

基于相似理论和模型试验的 K418B 大型薄壁件的成形及品质

丁 雪¹ 吴东辉^{1,2}

[1.航天海鹰(哈尔滨)钛业有限公司; 2.哈尔滨工业大学金属精密热加工国家级重点实验室]

摘 要 为实现利用比例模型来预测高温合金大型薄壁件的成形过程及内部品质的目的,采用物理相似的方法设计了比例模型并验证了其有效性。采用数值模拟和熔模铸造试验研究了高温合金大型薄壁件的流动性、凝固过程和内部品质。结果表明,比例模型可以充分反映原高温合金大型薄壁件的成形过程及内部品质,高温合金大型薄壁构件中筋条和无缝隙浇道连接的光滑薄壁处的充填凝固特性相同,且充填凝固速度均大于凸台的充填凝固速度,但充填凝固趋势相同。这表明相似理论与数值模拟及实际试验相结合可有效指导高温合金大型薄壁铸件的熔模铸造生产,有效降低其研制成本、提高成品率。

关键词 镍基高温合金;熔模铸造;物理相似;数值模拟;大型薄壁件

中图分类号 TG249.5;O303

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.03.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Forming and Quality of K418B Large Thin-walled Parts Based on Similarity Theory and Model Test

Ding Xue¹, Wu Donghui^{1,2}

[1.Aerospace HIWING(Harbin) Titanium Industry Co., Ltd.;

2.National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology]

Abstract: In order to utilize the scale model to predict the forming process and internal quality of large thin-walled parts, a scale model was designed based on similarity theory and the effectiveness was verified. Numerical simulation and investment casting experiments were conducted to investigate the filling, solidification, hot tendency and internal quality of large thin-walled superalloy parts. The results indicate that the scale model can fully reflect the forming process and internal quality of the original large thin-walled superalloy parts, where the filling and solidification properties of the smooth thin wall connected by steel bar and seamless gate are identical. Moreover, the filling and solidification velocity is higher than that of the convex, while the trend is common. Therefore, it is proved that the combination of similarity theory, numerical simulation and actual experiment can effectively guide the production of large thin-walled superalloy parts, effectively reducing the development costs and improving yield rate.

Key Words: Nickel-based Superalloy, Investment Casting, Physical Similarity, Numerical Simulation, Large Thin-walled Parts

收稿日期:2021-08-23;**修改稿收到日期:**2021-11-23

基金项目:装备预研重点实验室基金资助项目(6142909200105)

第一作者简介:丁雪,女,1997 年出生,助理工程师,哈尔滨(150029),E-mail:19s109246@stu.hit.edu.cn

通信作者:吴东辉,男,1988 年出生,高级工程师,哈尔滨(150029),E-mail:wudonghui56@163.com

引用格式:丁雪,吴东辉. 基于相似理论和模型试验的 K418B 大型薄壁件的成形及品质[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(3):384-390.

DING X, WU D H. Forming and quality of K418B large thin-walled parts based on similarity theory and model test[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(3):384-390.

[17] 石柏军,何灿荣,何涛. 基于机械变形的钣金件连接过程实时监控方法的研究和应用[J]. 机床与液压,2009,37(5):34-37.

[18] TAN Y M, HAHN Q, DU F N. Process monitoring method with window technique for clinch joining[J]. ISIJ International, 2005, 45: 723-729.

[19] BROWN R A. Electrical resistivity of dislocations in metals[J]. Journal of Physics: Metal Physics, 1977(7): 1 283-1 295.

[20] KAROLIK A S, LUHVICH A A. Calculation of electrical resis-

tivity produced by dislocations and grain boundaries in metals[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 1994(6): 873-886.

[21] DOMINGUEZ D, SEVOSTIANOV I. Cross-property connection between work-hardening coefficient and electrical resistivity of stainless steel during plastic deformation[J]. International Journal of Fracture, 2011, 167: 281-287.

(编辑:栗万仲)

随着我国航空航天、船舶领域的高速发展,大型化、轻量化、复杂化的高温合金构件应用日益广泛。此外,减轻部件的质量、降低其制造成本、缩短其制造周期等也是研究的重点^[1~3]。基于此,大型薄壁高温合金结构件因其优良的散热能力和质量轻等特点,被广泛用于航空航天工程、海洋工程、汽车制造领域和其他工业领域^[4~7]。但是由于精密铸造的高温合金薄壁铸件在凝固过程中容易产生冷隔和缩孔、缩松等缺陷^[8~10],并且高温合金大型薄壁构件形状尺寸和品质的要求各不相同^[11],因此,探究高温合金大型薄壁构件的成形规律和内部品质具有重要的意义。

