

# 基于 ABAQUS 的电解槽温度应力快速分析

秦忠国<sup>1</sup>, 魏雨露<sup>1</sup>, 刘聪<sup>2</sup>, 李全海<sup>1</sup>

1. 河海大学力学与材料学院, 南京 210098
2. 江苏省交通科学研究院, 南京 210017

**摘要** 针对电解槽在运行过程中常出现的因温度应力引起的裂缝问题, 使用 Visual Basic 编写了电解槽三维温度场及温度应力问题的有限元分析前处理程序, 形成操作界面, 仅需输入少量参数就能快速生成分析不同尺寸、不同材料、不同气候、不同液面高度下电解槽温度场及温度应力问题的模型输入文件, 再用 ABAQUS 有限元软件对模型进行分析。该程序操作简单, 工作量少, 适合于进行批量尺寸、批量工况下的电解槽应力分布的快速分析, 通过温度场与温度应力的分布规律, 分析影响其变化的主要因素, 可为电解槽的设计和延长使用寿命提供理论指导。

**关键词** 电解槽; 有限元软件; 温度应力; ABAQUS; Visual Basic

**中图分类号** TP12

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.08.008

## Rapid Analysis of Electrolyzer's Temperature Stress Based on ABAQUS

QIN Zhongguo<sup>1</sup>, WEI Yulu<sup>1</sup>, LIU Cong<sup>2</sup>, LI Quanhai<sup>1</sup>

1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China
2. Jiangsu Transportation Research Institute, Nanjing 210017, China

**Abstract** For the problem of the electrolytic tank cracks caused by thermal stress appearing in the operation process, a finite element pre-treatment procedure written in VB is developed to analyze the three-dimensional temperature field and temperature stress of the electrolytic tank. The model input files to be imported to ABAQUS to analyze the electrolytic tank's temperature field and thermal stress problem can be quickly generated, with different sizes, different materials, different climates and different liquid level heights according to a few parameters from the interface. This procedure is simple to operate and suitable for batch size, batch condition of electrolytic cell rapid analysis. By means of the distribution law of temperature field and thermal stress, the main factors affecting the change are analyzed to provide a theoretical guidance for the design of the electrolytic cell and prolong its service life.

**Keywords** electrolyzer; finite element model; temperature stress; ABAQUS; Visual Basic

电解槽是电解铜产业中最主要的生产设备, 运行期间若槽体开裂将致使生产过程中断, 给生产企业带来很大经济损失, 槽体开裂引发电解液泄漏还会严重污染周边环境。研究表明, 电解液温度变化导致的温度应力超标是导致槽体开裂的主要原因, 因此对运行中电解槽的温度场及温度应力进行分析非常必要。

目前对电解槽的研究主要集中在冶金行业, 研究内容多为改进和提高其防腐能力与电解效率<sup>[1,2]</sup>, 国外于 20 世纪 90 年代将有限元方法引入电解槽设计中, 中国领先企业也在 2009 年第一次完成了运行期间电解槽的有限元分析。

电解槽温度场温度应力分析涉及到计算力学知识, 而 VB 是 Microsoft 公司推出的可视化编程软件, 操作简单, 能较

收稿日期: 2013-10-10; 修回日期: 2013-11-08

作者简介: 秦忠国, 教授, 研究方向为高性能计算, 电子信箱: hhu\_zgqin@126.com; 魏雨露(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为计算机模拟与仿真, 电子信箱: jjweiyulu@sina.com

引用格式: 秦忠国, 魏雨露, 刘聪, 等. 基于 ABAQUS 的电解槽温度应力快速分析[J]. 科技导报, 2014, 32(8): 53-57.

