第 48 卷第 12 期
2020 年 12 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 12
December，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200326

基于工业 CT 数据的结构陶瓷建模及有限元分析

杨 晓，黄 健，刘学建，黄政仁

(中国科学院上海硅酸盐研究所，高性能陶瓷和超微结构国家重点实验室，上海 200050)

摘 要：通过工业 CT 的三维数据形成有限元分析的几何模型包含内部缺陷等细节信息，与理想模型相比更有利于获得准确的模拟结果。以陶瓷部件 CT 无损检测的三维数据为基础，建立对应的有限元几何模型，研究了理想模型与 CT 模型在不同工况下的应力分布差异。结果表明：工业 CT 数据经过处理能够建立有限元几何模型；无缺陷的 CT 模型与理想模型得到的应力分布结果相当，但是存在缺陷或特殊结构时，CT 模型获得的模拟结果更接近实际工况。

关键词：工业 CT；结构陶瓷；有限元；建模
中图分类号：TQ174　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)12–1893–05
网络出版时间：2020–10–13

Modeling and Finite Element Analysis of Structural Ceramics Based on Industrial CT Data

YANG Xiao, *HUANG Jian*, *LIU Xuejian*, *HUANG Zhengren*
(State Key Lab of High Performance Ceramics and Superfine Microstructure, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: CT models come from the three-dimensional data of industrial CT test which contain the internal defects, and can draw the more accurate conclusion rather than some ideal models. A CT finite element geometry model of three different ceramic components, containing internal details such as inner defects, was proposed based on the CT non-destructive test. The stress distributions of ceramic components were analyzed by both an ideal finite element model and a CT finite element model. It is indicated that the STL files obtained from the industrial CT test data can be processed to obtain the geometric model to realize the finite element analysis. The results of stress distribution obtained by the fault-free CT model are similar to those obtained by the ideal model. However, the simulation data obtained by the CT model are closer to the results under the actual working conditions when there are defects or special structures.

Keywords: industrial CT; structural ceramics; finite element; modeling

碳化硅等结构陶瓷材料因其独特的热学、力学等性能在国防、军工、航空航天等领域具有越来越广泛的应用[1]，但是陶瓷材料对缺陷非常敏感，因此缺陷的研究对于工程陶瓷具有重要的现实意义[2–3]。工业 CT 是最优的无损检测方式之一，能够在不损害备件物体的前提下直观的获得被检部件的三维信息[4–11]；也是目前对陶瓷材料内部缺陷研究的重要手段之一。有限元方法是利用数学近似的方法对真实物理系统进行模拟，具有强大的计算能力。通过工业 CT 对工程陶瓷进行无损检测，并根据获得的三维数据形成有限元分析的几何模型，能够包含内部缺陷、细节等信息，更加接近真实的工况从而更有利于获得更准确的模拟结果。近年来，随着科学技术的进步，工业 CT 检测能力不断提升，能够实现对结构部件的高精度检测，从而使得对结构陶瓷的三维建模及有限元分析成为可能。

基于此，以不同形状的结构陶瓷部件为研究对象，对其进行工业 CT 无损检测，并以 CT 检测的三维数据为基础建立包含相关内部信息的有限元几何模型，并进行简单的工况模拟；同时对上述结构陶

收稿日期：2020–05–08。　修订日期：2020–06–18。
基金项目：上海市青年科技英才扬帆计划(19YF1454200)；国家自然科学青年基金(51902329)资助。
第一作者：杨 晓(1987—)，女，副研究员。

Received date: 2020–05–08.　**Revised date:** 2020–06–18.
First author: YANG Xiao (1987–), female, Ph.D., associate Professor.
E-mail: yangxiao@mail.sic.ac.cn

瓷部件直接进行有限元建模，不考虑相关缺陷的信息，获得该陶瓷部件的“理想模型”，研究理想模型与 CT 模型对模拟结果的影响，探讨陶瓷材料的 CT 数据的有限元模型的构建途径，为陶瓷材料的工程化应用提供数据支撑。

1 实验

1.1 样品制备

采用碳化硅标准试条、碳化硅长管及碳化硅空心球为研究对象：试条尺寸为 3 mm×4 mm×6 mm，试条中心预埋有尺寸约ϕ(0.2~0.3) mm、长度 7.5 mm 的孔洞缺陷；长管尺寸为ϕ15 mm×40 mm，碳化硅空心球直径ϕ150 mm，由 2 个半球拼接而成，2 半球之间存在接缝。陶瓷材料致密度均大于 98%。

