

基于局部包络密度的铸件收缩尺寸的精确设计

黄西西 吴士平 戴贵鑫 王明杰 彭恒元 慕 岩 张晓东 陈瑞润
(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院)

摘 要 为了更精确地控制铸件收缩尺寸,提出了一种提高铸件尺寸精度的新设计方法。以 ZL205A 合金为研究对象,采用数值模拟方法模拟对比传统、整体包络密度以及局部包络密度 3 种铸件收缩率设计后的铸件。结果表明,基于局部包络密度设计方法对铸件收缩尺寸精度的控制效果最佳,是一种能够量化局部约束影响,提高铸件局部尺寸精度的设计方法,优于传统经验设计和整体包络密度设计方法。

关键词 数值模拟;局部包络密度;收缩尺寸;精确设计;尺寸控制

中图分类号 TP311;TG242

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.05.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Accurate Design of Casting Shrinkage Dimension Based on Local Envelope Density

Huang Xixi, Wu Shiping, Dai Guixin, Wang Mingjie, Peng Hengyuan,
Mu Yan, Zhang Xiaodong, Chen Ruirun

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology)

Abstract: In order to control the shrinkage dimension more accurately and improve the precision of casting dimension, and a new design method to improve the dimensional accuracy of casting was presented. ZL205A alloy was taken as the research object. The castings assigned with shrinkage rate of three kinds of castings including traditional, global envelopment density and local envelopment density by numerical simulation method, then, they were simulated and compared. The simulation results showed that the method based on local envelope density was the best for controlling the shrinkage dimension precision of casting, and it was a calculation scheme that can quantify the influence of local constraints and improve the precision of local dimension of casting. It was better than traditional experience and overall envelope density assignment.

Key Words: Numerical Simulation, Local Envelope Density, Shrinkage Dimension, Accurate Design, Size Control

为降低零件生产成本和机加工成本,企业在不断寻求各种新方法,近净成形技术^[1]的出现为此提供了有力手段,于是各种新方法、新技术^[2,3]层出不穷,其研究主要集中在控形和控性两方面,而铸件收缩尺寸的精确控制是近净成形精确控形领域不可缺少的一环。铸件收缩过程可能受到铸型、型芯等结构的机械阻碍,因此不同结构的铸件所受的约束(受阻)程度不同,结构复杂的铸件则更可能存在着约束程度不同的局部结构。因而需要新的设计方法提高对铸件收缩尺寸的控制能力,从而提高铸件尺寸精度。

在铸造工艺设计时多采用经验收缩率的方法对铸件进行设计,以保证铸件的成形尺寸满足要求。在设计过程中,通常根据不同材料选用不同的收缩率,获得更

加符合实际应用的铸件模型尺寸,从而获得符合技术要求的铸件^[4,5]。然而,CAMPBELL J^[6]率先提出利用铸件的包络密度来表征铸件凝固成形过程中受约束的程度,从而建立了包络密度与收缩率的经验曲线。包络密度的引入将不同铸型中铸件收缩时所受到的约束力量化,为收缩率的精确设计提供了可能。NAKAI A 等^[7]给出基于包络密度控制铸件收缩尺寸的现实依据,并提出基于包络密度对铸件收缩率的设计需向铸件各个部位、各个方向进一步发展^[8~10]。

由于经验收缩率的方法尺寸精度较低,而 CAMPBELL J^[6]所研究的包络密度与铸件收缩率的关系仅停留在对铸件整体的研究,并未涉及铸件局部包络密度的研究,致使该方法对铸件的尺寸精度提高效果并不明

收稿日期:2020-10-20;修改稿收到日期:2021-01-14
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52075123)
第一作者简介:黄西西,男,1993 年出生,博士研究生,哈尔滨(150001),E-mail:1799912097@qq.com
通信作者:吴士平,男,1963 年出生,教授,哈尔滨(150001),E-mail:wushiping_group@163.com
引用格式:黄西西,吴士平,戴贵鑫,等. 基于局部包络密度的铸件收缩尺寸的精确设计[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(5):543-546.
HUANG X X, WU S P, DAI G X, et al. Accurate design of casting shrinkage dimension based on local envelope density[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5):543-546.