物理相似在满足计算精度的要求下,可以减少单元数目,实现以小型单元模拟大型构件性能的目的^[12,13]。赵君临等^[14]利用相似理论对车辆底部的防护进行了仿真模拟,在满足精度的情况下有效提高了仿真效率;云忠等^[15]利用相似准则,设计模型血泵的具体参数,在保证精度和试验效果的前提下,有效地节省了制造成本。WAN J 等^[16]基于相似理论和相似试验方法,研究了强制通风条件下不同粉尘源的综采掘进工作、面粉尘浓度分布及粉尘扩散特性。结果表明,风速和粉尘浓度的相似试验结果与模拟结果之间的误差较小。SHI Y J 等^[17]利用尺寸理论推导了相似条件,进行了真实板块和类似板块的数值模拟,结果表明,温度和变形场具有良好的相似性。即满足相似条件的情况下,可以通过分析小尺寸板来预测大尺寸板的温度场和变形行为。因此,对实际大板料的成形,减少工艺费用和加工时间等具有积极意义。

虽然相似理论已被应用在诸多方面,但是针对镍基高温合金大型薄壁件的相似理论研究报道较少。因此,本课题以 K418B 高温合金为研究对象,根据相似理论设计大型薄壁件,利用熔模铸造试验与数字化模拟技术相结合,开展铸造成形大型薄壁件的成形特性及内部品质研究,旨在为其应用提供参考。

1 试验方法

1.1 试验方法

设计高温合金大型薄壁件及浇注系统,利用数值模拟对铸件及浇注系统的充型凝固过程进行模拟,铸件在真空下进行浇注,浇注温度为 1 500 ℃,浇注速度为 0.15 m/s,粘接剂选用硅溶胶,型壳厚度为 25 mm,预热温度为 950 ℃,铸件与型壳间的界面传热系数为 900 W/(m²·℃),扣箱温度为 200 ℃,扣箱辐射率设为 0.75。接着利用相似理论设计比例模型,模拟模型中铸件特征点的温度,通过拟合方式获得不同位置铸件温度

随浇注温度变化的定量关系,得到比例模型合适的浇注温度;随后模拟分析该浇注温度下比例模型的充型凝固过程以及不同特征部位的内部品质等;最后进行比例模型的实际重力浇注试验。浇注完成后,对成形铸件的内部品质进行检测,和比例模型数值模拟结果相比较,以进行验证。

1.2 相似准则的确定

为保证比例模型能够表现出高温合金大型薄壁件的主要流动过程、凝固特性以及内部品质,需在比例模型和高温合金大型薄壁件之间建立几何相似、运动相似和动力相似 3 个相似条件,保证比例模型和高温合金大型薄壁件在对应点上的各个物理量具有一定的比例关系。高温合金大型薄壁件与比例模型中各相对应物理量之间的比值称为比例尺,用 λ 表示,通常简称为比尺。

铸件的充型过程可以看成是粘性不可压缩的流体流动的过程,从而以相似理论为基础结合浇注试验,得出一套完整的浇注过程中流体流动的性能参数。粘性不可压缩流体流动参量与特征尺寸(D)、重力加速度(g)、粘度(μ)、流体密度(ρ)、压差(P)、平均流速(v)表述形式为:

$$f(D, g, \mu, \rho, P, v) = 0 \quad (1)$$

依据相似第三准则可知,可以将描述这些现象的函数关系式转变为 3 个相似准则之间的关系式。用 π 来表示这些无量纲量:

$$\pi = v^a L^b \rho^c \mu^d g^e \rho^f \quad (2)$$

利用基本量纲法,邹鹑鸣^[18]推导出了 3 个独立的相似准则,即弗汝德准则、欧拉准则和雷诺准则,而在重力铸造充型过程中,流体主要受到重力和粘滞力的作用,所以应当同时满足雷诺准则和弗汝德准则,而忽略次要的力,实现局部相似,则得出比例模型浇注过程中所需遵照的准则为:

$$\begin{cases} \lambda_v^2 \cdot \lambda_L^{-1} = 1 \\ \lambda_L \cdot \lambda_v^{-1} \cdot \lambda_\mu = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, λ_v 为速度比尺; λ_L 为长度比尺; λ_μ 为粘度比尺。

2 有限元模型建立

2.1 大型薄壁件有限元模型建立

图 1 为高温合金大型薄壁件有限元模型。铸件高为 1 500 mm,内径为 1 500 mm,壁厚为 5 mm,铸件中分布着纵横交错的筋条,筋条宽为 10 mm,厚为 20 mm。此外,铸件内部还分布着 6 个高 20 mm 的凸台,分别位于铸件的上、中、下位置并呈对称态分布。由于缝隙式浇注系统充型平稳,产生的缩孔数量少。因此对该大型薄壁件设计了缝隙式浇注系统,见图 1。

