

K4169 合金离心铸管工艺模拟及试制研究

韩少丽, 骆合力, 李尚平, 侯 杰, 刘天宇

(北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081)

摘要: 采用ProCAST软件对K4169合金的离心铸造工艺进行了模拟研究。通过分析浇注速度、铸型转速、浇注温度及铸型温度对离心铸管充型及凝固行为的影响, 获得了外径56 mm/内径38 mm的K4169合金离心铸管最佳制备工艺参数。在此工艺参数条件下, K4169合金离心铸管可实现连续稳定充型, 离心铸管壁厚差为0.2 mm, 内表面疏松比例小于3%, 且柱状晶平均宽度为1.7 mm。结合模拟结果对K4169合金离心铸管进行试制, 所制备的离心铸管显微组织中柱状晶占比80%, 且晶粒组织细小, 因而离心铸管具有优异的高温塑性。

关键词: K4169合金; 离心铸造; 工艺参数模拟; 显微组织及性能

离心铸造技术依靠比重力高60~80倍的成形方法, 金属液进入铸型后随铸型一起旋转, 并在离心力的作用下于型腔内均匀铺开而形成铸管, 所铸出的离心铸管组织致密度高、晶粒细小、壁厚均匀^[1-2]。由于离心铸造过程受力复杂、金属液温度高、铸型转速高的特点, 很难确定充型过程中金属液的流场及温度场变化规律, 而且离心铸造工艺参数较多, 包括铸型转速、浇注温度、铸型预热温度及浇注速度等, 各工艺参数之间存在一定的关联性, 且随合金种类和尺寸规格的变化而变化, 因而针对离心铸造工艺参数的探索周期长, 试错成本高, 为此数值模拟方法成为一种对离心铸造工艺参数进行摸索的一种快速研究手段^[3-4]。由于针对细长铸管所采用的卧式离心铸造技术在制备过程中金属液的充型方向与重力方向相互垂直, 仿真模型建立困难, 因而国内外针对卧式离心铸造的数值模拟研究尚处于起步阶段, 且大多数模拟仅限于充型流场和凝固温度场的分析, 未结合离心铸管的冶金质量及晶粒组织进行工艺参数的深入分析^[5-7]。因此, 本研究通过对不同工艺参数下离心铸管充型过程、壁厚均匀性及内表面的致密度差异的模拟, 探究其影响规律; 并在此基础上进行离心铸管的显微组织及力学性能分析, 为最终K4169合金离心铸造技术的开发和工艺参数优化提供理论参考依据。

作者简介:

韩少丽(1986-), 女, 硕士, 主要研究方向为高温合金材料及制备工艺。E-mail: hsl414@126.com

中图分类号: TG249.4
文献标识码: B
文章编号: 1001-4977(2021)03-0373-05

基金项目:
国家科技计划重点专项基金(2020YFC1107200)。
收稿日期:
2020-08-24 收到初稿,
2020-11-02 收到修订稿。

1 数学模型及实验过程

以外径56 mm, 内径38 mm, 长度500 mm的K4169离心铸管为研究对象, 采用ProCAST软件进行其卧式离心铸造工艺过程模拟。铸型采用规格为外径76 mm × 内径58 mm × 长度520 mm的H13钢, 铸型内表面涂覆有高温抗烧蚀、耐磨损涂料。浇口直径为20 mm。离心铸管与铸型之间的换热系数为500 W/(m²·K), 铸型与外界环境换热系数为25 W/(m²·K), 环境温度为25 ℃。进入铸型中的金属液在铸型高速旋转的带动作用下贴内壁运动, 并在铸型的快速凝固条件下凝固成铸管。离心铸造模型网格划分如图1所示: 网格为四面体网格, 网格总数为322 753个, 钢液自入口处直径为 Φ 20 mm的浇口, 以不同的浇注速度注入铸型, 铸管最终成品规格通过钢液重量进行控制。

在数学模型建立完成后, 首先通过研究浇注速度在1~18 kg/s变化时, 离心铸管充型顺序的变化规律, 得出持续稳定的充型流场所对应的最佳浇注速度; 在此基础

上研究铸型转速在600~3 000 r/min变化时对离心铸管壁厚均匀性的影响规律,确定出铸型最佳转速;最后研究不同浇注温度和铸型温度条件下离心铸管内部的疏松倾向性,从而获得K4169合金离心铸管的最佳制备工艺参数。此外,在25 kg真空离心铸造试验机上进行K4169合金离心铸管的试制,所获得的K4169离心铸管成分如表1所示,并进一步分析了离心铸管的晶粒组织及室温、650 ℃及700 ℃的拉伸性能。

