

# 铸造模拟数据中的缺陷体素单元标识技术

张兆创 孙飞 廖敦明 陈涛 唐玉龙 曹流  
(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室)

**摘要** 为了能够让铸造模拟数据更好地适应机器学习的需要,将经验公式和人工分析两种方法一同引入到铸造缺陷预测分析中,在直接体渲染技术基础上,提出了针对铸造模拟数据中的缺陷体素单元的标识技术。实际案例分析表明,这种标识技术可以有效并准确地辅助分析人员将缺陷体素进行标识。凭借标识技术,分析人员观察分析模拟数据并对特定体素进行标识,以此将长期实践经验保存下来。

**关键词** 标识技术;缺陷;铸造模拟;直接体渲染

中图分类号 O242;TP311

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2017.02.008

## Extract Technology for Defect Voxels in Casting Simulation Data

Zhang Zhaochuang, Sun fei, Liao Dunming, Chen Tao, Tang Yulong, Cao Liu  
(State Key Laboratory of Materials Processing and Die Mould Technology,  
Huazhong University of Science and Technology)

**Abstract:** In order to make the simulation data more available for machine learning, two main analysis methods, such as empirical formula and manual analysis, were combined in defect prediction. The extract technology of the casting voxel which is based on the direct volume rendering technology is presented. The practical case shows that the method can extract effectively and accurately and save the defect content. In this way, the analysis experience was saved, and therefore, all these saved experience will become the basic data for the following research.

**Key Words:** Extract Technology, Defect, Casting Simulation, Direct Volume Rendering

收稿日期:2016-12-05;修改稿收到日期:2016-12-21

第一作者简介:张兆创,男,1991年出生,硕士研究生,华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室,武汉(430074),电话:13036104354,E-mail: tronzhang@hust.edu.cn, zczckai@163.com

通信作者:孙飞,男,1987年出生,博士,华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室,武汉(430074),电话:13476805108,E-mail: sunfei@hust.edu.cn

- [17] CUI C L, WU L B, WU R Z, et al. Influence of yttrium on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-5Li-3Al-2Zn alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(37): 9 045-9 049.
- [18] LI R H, PAN F S, JIANG B, et al. Effects of yttrium and strontium additions on as-cast microstructure of Mg-14Li-1Al alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(4): 778-783.
- [19] YIN H M, JIANG B, HUANG X Y, et al. Effect of Ce addition on microstructure of Mg-9Li alloy [J]. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2013, 23(10):1 936-1 941.
- [20] 刘滨,张密林. Ce对Mg-Li-Al合金组织及力学性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2007, 27(5):329-331.
- [21] 曾迎,蒋斌,李瑞红,等. 合金元素对Mg-Li合金组织及性能的影响[J]. *铸造*, 2012, 61(3):275-279.
- [22] 任友良,查亮明,树奎. 镁锂合金胶接性能研究[A]. //第十二届全国典型零件热处理技术交流会暨第九届物理冶金学术报告会[C]. 山东烟台, 2013.
- [23] 顾永坤,任友良,王超,等. 镁锂合金埋件螺纹强度研究[A]. //第十二届全国典型零件热处理技术交流会暨第九届物理冶金学术报告会[C]. 山东烟台, 2013.
- [24] LI J F, ZHENG Z Q, LI S C, et al. Preparation and galvanic anodizing of a Mg-Li alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, A433: 233-240.
- [25] 景晓燕,袁艺,于方,等. 镁锂合金表面耐蚀微弧氧化膜的研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(7):1 154-1 157.
- [26] 卢一. 镁锂合金表面微弧氧化膜及复合涂层的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [27] 李思振,白晶莹,冯立,等. 镁锂合金低吸收/高发射微弧氧化热控膜层技术研究[J]. *材料保护*, 2014, 47(2):101-104.
- [28] JACKSON R J, FROST P D. Properties and current applications of magnesium-lithium alloys [R]. *Technology Utilization Report NASA SP-5068*, 6, 1965.
- [29] BYRER T G, WHITE E L, FROST P D. The development of magnesium-lithium alloys for structural application [R]. *NASA Contractor Report*, 1964, 79: 5-20.
- [30] FROST P D. Technical and economic status of magnesium-lithium alloys [R]. *Technology Utilization Report NASA SP-5208*, 1965, 8:3-20.

