DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.03.004

基于数值三维重构的含缺陷非均质材料力学性能研究

苗田雨,饶　磊,柏　雪,游　凯
(河海大学 力学与材料学院,江苏 南京 211100)

摘　要:缩松和夹渣缺陷是铸件的常见缺陷,这类缺陷非均匀地分布在铸件基体中,割裂了材料的连续性,在零件服役过程中极易引起应力集中而导致零件失效,因此综合考虑非均质性特征对材料力学性能的影响具有重要意义。本文基于平板铸钢件浇铸实验,采用连续切片法获得铸件整体切片序列影像,并基于数字图像处理构建了内含缺陷的三维空间点阵,进一步采用空间点阵映射算法建立非均质材料有限元模型,在此基础上进行了均质与非均质试样模型的拉伸过程模拟研究。结果表明,采用非均质模型能更为准确地表达试样的力学性能。

关键词:铸造缺陷;三维重构;非均质模型;力学性能

中图分类号:TG245　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)03-0214-05

Study on Mechanical Properties of Non-homogeneous Materials with Defects Based on Numerical Three-Dimensional Reconstruction

MIAO Tianyu, RAO Lei, BAI Xue, YOU Kai
(School of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Shrinkage and slag inclusion defects were common defects of castings, which were unevenly distributed in the casting matrix, disconnecting the continuity of materials and easily causing stress concentration and failure of parts during service. Therefore, it was the great significance to comprehensively consider the influence of heterogeneous characteristics on the mechanical properties of materials. Based on flat steel casting experiment, using the method of serial section for casting slice whole sequence images, based on digital image processing and constructed with three-dimensional space lattice defects, further space lattice mapping algorithm was adopted to establish the finite element model of heterogeneous materials, on the basis of the homogeneous and heterogeneous specimen tensile process simulation of the model. The results show that the mechanical properties of the samples can be expressed more accurately by using the heterogeneous model.

Key words: casting defects; three-dimensional reconstruction; non-homogeneous model; mechanical properties

由于合金材料具有复杂的凝固行为和组织结构形态,非常容易导致多种铸造缺陷(如缩孔、缩松和夹渣等)的产生,这些缺陷均会在一定程度上削弱金属基体的连续性和机械强度,通常称为非连续性缺陷[1,2]。大量的工程应用表明,材料中存在的非连续性缺陷在铸件服役过程中往往是应力集中点,并最终成为零件疲劳裂纹萌生的起源[3-5]。目前,在铸件结构和工艺规范设计中,通常采用理想均质材料的物性参数进行零件强度校核,同时依据零件的复杂程度和使用条件,适当增加零件的安全系数,以提高设计和使用的可靠性,这种方法能在一定程度上降低铸件内局部应力集中程度,但仍具有一定的经验性[6]。对于不同的材料和服役工况所使用的设计准则也不同,这就给铸件设计带来了难度。

由于金属材料内部结构的不可见性,长期以来对其内部三维结构的探究较为困难。近年来发展起来的三维重构技术是将数字图像技术、空间映射算法和高性能计算设备相结合的交叉学科,在工业、医疗等方面具有广泛的应用[7-9]。尤其是在金属材料领域的推广,在很大程度上拓展了人们对材料内部结构的认识。如Forsman等[10]采用切片法重构了渗碳体的实体模型,Hangai[11]和吴保亮[12]等对铸件的微观组织形貌进行了三维重构,在此基础上对其组织进行了定量表征分析。

收稿日期:2019-12-26
基金项目:国家自然科学基金(51775167)
作者简介:苗田雨(1995-),女,河南许昌人,硕士生.研究方向:铸造过程仿真.电话:13505171657,E-mail:Miaotyu@163.com
通讯作者:饶　磊(1975-),江苏南京人,博士,教授.研究方向:铸造工艺及仿真.电话:13701451616,E-mail:raol@hhu.edu.cn

本文采用连续切片法对平板铸钢件内部缺陷分布进行了三维重构，获得了缺陷的三维数值化模型，通过空间映射算法将材料属性赋值于有限元单元网格模型上并获得非均质模型；在此基础上进行拉伸过程的力学分析，并进行了实验验证。

1　试样制备及切片序列获取

1.1　平板试样制备

采用开放式重力砂型铸造制备长方形试样，材料为ZG230-450。为提高平板试样中的缺陷率，特地引入部分夹渣缺陷，浇注前对浇包内进行手工扒除大体积渣，保留少量氧化皮等小体积渣，然后直接浇注，浇口未进行挡渣处理，浇注温度为1 550 ℃。浇注系统形态及尺寸如图1所示。

