

基于模拟仿真的铝合金铸件热处理过程温度均匀性控制

王先飞 王征远 杨 钦 刘 博 余国康 时亚州 李宝辉
(上海航天精密机械研究所)

摘 要 为实现铝合金铸件热处理过程的温度场调控、减轻变形,采用数值模拟方法,研究了不同料架结构对铝合金铸件表面温度场及温度均匀性的影响。结果表明,模拟仿真能够实现热处理过程铸件表面温度场的准确模拟,同时,热处理料架对铸件表面温度场具有重要影响。针对铝合金舱体铸件,采用 $\phi 30$ mm 小孔+ $\phi 600$ mm 大孔的料架底板,铸件表面不同位置温度均匀性最好,温度误差在 ± 5 °C 范围内。

关键词 热处理;温度场;流场;数值模拟

中图分类号 TG146.21;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Temperature Uniformity Control of the Aluminum Alloy Casting by Simulation during the Heat Treatment Process

Wang Xianfei, Wang Zhengyuan, Yang Qin, Liu Bo, Yu Guokang, Shi Yazhou, Li Baohui
(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute)

Abstract: In order to control the temperature field of the aluminum alloy casting during heat treatment process and reduce deformation, the numerical simulation was adopted to investigate the effect of rack with different structure on the temperature field and uniformity of castings. The results indicate that the simulated temperature field is in great agreement with the experimental ones and the rack structure has significant effect on the temperature field. Regarding to cabin castings of aluminum alloy, the temperature uniformity on the surface of the casting is desirable within the range of ± 5 °C, when the rack with big hole of 600 mm in diameter and small holes of 30 mm in diameter are used.

Key Words: Heat Treatment, Temperature Field, Flow Field, Numerical Simulation

轻量化是航天结构材料的重要发展方向^[1]。减轻构件质量,能够提高飞行器机动性能,降低飞行器发射成本^[2]。铝合金密度约为 2.7 g/cm³,比强度和硬度高,

综合力学性能好,同时还具有优良的导电、导热性及耐腐蚀性,已广泛应用于航空航天、交通运输、机械制造等领域中^[3]。

收稿日期:2020-08-15;**修改稿收到日期:**2020-10-19

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2017ZX04006001)

第一作者简介:王先飞,男,1986 年出生,高级工程师,上海(201600),E-mail: wang_xf08@163.com

引用格式:王先飞,王征远,杨钦,等. 基于模拟仿真的铝合金铸件热处理过程温度均匀性控制[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(3):378-382.

WANG X F, WANG Z Y, YANG Q, et al. Temperature uniformity control of the aluminum alloy casting by simulation during the heat treatment process[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021,41(3):378-382.

[3] 王雅君,张浩,时君丽,等.基于过程的海产食品质量信息可追溯系统[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 264-271.
[4] 周奇才,沈鹤鸿,刘星辰,等.大型机械设备全生命周期管理体系结构研究[J]. 中国工程机械学报, 2017, 15(4): 318-323.
[5] 张瀚青,计效园,周建新,等.砂型铸造企业串并联式质量追责追溯模型研究与应用[J].铸造, 2017, 66(11): 1 178-1 183.
[6] 李存荣,彭磊.汽车注塑件生产过程控制和追溯系统的研究与实现[J]. 现代制造工程, 2019(1): 69-74.
[7] 王武兵,陈飞,计效园,等.流程优化与巩固 Eraser-SDCA 方法及铸造企业应用[J].特种铸造及有色合金, 2017, 37(11):1 192-1 196.
[8] 王国栋,唐任仲,刘运通,等.中小制造企业产品制造生命周期质量导航系统[J].浙江大学学报(工学版),2011,45(8):1 329-1 336.
[9] 尹超,郭晨,赵旭.微车后桥关键工序生产异常损失评估及预警方

法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(10): 2 532-2 541.
[10] 陈硕,但平静,吴兰兰.基于两化融合的产品生产过程控制及质量追溯[J]. 现代制造工程, 2020(3): 33-38.
[11] 张凯.基于条码技术的汽轮机零部件质量追溯系统研究与开发[D].上海:上海交通大学,2016.
[12] 刘彬,王德权.发动机装配线 MES 信息系统中标准件追溯方法的研究[J].组合机床与自动化加工技术, 2015 (3): 154-156.
[13] 吴绍方,黎烨文.铝压铸链条盖全工序精准追溯工艺开发及应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(10): 1 085-1 087.
[14] 张根保,任显林,李明,等.基于 MES 和 CAPP 的动态质量可追溯系统[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(2): 349-355.