1.2 样品表征

无损检测设备采用德国 Yxlon 公司 600 kV 工业 CT 无损检测系统完成，其焦点尺寸 0.5 mm，探测器为平板探测器。有限元分析采用 ANASYS 有限元软件实现。

通过常规焦点的工业 CT 对上述研究对象进行无损检测获取各部件内部信息的三维图像，根据 CT 获取的数据建立能够用于有限元分析的几何模型，并通过有限元方法分析各部件的受力状态。

1.3 CT 数据处理

图 1 为各部件的工业 CT 三维数据。通过图像后处理软件进行三维数据的点云数据处理，建立部件灰度域值确定部件的表面及不同材质的两相界面，并去除散射线造成的伪影及杂点，对表面进行光滑处理，并将表面存储为点云数据导出为 stl 文件。所导出的 stl 文件为部件的表面数据，不包含内部信息，因此需要对 stl 文件的表面数据进行实体化处理，从而获得可用于有限元分析的各部件的几何模型。

对缺陷位置的点云数据进行处理。针对碳化硅试条其内部缺陷应按照空气的灰度值处理，由于检测精度的问题，检测到的内部缺陷在直径方向仅有 2 个点，由于预置缺陷为圆柱形，因此在点云处理过程中将该内部缺陷简化为一维气孔，即无尖端的裂纹，进行处理。而碳化硅空心球的连接缝未发现明显缺陷，其灰度值可认为与球壁灰度值相当，但连接缝处存在少量的接缝台阶位置，且陶瓷烧结后表面未经加工处理，由于 CT 检测精度的原因，陶瓷球体的表面状态展示不明晰，因此在点云处理过程中根据实际情况和需要进行了表面平滑处理。