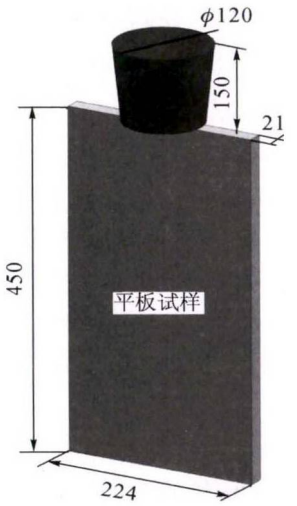


图 1　试样浇注系统示意图(mm)

Fig.1　Schematic diagram of sample gating system

1.2　试样切片序列获取

采用等间距连续切削方法对平板铸件进行分层离散。实验中将平板试样置于数控铣床上进行等间距连续铣削加工，并用相机拍摄全部加工面形态，从而获得一系列连续的二维断面图片。加工中片层间距为1 mm，共获得450张切片图像，图2为试样切片序列获取示意图。

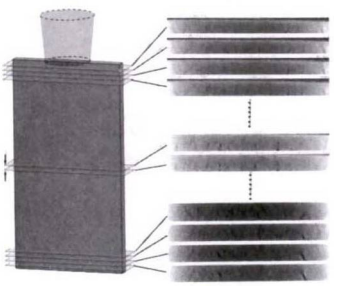


图 2　实验切片序列获取示意图

Fig.2　Experimental slice sequence acquisition diagram

2　图像处理及缺陷三维重构

2.1　切片图像处理

由于拍照所获取的切片照片的对比度较低，缺陷边缘锐度不高，难以区分缺陷二维形貌，无法直接用于三维重构计算。为了能有效提取出切片图像中所包含的全部缺陷信息，需要对图像进行数字化预处理，屏蔽掉图片上的无关噪声，获取缺陷分布的有效点阵图谱。本文针对所获得的连续切片序列，采用数值降噪、图像增强和二值化处理等数值图像处理算法，最终获得边缘清晰、对比明显的二值化图片，为后续的三维重构计算提供基础。图3表示了一张切片图像的数字处理过程。

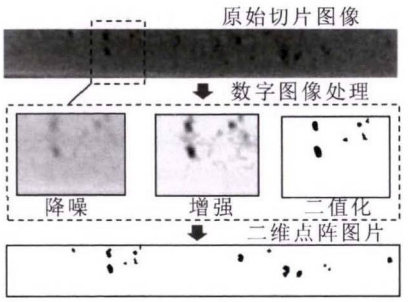


图 3　切片图像数值处理示意图

Fig.3　Schematic diagram of slice image numerical processing

(1)数值降噪　图像中的噪点严重影响了对缺陷主体边缘的判断精度，数值降噪就是通过数值滤波的方式除去干扰噪声，目前主要有均值滤波、维纳滤波以及中值滤波方法。本文采用中值滤波法对所有图片进行滤波降噪处理。计算过程中将图像中所包含的像素按照灰度值的大小排列，取序列中间点的值作为中间值，并以此值作为滤波器的输出值。由于灰度值的干扰值与其邻近像素的灰度值差异较大，因此取中值的结果是强迫将干扰点变为与其邻近的像素的灰度值一样，从而消除孤立的噪声点，最终获得良好的图像处理效果。从图3中可以看出通过降噪处理后图片上的黑色噪点已大幅度减少。

(2)图像增强　为了进一步提高图像中缺陷区域与背景间的对比度，突出缺陷特征边缘信息，本文采用指数变换方法，对图像中亮度值较高的部分扩大亮度间隔，在亮度值较低的部分缩小亮度间隔，从而实现全画幅中不同区域的亮度比例值的动态调整。从图3中可以看到增强后的图像中缺陷区域与背景的反差明显提高。

(3)图像二值化　为了获得清晰地缺陷边缘信息，需要将增强后的灰度图像进行二值化处理。通过设定阀值，将每个像素点的连续变化灰度值进行阀值判定，从而将所有像素点的灰度值设定为0(黑

色)或255(白色)。从图3中可以看到,通过二值化处理的缺陷具有清晰的区域边缘,同时图片存储数据量大幅度减小,从而为三维重构计算提供二维点阵数据。

2.2 切片序列的三位重构算法

三维重构的目的就是通过连续分层的二维图像重现原物体的三维结构,从而构建物体的三维立体模型。在此基础上可以继续进行模型的力学、传热等物理过程分析。本文基于已处理好的二值化切片序列,采用体素叠加法,对试样中缺陷的空间形貌和分布位置进行重构,获得三维二值化空间点阵。如图4所示,每层切片图像上的像素均向三个坐标轴方向扩展形成一个立方形的体素,每个体素还均包含了该像素的灰度值。针对断层扫描图像序列而言,在每个切片层间包含了多层体素结构,层间各体素的灰度值均通过相邻两层插值获得。