显。因此,本课题以 ZL205A 合金为研究对象,将基于 CAMPBELL J 的包络密度对铸件尺寸控制的设计理念,进一步应用于探究铸件局部包络密度对成形尺寸精度控制的效果,对比传统经验设计、整体包络设计以及局部包络设计 3 种方案对铸件尺寸的控制,获得最佳的铸件尺寸控制方案。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料及模型

以 ZL205A 铝合金为成形材料,采用数值模拟作为研究收缩的主要方法,研究铸件收缩尺寸的精确设计。ZL205A 合金的化学成分见表 1^[11,12],图 1 为 ZL205A 合金常见的热物性参数^[13]。

表 1 ZL205A 合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZL205A alloy %				
ω_B				
Cu	Mn	Ti	Cd	Al
4.6~5.5	0.3~0.5	0.15~0.35	0.15~0.25	余量

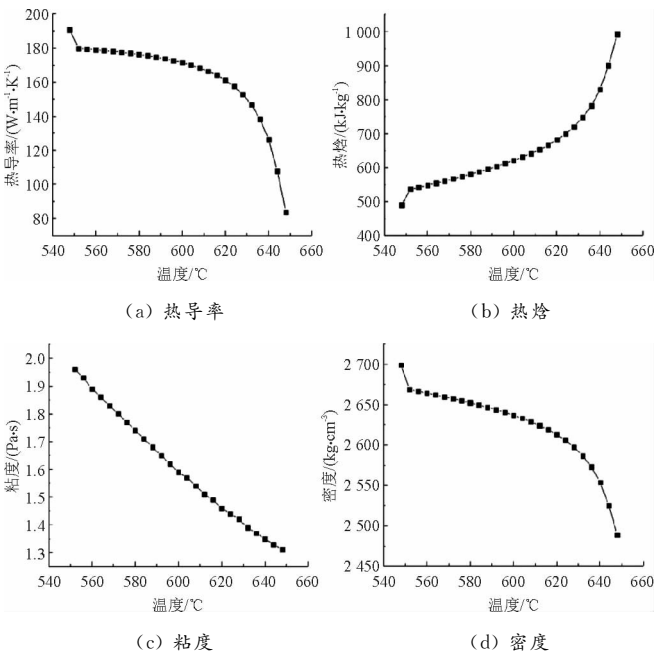


图 1 ZL205A 热物性参数

Fig.1 Thermal physical parameters of ZL205A alloy

1.2 铸件收缩尺寸的传统设计方法

铸件收缩率指铸件从线收缩开始温度(从液相中析出枝晶搭成骨架开始具有固态性质时的温度)冷却至室温过程中的相对线收缩量,其不仅与铸造合金的自身物理参数以及收缩温度区间相关,还与铸件的结构、受约束程度有关:

$$\epsilon_1 = \frac{l_0 - l_1}{l_1} \times 100\%$$

式中, ϵ_1 为铸件收缩率; l_0 为模样长度; l_1 为铸件长度。

对于大批量生产的铸件,一般在生产过程中实测铸件各部位的收缩率,反复修改木模,直至符合要求。对于单件、小批量生产的大型铸件,铸造收缩率的选取一般根据经验,铸造精度较低。传统设计方法的优点是计算方便,根据铸件实测尺寸,结合合金的收缩情况(受阻收缩和自由收缩),就可以设计铸件的尺寸,缺点是设计精度较低,特别是当收缩受阻的情况复杂时,决定铸件的收缩率比较困难。因此,探索定量的能衡量受阻收缩的精确设计方法,对提高铸件的尺寸精度至关重要。

1.3 基于整体包络密度的铸件收缩尺寸设计

包络密度的引入,将不同铸型中铸件收缩时所受到的约束力进行量化,为收缩率的精确设计提供了可能。包络密度是指铸件的质量与铸件所包含的包络体积之间的比值^[6]:

$$\rho' = \frac{m}{V'}$$

式中, ρ' 为包络密度; m 为铸件的质量; V' 为包络体积。

包络密度可以定量表征铸件收缩时受约束的程度,铸件收缩率则与铸件收缩时的约束程度紧密相关,因此铸件的收缩率与包络密度间存在函数关系,于是设计不同包络密度的结构(见图 2),并且对其进行数值模拟以及试验浇注,见图 3。