(编辑:刘晨辉)

铸件在热处理过程中,受到其自身与热处理料架等因素的影响,通常炉温均匀性会出现一定程度的下降,导致铸件在热处理时受热不均匀,进而发生变形。计算机模拟辅助制定热处理工艺可以提前获得铸件表面在热处理中的温度分布,提高热处理工艺开发效率,已得到较为广泛的应用^[4,5]。

本课题按照实际热处理设备状态,根据优化后热处理工艺及铸件装炉形式建立模型,对不同条件下的铝合金铸件热处理过程进行模拟仿真,得出炉内流场和温度场的分布情况,并进行实际验证。

1 试验方法

采用 ANSYS CFX 数值模拟软件,对计算模型进行 1:1 仿真。忽略不重要的几何特征,以减少计算资源,见图 1。炉膛、料架和铝合金铸件工装的材质为 Q235 钢,铸件材质为 ZL114A 合金,炉膛内的流动空气设置为理想气体,并考虑重力的影响。计算中忽略空气对辐射能的吸收和散射,空气的辐射模型选用 DTRM 模型,将所有的固体计算域设置为灰体,表面发射率均取 0.8,固体只考虑表面辐射。炉膛风机压力为 1 280 Pa,额定流量为 12 850 m³/h,风机外径为 350 mm。

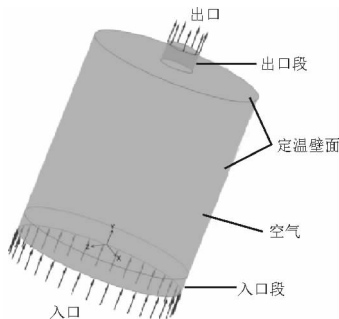


图 1 空载炉膛的计算模型

Fig.1 Numerical model of no-load furnace

在入口和出口附近分别设置 200 mm 的入口段和出口段以使流动充分进行,忽略入口段和出口段的传热情况,将其设置为绝热壁面,温度与炉膛内壁的温度连续。由于热处理的时间较长,可以将此过程进行稳态计算,设置炉膛内壁的温度为 540 ℃,流体入口取流量和定温边界,大小为风机的额定流量,温度为 540 ℃;流体出口取压力边界,大小为风机的压力;炉膛简化为 $\phi 1\ 800\text{ mm} \times 2\ 000\text{ mm}$ 的圆柱体,计算的坐标系建立在入口段顶部的中心位置,Y 轴负方向为重力方向,重力加速度取 9.8 m/s²。

在网格划分中,设置液固区域的计算网格最大尺寸不得超过 30 mm。由于计算模型较为复杂,在 ICEM 中采用非结构化进行网格划分,生成的各方案计算域网格总数约为 130 万。在进行热处理炉内流场湍流流动

时采用标准 $\kappa\text{-}\epsilon$ 模型并且壁面函数采用 Scalable 模型,计算域的液固交界面设置为无滑移条件。

2 模拟结果与分析

2.1 仅装载不同形式料架时炉内的温度场及流场模拟

热处理炉分别装载 4 种不同料架, C_1 为平板无孔, C_2 为平板有 30 mm 孔, C_3 为平板有 $\phi 30\text{ mm} + \phi 600\text{ mm}$ 孔, C_4 为平板有 $\phi 260\text{ mm} + \phi 600\text{ mm}$ 孔。装配形式见图 2,料架底部面与入口段顶部面重合,料架中心轴与热处理炉中心轴 Y 轴重合,料架顶端的横梁为 X 方向放置。

