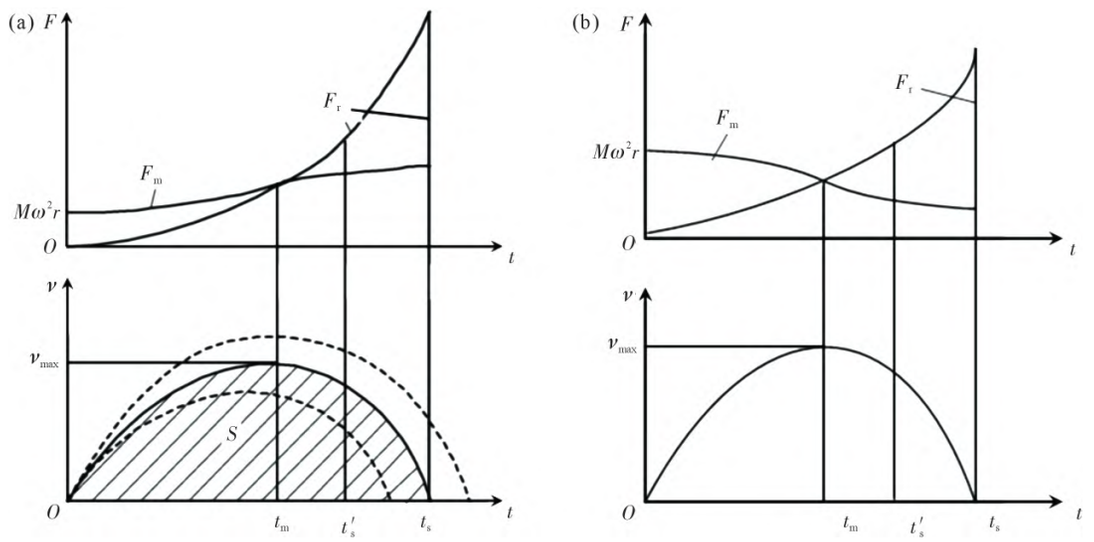

图 4 熔体中质点的运动状态：(a) $\rho>\rho_m$; (b) $\rho<\rho_m$

Fig.4 Moving state of a particle in a melt: (a) $\rho>\rho_m$; (b) $\rho<\rho_m$

中国知网 https://www.cnki.net

成正偏析。对于铝元素和钒元素，其初生 β(Ti)相中的含量低于 TC4 熔体中的含量，所以凝固后铸件中形成了铝元素和钒元素的负偏析。然而由于钛合金的结晶温度范围较窄，而且钛合金铸件的壁厚通常情况都较薄，所以钛合金铸件的偏析并不明显。本文所研究的 TC4 薄壁复杂钛合金铸件成形时的铸型转速较低，为 300 r/min，ν–t 曲线向下缩小，即质点的移动距离小，不利于形成宏观偏析，各合金元素的偏析程度总体来说并不严重。

2.2.3　铸件不同部位的冷却速度

铸件的冷却速度越大，熔体粘度随温度的降低增加越快，质点的运动距离越小。在实际铸件中，即使熔体质点的运动满足，然而由于冷却速度足够大，也会使熔体质点来不及运动就凝固，铸件不易形成明显的宏观偏析。

利用 ProCAST 数值模拟软件对该钛合金薄壁复杂铸件进行模拟，得到不同部位的温度曲线和冷却速度分布规律，如图 5a 和 b 所示。从图中可以看出，铸件薄壁部位冷却速度大，随着时间的推移其温度变化剧烈。在凝固开始时刻，钛合金熔体温度和铸件冷却速度都下降得很快。随着凝固过程的进行，相同时间内铸件不同部位的温度变化也越来越慢。这是由于凝固开始时，铸型与钛合金熔体温度间的较大差异造成的。在铸件充型期和合金熔体凝固初期，铸型温度比合金熔体温度低得多，因此在冷却初期，钛合金中的热量急剧散失而形成较大的冷却速度。随着凝固过程的进行，铸件与铸型之间的温度差异越来越小；随着凝固初期晶核的形成，铸件内部传热降低，因此合金熔体温度随时间变化越来越小，铸件的过冷度也随之变小。

Nadella 等[30]在直接激冷铸造研究中指出，当铸件成形速度足够大时，溶质元素的宏观偏析非常小，甚至可以忽略不计。这是因为在激冷铸造时，铸造速度越高，铸件的冷却速度越大。由于铸件的宏观偏析与其冷却速度关系密切，而当铸造冷却速度高时，其宏观偏析很微小。从图 5b 所示的冷却速度分布曲线可以看出，该立式离心铸造钛合金薄壁复杂铸件的薄壁部位冷却速度大，因此宏观偏析并不明显。相对而言，铸件的厚壁部位冷却速度较小，形成宏观偏析的趋势大。

