复杂陶瓷件烧结过程温度场数值模拟及仿真

汪 苏 陈 佳 李建明
(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 随着陶瓷应用领域的不断扩展,对其品质要求也越来越高. 而传统的设计工艺与制造过程是相分离的,到最终生产工艺的定型需要大量的反复修改. 为解决传统陶瓷设计工艺只能依靠经验的现状,节约成本,缩短生产周期,故开发了复杂陶瓷零构件烧结过程计算机仿真软件. 首先借助传热学原理来建立温度场模型,其次借助有限差分法处理温度场模型,编写出此仿真模拟软件的核心计算代码,从而实现了复杂陶瓷零件和组合构件烧结过程中温度场的模拟仿真.

关 键 词: 烧结; 温度场; 陶瓷; 计算机仿真
中图分类号: TB 24; TF 1. 24. 5
文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2004)08-0787-04

Study on the simulation of the temperature field of sintering complex ceramics parts

Wang Su Chen Jia Li Jianming
(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: As the applied fields of ceramics enlarged, the quality of the ceramics parts was needed higher and higher. However, the designing and the manufacturing of the ceramics parts were separated, and the designing resolution had to be amended many times before it became the final resolution. In order to solve the problem that designing ceramics parts has to depend on experience, to save the cost and to shorten the manufacturing time, the simulation software on the temperature field of sintering complex ceramics parts was developed. First, the formula of temperature field was founded on the basis of the diathermanous theory. Second, the Finite Difference Method was used to deal with the formula of temperature field and make the core code of this software for calculating, thus the simulation of the temperature field of sintering complex ceramics parts and combined component was realized.

Key words: sintering; temperature field; ceramics; computer simulation

随着陶瓷材料的不断发展,其应用领域不断扩大. 陶瓷材料具有耐磨、耐高温等特点,在飞机制造中许多关键零件采用陶瓷件替代金属材料. 复杂陶瓷件形式多样、结构复杂,如果工艺参数选择不当,会造成裂纹等缺陷. 因此,对其品质有极高的要求,相应的复杂陶瓷件材料和制造工艺过程控制便十分重要. 复杂陶瓷件属于陶瓷制品,传统陶瓷制造技术的产品设计过程和制造过程相分离,使得从产品设计开始到生产工艺的定型需要大量的反复修改,依靠"经验+试验"方法制订工艺. 这些成为阻碍陶瓷技术发展的瓶颈,迫切需要采用新的产品开发模式和技术来改变这种局面. 随着计算机技术的发展,陶瓷制造技术发生了很大变化,采用计算机仿真技术对陶瓷生产过程进行仿真,可以对生产工艺选择的合理性进行验证,而且还可以优化生产工艺、减少损失、缩短开发周期、提高产品质量等.

复杂陶瓷件的生产过程主要由坯体成型、干燥和烧结 3 部分组成. 其中坯体成型是将坯料加工成为有一定形状和尺寸的半成品; 干燥是排除

收稿日期: 2003-04-24
作者简介: 汪 苏(1959-),男,北京人,教授, seapig59@163. com.

生坯中的水分,属于物理变化过程;烧结是通过高温处理,使坯体发生一系列物理化学变化,形成预期的矿物组成和显微结构,从而达到固定外形并获得所要求性能的工序,就是发生质变成瓷过程.要完成复杂陶瓷件生产过程的数值模拟,烧结过程的数值模拟是至关重要的.陶瓷在烧结过程中,影响产品性能的主要因素是温度和气氛,只有按照坯体在烧结过程中物理化学变化的需要来提供给热量和气氛,才能获得理想的产品.

北京航空航天大学机械学院材料加工与控制系结合复杂陶瓷件的制造工艺及生产特点,开发了复杂陶瓷件仿真系统.

1 数学模型的建立

首先,为建立坯体的传热模型,现作如下假设:

①坯体为各向同性;②烧结过程中没有热损失;③烧结气氛中只有包围坯体的部分与坯体发生热交换,而远离坯体气氛视为烧结环境;④在坯体烧结过程中,仅考虑热传导和对流传热.

根据实际烧结过程,结合假设条件,可将烧结系统简化为图 1 所示.

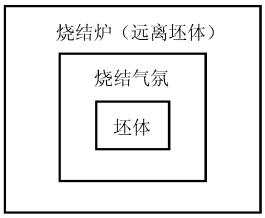


图 1 烧结系统简化图

对此简化系统进行热分析,将坯体在烧结过程中发生化学反应产生热看成一种内热源,含内热源的各向同性体热传导基本方程为

$$\rho C_{\mathrm{p}}\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q' \tag{1}$$

式中 ρ 为密度;C_{p} 为比热;λ 为导热系数;q' 为化学反应热.

