

多道次点式连续移动感应淬火数值模拟*

朱生霄^{a,b}, 秦训鹏^a, 汪舟^a, 毛华杰^b, 高恺^a

(武汉理工大学 a. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, b. 材料科学与工程学院, 武汉 430070)

摘 要: 为了实现复杂形状工件的表面强化,以电磁场和温度场的控制方程为基础,在 ANSYS 中建立了多道次点式连续移动感应淬火的有限元模型。通过改变各个道次之间感应器移动轨迹的重叠宽度,对多道次连续移动感应淬火过程进行了数值模拟研究,得到了重叠宽度对多道次淬火区域温度场分布和组织转变规律,并通过金相实验验证了模拟结果的可靠性。结果表明当轨迹的重叠宽度大于一定值时,后一道感应加热过程会使得前一道已淬火区域部分发生奥氏体转变,且由于存在热积累效应,后一道轨迹相比前一道轨迹的完全奥氏体化深度和部分奥氏体化深度会有一定程度的增加。

关键词: 多道次; 连续移动; 感应淬火; 数值模拟; 热积累效应

中图分类号: TG156.3

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)03-0122-09

Numerical Investigation of Multi-pass Spot Continual Induction Hardening

ZHU Sheng-xiao^{a,b}, QIN Xun-peng^a, WANG Zhou^a, MAO Hua-jie^b, GAO Kai^a

(a. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, b. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract: To realize the surface hardening of complicated components, a numerical model for multi-pass spot continual induction hardening (MP-SCIH) was built in finite element software ANSYS, based on the nonlinear partial differential equation for electromagnetic and temperature fields. The overlapping width between adjacent tracks was considered during the numerical analysis of MP-SCIH process and the influence of the overlapping width on temperature distribution and microstructure transformation was obtained. The numerical results were validated by metallographic analysis. The results show that if the width of the overlapping region is over a certain value, the austenitic transformation will appear in the former hardened track when subsequent induction heating is carried out on the next track. Because of the heat accumulation effect in the MP-SCIH process, the complete and the partial anstentizing depths of the latter track are larger than those of the former track.

Keywords: multi-pass; continual; induction hardening; numerical simulation; heat accumulation effect

0 引 言

三维点式连续感应淬火工艺通常使用一个单匝铜管线圈并镶嵌一个形状尺寸合适的导磁体作为热源,在工件表面连续移动并实现加热淬火^[1-2]。由于单匝线圈本身尺寸较小,和传统多匝线圈相比其运动方式更加灵活,且通常被安装在

数控机床或工业机器人上,其淬硬层的深度和范围可精确控制,因而适用于各类具有复杂形状工件的表面热处理。

由于感应淬火表面强化工艺具有许多独特的优点,国内外学者对感应淬火过程进行了大量研究。针对复杂曲面的强化,陈浩^[1]等学者提出

收稿日期: 2015-03-18; **修回日期:** 2015-04-26; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51175392); 湖北省科技支撑计划项目(2014BAA012); 教育部博士点基金新教师项目(20130143120015)

通讯作者: 秦训鹏(1962-), 男(汉), 教授, 博士; **研究方向:** 材料加工技术; **Tel:** (027) 8785 6733; **E-mail:** qxp915@sina.com

网络出版日期: 2015-05-07 15:59; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150507.1559.002.html>

引文格式: 朱生霄, 秦训鹏, 汪舟, 等. 多道次点式连续移动感应淬火数值模拟 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(3): 122-130. Zhu S X, Qin X P, Wang Z, et al. Numerical investigation of multi-pass spot continual induction hardening [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(3): 122-130.

了三维点式感应淬火的方法,在 ANSYS 中建立了 45 钢三维点式感应淬火的有限元模型并进行了数值模拟研究,得到了在特定功率和电流频率条件下的最佳加热时间,并根据 45 钢的连续冷却转变曲线和马氏体转变临界冷却速度对淬火后工件表面组织进行了预测,得到了在油冷和水冷两种情况下的淬硬层深度。其研究方法有一定的创新性和可行性,但其模型没有经过实验验证,且感应器和工件的相对位置保持不变,不能满足实际生产的要求。Shokouhmand^[3]等学者对空心圆筒型工件的连续移动感应淬火过程进行了数值模拟研究,该模型考虑了空气对圆筒型工件内外表面的自然对流,提高了计算结果的可信性。同时,也分析了移动速度、感应器的初始位置和工件内外表面的半径比等因素对温度场分布的影响,但其结果没有经过试验验证,且其模型简化为 2D,难以消除模型本身产生的计算误差。Magnabosco^[4]等学者对正火态和退火态的 ISO C45 钢棒进行了感应淬火的数值模拟研究及其实验验证,其目的是为了建立一个被验证的数值模型来预测在感应淬火过程中温度场、组织和硬度的变化规律。该工作是值得肯定的,虽然模型中存在一些不确定的假设条件和不合理的简化。与上述学者研究对象不同的是,文中所研究的多道次点式连续感应淬火工艺是为了满足相对较大平面或者特殊强化带平面的强化要求。在这种新工艺中,感应器需根据规划路径作多道次运动,且相邻道次运动轨迹间存在一定的几何学关系。因此在模拟该过程时,不仅需要考虑电磁场和温度场的非线性,同时需要解决由于感应器移动带来的随时间变化的非稳态边界条件问题,极大增加了模拟计算的难度^[4-5]。

