

# 淬火过程的计算机模拟及其应用

顾剑锋,潘键生,胡明娟

(上海交通大学高温材料及高温测试开放实验室,上海 200030)

**摘要:** 藉助于温度场-相变-应力和应变的有限元分析方法(FEM),实现了复杂形状工件淬火过程的计算机模拟。模拟结果直观地显示任一时刻工件内部的温度分布、组织分布、应力分布、应变状况及工件任意位置上的冷却曲线,为使用者提供了用虚拟现实方法详尽分析和研究淬火工艺的工具。本文列举了几个实际应用的例子,计算机模拟将成为虚拟制造技术中的重要组成部分。

**关键词:** 淬火;相变;温度场;应力场;有限元法;计算机模拟;虚拟制造

**中图分类号:** TB115;TG156.34 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-6051(2000)05-0035-03

## Computer Simulation of Quenching Process and Its Application

GU Jian-feng, PAN Jian-sheng, HU Ming-juan

(Shanghai Jiaotong University, Public Laboratory for High Temperature Materials and High Temperature Tests, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Computer simulation on complicate shaped parts during quenching process has been realized by using FEM analysis of temperature field-phase transformation - stress and strain. The simulation results vividly display the transient temperature field, microstructure distribution, stress and strain of the parts on any time, and show the cooling curve on any position of the parts. These results provide the user a tool for analyzing and studying on quenching technique in detail using virtual reality method. Several practically used examples are listed in this paper, and computer simulation will become important part of virtual manufacture technology.

**Key words:** quenching; phase transformation; temperature field; stress field; finite element method; computer simulation; virtual manufacture

### 1 前言

与淬火过程计算机模拟有关的基础理论研究工作近年来发展很快,例如温度-相变-应力/应变相互耦合的模型不断改进,已经可以考虑许多因素之间复杂的相互作用<sup>[1~3]</sup>。在相变计算方面文献<sup>[4]</sup>发展了多相转变的计算方法。就应力对相变的影响,近期工作<sup>[5,6]</sup>指出应力对相变动力学存在更为复杂的非线性关系。这些研究成果都有助于使计算机模拟的结果逐步接近于实际情况,引起热处理界的重视。淬火过程计算机模拟在实际生产中的应用已提到议事日程上来。一些作者已就此进行了有益的尝试<sup>[7,8]</sup>。尽管目前的淬火过程计算机模拟计算还远远未能被认为是成熟的技术,其准确性还不能令人满意,但是它与必要的试验测试相结合,可以成为研究淬火方法和制订工艺参数的辅助决策工具。本文介绍了应用计算机模拟技术进行几种形状复杂的零件的淬火过程虚拟生产试验的初步尝试。模拟计算是以大型有限元分析软件为平台,结合作者的二次开发程序来实现的。

### 2 数学模型

#### 2.1 相变量计算

本文相变量计算与文献<sup>[9~11]</sup>所介绍的方法基本相同。用孕育期叠加法判断相变的开始,用 avrami 方程计算扩散型相变的转变量,用 Koistinen-Marburger 方程计算马氏体转变

量。在相变量的计算中考虑了应力状态的影响,因而对上述公式进行了修正<sup>[5,6]</sup>。

#### 2.2 应力场分析

对淬火过程中应力应变以及淬火后残余应力和变形的预测的准确程度与所采用的材料力学模型密切相关。目前的淬火模拟已经从原来的弹性模型改进为弹塑性模型,考虑材料的力学性能,如加工硬化特性、塑性流动法则、屈服准则等等,通常采用 Von-Mises 准则、等向硬化条件和普朗特-劳埃斯(Prandtl-Reuss)塑性流动法则<sup>[5,6]</sup>。淬火过程中应力分析还必须考虑相变的影响,因此塑性区的处理远远较普通的应力分析复杂。总应变包括了弹性应变、塑性应变、热应变、相变应变和相变塑性应变等多项。

#### 2.3 复杂淬火操作的模拟以及非线性处理

淬火过程的模拟涉及多因素非线性问题,因为界面换热系数、钢的热物性参数和力学性能参数都是温度的函数。相变潜热的引入更使问题变成高度非线性。实际生产中常遇到一些复杂的淬火操作,例如预冷淬火、控时浸淬、双液淬火、间歇淬火以及淬火-自回火等,都属于界面条件剧变的冷却过程,本文用下述方法处理:模拟过程中,不同的冷却阶段调用不同的换热系数与温度的函数;采用改进的增量迭代法处理非线性问题;在边界附近采用较密的有限元网格;在不同的冷却阶段,根据冷却速度的大小调整计算时间步长。