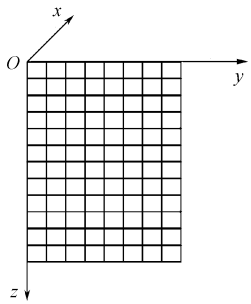


图 2 系统网格剖分示意图

将系统如图 2 所示网格剖分,x 方向也以相同形式剖分.

至此,烧结系统的传热计算模型建立完毕.

2 建立离散方程

对求解域和时间域进行离散化处理并应用有限差分法即可求解坯体任意时刻的温度分布.

求解域内任一点与其周围 6 个点的分布如图 3 所示.取系统中的一个微单元(内节点)进行热平衡分析,其边长分别为 $\mathrm{d}x,\mathrm{d}y,\mathrm{d}z$,时间域的离散网格间距为 $\mathrm{d}t$,离散后各点的标号见图 3.

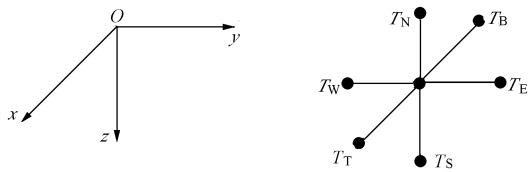


图 3 三维网格示意图

将上式(1)按图 3 所示网格离散化,得到:

1) 坯体的传热方式主要为热传导,其离散公式为

$$T_{\mathrm{P}}^{t+\Delta t}=T_{\mathrm{P}}^{t}-a_{\mathrm{E}}(T_{\mathrm{P}}^{t}-T_{\mathrm{E}}^{t})-a_{\mathrm{W}}(T_{\mathrm{P}}^{t}-T_{\mathrm{W}}^{t})-a_{\mathrm{N}}(T_{\mathrm{P}}^{t}-T_{\mathrm{N}}^{t})-a_{\mathrm{S}}(T_{\mathrm{P}}^{t}-T_{\mathrm{S}}^{t})-a_{\mathrm{T}}(T_{\mathrm{P}}^{t}-T_{\mathrm{T}}^{t})-a_{\mathrm{B}}(T_{\mathrm{P}}^{t}-T_{\mathrm{B}}^{t}) \tag{2}$$

其中,$T_{\mathrm{P}}^{t},T_{\mathrm{E}}^{t},T_{\mathrm{W}}^{t},T_{\mathrm{N}}^{t},T_{\mathrm{S}}^{t},T_{\mathrm{T}}^{t},T_{\mathrm{B}}^{t}$ 分别为各节点在 t 时刻温度;$T_{\mathrm{P}}^{t+\Delta t}$ 为节点 P 在 $t+\Delta t$ 时刻温度;$a_{\mathrm{E}},a_{\mathrm{W}},a_{\mathrm{N}},a_{\mathrm{S}},a_{\mathrm{T}},a_{\mathrm{B}}$ 分别为各节点与节点 P 的换热系数:

$$a_{\mathrm{E}}=\frac{\Delta t}{\rho c\Delta x\left(r_{\mathrm{E}}+\frac{\Delta x}{\lambda}\right)}$$

$$a_{\mathrm{W}}=\frac{\Delta t}{\rho c\Delta x\left(r_{\mathrm{W}}+\frac{\Delta x}{\lambda}\right)}$$

$$a_{\mathrm{N}}=\frac{\Delta t}{\rho c\Delta x\left(r_{\mathrm{N}}+\frac{\Delta x}{\lambda}\right)}$$

$$a_{\mathrm{S}}=\frac{\Delta t}{\rho c\Delta x\left(r_{\mathrm{S}}+\frac{\Delta x}{\lambda}\right)}$$

$$a_{\mathrm{T}}=\frac{\Delta t}{\rho c\Delta x\left(r_{\mathrm{T}}+\frac{\Delta x}{\lambda}\right)}$$

$$a_{\mathrm{B}}=\frac{\Delta t}{\rho c\Delta x\left(r_{\mathrm{B}}+\frac{\Delta x}{\lambda}\right)}$$

式中 λ 为微单元的导热系数;r 为微单元换热系数.

2) 烧结气氛的传热方式主要为对流传热,用内节点法差分的差分公式:

$$\rho_{(i)} C_{(i)} V_{(i)} \frac{T_{(t+\Delta t,j)} - T_{(t,j)}}{\Delta t} = \sum_{j=1}^{6} h_{(i,j)} S_{(i,j)} [T_{(i,j)} - T_{(t,j)}] \quad (3)$$

$$h_{(i,j)} = a_c \quad (4)$$

式中　$\rho_{(i)}$ 为当前单元 i 的密度;$C_{(i)}$ 为当前单元 i 的比热;$V_{(i)}$,$S_{(i,j)}$ 为几何参数;$T_{(t,j)}$ 为当前单元 j 在 t 时刻的温度;$T_{(i,j)}$ 为与当前单元 i 相邻单元 j 在 t 时刻的温度;$h_{(i,j)}$ 为与当前单元 i 相邻单元 j 与当前单元 i 的传热系数;a_c 为对流换热系数.

