

超大型高钼铸铁缸套离心铸造过程数值模拟

陈瑞润¹ 王新秀² 王琪² 王墅² 李易励² 夏园³ 周国平³

(1.山东科技大学材料科学与工程学院; 2.哈尔滨工业大学材料科学与工程学院; 3.扬州五亭桥缸套有限公司)

摘要 采用 ProCAST 软件,对超大型高钼铸铁缸套离心铸造过程进行了分段建模,耦合计算了铸件的温度场、流场和压力场。结果表明,金属液以层流形式充填铸型,用时 90.3 s。铸件由外到内逐层凝固,最后凝固位置在铸件厚壁端的中间位置。压力场呈同心圆分布,其大小与铸型内孔直径、铸件壁厚及离心转速相关。温度场、流场和压力场变化主要是由离心力、金属液重力、缸套模具强烈冷却耦合作用引起的。

关键词 超大型高钼铸铁缸套;离心铸造;数值模拟

中图分类号 TG139;TG249.4

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.05.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Centrifugal Casting Process of Super High Molybdenum Cast Iron Cylinder Liner

Chen Ruirun¹, Wang Xinxiu², Wang Qi², Wang Shu², Li Yili², Xia Yuan³, Zhou Guoping³

(1.School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology;

2.School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology;

3.Yangzhou Wutingqiao Cylinder Liner Co., Ltd.)

Abstract: The centrifugal casting process of super cylinder liner was modeled in segments using ProCAST software, and the temperature field, flow field and pressure field of the casting were coupling calculated. The results indicate that the metal liquid fills the mold in the form of laminar flow, and the filling time is 90.3 s. The castings are solidified from the outside to the inside layer by layer, and the final solidification is located in the middle of the thick wall end of the casting. The pressure field is concentric distribution, and the size is related to the diameter of the inner hole of the mold, the wall thickness of the casting and the centrifugal speed. The changes of fields above are mainly induced by the centrifugal force, the gravity of the metal liquid, and the strong cooling coupling of the cylinder liner mold.

Key Words: Super High Molybdenum Cast Iron Cylinder Liner, Centrifugal Casting, Numerical Simulation

发动机是汽车、船舶的动力来源,而缸套则是发动机的核心部件之一^[1]。缸套镶在缸体的缸筒内,内孔有活塞做往复运动,缸盖在其上部压紧,三者共同组成发动机的密闭燃烧室,为发动机提供动力^[2]。超大型缸套用于大马力柴油机,缸径在 $\phi 270$ mm 以上,最大壁厚为 150 mm 的复杂结构气缸套,主要应用于船舰等中速转动的活塞。

对于超大型缸套来说,目前实际生产中应用最多的是铸铁材料,其具有良好的综合力学性能,较好的强度、刚度和耐磨性,在高温时也可以保持较好的力学性能。提高铸铁力学性能的方法主要有:①加入可以促进生成

硬质相的元素以提高铸件耐磨性,或者加入可以提高铸件润滑性的纳米相,如硫化铅^[3];张勇等^[4]在铸铁中加入了 B 和 P 元素,促进耐磨性较好的碳化物的生成;②加入可以细化晶粒和石墨的元素,如 Mo 元素。Mo 可以改变铁素体的析出和生长环境使其强化,提高铸铁的高温力学性能,显著提高铸铁的耐磨性、抗蠕变能力和抗氧化能力,这种铸铁也叫减摩铸铁^[5];③通过离子共渗对铸件的内表面进行化学热处理^[6],处理后的铸件内表面耐磨性大幅提高。

此外,还可以对缸套的离心铸造过程进行优化^[7~9],借助计算机模拟软件可以更快、更经济地了解

收稿日期:2021-11-15

基金项目:国家自然科学基金杰出青年科学基金资助项目(51825401)

第一作者简介:陈瑞润,男,1975 年出生,教授,山东青岛(266590),E-mail:chenruirun@163.com

引用格式:陈瑞润,王新秀,王琪,等.超大型高钼铸铁缸套离心铸造过程数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2022,42(5):529-535.

CHEN R R, WANG X X, WANG Q, et al. Numerical simulation of centrifugal casting process of super high molybdenum cast iron cylinder liner[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5):529-535.