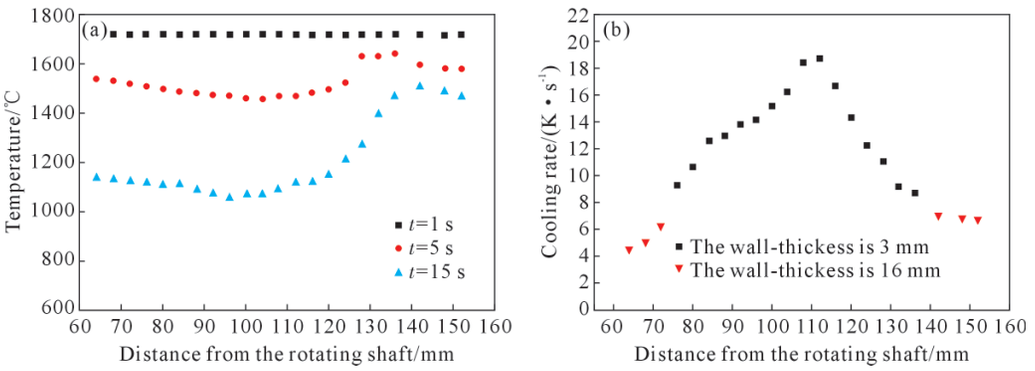

图 5　钛合金薄壁复杂铸件不同部位温度场及冷却速率：(a) 温度；(b) 冷却速率

Fig.5　Distribution of the temperature and cooling rate of the thin-walled titanium casting at different positions: (a) temperature; (b) cooling rate

3　结论

(1)TC4 钛合金薄壁复杂铸件中钒和铝元素含量随离心半径增加而降低，形成负偏析；钛元素含量随离心半径增加而增加，形成正偏析。

(2)提高铸型转速会加重钛合金铸件的宏观偏析；降低铸型转速，钛合金铸件的宏观偏析程度减小。相同铸型转速下，铸件壁厚越大其冷却速度小，则偏析趋势变大。

(3)TC4 钛合金熔体的初生相为富钛 β(Ti)相，但熔体中元素之间的密度差小，铸件的冷却速度大，因此，该立式离心铸造钛合金复杂铸件的偏析不大。

参考文献：

[1]　ALIREZA B D, SHAHROOZ N, HEIKE E, REZA G. Microstructural development of Ti-6Al-4V alloy via powder metallurgy and laser powder bed fusion[J]. Metals, 2022, 12(9): 1462-1462.

[2]　朱小平. 大重量高精度复杂钛合金机匣整体铸造技术研究[D]. 北京：北京科技大学，2023.
ZHU X P. Research on integral casting technology of large weight and high precision complex titanium alloy casting[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.

[3]　DYER K, MOLAEI R. Effect of thickness on fatigue behavior of L-PBF fabricated Ti-6Al-4V alloy using a novel specimen geometry[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 184: 108300.

[4]　白木，周洁. 金属钛的性能、发展与应用[J]. 矿业快报，2003(5): 1-7.
BAI M, ZHOU J. Performance, development and application of the metal titanium[J]. Modern Mining, 2003(5): 1-7.

中国知网　https://www.cnki.net

[5] 张绪虎,单群,陈永来,杜志惠. 钛合金在航天飞行器上的应用和发展[J]. 中国材料进展,2011(6): 28-32.
ZHANG X H, SHAN Q, CHEN Y L, DU Z H. Application and development of titanium alloys for aircrafts[J]. Materials China, 2011(6): 28-32.

[6] RET P L, BREVICK J R, PARK Y K. Development and evaluation of a novel inclusion seeding methodology for Ti-6Al-4V castings [J]. Metals and Mateials International, 2007, 13(4): 285-292.

[7] 时俊克,廖敦明,陈宇豪,陈涛,顾建华. 钛合金立式离心熔模铸造凝固缺陷数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2022, 42(11): 1360-1365.
SHI J K, LIAO D M, CHEN Y H, CHEN T, GU J H. Numerical simulation of solidification defects in titanium alloy by vertical centrifugal investment casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(11): 1360-1365.

[8] SUE V G, LUKAS K, JAKOB B, ILSE L P, STEFAN M, GER HARD L. Microstructure of a modulated Ti-6Al-4V-Cu alloy fabricated via in situ alloying in laser powder bed fusion[J]. Materialia, 2023, 28: 101731.

[9] WILLIAMS J C, STARKE E A. Progress in structural materials for aerospace systems[J]. Acta Materialia, 2003, 51(19): 5775-5799.