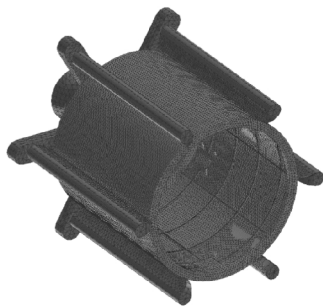


图 1 高温合金大型薄壁件有限元模型
Fig.1 Finite element model of the large thin-walled superalloy parts

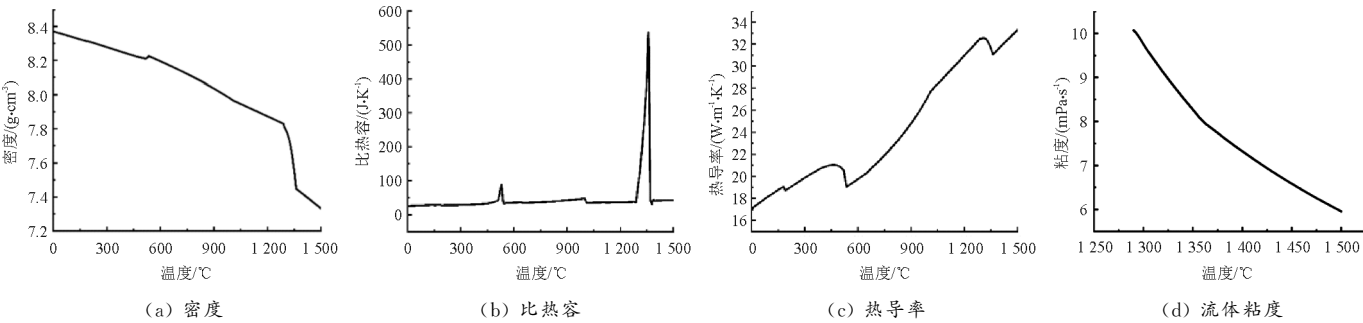


图 2 K418B 的物性参数变化曲线
Fig.2 Variation curve of physical parameter for K418B

因不同材料的运动粘度比尺不同,而试验中比例模型与高温合金大型薄壁件选用同种材料,设定运动粘度比尺 $\lambda_v=1$ 。依据 $\lambda_v=1$ 可从式(3)中计算得出, $\lambda_L=1$ 。

为保证长度比尺 $\lambda_L=1$,需要保证比例模型的特征尺寸与高温合金大型薄壁件的特征尺寸相同,即比例为1:1。薄壁圆筒件的特征尺寸为壁厚,所以保证长度比尺 $\lambda_L=1$,只需要保证高温合金大型薄壁件中的壁厚、筋条厚及凸台厚度与比例模型中对应的特征尺寸的比例为1:1即可,而其他尺寸不影响相似准则的应用。因此原高温合金大型薄壁件在高度方向和直径方向的非特征尺寸可以任意缩小比例,而壁厚、筋条厚及凸台厚度保持与原高温合金大型薄壁件中的一致,这样就保证了比例模型浇注过程中所需遵照的准则式(3)中的 $\lambda_L=1$ 。考虑到利用相似理论的目的是为了节省材料、缩短生产周期等,将比例模型的高度及直径取原高温合金大型薄壁件高度及直径的1/5,而壁厚、筋条厚及凸台厚度保持不变,所以经相似准则推导后绘制的比例模型见图3。

经相似准则推导后得到的比例模型中,整个比例模型高度由1500 mm缩小为300 mm,直径也由1500 mm缩小为300 mm。壁厚5 mm不变,凸台厚度与筋条厚度依旧为20 mm,与原型凸台、筋条厚度一致。各筋条间距离由原来的340 mm变为68 mm,凸台大小

2.2 比例模型的有限元模型建立

比例模型和高温合金大型薄壁件材料均为 K418B 镍基高温合金,其主要化学成分见表 1。

表 1 K418B 镍基铸造高温合金的主要化学成分
Tab.1 The main chemical composition of K418B

nickel-based casting superalloy												%
w_B												
C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	B	Nb	Al	Ti	Zr	Ni	
0.044	0.5	0.25	12.4	4.35	0.3	0.11	2.10	5.83	0.79	0.09	余量	