根据上述处理方式建立的 CT 有限元模型如图 2 所示。

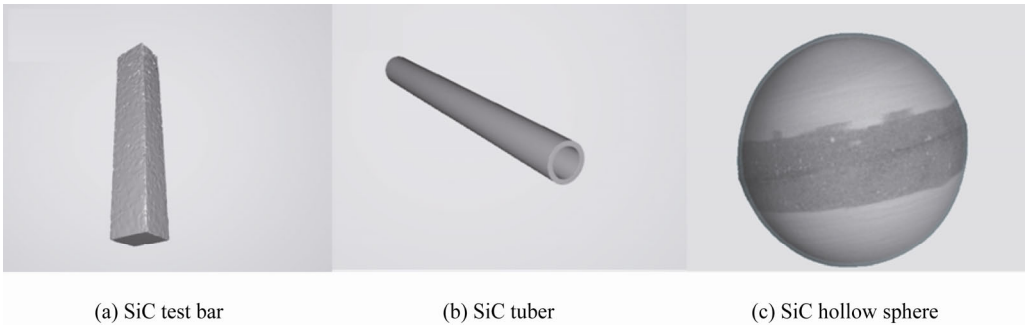


图 1 工业 CT 三维数据
Fig. 1 3D data from industrial CT

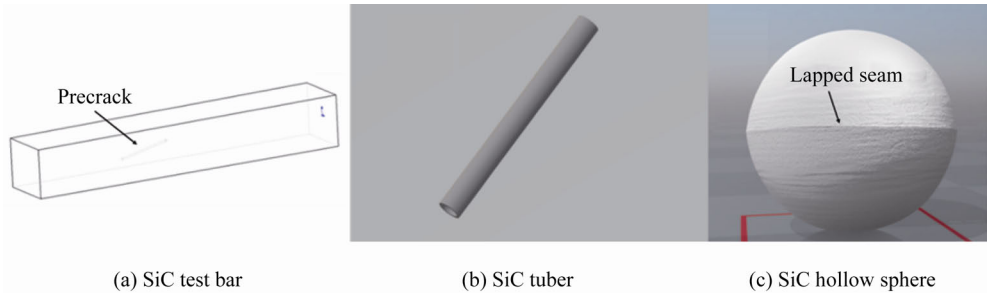


图 2 CT 有限元模型
Fig. 2 Finite element models by CT data

2　结果与讨论

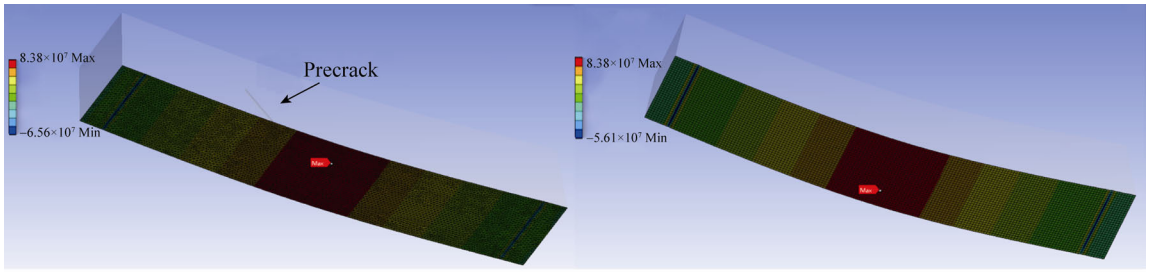
2.1　碳化硅试条(含内部缺陷)的有限元分析

将含内部缺陷的碳化硅试条的 CT 数据建立的有限元模型导入 ANSYS 软件进行有限元模拟。

根据碳化硅试条的实际工作条件确定有限元分析的工况条件，分析碳化硅试条在三点弯曲受力状态，载荷为 300 N，跨距 30 mm 时部件整体及缺陷区域的应力分布。为了分析 CT 建模的区别，分别考察了理想模型与 CT 数据模型在上述工况下的应力分布。

图 3 为 CT 模型及理想模型在 300 N 载荷情况下的应力分布情况。由图 3 可见，两模型外部应力分布基本相同，且所受最大应力值相当，其位置基本一致。

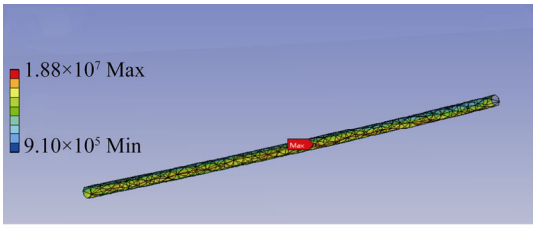
图 4 为缺陷处的应力分布。由图 4 可见，缺陷处的最大拉应力为 18.84 MPa，由于预置缺陷位于试条内部中间位置，理论上根据材料在三点弯曲过程中的应力分布，材料厚度中心处应不承受任何应力，也就是说此处应力应为 0；但是实际预埋缺陷偏离了试条的中心位置，因此缺陷处承受了一定的拉应力。但是由于该缺陷简化为圆柱形缺陷对碳化硅试条的材料强度几乎未造成任何影响，这是与三点弯曲过程中的应力分布理论相互一致的。



(a) CT model (preset defect) max tensile stress 83.85 MPa　　(b) Ideal model max tensile stress 83.83 MPa

图 3　碳化硅试条的应力分布图

Fig. 3　Stress distribution of SiC test bar



Max tensile stress 18.84 MPa

图 4　碳化硅试条 CT 模型缺陷处的应力分布

Fig. 4　Stress distribution around the preset defect of SiC test bar

2.2　碳化硅管有限元分析

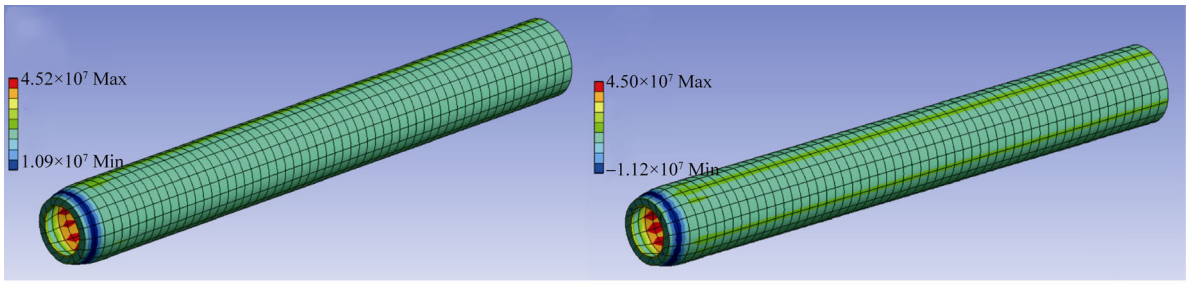
将碳化硅管的 CT 数据建立的有限元模型导入 ANSYS 软件进行有限元模拟。根据碳化硅管的实际工作条件，确定有限元分析的工况条件为碳化硅管内为 10 MPa 高压气体，外侧为常压气体，管头端部固定，分析部件整体的应力分布。分别考察了理想模型与 CT 数据模型在上述工况下的应力分布，其结果如图 5 所示。CT 模型为正常状态，与理想模型得到的碳化硅管的整体应力分布几乎完全一致，两者的最大应力值相差仅为 0.47%。上述结果表明无缺陷状态下 CT 模型与理想模型几乎无差异，对有限元的分析结果几乎无影响。