到金属液的充型和凝固情况^[10],预测缺陷可能产生的位置^[11~15]。研究人员利用 ProCAST 软件模拟了使用各种铸造方法的充型和凝固过程^[16~19]。肖良红等^[20]模拟了 ZL107 铝合金的铸造过程,结果发现铸件成形后会产生缩孔、缩松等缺陷,并通过正交试验对工艺方案进行优化。BAZHENOV V E 等^[21]以陶瓷为模具模拟了基于钛铝化合物的合金熔模铸造过程。刘铁军^[22]对钛合金熔体立式离心铸造复杂薄壁件进行了温度场、流场和压力场的计算。隋艳伟^[23]对离心铸造钛合金铸件过程中的缩孔、缩松的形成及演化机理进行了研究,所得结果为超大型缸套离心铸造数值模拟提供借鉴。

本课题利用 ProCAST 软件设计了超大型高钼铸铁缸套的卧式离心铸造工艺,对铸件的三维模型进行有限元网格的划分,设置了铸造过程中的初始条件和边界条件,同时设置了旋转参数以及合理的浇注时间、浇注位置,并对缸套卧式离心铸造过程温度场、流场、压力场进行了耦合计算,旨在为其生产应用提供参考。

1 网格划分及模拟条件设置

选用 MAN28-33D 型湿式气缸套作为研究对象,缸套毛坯长度为 686 mm,内孔直径为 $\phi 265$ mm,外圆直径为 $\phi 352\sim 390$ mm。图 1 为利用 CAXA 软件绘制的缸套离心铸件的毛坯图。选取铸型与铸件的壁厚比约为 2.0,铸型的壁厚最小处为 50 mm,最大处为 149 mm。利用 UG 软件绘制铸件及铸型的三维模型,见图 2。将三维模型导入到 ProCAST 软件中,并选择有限元方法对铸件和铸型进行二维及三维网格划分,网格尺

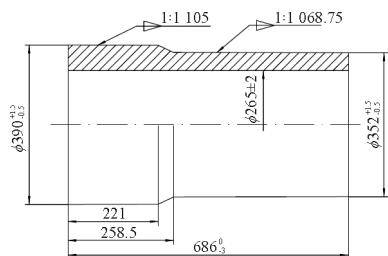


图 1 缸套铸件毛坯图

Fig.1 Blank diagram of cylinder liner casting

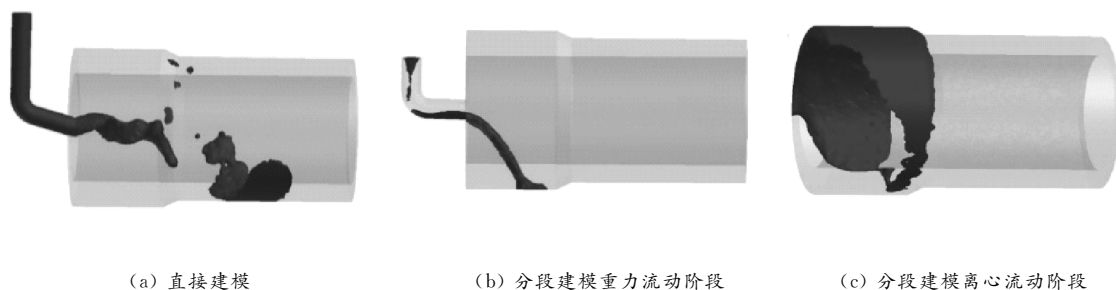
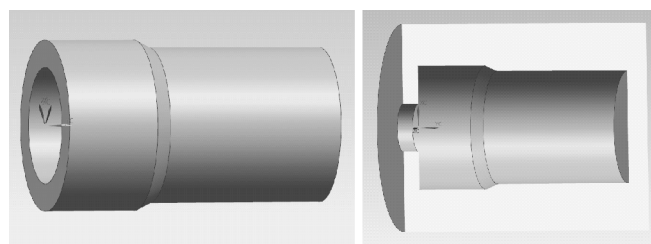


图 3 金属液流动情况模拟结果

Fig.3 Simulation results of the metal liquid flow situation



(a) 铸件 (b) 铸型半剖图

图 2 缸套铸件和铸型三维图

Fig.2 Three-dimensional diagrams of cylinder liner casting and mold

寸均为 10 mm,共约 128 万个网格。

缸套材质为高钼铸铁,其成分见表 1。将材料成分导入到 ProCAST 材料数据库中,计算得到其热物性参数,合金的固相线温度为 1 057 °C,液相线温度为 1 277 °C。

表 1 高钼铸铁的化学成分

Tab.1 Chemical composition of high molybdenum cast iron %									
ω_B									
C	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	Fe
2.75	0.42	0.36	0.75	0.74	0.43	0.27	0.055	1.8	余量

铸型材质为 H13 钢,预热温度为 200 °C,浇注温度为 1 430 °C,浇注时间为 90 s,转速为 700 r/min,传热系数为 1 000 W/(m² · K),边界条件设置为自由滑动边界条件。

2 缸套离心铸造过程数值模拟

2.1 缸套卧式离心铸造模型

缸套卧式离心铸造过程可以分为在浇道内的重力流动阶段和在旋转铸型内的离心流动阶段。

不同方式建模时金属液流动情况模拟结果见图 3。由于 ProCAST 软件中的离心铸造模块是基于立式离心铸造开发的,无法自动识别金属液的重力流动阶段,而是将这一阶段的流动识为离心流动阶段,启用离心铸造模块后金属液还在浇道内时就已经开始受到离心力的作用。如果将上述模型直接建模,在重力流动阶段模拟的结果与实际情况相比会严重失真,见图 3a。因此