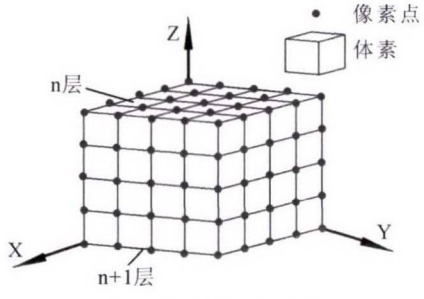


图 4 体素叠加示意图

Fig.4 Diagram of voxel superposition

通常来说,对象特征的三维重构精度随着切片数量的增加而增加,但增加切片数量往往比较困难。因此减小体素体积,用增大计算量的方法来减少切片数量,也可以明显地提升三维重构的显示分辨度,这对于目前的计算机速度和存储容量来说是可行的。本文基于上述图像处理及三维重构算法,编写了专用三维重构软件,实现了连续切片图像的自动数值处理和内部缺陷的空间三维重构,软件运行界面如图5所示。

通过对450张切片图像的处理,获得了平板铸件内部缺陷的三维形貌及空间分布。并采用点阵映射算法,将缺陷的空间点阵映射到平板实体模型中,从而获得了具有内部缺陷信息的非均质铸件模型。图6表示了缺陷点阵的映射过程。

为了测试试样的抗拉强度,平板试样需被加工成标准拉伸试样。因此,本文采用虚拟加工算法对包含缺陷的三维实体模型进行虚拟切割,获取了拉伸试样的三维模型(如图7所示)。

3 非均质试样的力学分析

3.1 缺陷信息映射

为了表达材料由于缺陷而造成的非均质特性,本文基于RICE模型[13,14]将均质有限元网格模型离散为变材质的有限元网格模型,每个网格的弹性模量和泊松比均与网格内的缺陷率有关。每个单元中的杨氏弹性模量和泊松比可以表示为[14]:

$$E_i=E_0\left(1-\frac{\theta_i}{\theta_0}\right)^{\eta},\ \gamma_i=\gamma_0\left(1-\frac{\theta_i}{\theta_0}\right)(\gamma_f-\gamma_0) \tag{1}$$

式中,E_0,γ_0为均质材料的杨氏弹性模量和泊松比,E_i,γ_i为第i单元的杨氏弹性模量和泊松比,θ_i为单元i中的缺陷体积百分率,θ_0,γ_f和η为实验常数,本文中θ_0=0.5,f_i=0.15,η=2.5。计算获得的均质模型和非均质模型的杨氏弹性模量分布如图8所示。

3.2 受力分析

为了研究材料内部缺陷对试样力学性能的影响,本文分别采用传统的均质模型与包含缺陷信息的非均质模型进行了拉伸试样的模拟计算,并与实际试样的拉伸曲线进行了对比分析。模拟计算的加载条件与实际拉伸实验保持一致。图9为两种模型的弹性模量分布及加载方式,图10为加载末期试样的应力分布图。

从图9中可以看出,均质模型和非均质模型在拉伸过程中的应力分布具有显著的区别。均质模型所获得的试验段中应力分布较为均匀。从采用非均质模型计算结果可以看出,在缺陷分布区域出现了明

