

齿轮钢淬火过程多场耦合分析

宋广胜^{1,2} 刘相华¹ 王国栋¹ 隋凤利³

(1 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004;

2 沈阳航空工业学院, 沈阳 110034; 3 东特集团抚顺特钢, 抚顺 113001)

摘要 利用有限元分析软件 MSC. Marc, 结合热弹塑性模型和编写的用户子程序, 对(%)0.21C-1.03Cr-0.20Mo-0.03Nb 齿轮钢圆柱体淬火过程的温度、组织和应力场进行了多场耦合分析。结果表明, 淬火过程产生的内应力促进马氏体相变, 在马氏体相变的情况下, 组织应力强于热应力, 使淬火后工件的残余应力呈组织应力分布。测量值和计算值对比表明, 淬火过程应力场数值模拟中, 考虑应力与相变的相互作用, 使计算结果更为精确。

关键词 齿轮钢 马氏体转变 残余应力 多场耦合分析

Multi-Field Coupled Analysis on Quenching Process of Gear Steel

Song Guangsheng^{1,2}, Liu Xianghua¹, Wang Guodong¹ and Sui Fengli³

(1 State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004; 2 Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034; 3 Fushun Special Steel Co Ltd, Northeastern Steel Group, Fushun 113001)

Abstract A multi-field coupled analysis on temperature, structure and stress field of 0.21C-1.03Cr-0.20Mo-0.03Nb gear steel cylinder in quenching process has been carried out by using FEM software MSC. Marc, combined with thermal elastic and plastic models and compiled sub programme. The results showed that the internal stress produced in quenching process promoted martensite transformation, in martensite phase transformation conditions the structure stress surpassed thermal stress led to residual stress in quenched piece presented structure stress distribution. Comparison between calculated value and measured value indicated that the calculated results of quenching stress simulation will be more precise with considering interactions between transformation and stress.

Material Index Gear Steel, Martensite Transformation, Residual Stress, Multi-Field Coupled Analysis

热处理过程数值模拟研究的一个重要应用领域, 是对齿轮等零件的热处理过程所产生畸变和残余应力进行预测, 以达到降低热处理变形量和改善应力分布、优化工艺的目的^[1-3]。基于此目的, 本研究利用大型有限元软件 MSC. Marc, 并结合淬火过程的数学模型^[4], 对其进行了二次开发。

1 数学模型

在计算中, 采用 Von-Mises 屈服准则、等向硬化条件和 Prandtl-Reuss 流动法则。总的应变增量由弹性应变、塑性应变、热应变、相变应变和相变塑性应变增量组成^[5,6]。

尺寸较小的工件在淬火过程中, 只发生马氏体相变, 马氏体相变量计算式为:

$$V = 1 - \exp[-\alpha(M_s - T)]$$

如果不考虑应力对相变的影响, 式中: M_s - 马氏体转变起始温度; α - 常数, 对多数钢, 其值为 0.011^[7]; 实际上, α 不是一个常数, 而是受应力影响的, 本文所用的材料, 其值与应力关系的表达式为:

$$\alpha = 2.3359 \times 10^{-5} + 3.9377 \times 10^{-7} \bar{\sigma}$$

式中: $\bar{\sigma}$ - 等效应力/MPa。

2 模拟计算条件与网格划分

所模拟的试样尺寸为 $\Phi 20 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, 取轴截面的 1/4 进行模拟, 模型视为轴对称问题, 其有限元剖分网格如图 1 所示。为提高计算精度, 表层部位进行局部细剖, 共 450 个单元, 496 个节点。在计算中, 直线 AE 和 EF 为对流换热边界, 直线 AB 上节点的 X 轴方向(轴向)位移为零, 直线 BF 上节点的

