

# 磁场淬火及其数值模拟<sup>①</sup>

刘美红, 黎振华, 陈君若

(昆明理工大学机电工程学院, 云南昆明 650093)

**摘要** 在热处理过程中, 通过外加磁场来改善被处理金属材料的力学性能是国际材料研究的一个重要的发展方向, 一些学者利用在淬火过程中外加磁场来达到改变金属组织和性能的目的. 本文综述了磁场淬火的研究和应用情况, 对外加磁场淬火的理论作了简要介绍, 并对磁场淬火的数值模拟提出了一些设想.

**关键词:** 磁场淬火; 比热; 热膨胀系数; 数值模拟

**中图分类号:** TG156.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007-855X(2001)06-053-03

## 0 前言

钢的磁场淬火是指在钢淬火时的冷却过程中通过外加磁场的作用, 改善钢的组织及性能的一种热处理工艺. 与传统的淬火工艺相比, 磁场淬火在细化组织、改善机械性能等方面作用明显. 50年代以来, 国内外学者对这种新型的热处理工艺开始进行研究, 取得了一些成果. 对磁场淬火机理进行进一步深入研究, 并将计算机应用于磁场淬火工件的温度场、应力场的模拟, 是目前这一领域的主要研究方向, 具有重要的理论和应用价值.

## 1 研究概况

1929年 Herbert 发现淬火钢磁化会引起硬度升高, 但当时并未将磁场与马氏体相变联系起来. 1960年, Sadorskiy 等发现, Fe-23Ni-1.5Cr-0.5C 钢在温度为 77K、外加 350Koe 磁场时诱发了广泛的马氏体相变. 从此, 有关磁场淬火的研究开始受到人们的重视. M. K. Korenko 和 M. Cohen 发现在一定的相变温度下, 随磁场强度增高, 马氏体形态倾向于变为较少的板条状和较多的片状, 并且在一定的驱动力条件下, 随温度的升高亦是如此. 因此他们总结出, 随相变温度下降马氏体形态变为多呈片状, 显然不单纯是热影响造成的, 而在很大程度上是附加的驱动力增长的结果. 因此对于一个给定的成分, 即使在一个固定温度下相变驱动力也是可以变化的<sup>[1]</sup>.

60年代我国研究人员开始开展磁场淬火研究. 戚正风等发现磁场加热能显著提高钢在淬火后的弯曲强度; 磁场淬火能使马氏体的嵌镶块碎化、马氏体针显著细化并形成明显的织构; 采用交变纵向磁化、提高含碳量或提高磁场强度都能提高磁场淬火的效果<sup>[2]</sup>. 龚方岳等发现淬火过程中加入磁场可促进奥氏体向马氏体转变, 减少钢中残余奥氏体量, 并细化马氏体组织; 对于 Ms 温度较高的低、中碳钢, 磁场淬火可增强其自回火温度, 加速碳的脱溶和碳化物的析出. 但磁场降低钢的淬透性, 如淬火冷却速度不够, 由于非马氏体组织(如屈氏体、铁素体)的出现, 硬度反而降低. 他们认为, 发生这些现象的原因在于, 对碳钢和低合金钢而言, 马氏体为铁磁相, 奥氏体为顺磁相, 在外磁场的作用下, 马氏体因磁化而降低自由能, 故磁场促进 A→M 转变; 另一方面则可能是磁致伸缩. 由于马氏体片取向不同会产生不同程度的磁致伸缩, 因而会导致马氏体相和母相奥氏体的点阵畸变, 产生弹性畸变能, 这些能量同样促进马氏体转变, 增加马氏体的形核率, 细化了马氏体, 减少残余奥氏体量. 而钢的淬透性的降低则可能与工件在磁场中由于电磁感应产生的热量有关<sup>[3]</sup>. 区定容等发现在连续冷却过程中加磁场可以使铁素体转变的 CCT 曲线左移, 淬透性下降; 在奥氏体化过程中加磁场, 会降低奥氏体的稳定性, 造成冷却过程中 CCT 曲线的左移, 而且左移的趋

① 收稿日期: 2001-03-15;    基金项目: 云南省自然科学基金项目;  
第一作者简介: 刘美红, 女, 1973年生, 在读博士. 研究方向: 材料力学行为.