利用 K418B 合金的主要化学成分计算出其物性参数随温度变化的曲线,见图 2。



图 3 比例模型的有限元模型
Fig.3 Finite element model of the scale model

变为原来的 1/5,即方形凸台边长从原高温合金大型薄壁件中的 200 mm 变为 40 mm,花形凸台内圆直径由原来的 190 mm 变为 38 mm。

2.3 拟合验证

根据已求出的比例模型与原高温合金大型薄壁件相似需要遵守的相似准则可知,为保证比例模型与原高温合金大型薄壁件相似,需要保证运动粘度比尺 $\lambda_v=1$,速度比尺 $\lambda_v=1$,长度比尺 $\lambda_L=1$ 。通过设计比例模型特征尺寸已保证长度比尺 $\lambda_L=1$,保证速度比尺为1只需要在数值模拟计算时设置流体流动速度相同即可,所以只需再保证运动粘度比尺 $\lambda_v=1$,即可遵循比例模型与原高温合金大型薄壁件的相似准则。其中运动粘度比尺 λ_v 与密度比尺 λ_ρ 和粘度系数比尺 λ_μ 具有如下关系:

$$\lambda_v = \lambda_\mu / \lambda_\rho \quad (4)$$

依据上式可知,若令 $\lambda_v = 1$,则 $\lambda_\rho = \lambda_\mu$,又因比例模型中所用材料和实际浇注材料一致,因此可令 $\lambda_\rho = \lambda_\mu = 1$ 。同种材料下,密度和粘度只随温度的变化而变化,而金属液在充型过程中,温度随时间不断变化,因此无法直接在数值模拟铸造软件中直接设置 $\lambda_v = 1$,而需要保证比例模型与原高温合金大型薄壁件的温度场相似才可保证 $\lambda_v = 1$ 。

但浇注过程中铸件温度因随时间不断变化,所以无法直接设定铸件在某一时刻的温度,为保证比例模型和原高温合金大型薄壁件的温度场分布一致,只能通过设定合适的浇注温度 T_0 来保证比例模型的温度场分布和原高温合金大型薄壁件在浇注温度为 1 500 °C 时的温度场分布近似一致。

为计算出合适的比例模型浇注温度,通过模拟多个不同浇注温度下比例模型的温度场分布,利用拟合方式,求出浇注温度-特征点位置-特征点温度三者之间的函数关系,再将原高温合金大型薄壁件已在 1 500 °C 浇注温度下计算得出的相对应比例模型的特征点温度,代入到已求出的函数关系式中,通过拟合公式计算,即可得到合适的比例模型浇注温度。

2.3.1 确定拟合方程

首先确定比例模型上所选特征点的位置,为保证所选特征点的温度具有代表性,分别选择了比例模型的上花形凸台中心点 A、中方形凸台中心点 C、上花形凸台和中方形凸台中间处的筋条纵横交错点中心 B、下花形凸台中心点 E,以及下花形凸台和中方形凸台中间处的筋条纵横交错点中心 D,具体选点位置见图 4。以远离浇口的比例模型底部为水平线,标定 A、B、C、D、E 的位置高度分别为 248、180、146、112 和 44 mm。

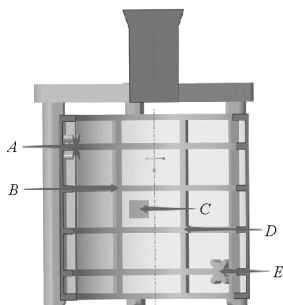


图 4 比例模型特征点位置

Fig.4 Feature point position of the scale model

为探究不同浇注温度下铸件的温度场分布,通过华铸 CAD 数值模拟软件分别模拟了比例模型在浇注温度分别为 1 460、1 470、1 480、1 490、1 500 °C 下的充型凝固过程,得到了不同浇注温度下整个比例模型在铸件充型结束时的温度场分布。通过选择 A、B、C、D、E 位

置的节点可得到相对应的温度,见表 2。

表 2 不同浇注温度下比例模型的特征点温度

浇注温度/°C	A	B	C	D	E
1 460	1 437.84	1 417.63	1 421.13	1 405.83	1 407.57
1 470	1 448.75	1 428.06	1 430.15	1 413.26	1 415.86
1 480	1 451.18	1 432.95	1 436.28	1 420.89	1 424.62
1 490	1 469.96	1 445.66	1 447.21	1 430.18	1 433.85
1 500	1 480.18	1 461.37	1 464.14	1 443.29	1 445.57

通过表 2 中不同浇注温度下比例模型的特征点温度数据,得到的比例模型温度场分布映面曲线见图 5。可以看出,浇注温度越高,铸件整体温度越高。图 6 为比例模型温度场分布的等高线图。可以看出,由于比例模型的充填过程为逐层充填,因此高温合金大型薄壁件下部温度始终低于高温合金大型薄壁件上部温度,而与缝隙浇道相连接处的凸台位置温度略高于其上部的筋条交错处的温度。

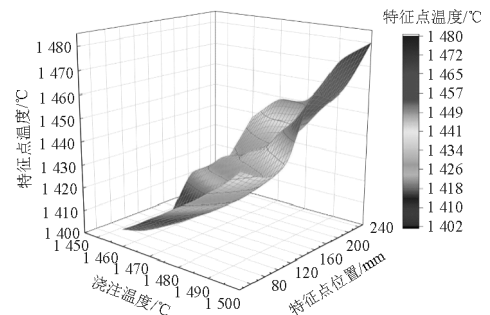


图 5 比例模型温度场分布的 3D 颜色映面曲线图

Fig.5 3D color mapping curve of temperature field distribution of the scale model