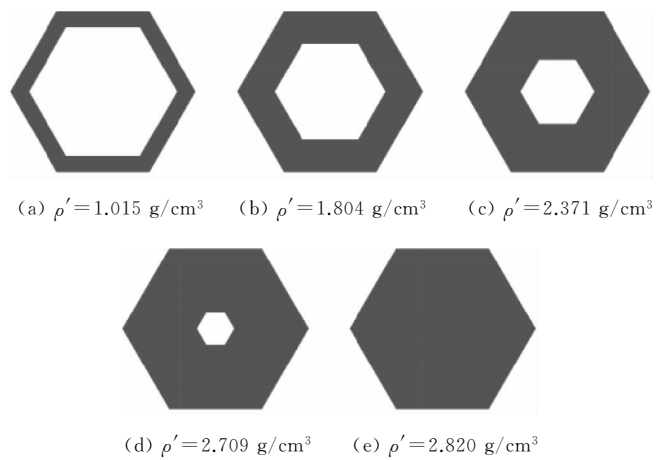


图 2 不同包络密度结构

Fig.2 Structure with different envelope densities

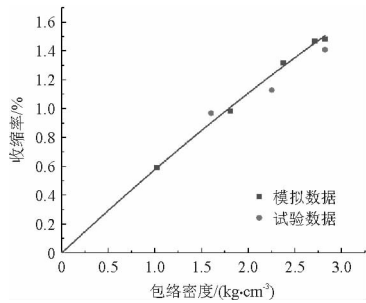


图 3 包络密度与收缩率的拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of envelope density and shrinkage rate

经拟合,得到其函数关系式如下:

$$\epsilon_1 = -0.025\rho'^2 + 0.609\rho' - 4 \times 10^{-4} \tag{3}$$

1.4 基于局部包络密度的铸件收缩尺寸的设计

用铸件的包络密度来表征铸件凝固成形过程中受约束的程度是一种全新的思想,其为量化受阻收缩提供了思路和方法。但是,铸件不同部位受阻情况不同,采用整体铸件的包络密度设计时仍给铸件赋予一个固定的收缩率,不能真实地反映出铸件的局部受阻收缩情况,本质上和传统收缩率设计类似。所以,针对铸件多数存在自由收缩和受阻收缩共存的收缩行为,提出一种基于局部包络密度的铸件收缩尺寸的设计方法。

研究表明,铸件的几何质心可被近似看作铸件的实际收缩中心^[14]。按收缩中心射线划分法划分试验模型的包络体,根据各划分区域的包络密度,即局部包络密度,结合包络密度与收缩率的曲线,给出该划分区域确定的收缩率。由于大多数铸件结构都存在自由收缩与受阻收缩的收缩行为,于是设计两端自由收缩,内部受阻收缩的铸件模型,见图 4。对其进行铸件局部包络体划分(见图 5),可以看出,将铸件的包络体划分 5 类模块,其中①和⑤为自由收缩,②③④为受阻收缩。为获得与目标尺寸相对应的铸件收缩率,还需将铸件局部模块的收缩率转换至所需尺寸区域的收缩率,转换公式如下:

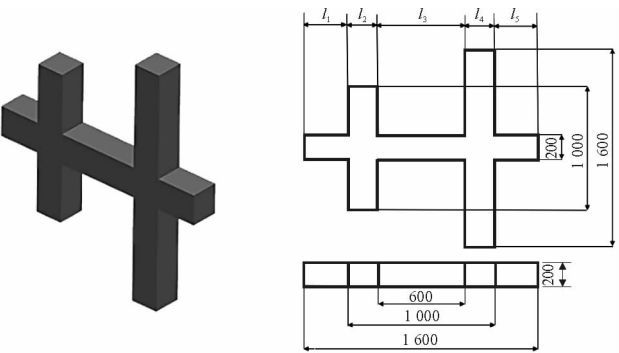


图 4 模拟模型示意图
Fig.4 Schematic diagram of the simulation model

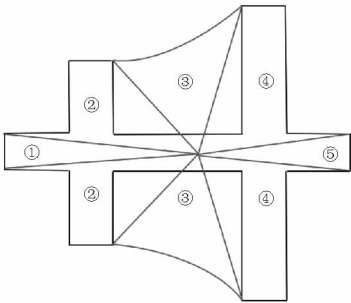


图 5 铸件局部包络密度的划分示意图
Fig.5 Partition diagram of local envelope density of casting

$$\epsilon_{li} = \alpha_1 \cdot \epsilon_1 + \alpha_2 \cdot \epsilon_2 + \cdots + \alpha_n \cdot \epsilon_n + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \cdots - \alpha_n) \cdot \epsilon_0 \tag{4}$$