势更明显,当淬火时所加磁场的强度增加到1.2T,马氏体组织明显细化.此外,磁场下淬火可以提高马氏体的耐蚀性,随着外磁场的增加,腐蚀速率下降<sup>[4]</sup>.任福东等发现脉冲磁场等温淬火可以降低过冷奥氏体的稳定性,促进过冷奥氏体向贝氏体转变,缩短等温时间;并可改善组织,即增加贝氏体数量,并对贝氏体形态和残留奥氏体量有一定影响.与常规等温淬火相比,得到相同组织可使工艺周期缩短;在硬度相近时,冲击韧性明显提高<sup>[5]</sup>.胡正前等认为磁场淬火可以提高工件的强度和韧性,降低淬火形成的组织应力,减少或防止淬裂倾向.与未加磁场相比,磁场淬火获得了改善工件机械性能的效果<sup>[6]</sup>.他们认为出现这些现象的原因可能是:①材料因吸收了磁能,提供了奥氏体向贝氏体转变的驱动力,使贝氏体相变驱动力增加;②磁场使贝氏体转变开始点 $B_s$ 升高,这就使在相同转变温度下,外加磁场时的相变驱动力大于正常条件下的相变驱动力;③在磁场作用下,由于磁致伸缩效应使铁原子的原子间距发生周期性的变化,有利于内部原子的扩散,使其扩散激活能降低,增大了扩散系数;④由于磁场的作用,铁磁相能量的变化,使其形核功小于正常状态下的形核功,致使形核率增大<sup>[4-6]</sup>.

以上研究表明,奥氏体在附加磁场的冷却介质中淬火时,由于磁场的作用,淬火介质的冷却特性发生了变化,影响到相变过程.另一方面,由于工件受到外磁场的作用,在马氏体转变阶段(300~400℃),因电磁感应产生的热量而使工件冷却速度大大减缓.同时,磁场使得 $M_s$ 点升高,马氏体自回火程度增强.这些影响导致磁场淬火后的工件在组织和性能都发生了变化:内应力及组织应力降低、残留奥氏体量减少、力学性能提高.但这些研究大多停留在对实验现象和相变机理的讨论上,均未涉及磁场淬火过程的数值模拟.

## 2 磁场淬火过程的数值模拟理论依据

受热后的合金在冷却过程中,当冷却速度大于某一临界值或温度低于某一临界温度时,会发生相变.各种相变产物具有不同的物性系数和力学性能,导致材料综合性能改变并产生相变应力.而应力的存在又会促进或阻碍相变的进一步发生,即应力诱发相变,产生非弹性的相变塑性,使之成为非弹性的热耦合问题.磁场淬火时外加磁场对相变的影响主要表现在:一方面,外加磁场提供给系统自由能,使相变在高于原临界温度发生,致使相变产物增加(即磁场诱发相变);另一方面,金属试件由于电磁感应产生的热量与相变释放的潜热一起作用于试件,使试件冷却速度减慢,使相变产物多元化.

传统意义上的马氏体相变属于一级相变,即其系统热力学势的一阶导数不连续;对于铁磁物质,一个显著的特性就是存在居里温度,居里温度是铁磁物质由铁磁状态转变为顺磁状态的温度,也就是自发磁化消失的温度.而铁磁相变属于二级相变<sup>[7]</sup>,即系统热力学势的二阶导数不连续,反映在由二阶导数确定的压缩率、膨胀率、比热及磁化率出现跃变.在居里温度附近,有比热突变:

$$\Delta c_p = c_p - c_0 = \frac{\alpha^2}{2b} \theta_c \quad (1)$$

式中, $\alpha$ 为铁磁物质的热膨胀系数, $\alpha = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)$ ;  $\theta_c$ 为该铁磁物质的居里温度; $b$ 为一常数.