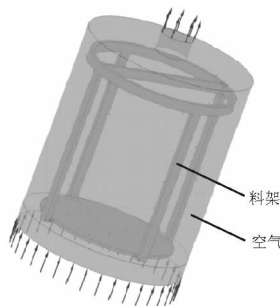


图 2 炉膛料架装配图

Fig.2 Assembling drawing of furnace rack

使用耦合求解计算,得到热处理炉的数值模拟结果。图 3 为不同料架的表面温度云图。表 1 为各方案下料架表面温度的计算结果,其中, $T_{\max}$ 为料架表面最高温度, $T_{\min}$ 为料架表面最低温度, T_{ave} 为料架表面平均温度, ΔT 为 $T_{\max}$ 与 $T_{\min}$ 的差值。取 $\frac{\Delta T}{T_{\max} + T_{\min}}$ 衡量料架表面温度的均匀性,其值越小表示料架的温度越均匀。

由图 3 可以看出,热处理炉内底部温度要比上部温度高,这是由于气体从底部流入热处理炉后遇到料架的阻挡,气体带来的热量容易在料架底部积聚,造成温度升高,而在料架顶部,气体流动顺畅,热量不容易积聚。由表 1 可知,大孔加中孔的料架(C_4)表面温度最均匀,这是由于料架的底部挖孔较多,气体在由炉内底部运动至顶部位置时,流动更加通畅,流动阻力更小,热量不容易在料架表面积聚。

图 4 为不同方案下流场流线图。可以看出, C_1 (平板)热处理炉内存在大量的涡流现象,流速分配不均匀,料架的不同位置附近的流速差异性较大,使得料架表面的不同位置传热情况有很大的区别,料架的表面温度分布不均匀,因此在热处理炉中应该避免料架底部为纯平板的装配形式。 $C_2 \sim C_4$ 流场的速度分布比较均匀,和 C_1 相比有了很大改善,料架表面的对流传热更加均匀。

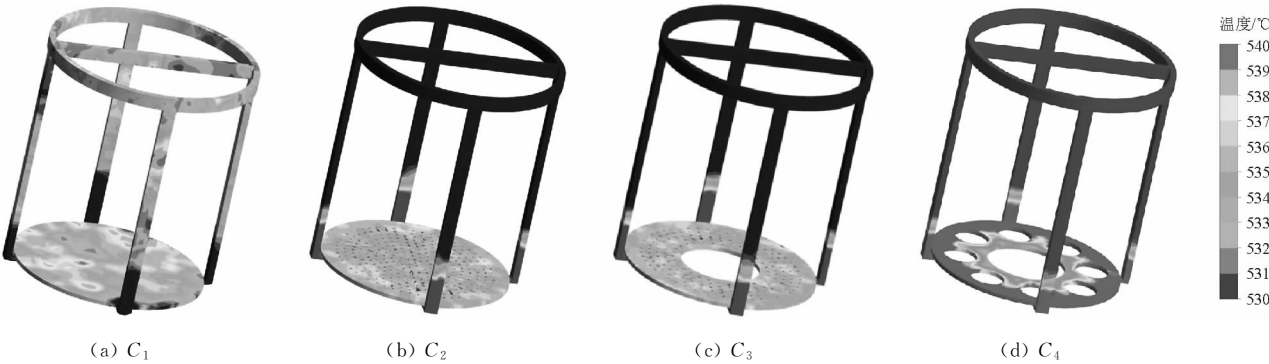


图 3 料架表面温度云图

Fig.3 Temperature nephogram of rack surface

表 1 各方案料架表面温度计算结果

Tab.1 Numerical results of rack surface temperature in various cases

方案	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\min}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ave}}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\frac{\Delta T}{T_{\max}+T_{\min}}/\%$
C_1	541.549	488.984	533.420	52.565	5.10
C_2	574.132	518.129	530.792	56.003	5.13
C_3	574.659	517.941	530.337	56.718	5.19
C_4	573.813	520.510	532.834	53.303	4.87

可以看出, $C_1 \sim C_4$ 中出口流体的速度均较大, 这是因为气体从入口流入后截面收缩, 根据质量守恒定理, 横截面积越小, 流速越大。

综上可知, 平板料架的装配方式会造成料架表面的温度分布不均匀, C_4 (大孔 + 中孔) 料架温度分布最均匀, 流场的涡流现象减少, 气流与料架表面的热交换更充分。