烧结气氛范围的确定直接影响数值模拟结果的精确性,选择范围越大,精度越高,但如果选择范围太大,计算单元过多,会影响计算速度,所以,应当合理选取烧结气氛范围.

3) 边界条件

如图 1 所示:烧结炉中坯体周围烧结气氛(假设烧结气氛)和远离坯体气氛交界面,此交界面微单元离散公式与烧结气氛公式相同,只是与之相邻远离坯体气氛温度为烧结制度温度 $T_{(t)}$,即:

$$T_{(t,j)} = T_{(t)}$$

假设烧结气氛和坯体的交界面的热交换考虑为对流换热和热传导;

对于假设烧结气氛:采用公式(3),但与坯体相邻单元的传热系数为

$$h_{(i,j)} = \frac{1}{\frac{1}{a_c} + \frac{\frac{\Delta x}{2}}{\lambda}}$$

对于坯体:采用公式(2),但与假设气体保护环境相邻单元的传热系数 r 须由坯体材料和保护环境气体成分来决定.

3　复杂陶瓷件烧结过程的数值模拟

北京航空航天大学机械学院材料加工与控制系开发了复杂陶瓷件烧结过程温度场分析仿真软件,此软件分为 3 大模块:前处理,中间处理及后处理. 前处理主要对分析实体系统进行几何离散化,此软件可读入 ProE,UG,Solidworkes 所绘制的三维实体图形并对其进行剖分;中间处理部分进行温度场数值模拟计算,计算过程中可选择不同的烧结气氛和烧结制度;后处理部分则用于计算结果的可视化,显示坯体的温度场分布. 其系统组成如图 4 所示.

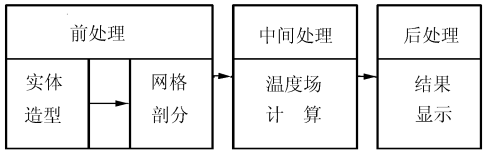


图 4　软件系统框图

现详细介绍复杂陶瓷零构件仿真软件,并以结构较为复杂的陶瓷制品——卫生洁具为例进行验证. 卫生洁具是由内外两层陶瓷结合一体烧结而成. 其内部为复杂曲面,冲水时水流状态为漩流,随着其内部曲面的不断调整可以模拟流体状态,同时其内外两层的结构使其容易产生裂纹,因此以其为例具有代表性.

3.1　前处理

1) 读入 STL 实体模型文件(图 5),本软件可读入 ProE,UG,Solidworkes 所绘制的三维实体图形;

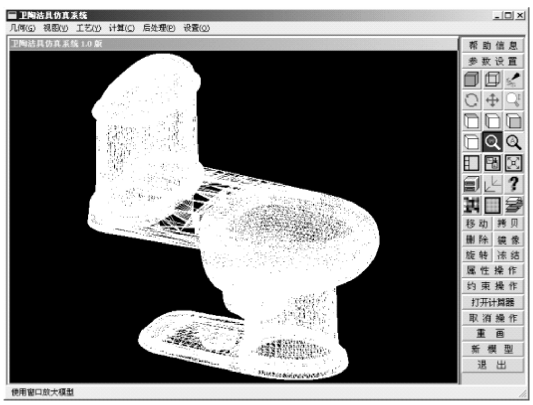


图 5　读入 STL 实体文件

2) 对读入的实体模型进行网格剖分(图 6),形成网格文件. 剖分时应合理选择剖分单元尺寸,剖分单元过多,计算速度会受到影响.

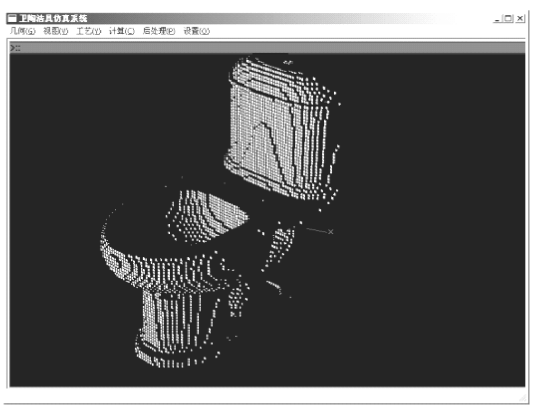


图 6　网格剖分

3.2 中间处理

1）设置烧结参数(图 7),可得到合理的烧结制度;

2）烧结计算(图 8),计算过程中可随时停止计算并观察坯体温度场.