[10] 陶春虎,刘庆璪,曹春晓,张卫芳. 航空用钛合金的失效及其预防[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
TAO C H, LIU Q Q, CAO C X, ZHANG W F. Failure and prevention of aeronautical titanium alloy[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.

[11] 周彦邦. 钛合金铸造概论[M]. 北京:机械工业出版社,2000.

[12] XU Q, WANG X, WU S P. Numerical simulation of bubble migration in liquid titanium alloy melt during vertical centrifugal casting process[J]. Journal of Harbin Institute of Technology(New series): 1-9.

[13] 徐自立,魏伯康,蔡启舟,林汉同. 离心铸造梯度功能材料凝固过程中第二相的迁移行为[J]. 热加工工艺,1995(3): 13-15.
XU Z L, WEI B K, CAI Q Z, LIN H T. Migratory behavior of the second phase in solidification of functionally gradient materials by centrifugal casting[J]. Hot Working Technology, 1995(3): 13-15.

[14] HALVAEE A, TALEBI A. Effect of process variables on microstructure and segregation in centrifugal casting of C92200 alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118(1-3): 123-127.

[15] ZHU X F, YU B, ZHENG L, YU B N, LI Q, LYU S N, ZHANG H. Influence of pouring methods on filling process, microstructure and mechanical properties of AZ91 Mg alloy pipe by horizontal centrifugal casting[J]. China Foundry, 2018, 15(3): 196-202.

[16] 王素平. 离心铸造高速钢复合轧辊生产工艺探讨[J]. 轧钢,2008, 25(2): 65-67.
WANG S P. Discussion on manufacture technology of centrifugal casting high speed steel roll[J]. Steel Rolling, 2008, 25(2): 65-67.

[17] WANG K, ZHANG Z M, YU T, HE N J, ZHU Z Z. The transfer behavior in centrifugal casting of SiCp/Al composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 242: 60-67.

[18] CHEN G, TONG M D, ZHI Z G. Study on the macrosegregation of aluminium in centrifugal-cast ZA27 alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 265(1-2): 306-309.

[19] WATANABE Y, HATTORI Y, SATO H. Distribution of microstructure and cooling rate in Al-Al_2Cu functionally graded materials fabricated by a centrifugal method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 221: 197-204.

[20] BALOUT B, MASOUNAVE J, SONGMENE V. Modeling of eutectic macrosegregation in centrifugal casting of thin walled ZA8 zinc alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(18-19): 5955-5963.

[21] HALVAEE A, TALEBI A. Effect of process variables on microstructure and segregation in centrifugal casting of C92200 alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118(1-3): 123-127.

[22] FU H G, XIAO Q, XING H D. A study of segregation mechanism in centrifugal cast high speed steel rolls[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 479(1-2): 253-260.

[23] BALOUT B, MASOUNAVE J, SONGMENE V. Modeling of eutectic macrosegregation in centrifugal casting of thin walled ZA8 zinc alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(18-19): 5955-5963.

[24] CHEN G, TONG M D, ZHU Z G. Study on the macrosegregation of aluminium in centrifugal-cast ZA27 alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 265(1-2): 306-309.

[25] 杨玉厚. 超重力对金属凝固组织细化及元素偏析行为的基础研究[D]. 北京:北京科技大学, 2017.
YANG Y H. Fundamental study on solidification structure refinement and elments segregation ofmetals by super gravity[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.

[26] YANG L, CHAI L H, LIANG Y F, ZHANG Y W, BAO C L, LIU S B, LIN J P. Numerical simulation and experimental verification of gravity and centrifugal investment casting low pressure turbine blades for high Nb-TiAl alloy[J]. Intermetallics, 2015, 66: 149-155.

[27] YE X, ZHANG P, ZHAO J, MA P. Effect of macro-and micro-segregation on hot cracking of Inconel 718 superalloy argon-arc multilayer cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 258: 251-258.

[28] 徐自立,魏伯康,蔡启舟,林汉同. 离心铸造梯度功能材料凝固过程中第二相的迁移行为[J]. 热加工工艺,1995(3): 13-15.
XU Z L, WEI B K, CAI Q Z, LIN H T. Migratory behaviour of the second phases in solidification of functionally gradient materials by centrifugal casting[J]. Hot Working Technology, 1995(3):13-15.

[29] 徐琴. 钛合金复杂铸件立式离心铸造过程充填流动及凝固规律[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学. 2013.
XU Q. Mould filling and solidificaiton of complicated titanium alloy casting during vertical centrifugal casting process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[30] NADELLA R, ESKIN D G, KATGERMAN L. Effect of grain refinement on structure evolution, "Floating" grains, and centerline macrosegregation in direct-chill cast AA2024 alloy billets[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39: 450-462.

中国知网 https://www.cnki.net