文中基于电磁学和传热学理论,在 ANSYS (13.0)中建立了多道次三维点式连续移动感应淬火(Multi-pass spot continual induction hardening, MP-SCIH)的有限元模型,研究了不同道次重叠宽度对工件表面和深度方向温度场的影响规律,为不规则三维曲面的移动感应淬火数值模拟方法提供了思路。

1 感应淬火有限元计算的物理基础

多道次点式连续移动感应淬火过程的电磁场是基于麦克斯韦方程组^[1-5]:

$$\operatorname{curl} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho_e \quad (2)$$

$$\operatorname{curl} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

在公式(1)~(4)中, \mathbf{E} 为电场强度矢量, \mathbf{B} 为磁感应强度矢量, \mathbf{D} 为位移电流矢量, ρ_e 为体电荷密度, \mathbf{H} 为磁场强度矢量, \mathbf{J} 为场电流密度, t 为时间。

在麦克斯韦方程组的基础上,推导出了工件中电磁场的微分方程^[5-6]:

$$\operatorname{curl} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{curl} \mathbf{A} \right) + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \mathbf{v} \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_s \quad (5)$$

μ 为介质的磁导率, \mathbf{A} 为磁矢势, σ 为介质的电导率, \mathbf{J}_s 为感应器内所通电流密度矢量, \mathbf{v} 为感应器的移动速度。

温度场的边界条件由加热和淬火时的条件决定。一般来说,感应淬火过程中的热量损失包括热传导、热对流及热辐射,因为热辐射相对于热对流和热传导来说造成的热损耗很小,可以忽略不计^[5],因此温度场边界条件为^[2,5]:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_s - T_{CM}) \quad (6)$$

式(6)中 n 为边界面的法线方向; h 为对流换热系数, k 为导热系数; T_s 为工件表面温度, T_{CM} 为工件表面流体的温度。在文中模拟中,沸腾水的换热系数设置为 $10\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[2],空气换热系数设置为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,环境温度设为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[7]。

2 有限元建模

选用 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 正火态 AISI 1045 钢为研究对象进行多道次点式连续移动感应淬火的数值模拟研究。其中,模拟计算所需要用到的材料物理参数及其随温度变化如图 1 所示^[1-2]。

整个模型分为工件、感应器和空气 3 部分,其中感应器包括感应线圈和导磁体,如图 2 所示,感应器与工件之间的垂直距离为 2 mm 。工件尺寸 ($L \times W \times H$) 为 $180 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$; U 型感应线圈材料为纯铜,长 40 mm ,高 50 mm ,截面尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,壁厚 1 mm ;在线圈上镶嵌导磁体,通过控制磁通的密度和方向从而改变工件表面的涡流分布,提高加热效率,其尺寸 ($L \times$

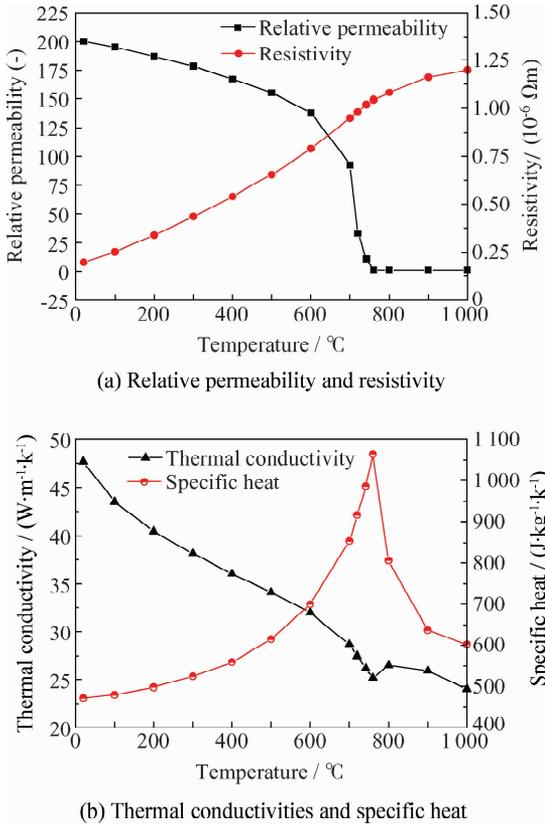


图1 AISI 1045 钢物理参数随温度变化曲线

Fig. 1 Variations of thermal and electro-magnetic properties with temperatures of AISI 1045 steel