2 模拟及试制结果与分析

2.1 不同浇注速度条件下的充型过程分析

卧式离心铸造过程中浇注速度直接影响离心铸管的充型:浇注速度过小,引起断流、破碎等宏观缺陷;而当浇注速度过大时,铸型内的钢液容易发生飞溅、紊流,造成铸管各部分不均匀。图2为不同浇注速度条件下离心铸管的充型行为:设定不同模型的铸型旋转速度均为1 000 r/min,浇注温度为1 460 ℃,铸型温度为200 ℃。研究结果表明:在浇注速度为1 kg/s时,离心铸管优先在近浇口位置处开始充型;随着浇注速度增加,充型位置逐渐远离浇口位置,当浇注速度小于5 kg/s时,由于入口钢液量较小,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;当浇注速度大于10 kg/s时,金属液自远离浇口位置的一端开始充型,充型过程稳定;随着浇注速度的进一步提升,在浇注速度为13 kg/s时,离心铸管充型呈现出了比较明显的螺旋线,影响离心铸管的表面质量;浇注速度为15 kg/s时与浇注速度为13 kg/s时离心管的充型过程相同;直至浇注速度进一步增大至18 kg/s时,金属液在铸型末端发生涡流,使离心铸管不能完全充型。

2.2 不同转速条件下的离心铸管壁厚均匀性分析

在上述充型过程的研究基础上,由于卧式离心铸造钢液旋转产生的离心力与自身的重力方向相平行,在离心力过小时很容易引起壁厚的严重偏差,而当离心力过大时同样会引起铸型内部钢液的飞溅,影响铸管的充型过程。因而为了获得均匀壁厚的离心铸管,从铸型离心转速对最终铸管壁厚均匀性的影响规律进行研究。图3是铸型转速从600~1 500 r/min变化时对离心铸管壁厚所带来的影响,浇注速度均匀10 kg/s,浇注温度为1 460 ℃,铸型温度为200 ℃。在转速较低时,金属液所受的离心力较小,金属液随铸型旋转所产生的离心力不足以克服自身重力,因而在重力作用下大部分金属液在离心铸管底部沉积凝固,离心铸管上薄下厚,壁厚不均匀。而随着铸型转速增加,离心力逐渐增大,离心铸管壁厚均匀性逐渐提高。不同转速条

件下离心铸管壁厚的统计值如表2所示,对于本研究的外径56 mm/内径38 mm的K4169离心铸管,从模拟结果分析可知:当转速达到1 500 r/min时可以获得均匀壁厚的离心铸管。当转速进一步提高时,虽然没有对离心

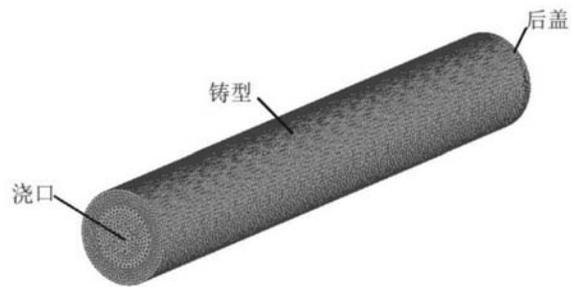
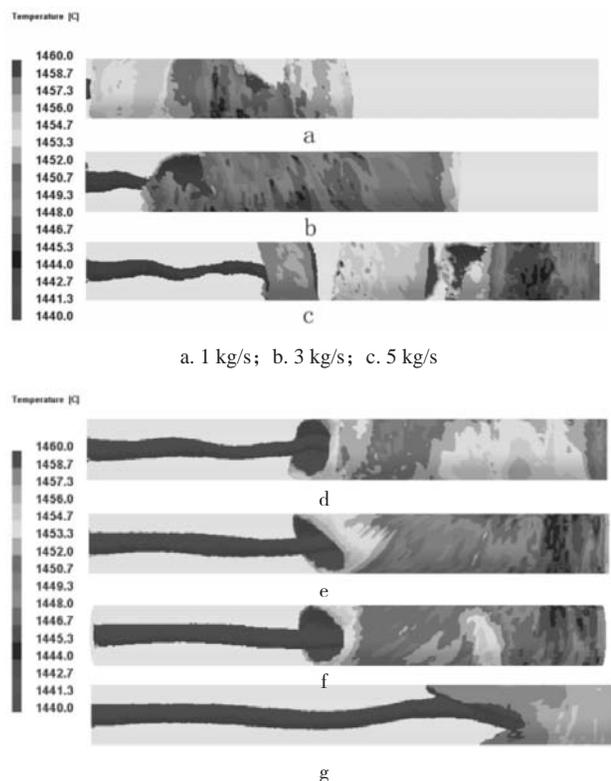