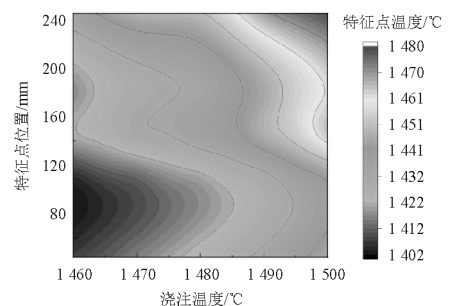


图 6 比例模型温度场分布的等高线图

Fig.6 Contour diagram of the temperature field distribution of the scale model

以上为直观的比例模型在不同浇注温度下高温合金大型薄壁件温度场分布情况。为得到确定的比例模型浇注温度,建立了比例模型浇注温度-铸件温度-比例模型特征点位置的函数关系,得到的拟合方程为:

$$z = -1\,059\,275 + 2\,487x - 1.691x^2 + 0.000\,383x^3 - 135\,601\ln(y) + 42\,928[\ln(y)]^2 - 6\,003[\ln(y)]^3 + 313.038[\ln(y)]^4 \quad (5)$$

2.3.2 确定比例模型浇注温度

通过数值模拟计算得到高温合金大型薄壁件在浇注温度为 1 500 ℃ 下的充型凝固过程,并从数值模拟计算结果中选取对应于比例模型的特征点及其特征点温度,表 3 是浇注温度为 1 500 ℃ 下不同位置的比例模型特征点温度。表中 A' 、 B' 、 C' 、 D' 、 E' 为原高温合金大型薄壁件中与比例模型特征点 A 、 B 、 C 、 D 、 E 相对应的各特征点,以远离浇口的高温合金大型薄壁件最底部为水平线,原高温合金大型薄壁件特征点 A' 、 B' 、 C' 、 D' 、 E' 的坐标位置分别为 1 240、900、730、560 和 220 mm。

表 3 原高温合金大型薄壁件特征点温度

Tab.3 Characteristic point temperature of initial large

thin-walled superalloy parts					℃
特征点位置					
<i>A'</i>	<i>B'</i>	<i>C'</i>	<i>D'</i>	<i>E'</i>	
1 435.72	1 416.03	1 417.35	1 400.24	1 403.04	

为保证高温合金大型薄壁件与比例模型的温度场分布相似,将表 3 的温度和对应于原高温合金大型薄壁件中特征点位置的比例模型的特征点距离代入式(5)中,得到当原高温合金大型薄壁件的温度场作用在比例模型上时,对应的浇注温度见表 4。

表 4 比例模型浇注温度求解值

Tab.4 Pouring temperature solution value of scale model

特征点位置	特征点温度	比例模型的浇注温度
A	1 435.72	1 455.323
B	1 416.03	1 456.718
C	1 417.35	1 454.609
D	1 400.24	1 456.889
E	1 403.04	1 456.461

通过表 4 可以看出,已求解出的各特征点温度对应的浇注温度略有差异,选择利用平均数法来确定最终的比例模型浇注温度,将表 4 中的 5 个浇注温度取平均值,得出比例模型浇注温度为 1 456 ℃。

3 结果分析与讨论

在浇注温度为 1 456 ℃,浇注速度为 0.15 m/s,及型壳预热温度为 950 ℃ 下,比例模型可以有效反映高温合金大型薄壁铸件的成形过程和内部品质,因此对比例模型的浇注过程进行数值模拟,有效分析比例模型的成形特性及内部品质。

3.1 充型模拟结果分析

图 7 为缝隙式浇注系统下比例模型的充填时间。可以看出,金属液由浇口进入横浇道内,流经缝隙浇道,在差压作用下金属液沿着铸件逐层向上充填,直至 3.220 s 时,金属液液面充满比例模型,充填状态极其平

稳,金属液流动稳定,充填效果好。为探究铸件不同部位的充填特性,选取比例模型的中部凸台及其周围部件(见图 7 中白色方框)的充型模拟结果进行分析,可知筋条和光滑薄壁处的充填过程完全一致,为竖直向上的逐层充填状态。而凸台位置是呈 135°逐层向上充填,可能是由于缝隙浇道的金属液不断进入凸台中,与凸台中开始进入的金属液发生撞击聚集,形成了 135°的液面。除此之外,凸台位置充填所需时间长于其上部的光滑薄壁处和左侧同水平线的筋条处,其原因可能是由于金属液进入方形凸台后,截面积突然变大,金属液流速降低,从而导致凸台部位所需的充填时间较长。