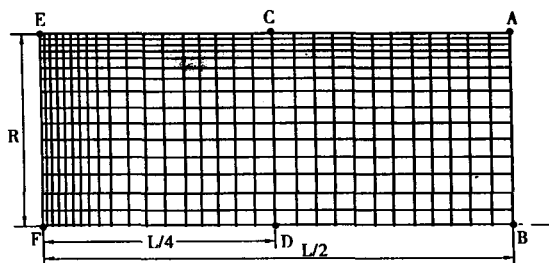


图1 试样轴截面 1/4 的剖分模型
Fig.1 Meshing model of 1/4 cross section of sample

Y 轴方向(径向)位移为零。试样的初始温度为 860 ℃, 淬入 20 ℃ 的静态淬火油中, 利用传热过程的反算法^[8,9], 并结合测温实验, 测得本文所模拟试样在淬火过程中, 淬火介质的换热系数值随温度变化如图 2 所示。实验所用材料齿轮钢(%: 0.21C-0.71Mn-0.18Si-0.20Mo-1.03Cr-0.03Nb) 的部分物理参数与温度关系如表 1 所示。

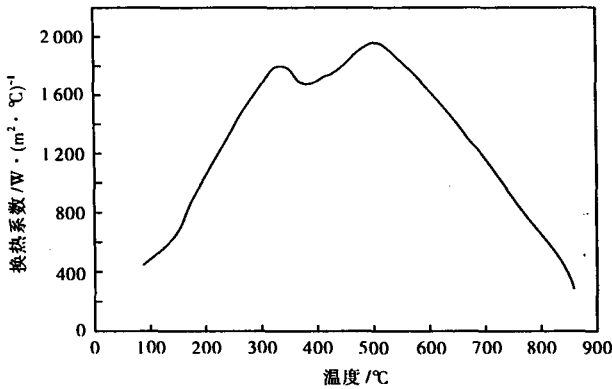


图 2 淬火介质的换热系数

Fig. 2 Heat transfer coefficient of quenchant

表 1 齿轮钢模拟计算的主要物理参数

Table 1 Main physical parameters for simulating calculation of gear steel

温度/ ℃	热传导系数/ W · (m · K) ⁻¹	比热容/ kJ · (kg · K) ⁻¹	热膨胀系数/ 10 ⁻⁶ · °C ⁻¹ (参考温度 29 °C)	密度/ (kg · m ⁻³)
25	45.26	0.51	-	7 820
100	46.39	0.55	12.10	7 820
200	46.73	0.60	12.55	7 820
300	45.80	0.65	13.05	7 820
400	45.71	0.73	13.65	7 820
500	40.11	0.75	14.25	7 820
600	35.04	0.80	14.70	7 820
700	28.30	0.85	15.12	7 820

3 计算结果及分析

为了考察淬火过程中应力与相变的相互作用对应力变化过程及分布的影响, 分别采用 3 种方案进行模拟计算:(1) 在计算中, 不考虑应力与相变的相互作用;(2) 在计算中, 考虑相变塑性的影响, 但不考虑应力对相变的影响;(3) 在计算中, 既考虑应力对相变的影响, 又考虑相变塑性的影响。图 3 为轴向中截面的表面和心部节点的马氏体生成量在淬火过程中的变化(分别对应于图 1 中的 A 点和 B 点), 根据计算结果, 方案 1、2 计算所得马氏体的变化过程是一致的(图 3 中方案 1 与方案 2 的计算结果曲线是重合的), 并且计算所得马氏体的生成速度远小于方案 3 的计算结果, 即淬火过程所产生的内应

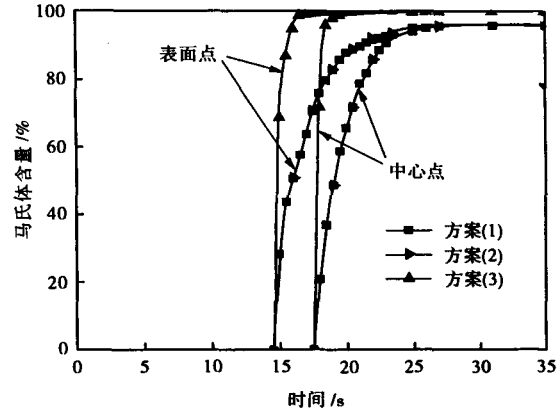


图 3 齿轮钢淬火过程马氏体含量变化

Fig. 3 Variations of volume percentage of martensite in gear steel in quenching process