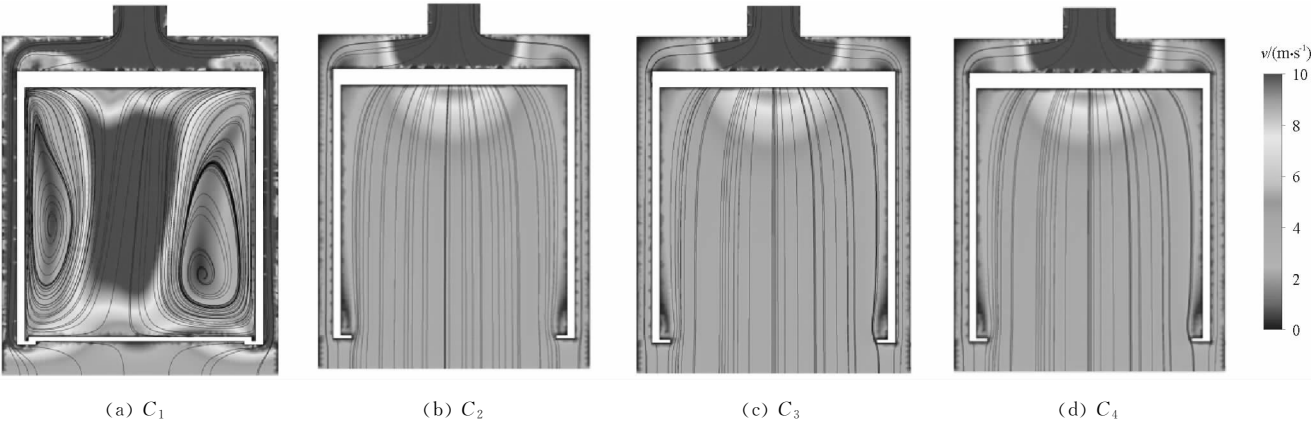


图 4 $Z=0$ 截面的流场流线图

Fig.4 Flow chart of cross section flow field with $Z=0$

2.2 热处理炉装载铸件后炉内的温度场及流场模拟

按照 $C_1 \sim C_4$ 的料架装配方式, 在料架上装配铸件和铸件工装, 铸件和工装的中心轴均与料架的中心轴保持一致。为了节约计算量, 忽略铸件和工装不重要的几何特征, 计算模型见图 5。

图 6 为料架工装的表面温度云图。可以看出, C_1 (平板) 料架和铸件工装表面温度分布最不均匀, 平板表面的温度较低。 C_2 (小孔) 和 C_3 (大孔 + 小孔) 表面温度分布差别不大, 温度较均匀。

进一步分析铸件表面温度, 见图 7, 表面温度计算结果见表 2。由图 7 可以看出, $C_1 \sim C_3$ 的最高温度都位于铸件顶部, 铸件上层温度比下层温度高。而 C_4 (大孔 + 中孔) 的最高温度出现在铸件底部, 铸件下层温度明显高于上层温度。造成这种差异的主要原因在于不

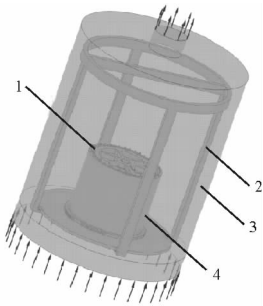


图 5 铸件热处理装配图

Fig.5 Assembling drawing of castings for heat treatment

1. 铸件 2. 料架 3. 空气 4. 铸件工装

同料架形式下, 炉内气体与铸件之间的对流传热情况不同。 C_3 表面的温度最高且最均匀, 铸件承受的热应力最小。结合表 2 可知, C_3 (大孔 + 小孔) 装配形式下铸件表面的温度最均匀, C_1 (平板) 装配形式下铸件表面