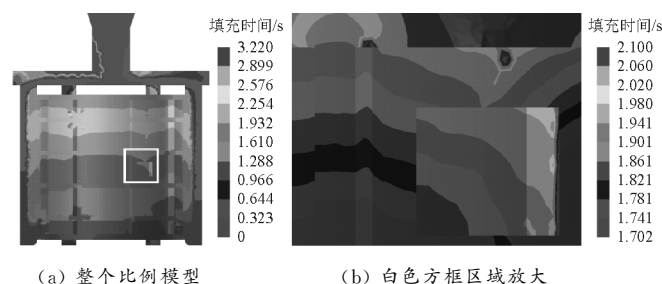


图 7 比例模型的填充时间

Fig.7 Filling time of scale model

3.2 凝固模拟结果分析

图 8 为缝隙式浇注系统下比例模型各个部位完全凝固时间示意图。可以看出,比例模型薄壁处最先凝固,随后交错筋条处凝固,凸台及凸台所在处的筋条最后凝固。由于缝隙浇道的持续液体补缩,导致缝隙浇道连接的部分没有独立的固液两相区,因此这部分不会产生缩松、缩孔缺陷。为研究凸台、筋条及光滑薄壁处各自的凝固特性,选取了比例模型的中部凸台及其周围部件(见图 8 白色方框)的凝固模拟结果进行分析,可以看出,凸台外围的薄壁处及筋条处均呈椭圆形逐圈凝固,凸台的水平方向为椭圆的短轴,竖直方向为椭圆的长轴。无论长轴、短轴方向,在距离凸台位置越远处,凝固所需时间越短。另外,可以发现,在长轴方向凝固所需

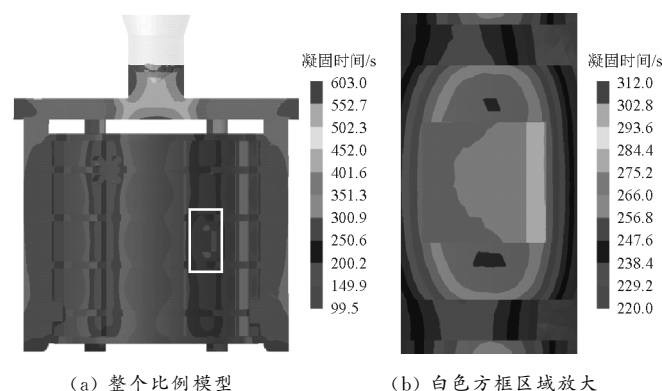


图 8 比例模型的凝固时间

Fig.8 Solidification time of scale model

时间普遍长于短轴方向,其原因应是该处与缝隙浇道相连,导致该处散热速率低。而筋条处虽然厚度与凸台相同,但是面积小于凸台的,散热性较好,平均凝固速度高。

3.3 内部品质分析

图 9 为经数值模拟计算得到的缝隙式浇注系统下比例模型的缩孔分布情况。经计算得比例模型的缩孔体积为 1.769 cm^3 ,缩孔率为 3.04% ,缩孔主要分布在筋条交界及光滑薄壁,薄壁处也有少量缩孔存在,且基本