利用 ProCAST 软件对金属液的重力流动阶段、离心流动阶段分别进行建模和模拟,见图 3b 和图 3c。从图 3b 中可以看出,金属液在浇道内外的流动均为重力流动,金属液在重力和管道的约束作用下,从浇道口水平流出,然后做自由落体运动,运动轨迹呈抛物线形,金属液获得轴向和沿重力方向的速度,与实际情况相符。将该速度换算成同等大小的、方向沿重力方向的速度作为离心运动阶段金属液速度的初始值。将金属液与铸型接触的位置和截面积作为离心运动阶段设置入口的初始条件。从图 3c 可以看出,金属液随着铸型做旋转运动,与实际情况一致,说明通过分段建模,可以准确地模拟出卧式离心铸造过程,较好地反映金属液的实际流动情况,并为深入分析卧式离心铸造过程中的流场、温度场、压力场奠定基础。

2.2 流场模拟与分析

图 4 为金属液的速度场模拟。从图 4a 中可以看出,在入流口位置,金属液是向两侧铺展的。当充型时间为 30 s 时,可以追踪到液流的走向,显示金属液是贴着型腔内壁旋转,与铸型旋转方向一致,见图 4b,矢量箭头为金属液的流动方向。

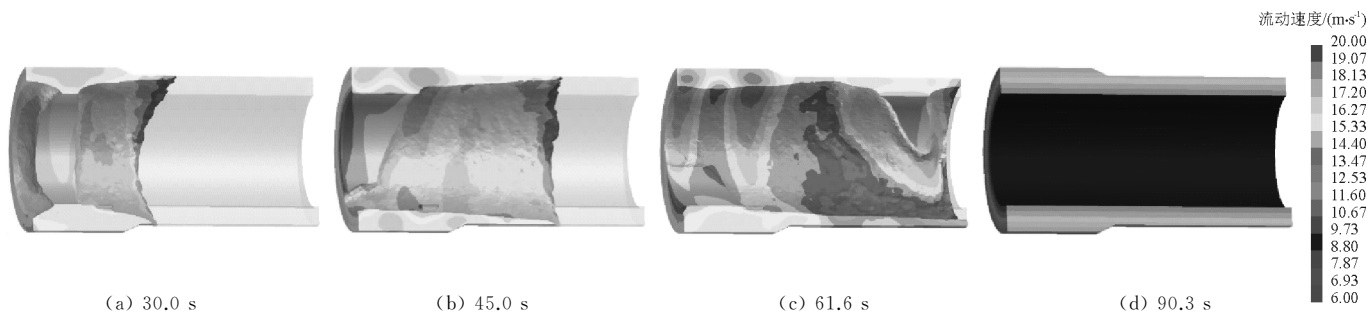


图 4 金属液速度场

Fig.4 Velocity field of metal liquid

图 5 为金属液在铸型中不同时刻的流场。可以看出,在 30.0、45.0、61.6、90.3 s 时金属液的充型率分别为 33.3%、50.0%、68.1%、100%。金属液在离心力的作用下先贴着铸型内壁呈圆周运动,并逐渐向两侧展宽,形成一层很薄的金属液。由于入流口位置在铸件左侧,因此金属液率先充满左侧型腔,随着入流的金属液不断增加,型腔左侧的金属液逐渐变厚,并不断向右侧铺展,直至充满整个型腔。