在居里温度附近,热膨胀系数也有突变,德棱(1936)曾应用热力学关系求得铁磁物质的反常热膨胀与顺磁化过程的体积膨胀 $\omega$ 的关系<sup>[8]</sup>:

应力一定时,体积膨胀 $\omega$ 为磁场强度 $H$ 和温度 $T$ 的函数,而 $H$ 又是磁化强度 $I$ 和温度 $T$ 的函数,因此有:

$$d\omega = \left( \frac{\partial \omega}{\partial T} \right)_H dT + \left( \frac{\partial \omega}{\partial H} \right)_T \left[ \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_I dT + \left( \frac{\partial H}{\partial I} \right)_T dI \right]$$

故:

$$\left( \frac{\partial \omega}{\partial T} \right)_I = \left( \frac{\partial \omega}{\partial T} \right)_H + \left( \frac{\partial \omega}{\partial H} \right)_T \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_I \quad (2)$$

$\frac{1}{3} \left( \frac{\partial \omega}{\partial T} \right)_I = \alpha_I$ 可认为是物质不具有铁磁性时的“正常”热膨胀系数,而 $\frac{1}{3} \left( \frac{\partial \omega}{\partial T} \right)_H = \alpha_H$ 则可认为是物

质具有铁磁性时的热膨胀系数, 故:

$$\alpha_H = \alpha_I - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial \omega}{\partial H} \right)_T \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_I \quad (3)$$

由(1)式可知, 比热的突变与热膨胀系数  $\alpha$  有关, 即在居里点附近, 比热发生突变是由于在此温度处热膨胀系数发生突变而引起的. 因此, 热力磁耦合诱发相变既有不连续相变的特点, 又有连续相变的特性, 是相变研究领域的深入和发展. 热力磁共同作用的耦合作用在于不同的温度梯度产生不同的热应力, 当冷却速度大于某一临界速度和温度低于某一临界点时, 导致相变发生, 由此产生组织应力; 而应力又诱发相变. 同时在稳定或脉冲磁场中, 由于在试件中产生感生电流而转化的热量的将减缓试件冷却速度, 降低热应力; 外加磁场使相变临界点发生漂移和材料比热和热膨胀系数出现的反常现象, 导致磁场诱发相变, 使相变量和应力分布情况发生变化, 而不同的组织和相变量产生不同的相变潜热, 造成新的温度梯度. 由于温度、应力和相组织的变化, 最终造成金属材料力学性能的变化. 因此, 可以在已提出的包含变物性、相变和过冷沸腾边界热传导方程<sup>[9]</sup>的基础上, 将外加磁场的作用视为一附加能量项, 利用相变点附近铁磁材料比热的反常现象, 建立包含变物性、磁场作用、相变和过冷沸腾边界的热传导控制方程, 定量求解热磁耦合作用下, 工件的瞬态温度、瞬态相成分分布, 对其力学性能进行数值模拟和预测. 并在二级相变唯象理论基础上, 利用相变点附近铁磁材料热膨胀系数反常现象, 初步建立包含相变、磁场作用和本构关系理论框架, 定量求解热磁耦合作用下, 工件的瞬态应力和残余应力分布, 研究外加磁场强度对相变点温度和应力的影响. 从而实现磁场淬火时瞬态温度场、相变和应力的数值模拟.

### 3 结 论

(1) 与普通淬火相比, 磁场淬火可减少淬火组织中残余奥氏体的数量, 降低内应力, 细化组织, 提高力学性能;

(2) 外加磁场改变了淬火介质的冷却特性和工件热物性系数, 影响工件相变过程, 是导致磁场淬火后的工件在组织和性能发生变化的原因;

(3) 热力磁耦合非弹性问题以热非弹性理论为基础, 结合凝聚态物理学和金属相变理论, 利用铁磁性材料在不同温度区间具有不同的磁性这一特点, 通过外加磁场, 为相变提供附加的自由能差, 促使相变量发生变化, 从而改变金属材料的力学性能. 这方面研究在国内尚属空白, 有必要开展工作, 定量求解热磁耦合作用下, 瞬态温度、相成分、应力和残余应力的分布, 并对其进行数值模拟和预测.