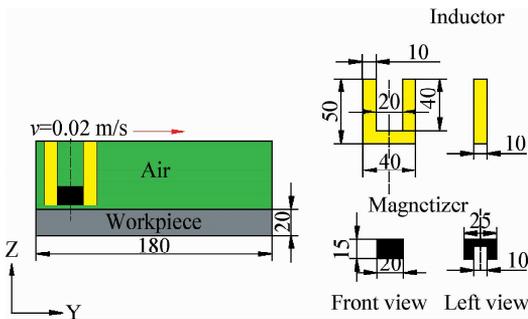


图2 多道次点式连续移动感应淬火模型示意图 (Unit: mm)

Fig. 2 Schematic diagrams of the MP-SCIH model

$W \times H$ 为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。

在数值模拟过程中, 网格划分质量会直接影响计算精度以及计算效率。综合考虑计算时间和计算精度, 工件采用六面体网格划分, 而空气、铜管及导磁体则采用四面体网格划分, 如图3所示。由于工件中电流分布具有明显的集肤效应^[1,8], 为了使得计算结果更精确, 对表层 2 mm 深度范围内进行网格细分(5 等分), 其余深度部分(18 mm)使用

等比例划分。网格划分完成后, 工件沿深度方向(Z轴)上最小节点距离为 0.2 mm, 宽度(X轴)和长度(Y轴)方向最小节点距离分别为 1.2 mm 和 1.65 mm; 整个模型中工件、线圈、导磁体和空气的单元数分别为 40 500、1 796、711 和 36 616。

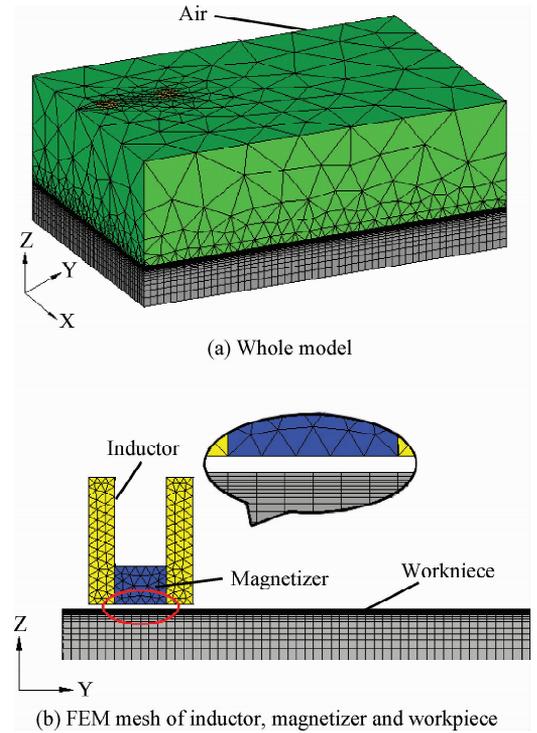


图3 模型网格图

Fig. 3. FEM mesh of the model

在 ANSYS(13.0) 中选用 solid 117 单元进行电磁场分析, 选用 solid 90 单元进行温度场分析。感应器的移动速度和移动路径的控制是通过时间步长来实现的, 即在 ANSYS 软件中将感应器的连续运动过程分解为多个子步。在每个子步中, 先进行电磁场求解, 将涡流生热作为温度场瞬态分析的初始条件进行温度场求解, 然后将温度场分析的结果数据保存在系统缓存文件之中, 删除所有耦合模型, 在下一个子步计算时改变线圈与工件的相对位置建立新的模型, 并重新进行网格划分和电磁场边界条件的施加, 然后读取系统缓存中工件的温度数据作为这一子步计算的初始条件, 进行材料相关物理参数更新以及电磁场和温度场的求解。由于将上一子步产生的温度数据作为这一子步的初始条件, 并且感应器与工件的相对位置发生了改变, 即可认为实现了感应器的移动。只要将时间步长设置足够小(设置为 0.05 s), 整个计算过程即可近似看作是一个连

续的移动过程。如果将感应器移动路径与时间的关系以函数的形式表示出来,那么可以通过时间来控制感应器的路径,从而实现任意路径的连续移动感应淬火过程。这一方法对复杂曲面连续移动感应淬火的数值模拟提供了解决思路。