图 5c 为金属液刚完成布型时的流场分布,时间为 61.6 s。可以看出,此时金属液的厚度并不均匀,呈左厚右薄,布型层厚度很薄。此后,金属液不断变厚,金属

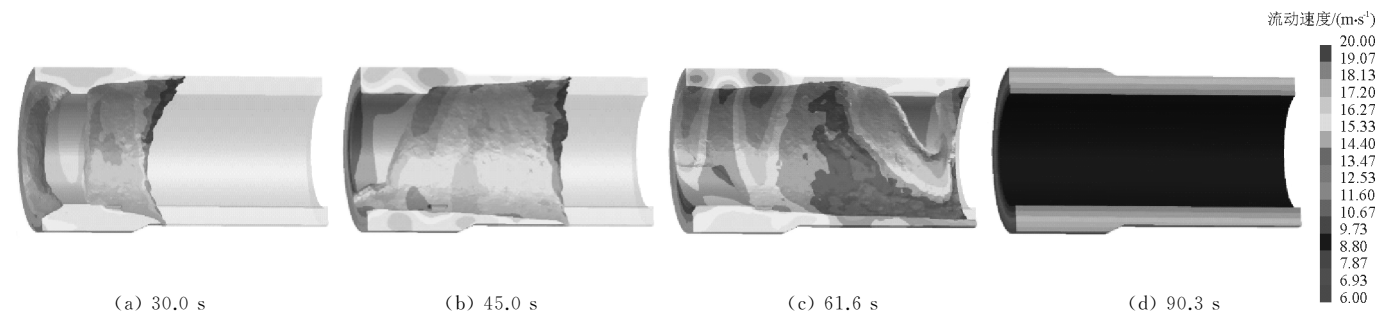


图 5 不同时刻的速度场模拟结果

Fig.5 Simulation results of velocity field at different moments

液层的厚度逐渐均匀,直至充型结束,时间为 90.3 s,见图 5d。充型结束后金属液的速度平稳,随着半径呈梯度增加。

2.3 温度场分析

图 6 为超大型缸套卧式离心铸造过程中金属液的

充型、凝固及冷却过程中的温度场模拟结果。可以看出,金属液进入铸型后是以层状流动形式不断向前推进的,其中 f_p 为铸件的充型率, t 为浇注时间。金属液从入流口进入铸型时出现了不连续的现象,刚进入铸型的金属液与金属型壁接触,受到激冷作用,由于金属型的

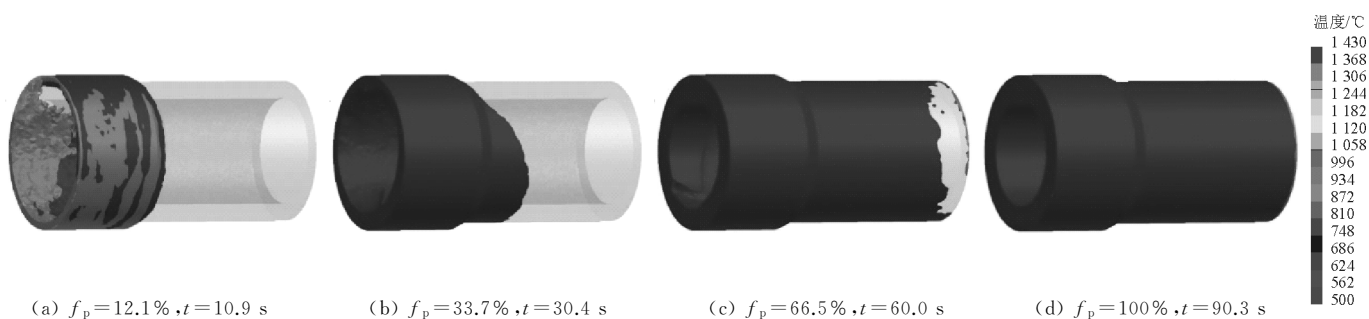


图 6 不同时刻温度场模拟结果

Fig.6 Simulation results of temperature field at different moments

冷却速度较快,金属液在旋转的过程中温度降低,见图 6a。靠近铸型左端的金属液温度较入流口位置的金属液约低 100 °C,部分金属液甚至发生凝固,容易得到细小的晶粒层,此时固相率为 0.4%。随后又有更多的金属液不断流入铸型,在之前的金属液层上继续向前推进,金属液的厚度不断增加,后来的金属液不断把热量传递给已进入铸型的金属液,见图 6b,使其固相率又变为 0。后面入流的金属液不断重复这种层状流动,直至充满整个型腔,共用时 90.3 s。

图 7 为卧式离心铸造过程金属液充型完毕时在径向和轴向上的温度场分布结果。可以看出,金属液在径向上温度场分布均匀,最高温度为 1 430.0 °C,最低温度为 1 381.2 °C,这是由于金属液内表面与空气、外表面与铸型双向传热造成的;而在轴向上温度场的分布情况是两端温度低,中间温度高,温度最高位置在铸件的厚壁端。由于部分金属液先接触到铸型受到激冷,温度下降,导致该处的温度低于其周围的温度,最高温度为 1 430.0 °C,最低温度为 1 283.5 °C,温差较大。在径向上温度分布较为均匀,靠近铸型表面的温度最低,与金属液最高温差约为 47 °C。

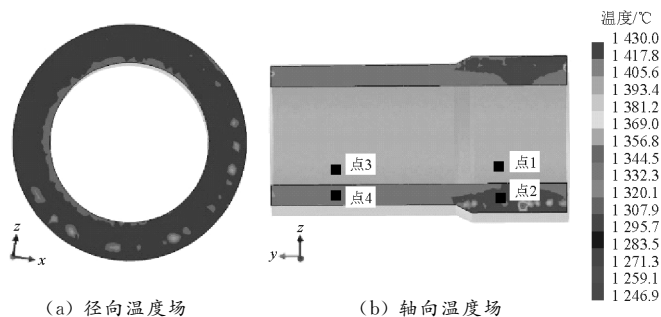


图 7 不同截面处金属液温度场分布及取点位置

Fig.7 Temperature field distribution and sampling points at different cross sections