2.3　碳化硅空心球有限元分析

根据碳化硅空心球的实际工作条件，确定有限元分析的工况条件为球体整体浸没于液体水中并对液体加载 100 MPa 的压力，此时球体外侧处于 100 MPa 等静压状态下，分析部件整体的应力分布。分别考察了理想模型与 CT 数据模型在上述工况下的应力分布，理想模型为理想的球体，CT 模型中存在连接缝，且某些位置具有一定的台阶。

图 7 为理想模型与 CT 模型的应力模拟结果。由图 7 可见，理想模型在上述工况条件下,空心球体只受压应力且受力均匀，内表面受压应力最大为 1 300 MPa；但 CT 模型上述工况条件下模拟结果表明，除压应力外内表面受一定的拉应力，且两表面的拉应力及压应力分布均不均匀，最大拉应力位于内表面的某个台阶的棱边处，为 49.6 MPa，如图 6 所示；最大压应力为 2 582 MPa，位于球体外壁两个半球的连接缝处，接近理想模型的两倍，如图 7 所示。CT 模型的最大拉应力及最大压应力值均远大于

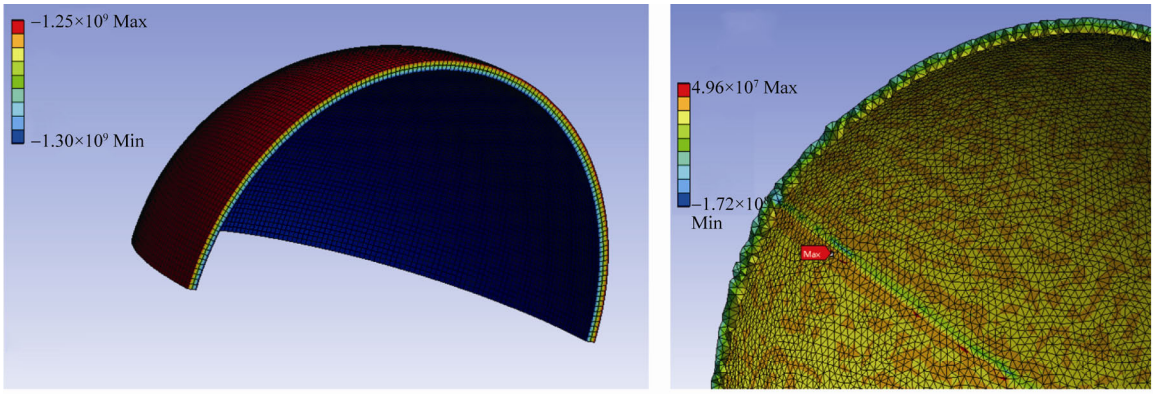
理想球体的情况。这主要是因为接缝棱边可视为球体的一处大缺陷，在上述工况条件下缺陷引起应力集中，而在棱边接缝上曲率最小的位置应力集中现象最为明显，从而表现为受到更大的应力。内表面某接缝处受到了最大的拉应力，而对于外表面，由于接缝的存在破坏了球体的整体性，原本由整个球体承受的压力需要由单个半球承受，其最大压应力出现在了两个半球的近中心处，且其值接近理想模型最大压应力的 2 倍；外表面上的中间接缝处所受的压应力反而最小。由于 CT 模型结合了球体连接缝的实际情况，采用该模型获得的数据与实际工况具有更好的符合性。



(a) CT model, max tensile stress 45.18 MPa (b) Ideal model, max tensile stress 44.97 MPa

图 5 碳化硅管的应力分布图

Fig. 5 Stress distribution of SiC tube



(a) Profile of CT model (b) Profile of ideal model max tensile stress at the inner surface of the joint step

图 6 碳化硅空心球的应力分布

Fig. 6 Stress distribution of SiC hollow sphere

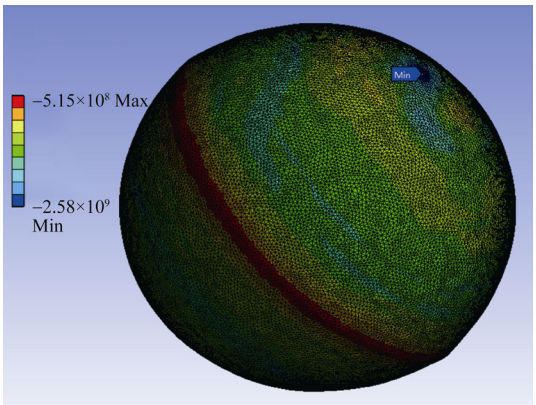


图 7 碳化硅空心球的外表面应力分布图

Fig. 7 Outer surface stress distribution of SiC hollow sphere

3 结论

综上所述，对工业 CT 获得的三维数据进行处理可获得能够实现有限元分析的几何模型；无缺陷的 CT 模型与理想模型得到的应力分布结果相当；但是存在缺陷或特殊结构时，CT 模型获得的模拟结果更接近实际工况。