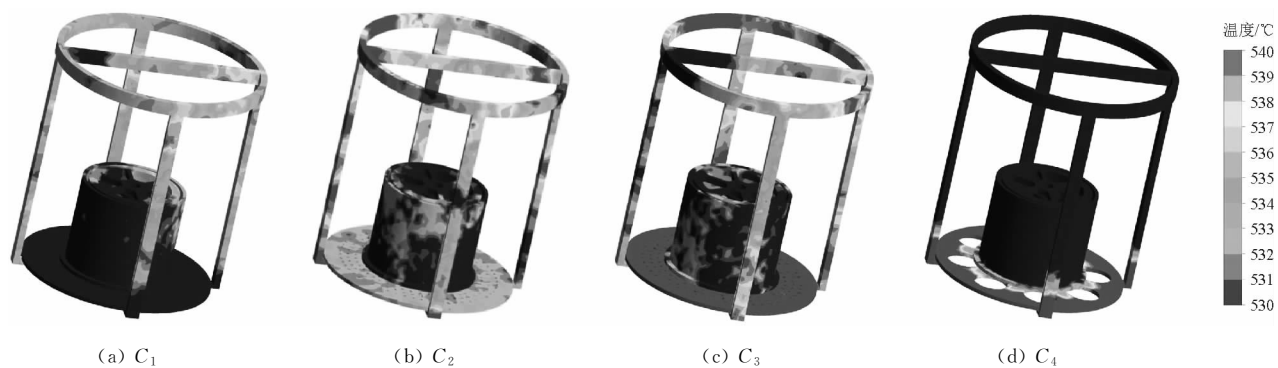


图 6 料架工装表面温度云图

Fig.6 Temperature nephogram of rack tooling surface

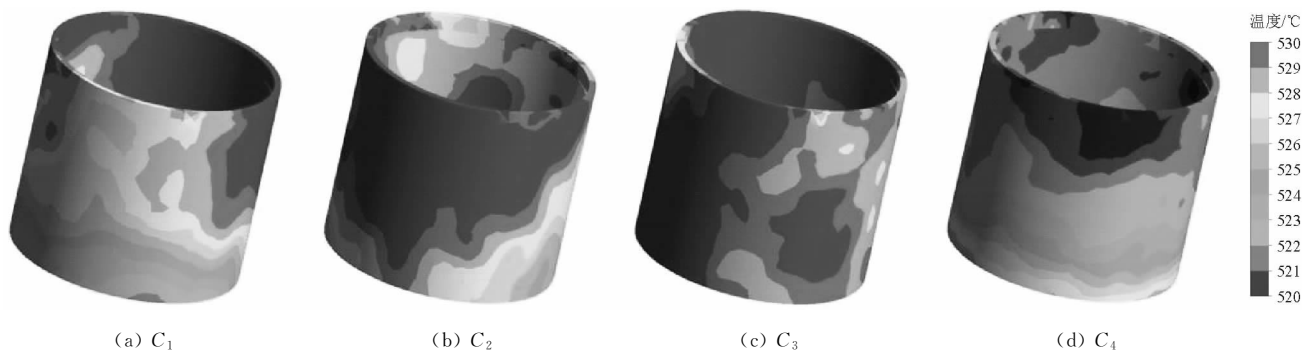


图 7 铸件表面温度云图

Fig.7 Temperature nephogram of casting surface

表 2 各方案铸件表面温度计算结果

Tab.2 Numerical results of surface temperature of castings in various cases

方案	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\min}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$\frac{\Delta T}{T_{\max}+T_{\min}}/\%$
C_1	536.824	520.931	15.893	1.50
C_2	533.460	523.095	10.365	0.98
C_3	535.586	526.549	9.037	0.85
C_4	529.188	517.554	11.634	1.11

的温度均匀性最差。

图 8 为 $Z=0$ 截面的流场温度云图。可以看出, C_5 (平板) 的流场温度最不均匀, 在铸件和铸件工装附近的空气温度较低。 C_2 (小孔) 和 C_3 (大孔+小孔) 流场温度分布基本一致, C_3 在铸件和工装附近的气体温度更高。 C_4 (大孔+中孔) 流场温度的均匀性不如 C_2 和 C_3 , 铸件中心轴正上方位置的温度比其他方案更低, 这是因为 C_4 底板挖孔较多, 气体流动更加顺畅, 流速更快, 气流