好地链接数据库<sup>[3]</sup>,非常适用于编程及制作操作界面<sup>[4]</sup>。本研究的主要内容是使用VB<sup>[5,6]</sup>编写电解槽快速分析的前处理程序,形成简单的操作界面,只要输入电解槽的基本尺寸、材料属性、初始条件和边界条件,就能自动生成可用于分析计算不同尺寸、不同材料、不同气温及不同液面状态下的电解槽温度场及温度应力<sup>[7,8]</sup>问题的模型输入文件(\*inp),将其导入到ABAQUS软件中形成有限元并计算得到相应的结果。

## 1 电解槽运行中的非稳定温度场问题

图1为电解槽整体结构呈箱形,下部有支座,两端及底部设有孔洞用于电解液进出。电解槽在运行时,槽体内部注满电解液,电极均匀分布在槽体之上,并且阳极与阴极交替排列。随着电解进行,电解液不断消耗,液面高度降低,此时通过进液管补充液体,保证其液面高度及电解质浓度。电解结束时,通过放液孔及放阳极泥孔清除槽体剩余液体及杂质并清洗槽体内壁<sup>[9]</sup>。电解槽温度场温度应力的分析计算是一个较为复杂的力学问题,必须依赖于数值计算才能解决。

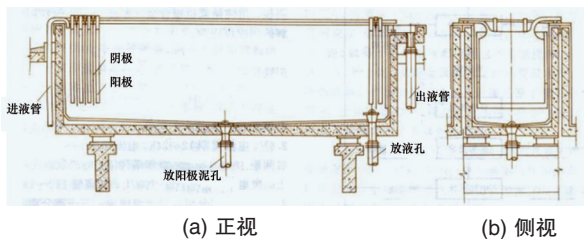


图1 带防腐层的电解槽结构示意图

Fig. 1 Cell structure schematic with anticorrosive coating

有限单元法是解决场问题的数值方法,能够较好地模拟温度场及温度应力的分布。根据热平衡原理,物体升高所需热量等于外界传入热量加上内部热源产生热量,其热传导微分方程表达式为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中,  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$  为导温系数,  $\frac{\partial \theta}{\partial t}$  为绝对温升率,  $T$  为温度,  $t$  为时间。

热传导微分方程<sup>[10]</sup>建立了物质内部温度与时间和空间的关系,通过建立有效的边界条件方程组可以定解得到温度场函数  $T$ 。边界条件有时被称为边值条件,包含初始条件和边界条件两部分,3类边界条件可分别表示为

$$\begin{cases} T = f(t) \\ -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) = (q_n) = \bar{q}_n \\ (q_n) = \beta(T - T_a) \end{cases} \quad (2)$$

式中,第1项为第1类边界条件,  $f(t)$  物体表面上任意一点在所有各瞬时的温度,  $T$  为物体表面温度;第2项为第2类边界条件,  $\bar{q}_n$  为法相热流密度,  $n$  为物体表面的外法向;第3项为第3类边界条件,  $T_a$  为周围介质的温度,  $\beta$  为运流放热系数。

## 2 电解槽参数化有限元建模与求解

ABAQUS程序是一个有限元分析通用程序,本文使用VB编写了电解槽温度应力分析前处理专用程序,使用该专用程序能快速生成相应的模型输入文件(\*inp),将其导入ABAQUS中,形成有限元模型并划分网格进行求解。流程见图2。

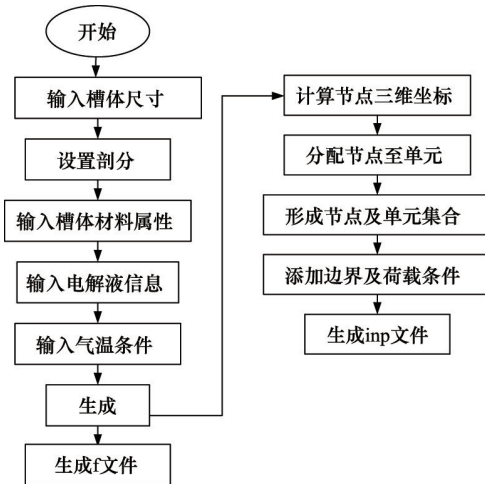


图2 建模流程

Fig. 2 Flow chart

### 2.1 几何信息的形成

有限元几何模型中95%以上的模型数据<sup>[11]</sup>是节点单元信息,其中包括单独的节点及单元信息,包括用于边界条件施加的节点单元集合信息。节点单元信息数据量大,规律性小,需科学合理建立并输出电解槽模型的节点及单元信息。