(编辑:张正贺)

传统的模拟分析可以分为工艺设计、模拟计算、后处理可视化和观察分析 4 个阶段(见图 1),这 4 个阶段组成一个分析周期<sup>[1~5]</sup>。为了得到满意的工艺方案,往往需要经过多个周期的迭代分析。但在模拟分析的每一个周期内,模拟计算、可视化、观察分析的进行都是单向的,分析人员的主要工作是观察分析数据、评估当前方案以及提出进一步的优化方案。

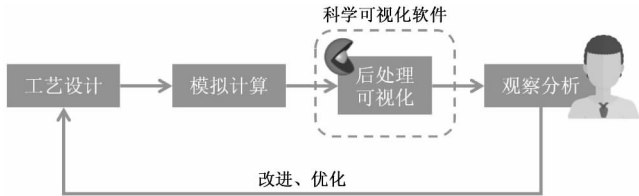


图 1 传统的模拟分析工作流程图

数值模拟计算后,分析人员需要使用科学数据可视化工具进行分析工作。在科学可视化软件的辅助下,分析人员便可结合长期生产实践中积累的经验,对铸造方案进行评估并提出改进方案。分析人员进行观察和分析工作时,需要仔细观察每个计算结果文件。观察过程具有高度重复性,会不可避免地遗漏某些细节,导致最终分析结果的错误,从而影响总的生产周期。如果能够让计算机总结分析人员的操作步骤和特征判断依据,在可视化阶段为其提供所需要的缺陷等信息,就可以大幅度减少重复性的操作。这样不仅能提高分析人员的工作效率,也可以减少人为因素导致的错误。另一方面,模拟计算能提供的设置参数无法完全覆盖实际生产中影响生产结果的因素。这种矛盾造成模拟计算软件在实际中的使用效果往往差强人意。而通过将分析过程中计算机总结的信息反馈给模拟计算,并对计算逻辑进行相应的改进,可以有效缓和模拟计算与实际生产的矛盾。

近年来,机器学习方法备受瞩目,而在铸造模拟分析的研究领域中,该方法的应用依然较少。将经验公式和人工分析两种分析方法与机器学习有机结合起来,一同引入到分析任务中来,就可以在大大便利分析工作进行的同时,得到科学的提示和帮助。

本课题拟定改善的模拟分析工作流程见图 2。在传统模拟分析工作流程基础上,增加了标识和机器学习两个阶段。其中,分析人员在观察分析时,通过标识技术对体素进行标识,并以数据文件等方式传送到机器学习单元中。机器学习单元负责对相关信息进行学习和总结,而后反馈给模拟计算和后处理可视化阶段。反馈给模拟计算的信息可以用于改进其中的数学模型,使模拟计算更为符合生产实际;而后处理可视化也可以利用这些反馈的信息丰富或优化显示的内容(如:增加可以提示的缺陷类型、提高提示的准确度等),减少分析人员的工作量,提高其工作效率。

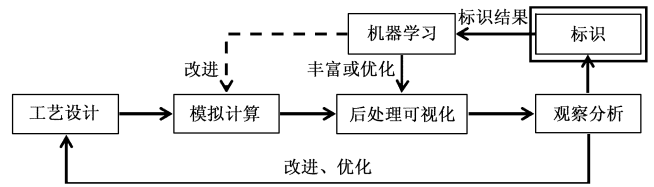
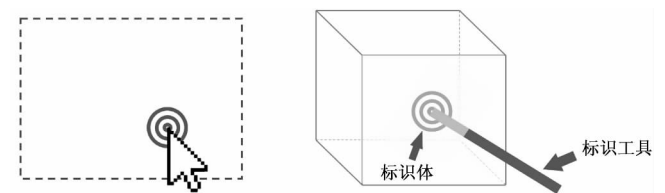


图 2 改善后的模拟分析工作流程图

在整个改善的模拟分析工作流程中,体素标识技术起着纽带作用。在直接体渲染技术基础上,提出了针对铸造模拟数据中的缺陷体素单元的标识技术。本课题的体素标识技术可以有效地收集和整合分析人员长期生产实践中形成的经验,为后续研究提供借鉴。