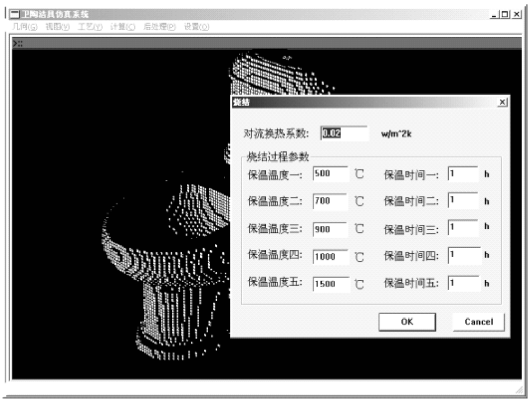


图 7 设置烧结参数

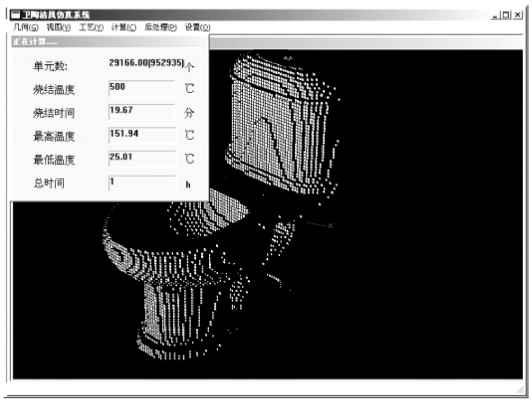


图 8 烧结计算

3.3 后处理

1）温度场场值显示(图 9),可参照屏幕右边的温度条得到坯体各单元的具体温度;

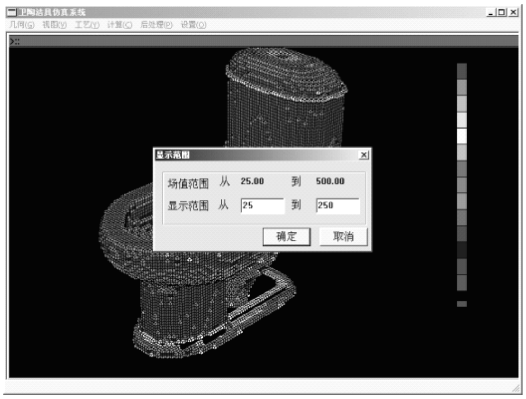


图 9 温度场场值显示

2）截面温度场显示(图 10),可选择不同截面观察坯体温度场.

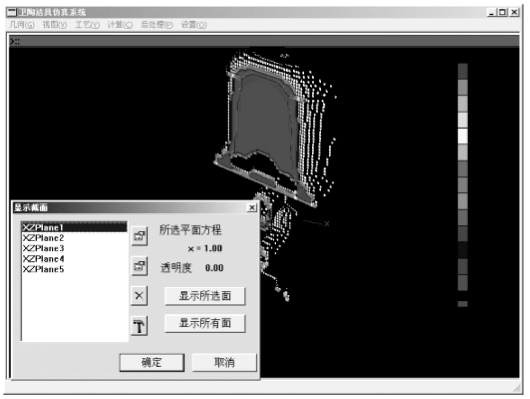


图 10 截面温度场显示

4 结 论

从传热学基本原理出发,利用有限差分方法建立了复杂陶瓷零构件坯体烧结过程温度场计算模型,开发了复杂陶瓷零构件仿真系统软件,并以卫生洁具为例进行了模拟计算,得到坯体烧结过程的温度场分布. 为制定合理的烧结工艺奠定了良好的基础.

参考文献（**References**）

[1] 华南工学院,南京化工学院,武汉建筑材料工业学院. 陶瓷工艺学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1980
South China University of Technology, Nanjing University of Technology, Wuhan University of Technology. Technology of ceramics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1980(in Chinese)

[2] 李家驹,马铁成. 陶瓷工艺学[M]. 北京:中国轻工业出版社,1999
Li Jiaju, Ma Tiecheng. Techniques of ceramics[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1999(in Chinese)

[3] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1998
Yang Shiming, Tao Wenquan. The study of heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998(in Chinese)

[4] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1998
Kong Xiangqian. Finite element method in heat transfer[M]. Beijing: Science Press, 1998(in Chinese)

[5] 刘 庄,吴肇基. 热处理过程的数值模拟[M]. 北京:科学出版社,1996
Liu Zhuang, Wu Zhaoji. Numerical simulation in heat treatment[M]. Beijing: Science Press, 1996(in Chinese)