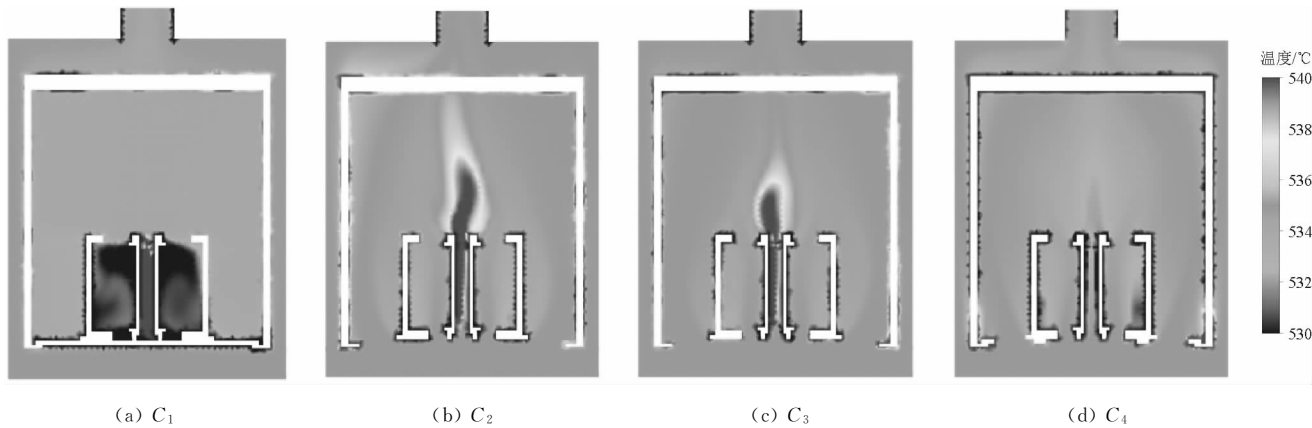


图 8 添加铸件及工装后 $Z=0$ 截面流场温度云图

Fig.8 Temperature nephogram of cross section flow field with $Z=0$

温度更低。

图 9 为 $Z=0$ 截面平面流线图。可以看出, 由于强烈的气流阻挡作用, 流场中存在大量的涡流现象, 使得

热处理炉内的流体温度分布不均匀, 从而导致铸件和工装表面的温度不均匀, C_1 (平板) 是 4 种方案中温度均匀性最差的。 C_2 (小孔) 和 C_3 (大孔+小孔) 流场基本一

致,气体在经过铸件和工装时流动比较均匀,不存在较大的速度梯度,使得铸件和工装与空气的对流传热比较均匀,热处理效果更好。 C_4 (大孔+中孔)装配形式下,由于料架底板对气流的阻碍作用较弱,使得气流在通过

底板时流速较快。当气流流过铸件和铸件工装内部空间时,内部气体的速度存在较大的梯度,使得 C_4 中铸件和工装处于不均匀的温度环境中,造成铸件和工装温度均匀性较差。