## 1 体素单元的标识定位

将二维的像素(pixel)概念引申到三维空间中就得到了体素(voxel)的概念。体素是数值模拟结果数据集在三维空间中的最小单位,用于表达该微小空间中各种物理量的分布情况<sup>[6]</sup>。图 3 是二维与三维情况下的定位方法。由图 3a 可见,在二维平面中,通过鼠标点击即可定位平面上的像素。但由于三维空间多出一个维度,只使用鼠标进行定位可能导致定位错误,而且也无法定位处于屏幕后方的其他体素。采用图 3b 的标识工具及标识体进行定位则可有效解决三位体素的定位问题。定位时真正起作用的是标识体(如二维定位时鼠标箭头的尖端部分)。使用一个含有三维位置坐标与一个区域半径的球体作为标识体,并将其与对应的标识工具进行绑定,辅助分析人员在标识过程中对体素进行准确的定位。



(a) 二维鼠标定位 (b) 三维标识体定位

图 3 二维与三维情况下的定位方法

在进行标识定位前需要将标识体的坐标转换为以数据场作为参考坐标系的相对坐标。结构化数据场的划分是沿 3 个正交的方向进行的,划分后的数据单元所处的参考坐标系可以通过将世界坐标系平移、旋转等变换得到。当数据场的划分是沿着世界坐标系 3 个主轴方向进行划分并且刻度尺标准一致时,数据场坐标系可以认为是对坐标系进行平移后的结果。给定标识体的坐标位置  $\vec{p}_w = (x_w, y_w, z_w)$ , 记数据场坐标系原点为  $O_{sf}$ , 则标识体对应的数据场相对坐标  $\vec{p}_{sf} = (x_{sf}, y_{sf}, z_{sf})$  为:

$$\vec{p}_{sf} = \vec{p}_w - O_{sf}$$

标识体的标识效果受到其区域半径的影响。由于

给定点和半径,标识体实际上表示一个球形区域,定位本质上就是找到受该球形区域影响的体素。为了简化判断过程,当体素所在的立方体与球形区域相交时,若立方体有超过 1/8 的体积位于球的包围盒范围内,则认为该立方体受此球形区域影响。当分析人员想对体素进行标识时,只需要将标识体移动到目标所在的位置上,上述标识判断方式就会求得体素对应的单元号。图 4 描述了标识体的作用。对于精度要求比较高的标识任务,则通过改变标识体的区域半径来改变标识的精度。

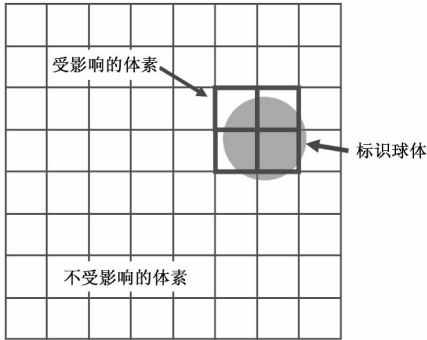


图 4 体素单元标识二维示意图

## 2 直接体渲染与标识工作流程

分布在三维物理空间中的三维数据场,记录有三维空间物理化学等属性以及其演变规律<sup>[7]</sup>。物理化学属性可以是标量、矢量或张量。相较后两者而言,标量数据的显示方法更为传统成熟。而且在一定程度上,后两者可以退化为标量形式进行可视化处理。体渲染是对三维标量数据场进行可视化的主要方法之一。

直接体渲染有以下几种优势<sup>[7,8]</sup>:①直接体渲染可以一次性展现三维标量场数据的整体信息和内部结构,提供对数据场的全局预览;②直接体渲染不需从数据中抽取等值面进行建模,因此对于没有明显边界结构或等值面信息不确定、不可知的对象尤其适用;③直接体渲染算法的绘制时间由绘制结果图像的分辨率和采样率决定,可以通过权衡渲染效率和效果进行调整。

本课题使用了基于 GPU 加速的光线投射直接体渲染算法<sup>[9]</sup>,合理利用现代图形管线的优势,保证了渲染过程拥有合理的帧率。为了正确有效地进行体素标识,结合直接体渲染技术的特性<sup>[10,11]</sup>,设计了算法与操作流程,见图 5。

具体如下:①模拟结果数据的过滤与处理,获得实际用于标识的数据集,模拟计算数据包含了很多内容,但并不是全部都需要在分析阶段进行观察。为了减少多余数据的困扰,在正式渲染前需要对原始数据进行过滤,只保留需要观察的数据;②将原生数据集转换为直接体渲染模块使用的体数据(即体素数据集),原生数据