另外在接近金属液入口位置的铸件厚壁端温度要高于远离入口位置的铸件薄壁端,温度分布变得不均匀,尤其是在铸件薄壁处与厚壁处交接的位置,这也与入流口选取在靠近厚壁端有关。在实际生产中由于温度场不均匀会导致最后生产出的铸件应力不均,甚至发生开裂。

金属液进入铸型后,取铸件靠近入流口和远离入流口的内表面和外表面上的 4 个点,见图 7b。点 1 (13.25, 19.809 60) 和点 2 (19.498 0, 19.809 60) 分别是靠近入口位置内、外表面的点,点 3 (13.25, 500) 和点 4 (17.6, 500) 分别是远离入流口位置内、外表面的点。

图 8 为从开始充型到铸件凝固过程中温度随时间的变化曲线。可以看出,金属液开始的冷却速度快,后面的冷却速度慢,这是由于随着金属液温度下降,金属

液与铸型之间的温度梯度减小,铸型散热能力降低。铸件外表面的温度始终低于内表面;靠近入流口位置的金属液温度高,远离入流口位置的金属液温度低,且靠近入流口位置的点内外表面的温差比远离入流口的点的温差大;远离入流口位置的金属液冷却速度较快。放大图上还可以看出,在 90 s 之前,4 条曲线都出现了剧烈的波动,这是由于熔融金属液一直不断充型流动造成的。在 1 277~1 430 °C 内,金属液的冷却速度较快,而在 1 277 °C 以后,金属液的冷却速度变缓,甚至出现了温度平台,这是由于金属液进入了凝固阶段,结晶时释放出了结晶潜热。

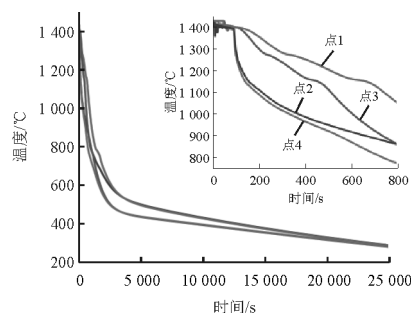


图 8 充型和凝固过程中内表面与外表面的温度曲线

Fig.8 Temperature curves of the inner and outer surfaces during filling and solidification processes

金属液入口位置,由于金属液温度一直很高,在同样的冷却条件下,冷却速度较慢。另外金属液以层流形式在铸型中推进,由于金属铸型导热能力强,冷却速度快,铸件表面被激冷,有利于这一部分金属液先凝固。而金属液内表面是空冷,冷却速度慢,因此热流方向是垂直于铸型型壁向外的,铸件发生定向凝固产生柱状晶,金属液最后冲刷的位置后凝固,因凝固收缩易产生缩松、裂纹等缺陷。由于铸型的离心转速较大,压力沿径向不断增大,产生了较大的离心力,不断破碎枝晶,冲落下来的枝晶可以作为异质形核的核心,达到了细化晶粒的效果,使铸件的组织致密。

图 9 为铸件在不同时刻的固相率(f_s)。可以看出,在 808 s 时金属液已经完全凝固。铸件的凝固顺序为:在轴向上两端先凝固,两端的金属液通过隔热材料向铸型传递热量,中间后凝固。薄壁处的外表面积与体积的比值(比表面积)大于厚壁处,因此散热更快,凝固也更快;在径向上由外表面先开始凝固,由外向内逐层凝固,这是由于铸件外表面与涂层和模具接触,降温较快,也符合层流流动规律。

图 10 为铸件各位置的凝固时间。从凝固时间上看,中间壁厚位置为最后凝固处,易出现热节等缺陷,见图 10a。铸件的外表面厚壁和薄壁交界处凝固时间最长,加上此处铸件在径向上的尺寸发生突变,易产生热应力集中等缺陷,见图 10b。