式中, ϵ_{li} 为铸件第 i 项尺寸的收缩率; ϵ_n 为铸件第 n 块区域内的收缩率; ϵ_0 为铸件自由收缩时的收缩率; α_n 为比例系数,铸件第 n 块区域该尺寸所占长度/所求尺寸总长。

2 讨 论

根据图 4,分别对其进行铸件收缩率传统经验设计、整体包络设计以及局部包络设计,然后利用模拟软件进行模拟,从而获得模型收缩后的尺寸。

传统经验设计方法:查阅铸造手册中 ZL205A 铸造铝合金的常用收缩率,获得该尺寸铸件在砂型铸造中的常用收缩率见表 2,由于 ZL205A 合金中 Cu 含量为 4.6%~5.5%,故而选择收缩率为 1.3%。设计后的铸件长度方向尺寸数值见表 3。

表 2 铝合金铸件的铸造收缩率
Tab.2 Shrinkage rate of aluminum alloy castings %

收缩类型	铝硅合金	铝铜合金[w(Cu)=7%~12%]	铝镁合金
受阻收缩	0.8~1.0	1.4	1.0
自由收缩	1.0~1.2	1.6	1.3

表 3 铸件模型各部分模块局部包络密度及收缩率
Tab.3 Local envelope density and shrinkage rate of each module of the casting model

模块编号	包络密度/(g·cm ⁻³)	收缩率/%
1	2.820	1.483
2	1.846	1.031
3	0.011	0.007
4	2.043	1.131
5	2.820	1.483

整体包络设计方法:为计算铸件的整体收缩率,首先得知道该铸件模型的包络体积,约为 2.84×10^8 mm³,通过式(2)计算该模型的整体包络密度为 1.509 g/cm³,再通过式(3)计算整体包络密度所对应的铸件收缩率为 0.856%,最后再根据计算得到的铸造收缩率对整体模型进行设计,设计后的铸件尺寸见表 4。

表 4 3 种设计方法收缩后铸件尺寸
Tab.4 Casting dimensions after shrinking by three assignment methods mm

设计方法	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	$l_{总}$
传统经验	299.334	199.597	603.47	199.589	299.332	1 601.322
整体包络	298.073	198.722	600.748	198.742	298.068	1 594.353
局部包络	299.926	199.288	600.657	199.379	299.923	1 599.173
名义尺寸	300	200	600	200	300	1 600

局部包络设计方法:根据各划分区域的包络密度,结合式(3)计算得出各局部包络体的收缩率(见表 3),所得铸件目标部位的收缩率与对应的收缩设计后的铸件尺寸见表 4。

图6为3种设计方案收缩模拟后铸件各目标尺寸的公差分布。可以看出,只有基于局部包络密度设计法所成形的铸件尺寸公差幅度较为均匀,另两种方案的结果严重偏离零公差线。其中传统经验设计方案所得铸件的尺寸 l_3 的公差整体位于零公差线的最上方,原因是以实际经验测得的收缩率对整体铸件尺寸进行设计,会在 l_1 、 l_5 等自由收缩区域赋予过小的铸件收缩率,而在 l_3 受阻收缩区域赋予过大的铸件收缩率。而整体包络密度设计方案所得铸件的尺寸公差则大部分位于零公差线的下方,这是因为整体包络设计方案采用整体包络密度对应下的铸件收缩率,势必会在 l_1 和 l_5 等自由收缩区域赋予过大的收缩率,从而导致成形尺寸远小于设计尺寸。以上两种方案的成形尺寸公差分布趋势是铸件各区域线收缩量分布不合理所导致的,因为整个铸件既有自由收缩,又有受阻收缩,若是按照一定的收缩率设计尺寸,显然是不可取的。但是,基于局部包络密度设计法既考虑了自由收缩,又考虑了受阻收缩,对不同区域赋予不同的收缩率,使得成形尺寸更加接近设计尺寸。