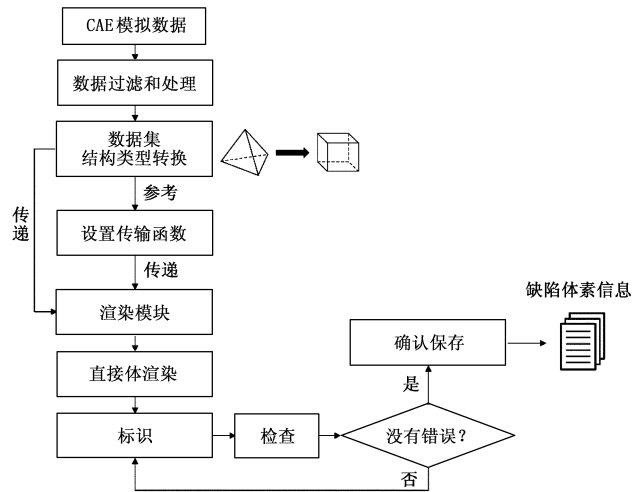


图 5 标识工作的整体操作流程

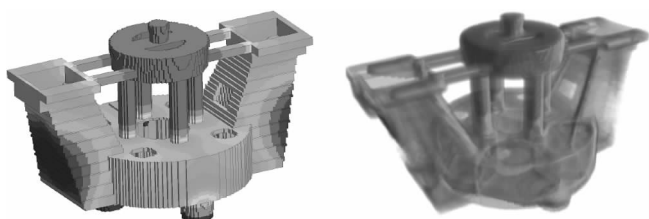
集的格式或精度等内容不能直接用于体渲染,需要通过格式转换将其处理为适用于直接体渲染的格式;③设定直接体渲染需要使用的传输函数,传输函数设定的好坏直接影响体渲染的显示效果,由于传输函数的设置较为困难,通常提供几组设定好的传输函数,分析人员可以按需进行选择;④将体数据与传输函数传递给渲染模块;⑤使用直接体渲染技术对体数据进行渲染显示;⑥用户通过鼠标、键盘交互地改变标识工具的位置并对体素单元进行初步的标识;⑦用户通过实时显示反馈对已标识体素单元进行修改或删除;⑧用户确认标识内容,生成标识文件。

使用直接体渲染技术进行渲染显示时,虽然使用了 GPU 加速方法,但大量密集的渲染工作仍然会占用大量的硬件资源,影响体验。为了避免标识工作进行期间系统出现卡顿,在具体实现时需要做出适当的优化。

优化工作主要针对直接体渲染方法本身,通过降低渲染频率和合理分配渲染精度实现优化。优化内容包括但不限于以下几点:①标识进行期间,大部分时间是用于对渲染结果进行观察,此时渲染内容没有任何修改,通过判断使用者是否处于观察状态,适时地停止渲染内容的刷新,便可减少不必要的资源浪费;②标识进行过程中为了获得正确的标识位置,需要不断调整标识工具的位置。连续操作过程中,屏幕在较短的时间里需要进行多次的渲染任务,如果不对渲染进行优化,直接体渲染对资源的大量占用将导致屏幕渲染帧率的急剧下降,严重时会出现明显的“卡顿”现象,此时,调整渲染算法中对资源占用较高的参数,通过适当降低渲染质量来减少资源的占用,则可以获得较顺滑的操作体验。同时为了保证观察时渲染图像的质量,当停止修改操作时恢复到正常的采样频率和迭代次数;③在正式渲染前,提供给使用者多种渲染质量的选择,使用者根据当前的硬件情况选择恰当的渲染质量,从而获得针对性的渲染优化。

### 3 铸件体素单元标识应用实例

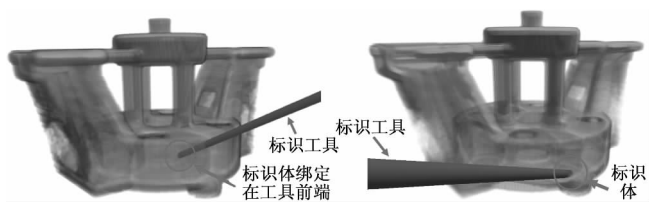
图 6 为该流程中使用面渲染技术(见图 6a)与直接体渲染技术(见图 6b)分别对相同的模拟数据进行显示的效果对比。从图 6a 中可以看出,面渲染技术比较清晰和明亮,但一次只能显示一个表面的信息,若分析人员希望了解内部信息,则需要使用剖切、等值面抽取等方法进一步处理数据,然后才能观察到内部信息。而图 6b 中体渲染的显示效果没有面渲染的效果饱和,但分析人员可以看透整个铸件,直接了解到不同温度区域在铸件中的整体分布情况。可以看出,体渲染更突出数据的全局关系,使分析人员能在一次渲染中获得更多的特征信息。