### 3 借助于计算机模拟进行热处理虚拟生产试验

计算机模拟技术不仅有强大的计算功能,而且可以显示任意时刻工件内任意截面上的温度场、组织分布和应力场,能使操作者观察到各种等值面(温度值、应力值、应变值、组织分布

**作者简介:** 顾剑锋(1970—),博士,讲师,江苏江阴人,主要从事热处理数学模型和计算机模拟,发表论文10余篇,获99年度国家教育部科技进步一等奖。E-mail: jianfeng.gu@univ-troyes.fr

**基金项目:** 国家自然科学基金资助(No. 59371073);国家科委“九五”攻关重点项目(No. 96-A01-02-01)。

**收稿日期:** 1999-11-01

值)、等值线随着时间推移的情况,也可以显示出用户所感兴趣的任何点上的温度-时间曲线、组织分布-时间曲线、应力-时间曲线和位移-时间曲线。这样就为热处理研究工作提供一个虚拟现实的环境,或者说进行虚拟生产试验的工具。本文选择了几种形状比较复杂的零件,在预冷-双液淬火或预冷-浸淬-自回火条件下,测定了有代表性的位置上的冷却曲线和淬火后截面上的组织分布。根据实测结果,检验和修正数学模型,使计算机模拟与实际情况比较吻合<sup>[12]</sup>,然后就可以用来进行虚拟生产试验,选择合理的淬火方法和确定最佳工艺参数。

## 4 应用实例

### 4.1 预冷淬火(延时淬火)工艺设计

卡爪用 1045 钢制造,要求表面有高硬度,但在齿根和侧面的槽口之间,截面变化很大,淬火时很容易开裂。用计算机模拟进行卡爪的虚拟淬火试验,可以连续“观察”在冷却过程中截面上的组织转变,卡爪在 850 奥氏体化后,预冷到 20s 时,齿和槽口边缘温度降低 100 (见图 1),但并无铁素体析出,随后淬入盐水中,在卡爪工作面上仍得到 100% 马氏体(见图 2),但在马氏体转变区内的温度梯度明显减小(见图 3)。预冷时间延长至 30s,虽然表面仍可获得 100% 马氏体,但全马氏体层变薄,因此预冷 20~30s 是合理的。

### 4.2 锚环淬火工艺设计

锚环用 5140 钢制造,要求淬火、回火处理,硬度为 26~

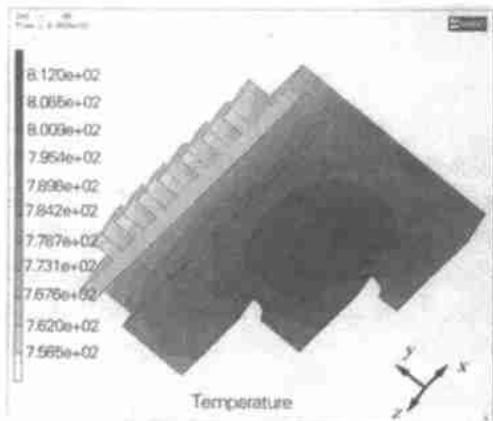


图 1 卡爪在空气中预冷 20s 后的温度场分布

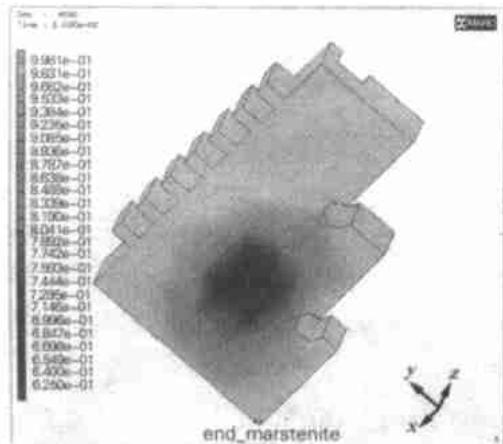


图 2 卡爪淬火后马氏体分布

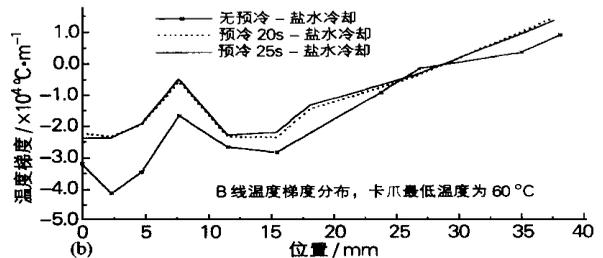
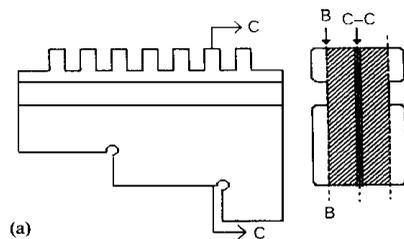