针对较为简单的样件或包含少量缺陷的简单样件，可通过上述方法实现三维数据的建模，但是针对复杂形状的样件，通过 CT 数据的建模处理仍然较为困难，主要难点仍然在于 CT 扫描复杂样件时产生大量伪影、赝像等问题更为复杂，点云数据量

大处理困难，后续研究中需要从复杂部件的角度考虑 CT 数据的建模问题。

参考文献:

[1] 佘继红, 江东亮. 碳化硅陶瓷的发展与应用[J]. 陶瓷工程, 1998(3): 3–11, 28.
SHE Jihong, JIANG Dongliang. Ceram Engin (in Chinese), 1998(3): 3–11, 28.

[2] YANG Xiao, LIU Xuejian, HUANG Zhengren, et al. Vickers indentation crack analysis of solid-phase-sintered silicon carbide ceramics[J]. Ceram Inter, 2012, 39(1): 841–845.

[3] YANG Xiao, LIU Xuejian, WANG Lujie, et al. Effects of artificial defect on the material residual strength of SiC ceramics after thermal-shock[J]. Mater Sci Eng A, 2017, 707: 159–163.

[4] 冯雨欣, 王玥涵, 曲佳欣, 等. 基于 CT 的股骨精确建模与三维有限元分析[J]. 软件, 2020, 41(1): 46–49.
FENG Yuxin, WANG Yuehan, QU Jiaxin, et al. Software, 2020, 41(1): 46–49.

[5] 黎超, 杨贞军, 黄宇劼. 基于 CT 图像的细观混凝土模型中低应变率冲击下端部摩擦效应研究[J]. 计算力学学报, 2019, 36(3): 383–388.
LI Chao, YANG Zhenjun, HUANG Yujie. J Comput Mech, 2019, 36(3): 383–388.

[6] 王玉凤, 张建华, 薛昌敖. 基于锥形束 CT 数据的牙列建模及有限元分析研究[J]. 中国数字医学, 2018, 13(10): 46–48.
WANG Yufeng, ZHANG Jianhua, XUE Changao. China Digital Medicine, 2018, 13(10): 46–48.

[7] 王晓艳, 齐子诚, 唐盛明, 等. 工业 CT 在喷管逆向重构中的应用[J]. 无损检测, 2014, 36(1): 24–26, 57.
WANG Xiaoyan, QI Zicheng, TANG Shengming, et al. Nondestructive Testing, 2014, 36(1): 24–26, 57.

[8] 董方旭, 王从科, 赵付宝, 等. 工业 CT 检测工艺参数对复合材料检测图像质量的影响[J]. 无损检测, 2017, 39(12): 15–19.
DONG Fangxu, WANG Congke, ZHAO Fubao, et al. Nondestructive Testing, 2017, 39(12): 15–19.

[9] ZHANG Mingzhong, JIVKOV, ANDREY P. Micromechanical modelling of deformation and fracture of hydrating cement paste using X-ray computed tomography characterisation[J]. Composites Part B: Eng, 2016, 88: 64–72.

[10] STAUDE A, BARTSCHER M, EHRIG K, et al. Quantification of the capability of micro-CT to detect defects in castings using a new test piece and a voxel-based comparison method[J]. Ndt E Interl, 2011, 44: 531–536.

[11] JOËL Lachambre, JULIEN Réthoré, ARNAUD Weck, et al. Extraction of stress intensity factors for 3D small fatigue cracks using digital volume correlation and X-ray tomography[J]. Inter J Fatig, 2016, 71: 3–10.

※　※　※　※　※　※　※　※　※　※　※



杨晓，中国科学院上海硅酸盐研究所 结构陶瓷与复合材料工程研究中心，副研究员。主持国家自然科学青年基金、上海市青年科技英才扬帆计划、及中科院项目在内的多项课题。主要研究方向为结构陶瓷的制备科学、缺陷无损检测及其对力学性能的影响研究，工业 CT 无损检测技术研究等。