图1 离心铸造模型

Fig. 1 Centrifugal casting model

表1 K4169合金离心铸管化学成分
Table 1 Chemical composition of K4169 alloy centrifugal casting tube

											$w_B/\%$
C	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Nb	B	Co	Si	Mn	Fe
0.05	19.82	52.55	3.01	0.65	0.98	5.25	0.002	0.1	0.02	0.004	余量



a. 1 kg/s; b. 3 kg/s; c. 5 kg/s

d. 10 kg/s; e. 13 kg/s; f. 15 kg/s; g. 18 kg/s

图2 不同浇注速度条件下离心铸管充型过程

Fig. 2 Filling process of centrifugal casting tube under different pouring speeds

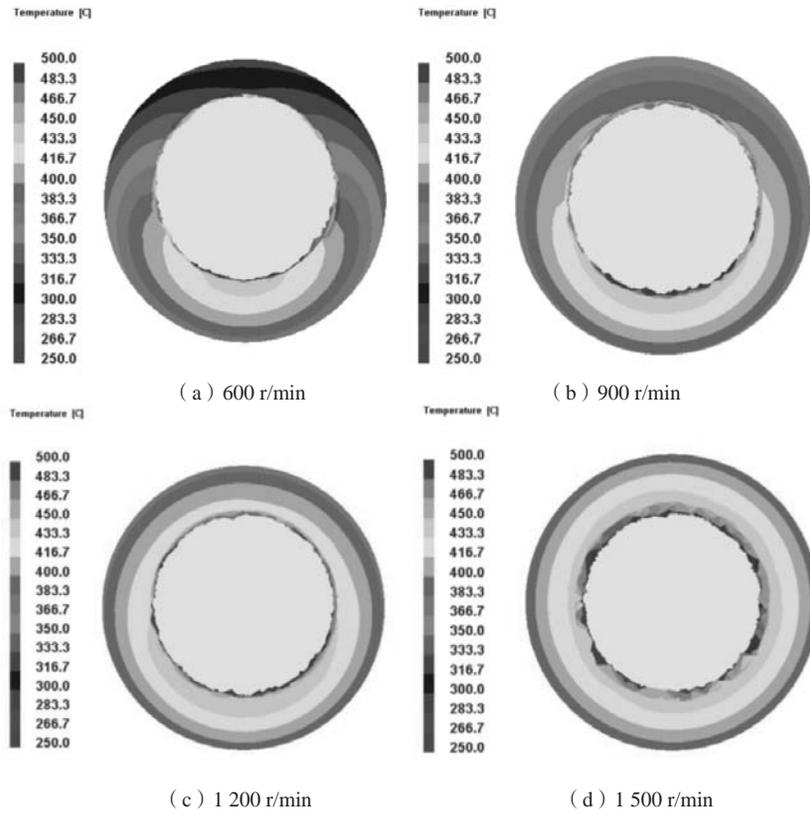


图3 不同转速条件下离心铸管壁厚均匀性

Fig. 3 Uniformity of wall thickness of centrifugal casing tube under different rotating speeds

铸管壁厚产生影响，但加剧了金属液对铸型的冲蚀，并引起充型过程中金属液的无规律飞溅，如图4所示，飞溅的液滴在铸型的冷却条件下快速凝固，这一现象不仅会严重影响离心铸管的充型完整性及表面质量，而且也有损于铸型的使用寿命。

2.3 不同浇注 / 铸型温度条件下的疏松倾向性分析

不同于传统合金钢类的卧式离心铸造，含Al、Ti元素的高温合金的强度高、铸造工艺性较差，在凝固成形过程中容易形成气孔及缩孔等冶金缺陷，因而在确保铸管完整成形的同时，需要控制凝固过程中铸管的温度场分布，促使铸件各部位尽可能实现同时凝固，进而减少铸管内部的疏松倾向性，提高其冶金质量。而在离心铸造过程中，金属液在离心力的作用下分布在铸型内表面，并在铸型的快速冷却作用下发生凝固，离心铸管的凝固顺序为从外侧至内侧逐层凝固，最后凝固区即离心铸管的内表面，因此在离心铸管的内表面容易形成气孔、缩孔及夹杂等冶金缺陷。图5是不同浇注温度和铸型温度条件下离心铸管内表面疏松模拟结果，浇注速度为10 kg/s，铸型旋转速度均为1 500 r/min。通过对比分析发现：随着浇注温度的降低和铸型温度的提高，凝固过程中离心铸管横截面上的温度梯度逐渐降低，离心铸管内外表面局部的凝固时