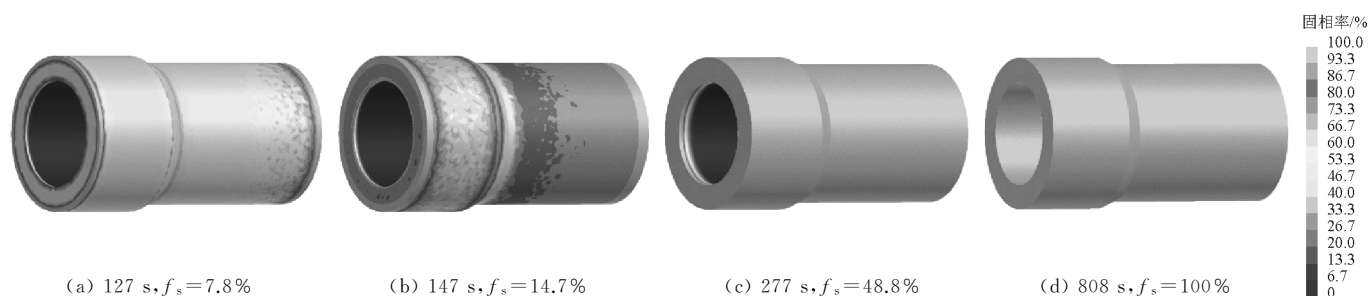


图9 不同时刻铸件的固相率

Fig.9 Solid fraction of the casting at different time

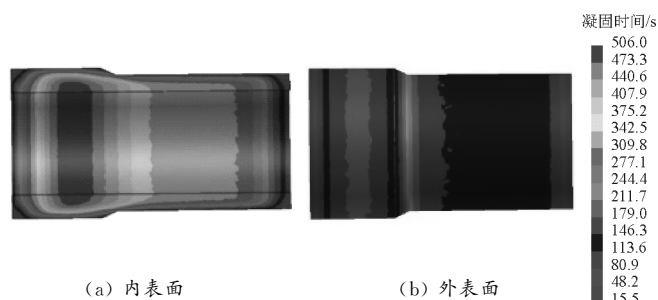


图10 铸件各位置的凝固时间

Fig.10 Solidification time of casting at different positions

2.4 压力场分析

图11为浇注完成时金属液的压力场分布的模拟结果。卧式离心铸造过程中,金属液刚刚充满铸型时压力场的分布基本呈同心圆分布,压力的大小与铸型内孔直径、铸件壁厚及离心转速直接相关。离心转速对于铸件的充型过程影响非常关键。理论上,即使模具的转速比较低,最终也可以得到均匀的圆筒件。但实际上,只有铸型转速达到临界值以上,金属液才会被收集起来。在最佳旋转速度下,金属液牢牢地贴在铸型的内壁形成一个厚度均匀的液柱,跟着铸型一起旋转并最终凝固^[24]:

$$F = m\omega^2 r$$

式中, F 为离心力,N; m 为质量,g; ω 为角速度, $\omega = 2\pi nr$; r 为半径。

图11 浇注完成时压力分布($t=90.3$ s)Fig.11 Pressure distribution after pouring process($t=90.3$ s)

可以看出,转速 ω 直接影响了金属液的离心力。转速过低时,产生的离心力不足,不利于金属液的正常充型流动。转速过高时,也会产生很多不利的影响。一

方面,转速越高,金属液的粘度越大^[25],金属液内不同质量的合金元素会产生严重偏析,质量更大的金属会更贴近铸件的外表面;另一方面,过高的转速会在铸件的外围产生很高的拉伸应力,最终导致纵向裂纹^[26]。从能耗的角度考虑,转速越高,需要离心机提供的动能也越多,转速超过了金属液可以正常充型的转速范围时,反而导致能源浪费。

此外,不同厚度的部位金属液的压力不同,外表面的压力始终大于内表面,这与铸件的壁厚有关,压力的大小在径向上呈梯度分布,压力差最大可达0.317 MPa;铸件厚壁处的压力也要大于薄壁处,厚壁与薄壁外表面处的压力差为0.097 MPa,这是由于离心力随着半径的增加而增大,外表面的半径大于内表面,厚壁处的半径大于薄壁处。但是由于铸型前后挡板的影响,金属液在轴向上压力分布并不均匀。金属液在离心力和铸型约束的共同作用下,会向前后盖板处运动,由于入口位置更靠近铸型左侧,金属液先接触铸型左端,导致左端的金属液较右端的金属液压力大。由此可以发现,如果转速过高,金属液易在铸型两端聚集,导致铸件中部出现充不满、内表面凹陷等缺陷,因此离心转速要选定在一个合理的范围内。在径向上,由于重力影响,压力场呈不规则同心圆状,铸件上方的金属液会对下方的金属液产生压力,因此铸件下部的压力略大于上部的压力,压力差为0.023 MPa。在铸型低速旋转条件下,这种影响不可忽略。在铸型高速旋转条件下这种影响较小。从压力场的分布可以得到金属液在离心铸造过程中受到的压力很大,最高达到0.506 3 MPa,使得金属液的补缩能力变强。离心力对铸件的的压力场分布影响最大,距离旋转中心越远的位置,其离心补缩压力越大,铸件部位的致密度越高,力学性能也越好。

2.5 模拟结果验证

图12为在计算机模拟辅助下生产出的 $\phi 400$ mm和 $\phi 580$ mm缸套的毛坯成品。可以看到铸件充型完整,成形品质较好,验证了模拟结果的准确性。最终确定的优化工艺参数见表2和表3。



(a) $\phi 400$ mm (b) $\phi 580$ mm

图 12 不同孔径缸套毛坯

Fig.12 Blanks of cylinder liners with different diameters

表 2 $\phi 400$ mm 缸套的最终工艺参数

Tab.2 Final process parameters for a cylinder liner with $\phi 400$ mm

材质	模具 温度/ $^{\circ}\text{C}$	铁水 重量/kg	浇注 温度/ $^{\circ}\text{C}$	浇注 时间/s	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
CrNiCuP	200 ± 50	760 ± 3	$1\,410 \pm 20$	100 ± 20	540 ± 20