#### 2.1.1 节点信息

根据体-面-点的建模方法,首先获取电解槽几何物理参数,形成电解槽三维结构模型,再将电解槽三维结构模型分解为若干不重复的截面类型,在截面上定位关键点(图3)。通过默认的坐标原点,计算出电解槽关键点的坐标,并将关键点坐标转化为三维节点坐标。根据剖分设置,将a截面形状分为上部矩形及下部梯形,分别进行节点坐标计算,b截面即U形截面的节点信息需建立在a截面的节点坐标信息基础上,c截面比b截面又多出两个梯形和一个矩形区域,需先定位其关键点坐标,并根据网格设定分配周围节点号,计算节点坐标,连接节点形成单元。

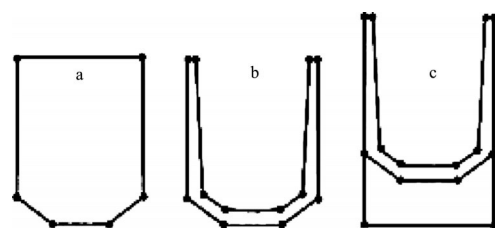


图3 3种截面及其关键点

Fig. 3 Three kinds of cross section and key points

### 2.1.2 单元信息

单元中节点号的排列决定了单元面的法向方向,有限单元法中,单元节点编号及面号的定义遵循右手定则。单元面的法向方向又与载荷及边界条件紧密相关。相同截面前后形成单元,根据每一层单元的单元号进行运算,得出与之相对应的上一层节点的节点号,并按照单元节点顺序输出。不同截面之间节点连接成单元时,首先根据后一层节点的节点坐标搜索上一截面相同坐标上的节点号,并建立一一对应关系,在单元节点输出时,按照单元节点顺序输出。

## 2.2 边界条件信息的形成

### 2.2.1 施加对象选取

在 ABAQUS 的 CAE 中可以使用鼠标方便地进行边界选取,施加各种边界条件和初始条件,但在模型输入文件中,非可视化的条件下,必须通过单元集合和节点集合来实现。其定义格式如下。

1) 若节点编号是连续或者规律出现,则需要在最后添加参数为 generate:

节点集合: \*Nset, Nset=集合名, internal, instance=实体名, generate<起始节点编号>, <结束节点编号>, <节点编号增量>

单元集合: \*Elset, Elset=集合名, internal, instance=实体名, generate<起始单元编号>, <结束单元编号>, <单元编号增量>

2) 若节点编号是间断的非规律的,则省略参数 generate, 并依次输入节点编号和单元编号。

程序中通过在节点与单元中设置特殊节点来实现节点

号、单元号的统计与计算。

### 2.2.2 热边界条件

1) 电解液与电解质的温度均匀给定,初始温度设为 60℃。

2) 电解液与电解槽接触传热为第 1 类边界条件。

3) 电解槽与周围空气接触散热为第 3 类边界条件,初始放热系数  $\beta$  为 6 W/m<sup>2</sup>·K, 导热系数  $\lambda$  为 3.6 W/m·K。

4) 周围的环境温度按车间平均温度给定。

## 2.3 加载步信息的形成及求解

在 ABAQUS 中,包括位移、力、温度在内的载荷均可以直接施加在有限元模型上,载荷可以是具体数值,也可以是与时间或者坐标有关的任意函数<sup>[12]</sup>。电解槽温度场及温度应力分析所涉及的载荷包括初始温度、第 1 及第 3 类温度场边界条件、均布压力,静水压力和重力。其中第 3 类边界条件的实现需要通过 Fortran 语言定义的函数来实现,并在模型输入文件中引用。

按照上述节点与单元的计算方法,边界条件与载荷条件<sup>[13]</sup>的施加,就形成了电解槽温度场有限元分析专用程序。图 4 为界面中输入相应的几何尺寸,材料属性,电解液信息及气温条件。

生成模型输入文件后,将其导入 ABAQUS 中,通过相应的命令进行加载和分析求解,显示所有荷载来查看所加荷载及边界条件是否正确,以确保最后结果分析的正确性。



图 4 电解槽几何尺寸,材料属性及电解液信息

Fig. 4 Electrolytic cell geometry, material properties and the electrolyte information

## 3 算例分析

应用上述程序对长为 11 m 的电解槽进行温度应力分析,几何尺寸及材料属性如图 4,基本结构特征如图 5 所示,采用 8 节点六面体单元<sup>[14]</sup>及线弹性材料模型,建立的有限元模型节点总数为 27873,单元总数为 20552。总计算时间为 24 h,子步时间为 0.5 h,温度曲线自 0 时刻开始,24 h 结束。结果表明 24 h 后所有计算温度场变化趋于平稳,温度应力变化幅度较小,所以所得数据可用于温度场及温度应力分析。