表2 不同转速条件下离心铸管壁厚统计值

Table 2 Statistical value of wall thickness of centrifuge casing tube under different rotating speeds

转速/ (r · min ⁻¹)	最小壁厚/mm	最大壁厚/mm
600	6.8	12.3
900	8.2	10.5
1 200	8.6	9.9
1 500	9.5	9.7
1 800	9.4	9.6



图4 转速在3 000 r/min条件下离心铸管的充型过程

Fig. 4 Filling process of centrifuge casing tube under 3 000 r/min rotating speed

间差异逐渐减小,进而使得离心铸管的疏松倾向性明显降低。在浇注温度1 390 ℃、铸型温度500 ℃条件下时,离心铸管中疏松比例大于3%的缺陷已得到消除。因而,为提高离心铸管的冶金质量,在满足充型的前提下,尽可能采取低浇注温度、高铸型温度的浇注方式。

2.4 K4169 离心铸造管显微组织及力学性能

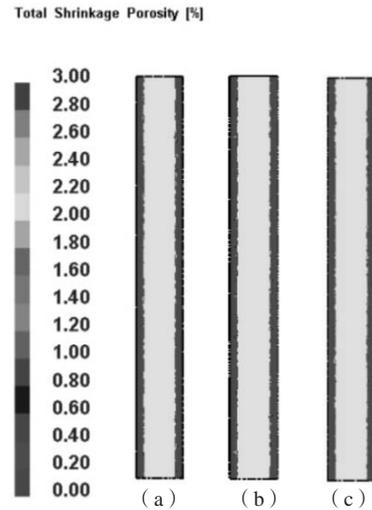
图6是K4169离心铸管晶粒组织模拟,与实际离心铸管显微组织对比可以发现:离心铸管显微组织由外表面至内表面,分别为占比80%的柱状晶和20%左右细小等轴晶,柱状晶平均宽度为1.7 mm,模拟结果与实际浇注结果相吻合。离心铸管柱状晶形成原因分析为:在离心作用下最先到达铸型内壁上的金属液快速凝固,并顺着温度梯度降低的方向长成柱状晶;后浇入的金属流体会冲击刚刚结晶或正在结晶的枝晶组织,妨碍树枝晶的发展,从而达到细化晶粒的效果;此外金属液渗入已结晶的枝晶空穴中,使铸态下的枝晶组织进一步致密化,两者都有利于提高离心铸管的力学性能^[8-9]。表3列出了该K4169离心铸管在室温、650 ℃及700 ℃条件下的拉伸性能,拉伸试样的取样位置平行于铸管轴向,测试过程中试棒的受力方向垂直于柱状晶,经过对离心铸管的力学性能多次取样,并与精铸试棒(高温合金材料手册数据)相比发现,采用离心铸造工艺获得的柱状晶组织,与传统模铸条件下获得的等轴晶铸态组织相比,离心铸管显微组织中柱状晶的大量存在,显著了提高合金的塑性性能。

3 结论

(1) 浇注速度较低时,铸型内金属液的充型容易出现不连续现象;随着浇注速度的增加,充型连续性增强,金属液的起始充型位置逐渐后移;当浇注速度为10 kg/s时,金属液充型过程连续,且达到最稳定状态;当浇注速度进一步增大至18 kg/s时,金属液在铸型末端发生涡流,离心铸管不能完整充型。

(2) 离心铸管壁厚的均匀性随转速的增加而提高,对于外径56 mm/内径38 mm的K4169离心铸管的制备,铸型最佳转速为1 500 r/min,在该转速条件下离心铸管的壁厚差达到最小,为0.2 mm;随着转速进一步增大,铸型内容易发生金属液的飞溅,不仅影响了离心铸管的完整充型,而且有助于铸型的使用寿命。