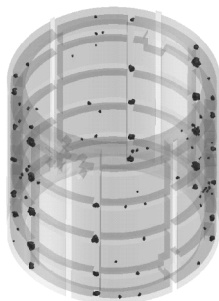


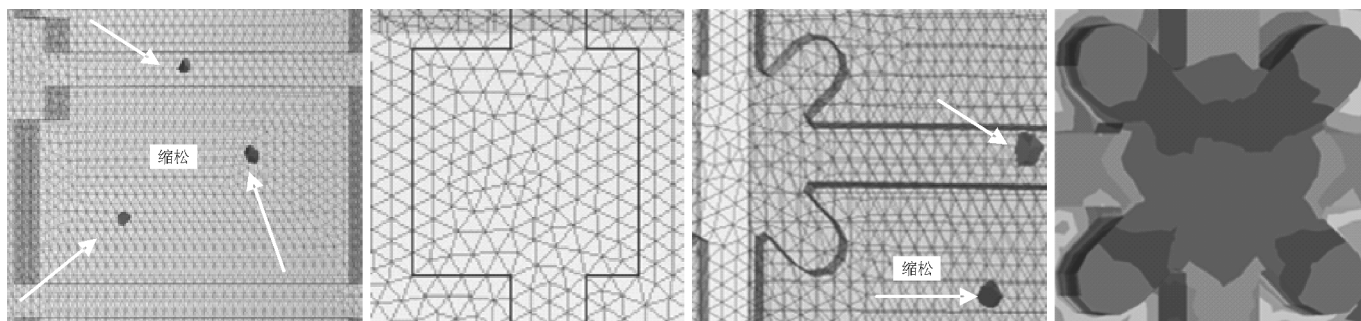
图 9 比例模型的缩孔分布

Fig.9 Distribution of shrinkage porosity in scale model

成对称分布。

以上是整个比例模型的缩孔分布情况,为验证该模拟结果的可靠性,针对实际浇注完成的比例模型铸件进行 X 射线探伤检测,并与数值模拟进行对比。

从图 9 看出缺陷的大体位置,为更加准确地确定缩孔位置,将比例模型和实际铸件中具有代表性的位置进行放大观察,结果见图 10 和图 11。从图 10a 可以看出,在铸件的光滑薄壁处存在小面积缩孔缺陷,实际缺陷位置与图 10a 模拟所得的缩孔分布位置相类似,均是发生在光滑薄壁处。从图 10b 和图 10c 看出,凸台位置没有缩孔缺陷,经实际探伤检测发现图 11a、图 11c 和图 11d 中的凸台均未见内部缺陷,只是在凸台周围的筋条上存在缩孔缺陷,见图 11c,且尺寸极小,缩孔直径为 0.05 mm ,与数值模拟结果相符合。从图 10d 可以发现,花形凸台四周存在应力集中现象,因此预测这些部位产生热裂倾向极大,为探究实际铸件该部位也是否存在热裂倾向,利用 X 射线探伤检测了与横纵筋条相连接的花形凸台,从图 11d 看出,在花形凸台与筋条连接的薄壁夹角处,产生了微裂纹,裂纹长度约为 0.3 mm 。



(a) 薄壁处

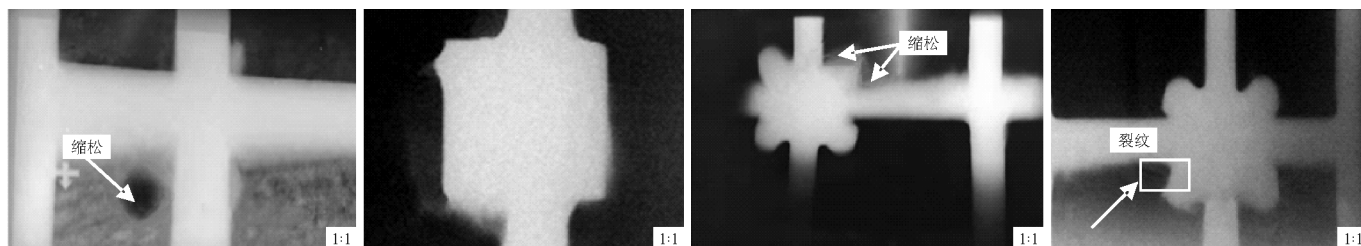
(b) 方形凸台

(c) 筋条

(d) 花形凸台

图 10 铸件不同部位的模拟缺陷分布

Fig.10 Simulated defect distribution in different locations of casting



(a) 薄壁处

(b) 方形凸台

(c) 筋条

(d) 花形凸台

图 11 与模拟缺陷对应的实际缺陷分布

Fig.11 Distribution of actual defects corresponding to the simulated defects

4 结 论

(1)利用相似理论确定了比例模型和原高温合金大型薄壁件之间的相似准则,即运动粘度比尺 $\lambda_v = 1$,长度比尺 $\lambda_L = 1$,速度比尺 $\lambda_v = 1$ 。

(2)利用拟合方式得到了比例模型中浇注温度-铸件温度-特征点位置的函数关系,确定了比例模型的浇注温度应为 $1456 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在该浇注温度下比例模型的模拟计算结果可以充分反映原高温合金大型薄壁件的成形过程及内部质量。

(3)高温合金大型薄壁件中筋条和无缝隙浇道连接的光滑薄壁处的充填凝固特性相同,且充填凝固速度均大于凸台的充填凝固速度,但充填凝固趋势相同。

参 考 文 献

- [1] 石照夏,颜晓峰,裴丙红,等.一种新型 Fe-Ni-Cr 基高温合金组织特征及平衡相析出热力学研究[J].稀有金属材料与工程,2016,45(6):1 539-1 544.
- [2] ABRAMOWICZ W. Thin-walled structures as impact energy absorbers[J]. Thin-walled Structures, 2003, 41(2-3): 91-107.
- [3] 杜金辉,吕旭东,董建新,等.国内变形高温合金研制进展[J].金属学报,2019,55(9):1 115-1 132.
- [4] YIN H F, XIAO Y Y, WEN G L, et al. Crushing analysis and multi-objective optimization design for bionic thin-walled structure [J]. Materials & Design, 2015, 87: 825-834.
- [5] 石照夏,董建新,张麦仓.K418 合金显微组织及其增压器涡轮叶片热裂的研究[J].稀有金属材料与工程,2012,41(11):1 935-1 939.
- [6] 谢君,于金江,孙晓峰,等. K416B 镍基铸造高温合金的 700 ℃ 高周疲劳行为[J].金属学报,2016,52(3): 257-263.
- [7] 杨成,王海强,肖旋. GH2107 高温合金力学性能的研究[J].沈阳理工大学学报,2016,35(1): 45-49, 62.
- [8] 余志文,李发国,张佼,等.高温合金大型薄壁铸件反重力铸造技术进展[J].特种铸造及有色合金,2012,32(12): 1 103-1 107.
- [9] 李晨希,王宏,李革,等.挤压铸造大高径比铸件的凝固特性和组织[J].特种铸造及有色合金,2006,26(11): 713-715, 677.
- [10] 林小瑛,翁薇,卢月美,等.移动磁场对铝合金 E 型铸件充型能力