图 3 马氏体转变区域内的温度梯度

(a) B 线:温度梯度图示位置,方向如箭头所示

(b) 沿 B-B 线位置,从顶端到底部的温度梯度

30HRC,锥孔的内表面是工作面,生产中用盐水淬火。在两孔之间壁厚最小的地方淬火时很容易开裂,而用油淬则硬度不足。用计算机模拟进行虚拟淬火生产试验,采用 15% NQ-C 水溶液为淬火介质。淬火后内孔表面可得到马氏体和少量残留奥氏体组织。虚拟生产试验可以动态显示淬火过程中锚环内温度场和组织分布的变化情况(见图 4、5)和用户感兴趣

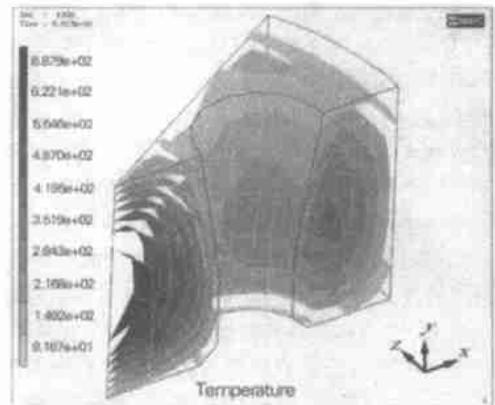


图 4 淬火 38s 时的温度场分布

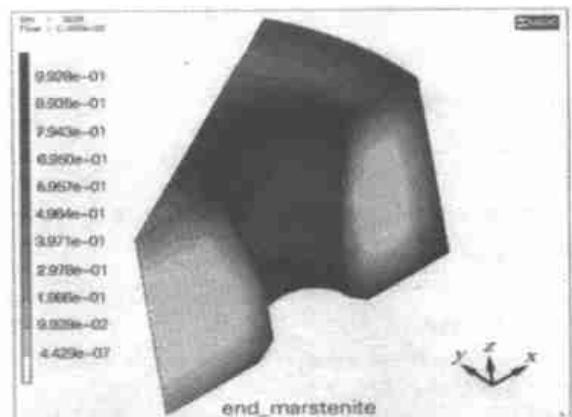


图 5 淬火后的马氏体分布

的任意点上的温度变化曲线和转变量曲线,为选择工艺参数提供了充分的依据。例如从图6可以看出,控制浸淬,当工件表面完成马氏体转变后立即将工件转移到空气中自回火,可以保证承载表面的组织和性能。浸液15s和20s后出水,对工件心部在珠光体转变温度范围内的冷却速度没有明显的影响,因而淬火后整个截面上的组织分布也不会有明显的影响。虚拟生产试验的结果还说明,提前出水使工件及时自回火,进一步减小了淬火开裂的危险。经过60min后工件内外温度基本均匀,如在此时及时进入550℃回火炉中回火,就能起到利用淬火余热的作用。

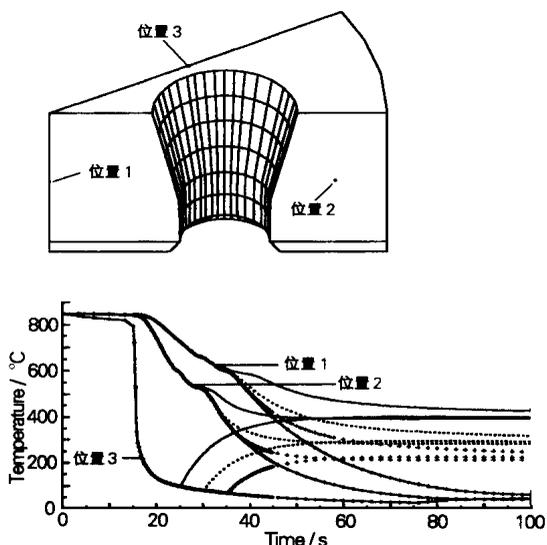


图6 淬火不同时间不同位置冷却曲线的比较  
 ——预冷15s,浸液10s,空冷;.....预冷15s,浸液15s,空冷;  
 +++预冷15s,浸液20s,空冷;——预冷15s,浸液60s,空冷