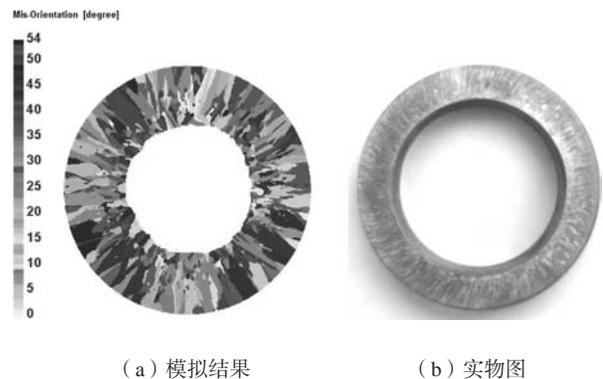
(3) 离心铸管的疏松集中分布于内表面,通过降低浇注温度、提高铸型温度,可降低离心铸管在凝固过程中的温度梯度,从而起到减小内表面疏松倾向性;模拟表明,K4169合金在浇注1 390 ℃/型温500 ℃条件下,铸管内表面疏松比例大于3%的缺陷可完全消除。



(a) 浇温1 460 ℃、型温100 ℃; (b) 浇温1 420 ℃、型温300 ℃; (c) 浇温1 390 ℃、型温500 ℃

图5 不同浇温/型温条件下离心铸管疏松

Fig. 5 The porosity of centrifugal casting tube under different pouring and mold temperatures



(a) 模拟结果 (b) 实物图

图6 离心铸管的晶粒组织模拟及实物图

Fig. 6 Simulation of grain structure and real object of centrifugal casting tube

表3 在不同温度下K4169离心铸管的力学性能
Table 3 Mechanical properties of K4169 centrifugal casting tube under different temperatures

测试温度 /℃	抗拉强度 R_m /MPa		伸长率 A /%	
	实测值	手册值	实测值	手册值
25	933	1 100	22.0	16.0
650	674	570	19	3.0
700	475	420	7.3	2.0

参考文献:

- [1] 林刚, 杨院生, 花福安, 等. 电磁离心1Cr18Ni9Ti不锈钢的凝固组织与变形性能 [J]. 金属学报, 2003, 39 (12): 1233-1237.
- [2] 张武城. 离心铸造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 3-17.
- [3] 邓传杰, 汪选国, 杜学铭. 离心铸造复合管外层充型与凝固数值模拟 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (6): 1197-1201.
- [4] 吴轩. 离心铸造双层金属管数值模拟与工艺研究 [D]. 武汉理工大学, 2015.
- [5] 曾兴旺, 陈立亮, 刘瑞祥. 离心铸造数值模拟技术的研究与开发 [J]. 铸造, 2004, 53 (4): 310-313.
- [6] 刘贞露, 肖文丰, 孟祥炜, 等. 基于ProCAST的K4169高温合金铸件离心铸造工艺参数模拟 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (9): 103-107.
- [7] 鲁素玲, 曹磊, 郭志红, 等. 基于ProCAST的筒形件卧式离心铸造充型流动模拟 [J]. 铸造, 2019, 68 (9): 1036-1039.
- [8] 张勃, 杜学铭, 顾剑峰. 基于Flow-3D的卧式离心铸造管数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (23): 81-85.
- [9] 关涌康. 卧式离心铸造镁合金工艺及其轧制成型板材性能研究 [D]. 沈阳工业大学, 2019.

Casting Process Simulation and Trial Production of K4169 Alloy Centrifugal Tube

HAN Shao-li, LUO He-li, LI Shang-ping, HOU Jie, LIU Tian-yu
(Beijing CISRI-GAONA Materials & Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract:

The centrifugal casting process of K4169 alloy tube was simulated by ProCAST software. By analyzing the effects of pouring speed, mold speed, pouring temperature and mold temperature on the filling and solidification behavior of centrifugal cast pipe, the optimal preparation process parameters of K4169 alloy centrifugal casting pipe with outer diameter of 56 mm and inner diameter of 38 mm were obtained. Under these conditions, continuous and stable mold filling can be realized for K4169 alloy centrifugal casting pipe. The wall thickness difference of centrifugal casting pipe is 0.2 mm, the porosity ratio of inner surface is less than 3%, and the average width of columnar crystal is 1.7 mm. Combined with the simulation results, the centrifugal casting pipe of K4169 alloy was trial-produced. The columnar crystal accounts for 80% of the microstructure, and the grain structure is fine, so the centrifugal casting pipe has excellent high temperature plasticity.

Key words:

K4169 alloy; centrifugal casting; process parameter simulation; microstructure and properties