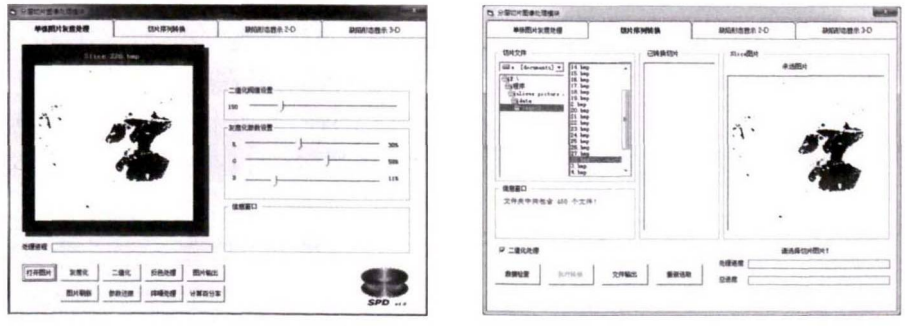


图 5 三维重构软件运行界面

Fig.5 3D-reconstruction software operation interface

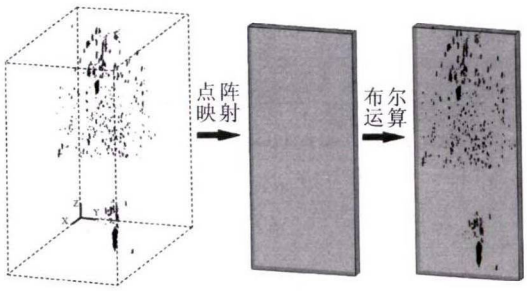


图 6 缺陷点阵映射过程
Fig.6 Defect lattice mapping process

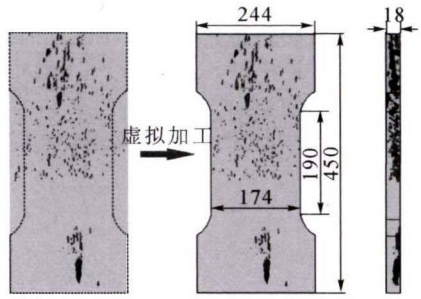


图 7 拉伸试样的虚拟加工(mm)
Fig.7 Virtual machining of tensile specimen

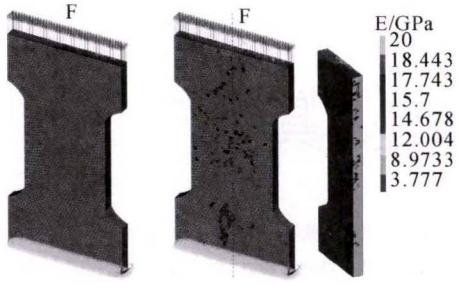


图 8 均质与非均质网格模型及加载图
Fig.8 Homogeneous and heterogeneous grid model and loading diagram

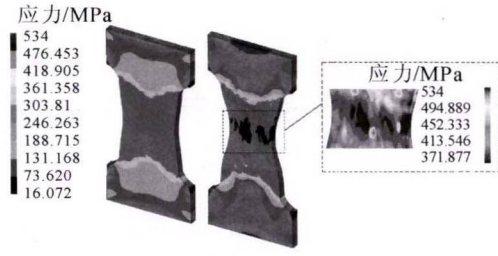


图 9 试样应力分布图(拉力为 200 t)
Fig.9 Stress distribution diagram of sample (Tensile force is 200 t)

显的应力集中现象，且局部应力值远高于非均质模型的计算值。当局部应力超过材料的抗拉极限强度时，试样就会发生破坏。从图10中也可以看出，采用非均质模型计算的抗拉强度低于均质模型的计算值，这也说明缺陷对材料的强度有明显的削弱作用。同时，与均质模型的计算曲线相比，采用非均质模型的计算结果更接近实验曲线，这也说明了基于缺陷分布的非均质模型可以更为真实的反映出材料的力学性能。

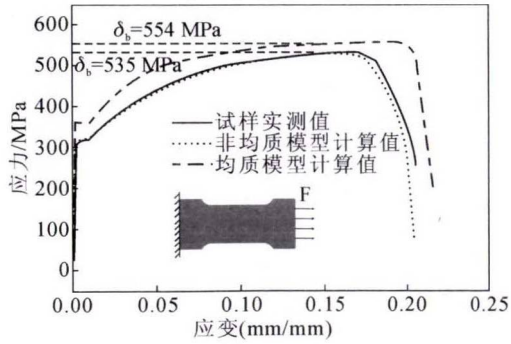


图 10 应力应变图
Fig.10 Stress-strain diagram

4 结论

(1)材料内部的缺陷形态及分布特征对材料的力学性能有显著的影响。铸件受力过程中极易在缺陷位置附近形成应力集中，从而大幅度降低材料的抗拉强度，影响铸件服役的安全性。

(2)基于材料缺陷特征的非均质模型更贴近实际材料性能，在此基础上可大幅度提高材料的力学、疲劳分析精度。

(3)采用连续切片的三维数值重构方法可有效获取铸件内部各种缺陷的形态与分布特征，对切片的数字图像处理及体素叠加重构算法能显著提高重构精度。

参考文献：

[1] 倪灯塔. 镁合金铸件熔剂夹渣缺陷的形成及预防 [J]. 铸造技术, 2005, 26(3):241-242.

[2] 马广辉,李润霞,段林. 铸造缺陷对ZL101合金断裂行为的影响[J]. 铸造, 2018, 67(2):162-166.

[3] 万谦. 铝合金压铸件微观孔洞的三维特征及其对疲劳性能的影响[D]. 广州：华南理工大学, 2013.

[4] 李可师，吴数. 铸钢节点铸造缺陷的疲劳分析 [J]. 铸造技术, 2018,39(10):2190-2192, 2212.