力将大幅度提高马氏体相变的速率。

为了分析淬火过程工件内应力的变化, 取图 1 中表面节点 A 和内部节点 B 作为研究对象, 分别按上述 3 种方案进行计算, 两点的轴向应力在淬火过程中的变化分别如图 4a、图 4b 所示, 根据图示计算结果, 在淬火初期, 试样表面的冷速高于内部, 表面的收缩受到内部的约束, 此时, 试样的应力状态为: 表面为拉应力, 内部为压应力。随着表面冷速的降低和内部冷速的增大, 在约 15 s 时, 表面节点 A 的拉应力值达到约 170 MPa 后开始减小, 并向压应力状态转变。在同一时刻, 内部节点 B 的压应力在达到约 -200 MPa 后, 开始向拉应力状态转变。表面的马氏体相变膨胀效应加速了上述转变过程, 使表面的拉应力迅速转变为压应力状态, 内部的压应力迅速转变为拉应力状态。

随着马氏体相变区域由表层向内部迅速扩展, 内部的马氏体相变使内部的拉应力在约 30 s 时达到最大值后, 开始向压应力状态转变, 表面的压应力则在达到最大值后, 向拉应力状态转变。在淬火结束时, 表层的拉应力及内部的压应力分别达到最大值, 形成组织应力状态, 成为工件的淬火残余应力。如图 4c、图 4d 所示, 在淬火过程中, 节点 A 和 B 的切向应力变化规律与轴向应力一致, 淬火结束时的应力状态为组织型应力。