### 4.3 高硬冷轧辊淬火工艺的研究

(1) 奥氏体化时间的确定 9Cr2Mo钢制造的小型冷轧辊(辊身直径 $\phi 132\text{mm}$ ),生产中原来采用的工艺奥氏体化温度为850℃,时间为135min,用虚拟生产的方法观察加热时截面上的组织变化情况,可以看到46min时轧辊表面已经奥氏体化(见图7a),及至58min,除了心部以外,奥氏体化的深度扩大已远远超过预期的淬硬层深度(见图7b)。显然奥氏体化时间定为1h是合理的。

(2) 淬火介质的选择 用虚拟淬火试验的方法比较了用不同的淬火介质得到的淬火后组织和应力分布。其结果表明,选用三硝淬火液(25% NaNO<sub>3</sub>、20% NaNO<sub>2</sub>、20% KNO<sub>3</sub>、35% H<sub>2</sub>O)可得到足够厚的马氏体层(见图8),应力分布状态也比较合理。

(3) 残余应力的预测 用虚拟淬火试验观察轧辊内应力发展过程说明,轧辊在三硝水溶液中冷却40s后,工件表面层已经发生了马氏体转变,而心部温度依然在800℃以上。继续冷却时心部温度降低,体积收缩,使得表面层应力状态向压应力方向转化,最终使压应力层的深度接近20mm,(见图9a、b),有利于提高轧辊对接触疲劳的抗力,使用寿命高于中频加热淬火,这一结论已为生产实践所证实。

## 4 结论

本文采用三维非线性有限元模型,建立了复杂形状零件淬火过程中,温度场-相变-应力/应变计算机模拟方法。这种方法可以作为具体工件虚拟淬火生产试验的工具,正确地选择卡爪预冷淬火的淬火时间,设计了锚环预冷-浸淬-自回火工艺。在生产应用中防止了这种工件淬火开裂,消除了废品。轧辊虚拟淬火生产试验收到了缩短奥氏体化加热时间,正确选择淬火介质获得理想的组织分布和应力状态等效果。在淬火过程计算机模拟的工业应用方面作了一些初步的尝试。

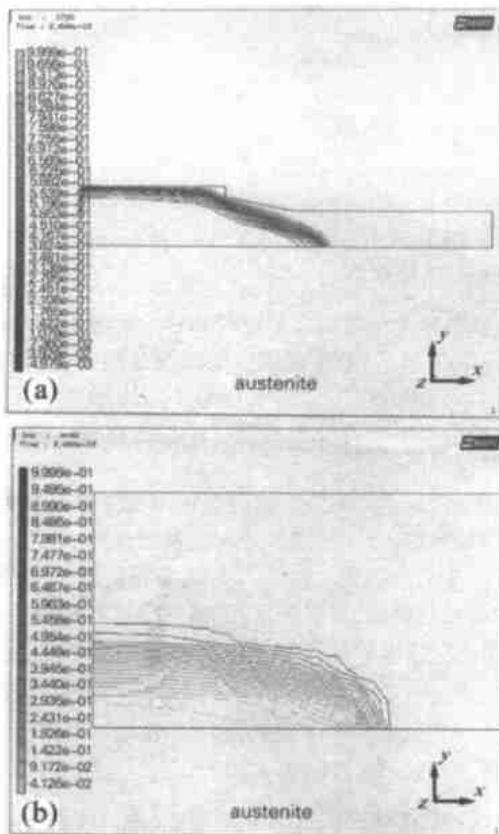


图7 不同加热时间下的奥氏体分布  
 (a) 加热时间46min (b) 加热时间58min

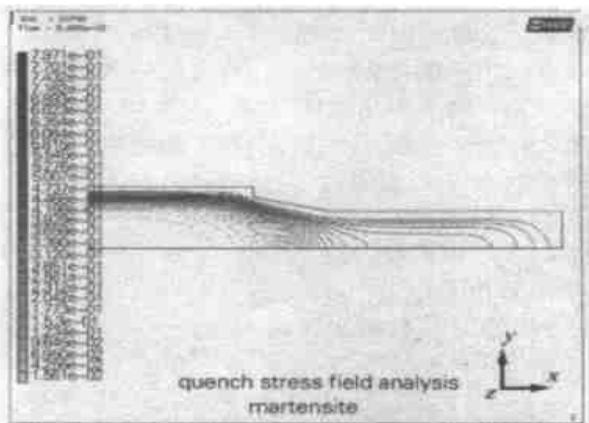


图8 淬火后的马氏体分布

(下转第44页)

[4] Ensor T F. Glass Technol. [J], 1970, (11): 42 ~ 7.  
 [5] 杨兰英等. 奥氏体不锈钢渗硼工艺研究[J]. 金属热处理, 1992 (5): 28 ~ 30.  
 [6] 雷天同等. 特种钢固体渗硼的研究[J]. 金属热处理, 1987, (8).