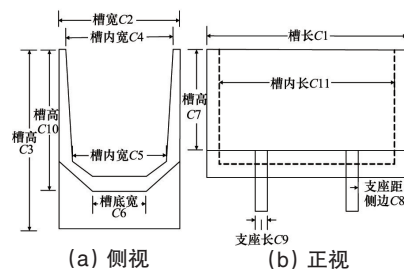


图 5 电解槽的基本结构特征

Fig. 5 Basic structure characteristics of electrolytic cell

### 3.1 电解液液面高度对槽体温度场及温度应力影响

图6是电解槽顶部最大拉应力与液面高度关系曲线,图7是液面降低40 cm时槽体温度场分布与y方向应力分布图。由图6、图7分析可知,从满槽开始,不断降低电解液液面高度,每次降低10 cm,y方向(沿槽体长方向)应力迅速开始上升,当液面高度自槽底下降至40 cm时,应力达到最大,4.5714 MPa,液面继续降低,应力却随之缓慢降低,直到最后稳定至3.523 MPa。主要原因是液面降低致使槽顶处温度降低,与液面当前高度处槽体温度差增大,而温差是温度应力产生的根本原因<sup>[5]</sup>,所以应力水平提高。随着液面下降,槽顶温度继续降低,液面高度距槽顶距离增大,此时槽顶较低温度的混凝土对液面处的高温混凝土约束作用效果增强,拉应

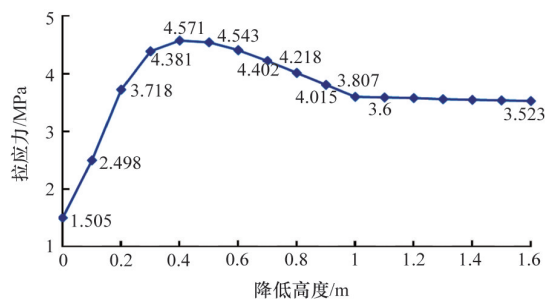


图6 电解槽顶部最大拉应力与液面高度关系曲线

Fig. 6 Relationship between the maximum tensile stress of the top electrolytic cell and liquid level height

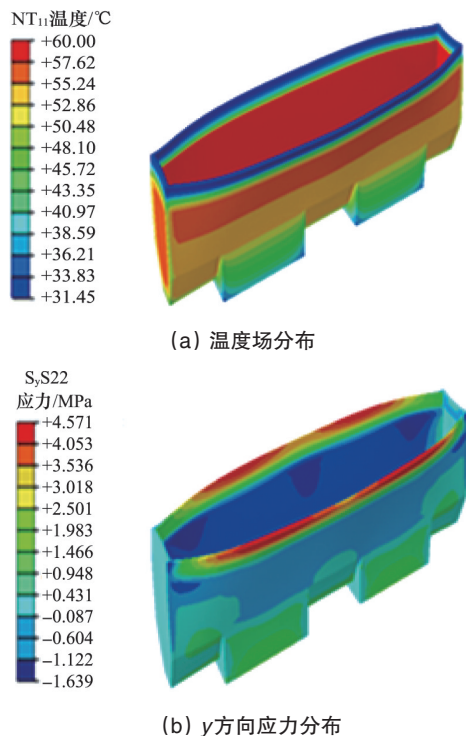


图7 液面降低40cm时槽体温度场分布与Y方向应力分布(最大为4.571 MPa)

Fig. 7 Temperature field distribution and the stress distribution in Y direction till the liquid level reduce 40 cm

力水平降低,主要依据是随着液面高度的降低,上部低温区混凝土高度增大,y方向拉应力减小。

z方向(沿槽体高度方向)应力在液面高度较高时,槽体内部有较大应力区。主要原因是液体压力作用,依据是随着液面高度降低,内部拉应力区范围逐渐缩小,当液面高度继续降低时,拉应力区消失。