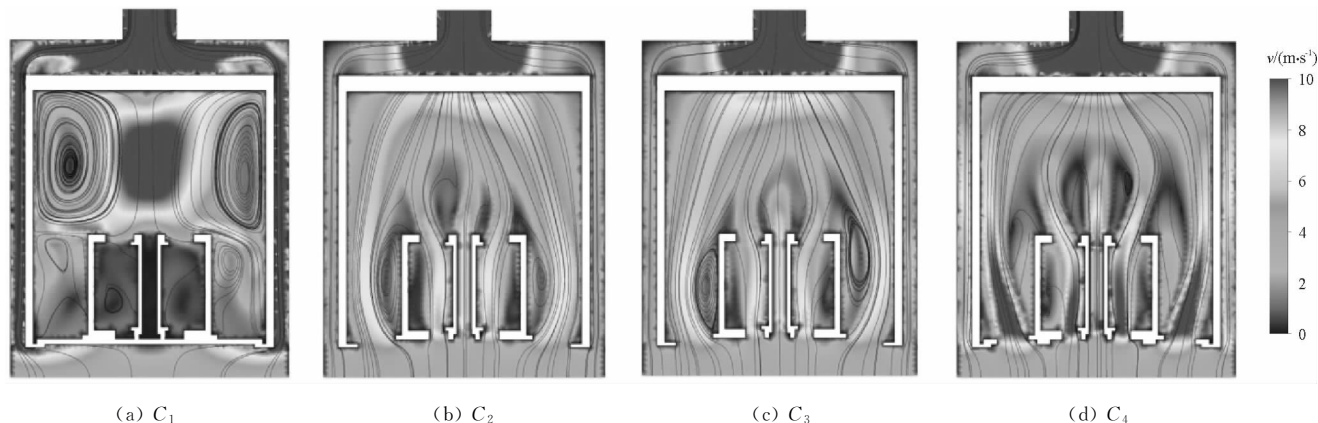


图 9 $Z=0$ 截面流场流线图

Fig.9 Flow chart of cross section flow field with $Z=0$

综上, C_3 (大孔+小孔)的流场温度均匀性最好,铸件的温度均匀性最佳,是最优的热处理方案。 C_1 (平板)的流场温度最不均匀且存在大量涡流现象,铸件的温度均匀性最差。

2.3 实际热处理炉内温度场验证

通过数值模拟表明,使用 $\phi 30$ mm 小孔+ $\phi 600$ mm 大孔的底板对铸件进行热处理时,热处理炉的炉温均匀性最好,因此,在铸件热处理时使用这种形式的底板进行装载,周围设置 8 个测温点。在固溶处理过程中,测温点记录到的最高温度为 543.3 $^{\circ}\text{C}$,最低温度为 538.6 $^{\circ}\text{C}$,铸件周围的温度场较为均匀,在 540 ± 5 $^{\circ}\text{C}$ 范围内。

综上所述,通过数值模拟能够获得铸件热处理过程中的表面温度场,有效指导铸件装载方式的优化,提高铸件表面温度均匀性,从而降低热处理变形程度。

3 结 论

数值模拟可有效预测铝合金铸件热处理过程中的表面温度场,热处理料架对铸件表面温度场具有重要影响。针对铝合金舱体铸件,采用 $\phi 30$ mm 小孔+ $\phi 600$ mm 大孔的料架底板,铸件表面温度均匀性最好,且实际结果与仿真结果一致。

参 考 文 献

- [1] 李中权,肖旅,李宝辉,等. 航天先进轻合金材料及成形技术研究综述[J].上海航天,2019,36(2):9-21.
- [2] 周林,曾捷,李钰,等. 空间环境铝合金板结构热属性光纤监测技术

研究[J].上海航天,2017,34(3):108-115.

- [3] 肖冰,康凤,胡传凯,等. 国外轻质结构材料在国防工业中的应用[J]. 兵器材料科学与工程,2011,34(1):94-97.
- [4] 张李强,王婧,骆晓萌,等. 热处理过程流场-温度场-组织场-应力场耦合模拟研究[J]. 金属热处理,2017,42(8):181-186.
- [5] 潘健生,王婧,顾剑锋. 热处理数值模拟进展之一——扩展求解域热处理数值模拟[J]. 金属热处理,2012,37(1):7-13.

(编辑:栗万仲)

万丰将为中国航发集团提供铝 铸件后处理自动化产线

2月18日,由中国航发集团组织的铝合金铸件清理自动化生产线评标工作完成,经专家组的认真评选和审核,万丰科技凭借优秀的综合实力、技术水平、行业经验以及良好的品牌口碑获得认可,成功中标。意味着万丰“智”造将配套服务于中国顶尖的航空发动机产品升级。

此次,万丰科技提供的生产线项目主要用于航空零部件产品后处理多道工序的全自动化生产。项目针对客户要求 and 产品特点提供了创新性设计,生产布局实现空间利用的最优化,生产流程的自动化,做到所有设备高度集成,实现智能、安全、高效、节能、降噪等特点,同时通过 3D 视觉+柔性化生产线技术,实现多品种、批量生产,全流程无人化、柔性化、数字化。

(摘自压铸周刊)