[5] 宫维佳. 铸造缺陷对含铸钢节点钢结构的力学性能影响 [D]. 南京：东南大学, 2016.

[6] 杨为勤. 大、中型离心铸型金属筒套的强度校核方法[J]. 铸造技术, 2013, 34(12):1702-1705.

[7] 李英. 镁合金微观结构的三维重构和有限元分析[D]. 青岛：青岛科技大学, 2015.

[8] 刘洪军，张东旭，张靖宇. 半固态7075铝合金组织的连续切片三维重构[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(4):354-357.

[9] 刘坤，徐磊，李双明. 三维重构技术在金属材料微观结构研究中的应用[J]. 材料导报, 2012, 26(19):116-120.

[10] Kral M V, Mangan M A, Spanos G, et al. Three-dimensional analysis of microstructures [J]. Materials Characterization, 2000, 45(1):

17-23.

[11] Hangai Y, Kuwazuru O, Yano T, et al. Clustered shrinkage pores in ill-conditioned aluminum alloy die castings[J]. Materials Transactions, 2010, 51(9): 1574-1580.

[12] 吴保亮. 铸件微观组织结构三维重构技术研究[D]. 南昌：南昌大学, 2015.

[13] Rice R W. Evaluating porosity parameters for porosity-property relations [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1995, 76(7): 1801-1808.

[14] Rice R W. Evaluation and extension of physical property-porosity models based on minimum solid area [J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(1): 102-118.

河北省冀州市华北铸钉铸造工具总厂



冀州市华北铸钉铸造工具总厂座落于河北省冀州市城南白庄工业区，紧靠全国大动脉京九、石梅铁路，交通十分便利。我厂是生产铸顶（泥芯撑）、羊毛掸笔、硬扫笔、圆水笔的专业厂家。建厂36多年来,技术设备先进，产品销往全国各地,深受用户欢迎。本厂始终承诺：诚信至上，守信誉,质高价低，实行三包，交货及时，代办发运，可供图订做。热情欢迎国内外来人来电选购。

四同

同类产品比质量　同等质量比价格
同样价格比服务　同等服务比速度

两免

免费为客户提供产品技术咨询
免费为客户提供初期试用产品

一、常用修造工具规格（材质为不锈钢或弹簧钢）

/mm

名称	型号	规格	名称	型号	规格	名称	型号	规格	名称	型号	规格
刮刀	2#	160×45	秋叶	1#	180×30	三角光子	2#	50×30	东北压钩	1#	270×50
尖刮刀	3#	140×35	单头钢批	2#	240×22	蛋圆光子	1#	75×50	圆型钩	2#	200×30
提钩	2#	350×15	单头钢批	3#	210×20	压钩	1#	270×50	长把压钩	1#	220×30
提钩	4#	300×10	法兰钩	1#	270×14	压钩	2#	240×45	柳叶钩	1#	240×40
钢批钩	1#	280×16	榔头铲	1#	240×24	单齐压钩	2#	240×45	单开提钩	2#	320×12

二、掸笔、硬扫笔：20～120 mm 10个品种；圆水笔：12～17 mm 3个品种；
三、铸顶（芯撑）有圆、方、长方形，单、双、多柱、异形铸顶等各种铸铁、铸钢用铸顶材质为A3或A3F，表面镀锌、镀锡等；
四、过滤网、木型工具、皮风箱、铸尺、百叶轮、角磨片、树脂油、固化剂、粘结剂、木型锤等。



图中从左至右依次为：1.刮刀 2.尖刮刀 3.压勺 4.单齐压勺 5.提钩 6.单头钢批 7.秋叶 8.单开提钩 9.法兰钩 10.钢批钩 11.掸笔、扫笔 12.圆水笔 13.铸顶

诚征各地代理商

厂址：河北省冀州市城南白庄工业区（053200） 联系人：白英韩 13831863803 白其水 13582484193（中国农行金穗卡，户名：白英韩 卡号：9559982130332490310）
电话/传真：0318-8682135 网址：www.hbzhz.com E-mail:hbbyh@hbzhz.com 银行汇款：冀州市华北铸钉铸造工具总厂 开户行：市中行 帐号：100148643069

经销处
哈尔滨市铸材门市部 13831863803　包头市铸材经销处 13633184318
杭州市中亚铸材有限公司 13932860882　贵阳市忠信铸材公司 13831888322
长沙市铸材办事处 13831823340　西宁市铸材办事处 13931810511
上海市铸材办事处 13932894585　南宁市铸材办事处 0771-8994686

本单位为一般纳税人，增值发票税率17%。