#### 参考文献:

- [1] M. K. Korenko, M. Cohen. 高磁场中的马氏体相变[C]. 见: 钢的组织转变译文集, 北京: 机械工业出版社, 1975, P215~219.
- [2] 戚正风, 高彩桥. 钢的磁场热处理[C]. 见: 中国机械工程学会第一届热处理年会论文集, 1986, 160~167.
- [3] 龚方岳等. 磁场淬火对碳钢组织的影响[J]. 机械工程材料, 1987, 11(1):45~50.
- [4] 区定容等. 静磁场对 32CrMnNbV 淬透性及耐腐蚀性能的影响[J]. 金属学报, 2000, 36(3):275~278.
- [5] 任福东等. 9SiCr 钢磁场等温淬火新工艺的研究[J]. 金属热处理, 1993, (5):23~27.
- [6] 胡正前等. 碳钢磁场淬火的工艺效果及其热力学动力学分析[J]. 金属热处理, 1987(5):27~29.
- [7] 徐祖耀. 相变原理[M]. 北京: 科学技术出版社, 1988. 365.
- [8] 郭贻诚. 铁磁学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1965. 278.
- [9] 陈君若等. 淬火时考虑过冷沸腾边界和相变的热传导问题[J]. 金属热处理学报, 1993, 14(1):42~49.

(下转第 61 页)

**参考文献:**

- [1] 潘建生等. 45 钢淬火三维瞬态温度场与相变的计算机模拟[J]. 热加工工艺, 1998, (1): 9~12.
- [2] 田东等. 淬冷过程中三维传热的数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 1998, 21(4): 28~31.
- [3] 陈君若等. 淬火时考虑过冷沸腾边界和相变的热传导问题[J]. 金属热处理学报, 1993, 14(1): 42~49.
- [4] 龚方岳等. 磁场淬火对碳钢组织的影响[J]. 机械工程材料, 1987, (11): 45~50.
- [5] 戚正风等. 钢的磁场热处理[C]. 见: 中国机械工程学会第一届热处理年会论文集, 1986. 160~167.
- [6] M. K. Korenko, M. Cohen. 高磁场中的马氏体相变[C]. 见: 钢的组织转变译文集. 北京: 机械工业出版社, 1975. 216~219.
- [7] 任福东等. 9SiCr 钢磁场等温淬火新工艺的研究[J]. 金属热处理, 1993, (5): 23~27.
- [8] 徐祖耀. 相变原理[M]. 北京: 科学技术出版社, 1988. 345.
- [9] 戴道生, 钱昆明. 铁磁学[M]. 北京: 科学技术出版社, 1987. 285.
- [10] Oden J T, Reddy J N. Variational Methods in Theoretical Mechanics[M]. 2nd ed. Springer-Verlag, 1983. 208.
- [11] 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体[M]. 北京: 科学出版社, 1981. 268.
- [12] 陈君若等. 厚壁管类式件水淬传热问题的计算机模拟[J]. 金属热处理学报, 1997, 18(1): 38~44.
- [13] 刘庄等. 热处理过程的数值模拟[M]. 北京: 科学技术出版社, 1996. 350.
- [14] 王洪纲. 热弹性力学概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989. 365.

## Numerical Simulation of Temperature Field in the Quenching Process by Means of the Magnetic Field

LIU Mei-hong, HU Wei-liang, LI Zi-liang, CHEN Jun-ruo

(The Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract** In this paper, on the basis of the heat conduction equation which has already been brought forward in prophase, we treat the effect of the extra magnetic field as an additional energy item, taking advantage of the abnormal phenomena of specific heat and thermal dilate coefficient of iron - magnetism stuff near the phase transformation point, and establish the heat conduction equation involving the effect of magnetic field. By finite element method to simulate quenching process of middle - carbon steel, the distributing of transient temperature on the condition of coupling effects of heat and magnetism is obtained quantificationally.

**Key words:** quenching process by the magnetic field; abrupt change of specific; heat conduction; finite element method; numerical simulation

(上接第 55 页)

## The Research on Evolution of the Magnetic Field Quenching and Its Numerical Simulation

LIU Mei-hong, LI Zheng-hua, CHEN Jun-ruo

(The Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract** At present, in heat treatment process, the method of improving the mechanical properties of the metal materials by means of additional magnetic field is an important development tendently in international material study. Some scholars begin to utilize the quenching by additional magnetic field to change the organization and capabilities of the metal. This paper summarizes the research and application in the magnetic field quenching, briefs the theory of the magnetic field quenching and put forward some assumptions in the numerical simulation of the magnetic field quenching.

**Key words:** magnetic field quenching; specific heat; ardent dilated coefficient; numerical simulation