(a) 面渲染效果 (b) 体渲染效果

图 6 两种渲染方式的对比

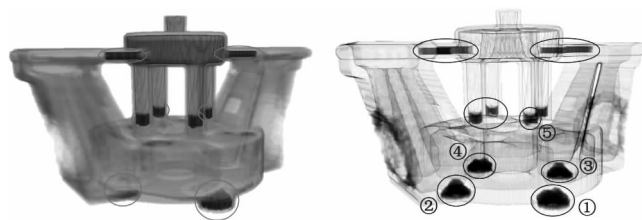
图 7 为使用标识工具对该模拟数据进行标识的方法。标识工具与直接体渲染的内容合理融合,使分析人员能顺利地完标识定位,保证了标识的正确进行。标识体(定位用的范围球)与标识工具的前端绑定在一起,分析人员移动标识工具、改变其倾角或改变其前伸深度的同时都将改变标识体在数据场的位置,从而使标识可以准确地定位到目标体素。



(a) 移动前 (b) 移动后

图 7 使用标识工具进行体素标识

图 8 为分析人员标识出来的可能出现缩孔、缩松的体素的实时反馈。图 8a 是将标识结果与温度数据显示在同一个窗口中,而标识后的体素表现为深色区域,有利于分析人员将其与未标识体素区别开来。分析人员可以对已标识结果进行审查和修改。图 8b 则是将温度数据与标识结果分离开来,显示窗口中只渲染标识结果和铸件的几何结构。这种方式表现标识结果在铸件中的相对分布情况和标识量的大小。表 1 为图 8b 中相应序号标识区域的数据,其中数据场的体素划分标准为  $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ ,每个体素所表示的体积为  $1\text{ cm}^3$ 。



(a) 同屏显示反馈 (b) 第二屏显示反馈

图 8 实时显示反馈

表 1 标识量结果列表(部分)

序号	体素数量/个	体积/ $\text{cm}^3$
1	672	672
2	635	635
3	613	613
4	589	589
5	89	89

### 4 结 论

在直接体渲染技术的基础上,提出针对铸造模拟数据中的缺陷体素单元的标识技术。直接体渲染,让分析人员可以对铸件的整体信息和内部结构有着整体的把握。而提出的标识技术则允许分析人员以一种自然的方式对体素单元进行准确定位和标识确认。针对渲染进行优化,让整个操作过程有着良好的体验,并从侧面确保了标识工作的正确进行。

#### 参 考 文 献

- [1] 王志坚,赵岩,宋鸿武,等. 大型铝合金轮毂低压铸造过程数值模拟及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(3):256-259.
- [2] 夏望红,刘琪明,任川东. 基于 MagmaSoft 的悬置支架挤压铸造模拟分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(11):1 171-1 173.
- [3] 许晓平,王跃飞,雷金辉,等. 内热式多级连续真空炉温度场的有限元分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(10):904-907.
- [4] 王啟军,廖敦明,周建新,等. 低压铸造 CAE 软件的开发及应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(3):227-230.
- [5] 于靖,张新平,许庆彦,等. 基于熔模铸造模拟软件的铸钢件工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2004(5):36-37.
- [6] 吴晓军,刘伟军,王天然. 基于八叉树的三维网络模型体素化方法[J]. 工程图学学报, 2005(4):1-7.
- [7] 陈为. 数据可视化[M]. 北京:电子工业出版社, 2013.
- [8] 张怡. 实时体绘制关键技术研究[D]. 天津:天津大学, 2009.
- [9] KRUGER J, WESTERMANN R. Acceleration techniques for GPU-based volume rendering[J]. IEEE Visualization Conference, 2003:287-292.
- [10] HANSEN C D, JOHNSON C R. The Visualization Handbook [M]. Amsterdam: Elsevier Inc., 2005.
- [11] SCHARSACH H, HADWIGER M, NEUBAUER A. Perspective isosurface and direct volume rendering for virtual endoscopy applications[J]. IEEE-VGTC Symposium on Visualization, 2006:315-322.

(编辑:袁振国)