表 3 $\phi 580$ mm 缸套的最终工艺参数

Tab.3 Final process parameters for a cylinder liner with $\phi 580$ mm

材质	模具 温度/ $^{\circ}\text{C}$	铁水 重量/kg	浇注 温度/ $^{\circ}\text{C}$	浇注 时间/s	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
钒钛铸铁	180 ± 30	$2\,166 \pm 3$	$1\,410 \pm 30$	240 ± 20	400 ± 20

3 结 论

(1)离心铸造高钼铸铁缸套过程中,金属液在浇口位置开始逐渐向轴向充填,然后贴着铸型内壁旋转,且旋转方向与铸型方向一致。金属液进入铸型后是以层状流动形式不断向前充填,充型顺序为金属液率先充填左侧型腔,金属液层不断变厚,并向右侧铺展,直至充满型腔,共用时 90.3 s。

(2)离心铸造高钼铸铁缸套过程中,远端金属液温度较近端低约 100°C 。铸件轴向两端温度低,中间温度高,外表面的温度始终低于内表面。靠近入流口位置的金属液温度高于远离入流口位置,冷却速度先快后慢,由于结晶潜热释放,会出现温度平台。在金属液最后凝固位置,易出现缩孔、缩松。铸件的凝固顺序是由外到内逐层凝固,最后凝固位置在铸件的厚壁端的中间位置。

(3)离心铸造高钼铸铁缸套过程中,金属液刚充满铸型时压力场基本呈同心圆分布,压力的大小与铸型内孔直径、铸件壁厚及离心转速直接相关。金属液最大压力达 $0.506\,3\text{ MPa}$,金属液的补缩能力强;由于铸件的半径和壁厚不同,外表面与内表面的压力差最大为 0.317 MPa ,铸件壁厚与薄壁处压力差为 0.097 MPa 。由于重力的影响,铸件下部与上部的压力差为 0.023

MPa。

(4)根据温度场、流场、压力场的模拟结果,对 $\phi 400\text{ mm}$ 和 $\phi 580\text{ mm}$ 的超大型缸套实际生产过程中的工艺参数进行优化,生产出的铸件充型完整,成形品质较好,验证了模拟结果的准确性。

参 考 文 献

- [1] 陈昭. 离心铸造发动机缸套的制备工艺及其切削性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [2] GIORGIO M, GUIDA M, PULCINI G. A condition-based maintenance policy for deteriorating units: An application to the cylinder liners of marine engine[J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2015, 31(3): 339-348.
- [3] KELLER J, FRIDRICI V, KAPSA P, et al. Influence of chemical composition and microstructure of gray cast iron on wear of heavy duty diesel engines cylinder liners[J]. Wear, 2007, 263(7-12): 1 158-1 164.
- [4] 张勇, 张亮亮, 秦小才, 等. 新型高性能表面纳米合金化气缸套研究[J]. 内燃机与配件, 2017(6): 41-43.
- [5] 夏鹏举, 邹祥宇, 寇小平. 钼对金属型铸造高铬铸铁组织与性能的影响[J]. 陕西理工学院学报, 2016, 32(1): 19-24.
- [6] JANOWAK J F, GUNDLACH R B. Improved the machinability of high strength gray cast iron[J]. AFS Transactions, 1988, 18(12): 61-62.
- [7] PRADEEPA D, RAMESHKUMAR T. Review on centrifugal casting of functionally graded materials[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 729-734.
- [8] FATHI R, MA A, SALEH B, et al. Investigation on mechanical properties and wear performance of functionally graded AZ91-SiC_p composites via centrifugal casting[J]. Materials Today Communications, 2020, 24: 101 169.
- [9] ZYGMUNTOWICZ J, WACHOWSKI M, PIOTRKIEWICZ P, et al. Investigation on fabrication and property of graded composites obtained via centrifugal casting in the magnetic field[J]. Composites, 2019, B173: 106 999.
- [10] DUBEY S, SWAIN S R. Numerical investigation on solidification in casting using ProCAST[A]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering[C]. UK, 2019.
- [11] 王宇钊, 孟令刚, 亚斌, 等. 超声场对 2219 铝合金连铸坯晶粒尺寸的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(10): 1 245-1 250.
- [12] 裴恒伟, 张树国, 刘旭波, 等. 半固态流变成形数值模拟研究现状及展望[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(10): 1 264-1 268.
- [13] 俞占扬, 张慧, 王明林, 等. 钢锭中缩孔与缩松缺陷的研究现状及进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(9): 1 073-1 078.
- [14] 杨新娣, 田智星, 路涵博, 等. 涡轮后机匣支板熔模铸造工艺数值模拟及优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(9): 1 184-1 188.
- [15] 周本建. 接触网零部件定位支座本体低压铸造工艺设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(10): 1 300-1 302.
- [16] 邓超, 龙骏, 郑志斌, 等. 基于 ProCAST 的履带板消失模铸造凝固过程数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(3): 368-371.
- [17] 殷华英. 基于 ProCast 软件的熔模铸造计算机模拟系统设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(6): 804-805.
- [18] 高浩斐, 屈银虎, 钟涛, 等. 基于 ProCAST 的阀体零件熔模铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 657-660.