[7] 马英仁. 封接玻璃[J]. 玻璃与陶瓷, 1992, (5, 6): 59 ~ 68; 52 ~ 57.  
 [8] 张飞鹏. 玻璃与金属封接的热力学基础[J]. 玻璃与陶瓷, 1988, (4 ~ 6); 1989, (1, 2)

(上接第 37 页)

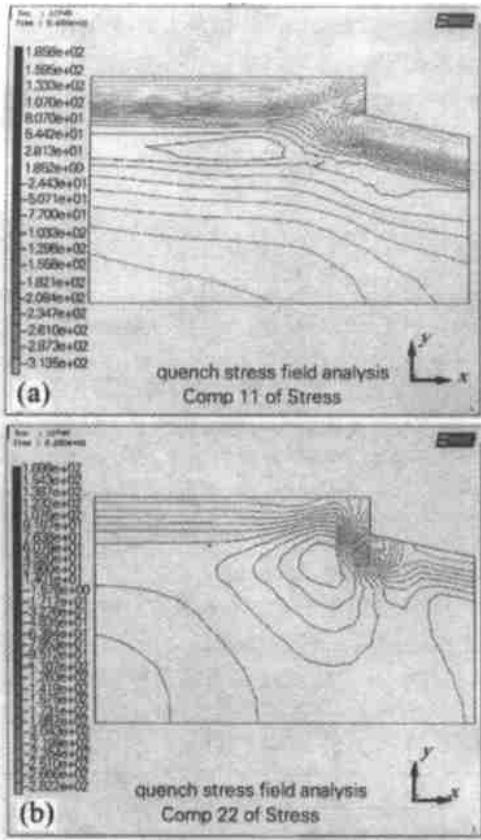


图 9 淬火后的残余应力分布  
 (a) 径向应力 (b) 轴向应力

参考文献:

[1] Denis S, Archambault P, Aubrg C, Mey A, Louin Ch, Simon A. Proceedings of 3rd European Mechanics of Materials Conference [C], Oxford U. K., 1998.  
 [2] Inoue T, Inoue H, Ikuta F and Horino T. Proceedings of 3rd International Conference on Quenching and Control of Distortion [C], 24 ~ 26 March, 1999, Prague, Czech Republic, 243 ~ 250.  
 [3] Xiao (Leo) Chen. Advanced Materials and Processing [J], 1997, 152 (6): 44w ~ 44y.  
 [4] Tamas Reti, Zoltan Fried and Imre Felds. Proceedings of 3rd International Conference on Quenching and Control of Distortion [C], 24 ~ 26 March, 1999, Prague, Czech Republic, 157 ~ 173.  
 [5] 刘庄, 吴肇基, 吴景之, 张毅. 热处理过程的数值模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 1996: 119 ~ 158.  
 [6] 李自刚, 张鸿冰, 徐祖耀. 金属热处理学报, 1999, (4).  
 [7] 潘健生, 胡明娟, 田东, 顾剑锋. 金属热处理, 1998, (12): 30 ~ 31  
 [8] Shabnam Rasouli Yazdi and Jian Lu. Proceedings of 3rd International Conference on Quenching and Control of Distortion [C], 24 ~ 26 March, 1999, Prague, Czech Republic, 182 ~ 186.  
 [9] Fletcher A J. Thermal Stress and Strain Generation in Heat Treatment [M]. Elsevier Science Publishers L TD, New York, 1989: 349 ~ 421.  
 [10] Fernandes F M B, Denis S, Simon A. Materials Science and Technology [J], 1985, 1 (10): 838 ~ 844.  
 [11] Sjostrom S. Materials Science and Technology [J], 1985, 1 (10): 823 ~ 829.  
 [12] Pan J S, Gu J F, Tian D, Ruan D. Proceedings of 3rd International Conference on Quenching and Control of Distortion [C], 24 ~ 26 March, 1999, Prague, Czech Republic, 251 ~ 259.