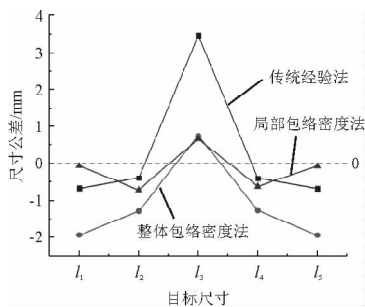


图6 收缩后铸件尺寸公差曲线

Fig.6 Dimensional tolerance curve of casting after shrinking

由此可见,采用传统经验收缩率设计方案虽能保障铸件的成形尺寸合乎规格,但经验数据的获得需要大量的试验,因此并非最优的设计方案。而整体包络密度方案的提出,虽将铸件收缩过程中的约束因素(受阻)考虑进了铸件收缩率的计算过程,但当铸件局部存在明显的约束程度差异时,该方案的使用可能会引起较大的尺寸误差,严重时可能会产生铸件余量不足而导致报废。因此通过对铸件的局部划分,识别铸件约束程度不同的区域并采用局部包络密度的方式进行表征,从而制定铸件各部位合理的铸件收缩率的设计方案较为精确、合理。

3 结 论

(1)提出了一种设计铸件收缩率的局部包络密度的新方法,以提高铸件的尺寸精度。

(2)基于局部包络密度设计方法是一种能够量化局

部约束影响,提高铸件局部尺寸精度的设计方法,设计方法合理可行,可操作性较高等优点。

(3)基于局部包络密度设计方法对铸件收缩尺寸精度的控制效果最佳,优于传统经验法和整体包络密度设计方法。

参 考 文 献

- [1] 李元东,刘兴海,张心龙,等.变形铝合金半固态近净成形研究进展[J].特种铸造及有色合金,2014,34(5):471-479.
- [2] 沈响,郑功,冯辰铭.熔模精密铸造技术研究进展[J].精密成形工程,2019,11(1):54-62.
- [3] MISHRA S, RANJANA R. Reverse solidification path methodology for dewaxing ceramic shells in investment casting process[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2010, 25: 1 385-1 388.
- [4] 孙振国,杨震华,贺杨,等.军工台体的铸造工艺[J].大型铸锻件,2010(5):20-22.
- [5] 王子恒,王子旭.一种卷扬机滚筒及其卷扬机滚筒铸造尺寸控制方法:中国,110371875A[P].2019-10-25.
- [6] CAMPBELL J. 铸造原理[M].李殿中译.北京:科学出版社,2011.
- [7] NAKAI A, NAKAMURA K, SEKI S, et al. Measurement of casting shrinkage with U-type tungsten die[J]. Shika Rikogaku Zasshi, 1980(21):122-128.
- [8] SOUDER W, PAFFENBARGER G C. Physical properties of dental materials[J]. Journal of the American Dental Association, 1942, 29(10):1 349-1 350.
- [9] LIU C H, JIN S, LAI X M. Influence of complex structure on the shrinkage of part in investment casting process[J]. Adv. Manuf. Technol., 2015, 77: 1 191-1 203.
- [10] SABAU A S. Alloy shrinkage factors for the investment casting process[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2006, B37(1):131-140.
- [11] 谢建辉,芦刚,严青松,等.电磁场对真空差压铸造 ZL205A 合金补缩特性研究[J].特种铸造及有色合金,2019,39(9):963-966.
- [12] 张海珍. ZL205A 高强度铝铜合金铸造性能及工艺技术研究[D].太原:中北大学,2010.
- [13] 王晔. ZL205A 筒形件低压铸造宏观偏析形成机制及补缩行为[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [14] 彭恒元. ZL205A 合金复杂铸件收缩尺寸精确控制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [15] 中国机械工程学会铸造分会铸造手册-铸造工艺(第3版)[M].北京:机械工业出版社,2004.

(编辑:栗万仲)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com