Fe 代替 V 制备低成本钛合金的组织与性能

王 亮 颜 卉 姜博涛 陈 云 骆良顺 苏彦庆 郭景杰

(哈尔滨工业大学金属精密热加工国家级重点实验室)

摘 要 设计了 4 种成分的低成本 Ti-Al-V-Fe 合金,通过真空非自耗电弧熔炼及热处理得到成分较为均匀的($\alpha+\beta$)钛合金铸锭,并利用扫描电镜、拉伸试验机、数显硬度计等手段研究了不同 Fe 和 V 含量的低成本钛合金的微观组织与力学性能。结果表明,不同成分钛合金的组织差异不明显,多为粗大柱状晶,显微组织为魏氏组织和网篮状组织;随着 Fe 和 V 含量增加,其屈服强度和抗拉强度随之增大,其中 Fe 比 V 的强化效果更明显;当 Fe 含量升高时,钛合金伸长率降低程度明显严重,Fe 含量过高会使晶格畸变过大引起相的脆化;V 对钛合金组织细化作用明显,当 V 含量增加时钛合金伸长率略有提高。

关键词 低成本钛合金;Ti-Al-V-Fe;微观组织;力学性能

中图分类号 TG146.23;TF823

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.05.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Mechanical Properties of the Low Cost Titanium Alloy with Substitute of Fe for V

Wang Liang, Yan Hui, Jiang Botao, Chen Yun, Luo Liangshun, Su Yanqing, Guo Jingjie

(National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology)

Abstract: Several low-cost Ti-Al-V-Fe alloys with different composition were designed, and uniform ($\alpha+\beta$) titanium alloy ingots were obtained by thenon-consumable vacuum arc melting and heat treatment. The microstructure and mechanical properties of low-cost titanium alloys with different Fe and V contents were investigated by means of scanning electron microscope, test machine and digital micro-hardness tester. The results indicate that absence of difference between the microstructure of titanium alloy with different composition can be observed, which are coarse columnar crystals composed of Widmannstatten and basket-net structure. With the increase of Fe and V, the yield strength and tensile strength of the alloy are also increased, where the strengthening effect of Fe is more significant than V. As Fe content increases, the reduction of elongation is increased obviously, and the higher Fe content leads to the larger lattice distortion, resulting in phase embrittlement. V can refine the microstructure of the titanium alloy, and the elongation of the titanium alloy is increased slightly as V content increases.

Key Words: Low-cost Titanium Alloys, Ti-Al-V-Fe, Microstructure, Mechanical Properties

收稿日期:2021-11-09;**修改稿收到日期:**2021-12-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51871075)

第一作者简介:王亮,男,1981 年出生,教授,哈尔滨(150001),E-mail:wliang1227@163.com

引用格式:王亮,颜卉,姜博涛,等. Fe 代替 V 制备低成本钛合金的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(5):535-539.

WANG L, YAN H, JIANG B T, et al. Microstructure and mechanical properties of the low cost titanium alloy with substitute of Fe for V [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5):535-539.

- [19] 魏剑辉,蒋梦麒.基于 ProCAST 的 K423 衬板熔模铸造工艺优化设计[J].特种铸造及有色合金,2020,40(11):1259-1261.
- [20] 肖良红,艾自祯,陆东,等.基于 ProCAST 的 ZL107 合金进气管铸造工艺优化[J].特种铸造及有色合金,2021,41(10):1306-1312.
- [21] BAZHENOV V E, KOLTYGINA V, FADEEVA V. The use of the ProCast software to simulate the process of investment casting of alloy based on titanium aluminide TNM-B1 into ceramic molds [J]. Russian Journal of Non-ferrous Metals, 2014, 55(1): 15-19.
- [22] 刘铁军. 钛合金叶轮离心铸造数值模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [23] 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.
- [24] MUKUNDA P G, SHAILESH R A, RAO S S. Influence of rotational speed of centrifugal casting process on appearance, microstructure, and sliding wear behaviour of Al-2Si cast alloy [J]. Metals and Materials International, 2010, 16(1): 137-143.
- [25] SHEN X, YIN Y J, XIAO G, et al. Physical simulation of fluid frontal motion morphology in filling process of titanium alloy vertical centrifugal casting [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 37: 51-58.
- [26] KEERTHIPRASAD K S, MURALI M S, MUKUNDA P G, et al. Numerical simulation and cold modeling experiments on centrifugal casting [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2011, B42(1): 144-155.

(编辑:彭瑾)