试样淬火后残余应力沿径向分布, 表现为表层部位为拉应力, 心部为压应力的组织应力型残余应力分布, 拉应力最大值在试样表层, 压应力在心部。

为了对模拟结果进行检验, 用 MSF-2M 型 X 射线应力仪对淬火后的试样测量了表面的残余应力。如图 5 所示, 为侧表面沿轴向的残余应力的模拟值

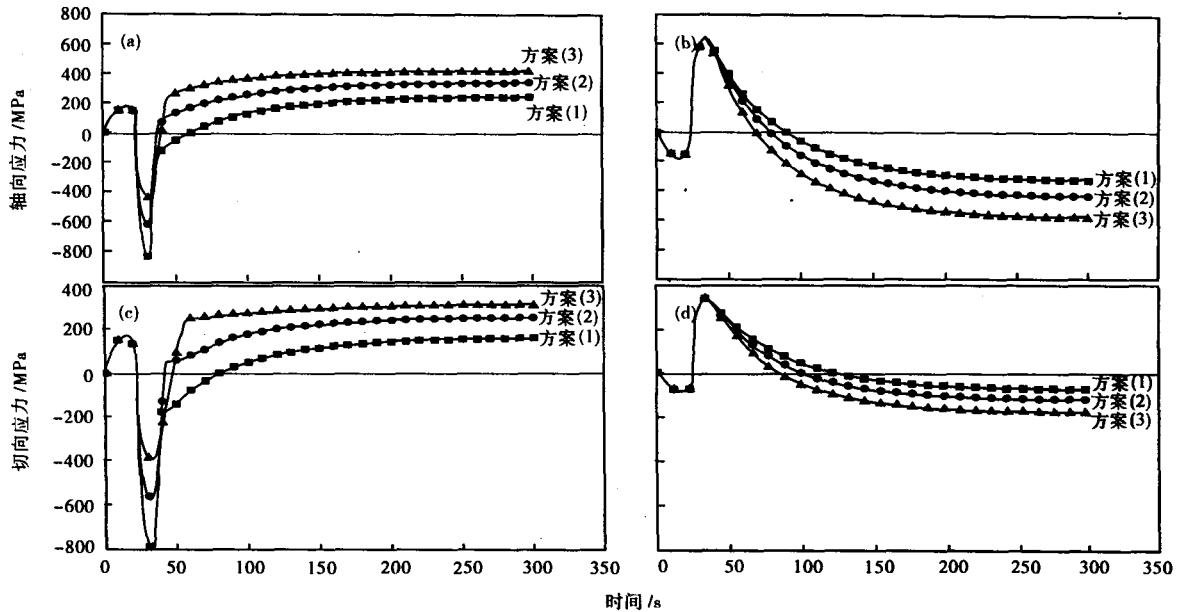


图 4 淬火过程齿轮钢中应力变化: (a) 表面节点轴向; (b) 内部节点轴向; (c) 表面节点切向; (d) 内部节点切向

Fig. 4 Variation of stress in gear steel in quenching process: (a) axial at surface nodes; (b) axial at inner nodes; (c) tangent at surface nodes; (d) tangent at inner nodes

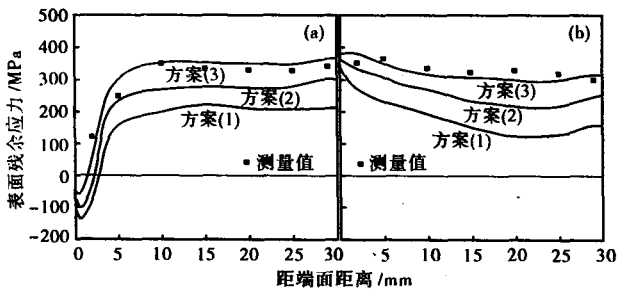


图 5 淬火齿轮钢表面残余应力的计算值与测量值: (a) 轴向应力; (b) 切向应力

Fig. 5 Calculated and measured values of surface residual stress in quenched gear steel: (a) axial stress; (b) tangent stress

和实测值分布, 根据图示结果, 3 种计算方案所得表面残余应力值及测量值沿轴向分布规律是一致的, 除个别点外, 方案 3 所得计算结果与实测值吻合较

好; 在计算中, 考虑应力与相变相互作用的影响, 计算所得的轴向应力值与切向应力值有所提高。对比表面残余应力的测量值与计算值, 在计算中需考虑应力与相变的相互作用, 使计算结果更准确。

4 结论

(1) 根据相变过程的模拟计算结果, 淬火过程的内应力将促进马氏体相变。

(2) 在一定条件下, 组织应力的作用要强于热应力, 使淬火后工件的残余应力呈组织应力分布。

(3) 根据淬火后表面残余应力的测量值与计算值对比, 发现在淬火过程应力场数值模拟中, 需考虑应力与相变的相互作用, 使计算结果更准确。

国家自然科学基金重点资助项目 (编号: 50534020)

参考文献

- 1 刘 庄, 吴肇基, 吴景之. 热处理过程的数值模拟技术. 北京: 科学出版社, 1996
- 2 潘健生, 胡明娟, 田 东, 等. 淬火过程计算机模拟研究的若干进展. 金属热处理, 1998(12): 30
- 3 潘健生, 胡明娟. 计算机模拟与热处理智能化. 金属热处理, 1998(7): 21
- 4 陈火红. MSC. Marc 二次开发指南. 北京: 科学出版社, 2004
- 5 邹壮辉, 高守义. 淬冷热应力场研究和进展. 金属热处理学报, 1993(3): 1
- 6 Sjöström S. Interactions and Constitutive Models for Calculating Quench Stresses in Steel. Materials Science and Technology, 1985, 1: 823
- 7 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体. 北京: 科学出版社, 1999
- 8 程郝明, 王洪纲, 陈铁力. 45 钢淬火过程中热传导方程逆问题求解. 金属学报, 1997, 33(5): 467
- 9 程郝明, 郭荣鑫, 王洪纲. 有限差分法在 CrNi 钢淬火中的应用. 计算物理, 1997, 14(4): 563

宋广胜 (1971-) 男, 讲师, 博士研究生, 从事热处理过程的数值模拟研究。