### 3.2 外界温度对槽体温度场及温度应力影响

图8是外界温度与电解槽顶部拉应力关系曲线。由图8分析可知,外界温度为25.8℃时,y(沿槽体长)方向应力为4.543 MPa,当温度降低至15.8℃时,应力增长到5.852 MPa;继续降低至5.8℃时,应力增长到7.163 MPa,增幅十分明显,主要原因是温差增大,温度场梯度增大,温度应力增大。从曲线上可以看出,其变化规律呈现线性变化,主要原因是材料弹性模量及线膨胀系数在温升、温降时保持不变,应力及应变保持线性关系不变。

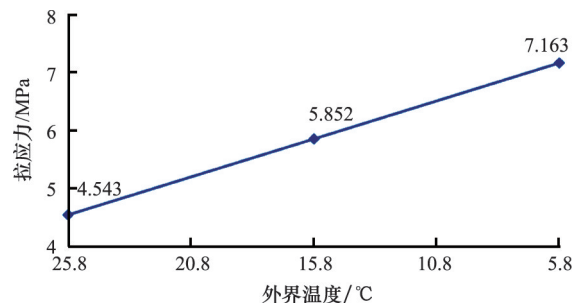


图8 外界温度与电解槽顶部拉应力关系曲线

Fig. 8 Relationship between ambient temperature and the maximum tensile stress of the top electrolytic cell

### 3.3 空气流动对槽体温度场及温度应力影响

实验分析可知,在放热系数为8 W/(m<sup>2</sup>·K)时,y和z方向最大应力分别为4.625、4.362 MPa;当放热系数增大到11 W/(m<sup>2</sup>·K)时,y和z方向的最大应力相应的变为4.667、4.015 MPa,这是因为随着放热系数增大,电解槽槽体外壁对周围气温变化更加敏感,电解槽外壁温度较放热系数增大之前有所降低,温差增大,温度梯度上升,拉应力增大。可以预见,当放热系数增长到很大时,第3类温度场边界条件将转变为第1类边界条件,此时电解槽外壁温度将等于外界气温,温度梯度进一步增大,拉应力增大。

### 3.4 支座长度对槽体温度场及温度应力影响

对不同支座长度的电解槽进行温度应力分析,图9是支座长度对电解槽顶部拉应力的影响曲线。由图9分析可知支座越长,拉应力越小。当支座长度较小时,支座之间的槽体在重力作用下对支座正上方槽顶混凝土产生较大弯矩,致使槽顶拉应力增大,所以长支座有利于降低槽顶拉应力。

分别对长为3、5、8 m的电解槽进行了相关温度场及温度应力的计算分析,结果显示,其温度场及温度应力场分布规律同11 m长电解槽能够较好相符。

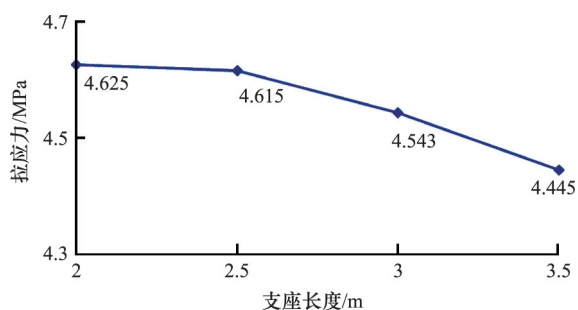


图9 支座长度对电解槽顶部拉应力的影响曲线

Fig. 9 Bearing length's influence on the tensile stress of the top electrolytic cell

#### 4 结论

从电解槽运行的实际情况出发,使用VB编写了电解槽温度应力分析前处理程序,可以简单快速地生成模型输入文件(\*inp),将其导入ABAQUS中建立电解槽有限元模型,能准确分析电解槽在不同因素影响下的温度场及温度应力分布。研究表明:电解槽顶部拉应力随着液面高度的降低先迅速升高,后缓慢降低;随着外界温度的降低而升高;随着放热系数的增大而升高;随着支座长度的增大而降低。为了提高电解槽的使用寿命,防止电解槽因温度应力过大而开裂,应持续补充电解液,既能保持液面高度,降低槽顶拉应力,还能及时补充电解液消耗引起的浓度降低问题,稳定生产效率;在条件允许情况下尽量采用长支座。