的影响[J].福州大学学报,2007,35(4): 566-569.

- [11] SAMI E A, FARIS T, AHMED H, et al. Collapse behavior of thin-walled corrugated tapered tubes under oblique impact [J]. Thin-walled Structures, 2018, 122: 510-528.
- [12] TONG X, WANGZ R. A modeling method for predicting the concentration of indoor carbon dioxide leakage and dispersion based on similarity theory [J]. Energy and Buildings, 2017, 151(7): 585-591.
- [13] WANG L X, ZUO X S, LIU H L, et al. Flying qualities evaluation criteria design for scaled-model aircraft based on similarity theory [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 90: 209-221.
- [14] 赵君临,王显会,张鑫磊,等.基于相似理论的车身底部防护仿真分析研究[J].科学技术与工程,2017,17(5): 208-212.
- [15] 云忠,谭建平,彭俊.基于相似理论的实验血泵设计[J].机械工程与自动化,2006(4): 65-67.
- [16] WAN J, XUE X Y, WEN Z H, et al. Applying the similarity theory to model dust dispersion during coal-mine tunneling [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 148: 415-417.
- [17] SHI Y J, SHE N H, YAO Z Q, et al. Application of similarity theory in the laser forming process [J]. Computational Materials Science, 2006, 37(3): 323-327.
- [18] 邹鹤鸣.低差压铸造型过程水模拟实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2003.

(编辑:刘卫)

电动车结构轻量化共性关键技术研究与应用项目通过评价 其中含多项镁合金成果

科技部高技术研究发展中心在北京通过视频会议的方式,组织专家对中国汽车工程学会承担的“十三五”国家重点研发计划“新能源汽车”重点专项“电动汽车结构轻量化共性关键技术研究与应用”项目进行了综合绩效评价。

项目专家组根据负责人以及课题承担单位的汇报和答辩情况会议后,一致认为,“电动汽车结构轻量化共性关键技术研究与应用”项目围绕碳纤维复合材料、铝合金和镁合金、超高强度钢应用、全新架构电动汽车轻量化优化设计、异种材料连接、电动汽车轻量化数据库构建水平评价、标准制定方面开展了研究工作,取得了一系列研究成果,这些技术创新有助于我国电动汽车轻量化技术的发展和产品竞争力的提升,对重点专项目标的实现具有重要支撑作用。

电动汽车结构轻量化共性关键技术研究与应用”项目取得的具体成果如下:

- 1.建立了全新架构电动汽车结构-材料-性能一体化轻量化多目标优化设计方法,优化得到的铝合金底盘车架与碳纤维乘员舱组成车体耦合系统与原钢制全承载白车身相比,实现减重 33.1%。
- 2.突破碳纤维大型车身结构件集成设计技术,开发的地板总成比钢制地板总成减重 46.91%。
- 3.突破复杂薄壁压铸铝合金结构件集成设计技术,开发的减振器支座相对钢制总成实现减重 44.7%、刚度提升 $\geq 17.6\%$ 、铸件含气量 ≤ 2.37 mL/100 g,开发的锻造铝轮毂相对铸造轮毂实现减重 13.2%。
- 4.突破大型复杂薄壁耐蚀镁合金结构件集成设计技术,开发的 16 寸镁合金轮毂相对同尺寸铸造铝合金实现减重 29%,开发的镁合金前端构件相对钢制前端构件实现减重 66.98%,镁合金零部件裸材的腐蚀率低于 1.2 mm/a。
- 5.建立了超高强度钢延迟断裂和抗冷弯评价方法,在此基础上开发出了高强度、轻量化的车门防撞梁和 B 柱加强板。
- 6.建立了异种材料连接结构的数学模型、连接性能与疲劳失效的数值分析和评价方法。
- 7.建立了电动汽车整车、车身和典型零部件的轻量化评价方法,构建了电动汽车轻量化共性技术数据库,制定和发布了 19 项轻量化技术团体标准。

(摘自中国有色金属报)