#### 参考文献 (References)

- [1] 翟红侠, 刘瑾, 廖邵锋, 等. 电解槽用聚合物混凝土在铜冶炼工业中的研究[C]//中国硅酸盐学会2003年学术年会论文集. 北京: 中国硅酸盐学会, 2013: 101.  
Qu Hongxia, Liu Jin, Liao Shaofeng, et al. The research of electrolytic tank with polymer concrete in copper smelting industry[C]// Proceedings of National Annual Conference on the Chinese Ceramic Society. Beijing: Chinese Ceramic Society, 2003:101.
- [2] 冯乃祥, 彭建平, 王耀武, 等. 铝电解高效节能技术应用与研究现状[J]. 材料与冶金学报, 2010, 9(S1): 1-7.  
Feng Naixiang, Peng Jianping, Wang Yaowu, et al. Application and study on high energy saving technology of aluminium electrolysis[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2010, 9(S1): 1-7.
- [3] 占维, 刘伟. Visual Basic 6.0数据库使用编程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.  
Zhan Wei, Liu Wei. Visual Basic 6.0 database utilities programming 100 cases[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- [4] 杨溢, 曹斌, 郑蕾. VB与ANSYS及Matlab混合编程计算铝电解槽磁场[J]. 轻金属, 2009(7): 30-34.  
Yang Yi, Cao Bin, Zheng Pu. Calculation of aluminium electrolyser magnetic field by hybrid programming with VB, ANSYS and Matlab[J]. Light Metals, 2009(7): 30-34.
- [5] 张艳. 新编 Visual Basic 程序设计教程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007: 1-16.  
Zhang Yan. New Visual Basic programming tutorial[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2007: 1-16.
- [6] 牛又奇, 孙建国. 新编VB程序设计教程[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2002.  
Niu Youqi, Sun Jianguo. New VB programming tutorial[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2002.
- [7] 罗海岩, 陆继乐, 黄来, 等. 铝电解槽三维电热场的ANSYS分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2002, 30(7): 4-6.  
Luo Haiyan, Lu Jiyue, Huang Lai, et al. ANSYS analysis of aluminum reduction cell three-dimensional thermo-electric field[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2002, 30(7): 4-6.
- [8] 王泽武, 蒙培生, 曾青, 等. 铝电解槽三维热应力场非线性有限元分析[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(9): 948-952.  
Wang Zewu, Meng Peisheng, Zeng Qing, et al. Nonlinear finite element analysis of aluminum reduction cell three-dimensional thermal stress field[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(9): 948-952.
- [9] 朱祖泽, 贺家齐. 现代铜冶金学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 531-533.  
Zhu Zuze, He Jiaqi. Modern copper metallurgy[M]. Beijing: Science Press, 2003: 531-533.
- [10] 陈国荣. 有限单元法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 248-250.  
Chen Guorong. Principle and application of the finite element method [M]. Beijing: Science Press, 2009: 248-250.
- [11] 曹金凤, 石亦平. ABAQUS有限元分析常见问题解答[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 189-190.  
Cao Jinfeng, Shi Yiping. Frequently asked questions of ABAQUS finite element analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 189-190.
- [12] 吴淑峰, 张建华, 杨士岭, 等. 基于ABAQUS的高炉开口机钻头温度场及应力场分析[J]. 工具技术, 2011, 45(1): 29-30.  
Wu Shufeng, Zhang Jianhua, Yang Shiling, et al. Analysis of blast furnace tapping machine bit temperature field and stress field based on ABAQUS[J]. Tool Engineering, 2011, 45(1): 29-30.
- [13] 周玉蓉, 石亦平. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 108-110.  
Zhou Yurong, Shi Yiping. Detailed examples of ABAQUS finite element analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 108-110.
- [14] 吕军, 王忠金. 有限元六面体网格的典型生成方法及发展趋势[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(4): 485-490.  
Lü Jun, Wang Zhongjin. The typical generation method and development trend of finite element hexahedral meshes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, 33(4): 485-490.
- [15] 郑有伟. 大体积混凝土温度应力造成裂缝的控制[J]. 福建建筑高等专科学校学报, 2001, 3(3/4): 93-96.  
Zheng Youwei. The control of crack caused by mass concrete temperature[J]. Journal of Fujian College of Architecture & C. E., 2001, 3(3/4): 93-96.

(责任编辑 赵业玲)