3 结果与讨论

连续移动感应淬火工艺的主要参数包括电流(I)、频率(f)、感应器移动速度(v)、淬火介质以及工件和感应器的尺寸^[5]。淬火介质选用的是冷却水,工件和感应器尺寸已在进行了介绍,其余工艺参数设置如表 1 所示。

表 1 数值模拟的工艺参数

Table 1 Process parameters of the multi-pass spot continual induction hardening

Group	I/A	f/kHz	$v/(m \cdot s^{-1})$	Overlap/mm
A	1 800	30	0.02	5.2
B	1 800	30	0.02	2.8
C	1 800	30	0.02	0.4

为了研究多道次点式连续移动感应淬火过程中,不同的重叠轨迹对工件温度场的影响,选用了 3 组不同的重叠宽度进行分析。每一道轨迹的加热时间为 5 s,在感应器移动 2 s 后在其后方工件被加热区域进行水淬。图 4 为多道次表面热处理区域示意图,线 L1、L2、L3 分别为各个道次的中心线,深色区域为重叠区,其中一道轨迹与二道的重叠区命名为第一重叠区(OZ1),二道轨迹与三道的重叠区命名为第二重叠区(OZ2)。选取工件表面各个轨迹中心线上的点为研究对象,以感应器初始位置正中心对应工件表面为 P0 点,沿运动方向每隔 20 mm 选取一点,直至各道轨迹的终点。其中 P6 点为二道轨迹初始点,P12 为三道轨迹初始点。为了分析各个道次之间的相互影响,选取位于三道轨迹中段表面上的 P3、P9 和 P15 点作为研究对象,图 5 为 P3、P9、P15 点所在横截面的示意图,提取这 3 点在 A、B、C 这 3 组参数条件下的时间温度曲线如图 6 所示。

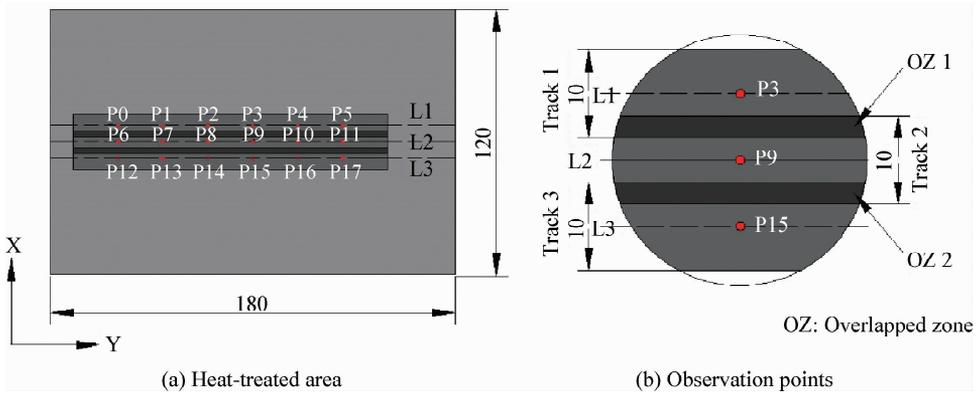


图 4 工件表面热处理区及选点示意图(Unit: mm)

Fig. 4 Schematic diagrams of the heat-treated area and the positions of observation points

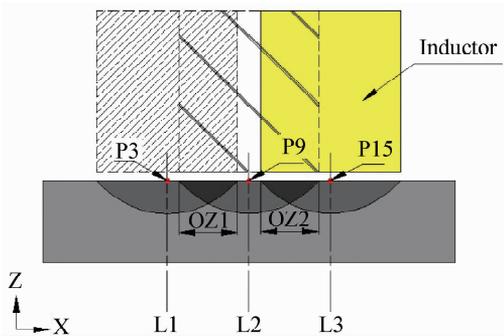


图 5 点 P3、P9 和 P15 所在横截面位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the selected points P3, P9 and P13 on cross section

在图 6 中,AISI 1045 钢 Ac1 温度为 740 ℃,Ac3 温度为 800 ℃,马氏体转变临界冷却速度为 200 ℃/s^[9-10]。比较 A、B、C 组曲线可以看出,在多道次连续移动感应淬火过程中,P3、P9 和 P15 点都是随着感应器的接近,温度迅速升高;当感应器的中心越过观测点而非观测点正上方时,观测点温度达到最大值;随着感应器的离开,温度开始缓慢下降,在加入冷却水后,工件表面温度迅速降低到马氏体初始转变温度(Ms)以下的某一温度后降温速率随时间慢慢减小。比较图 6(a)(b)(c)可得,随着重叠区域的减小(A 组

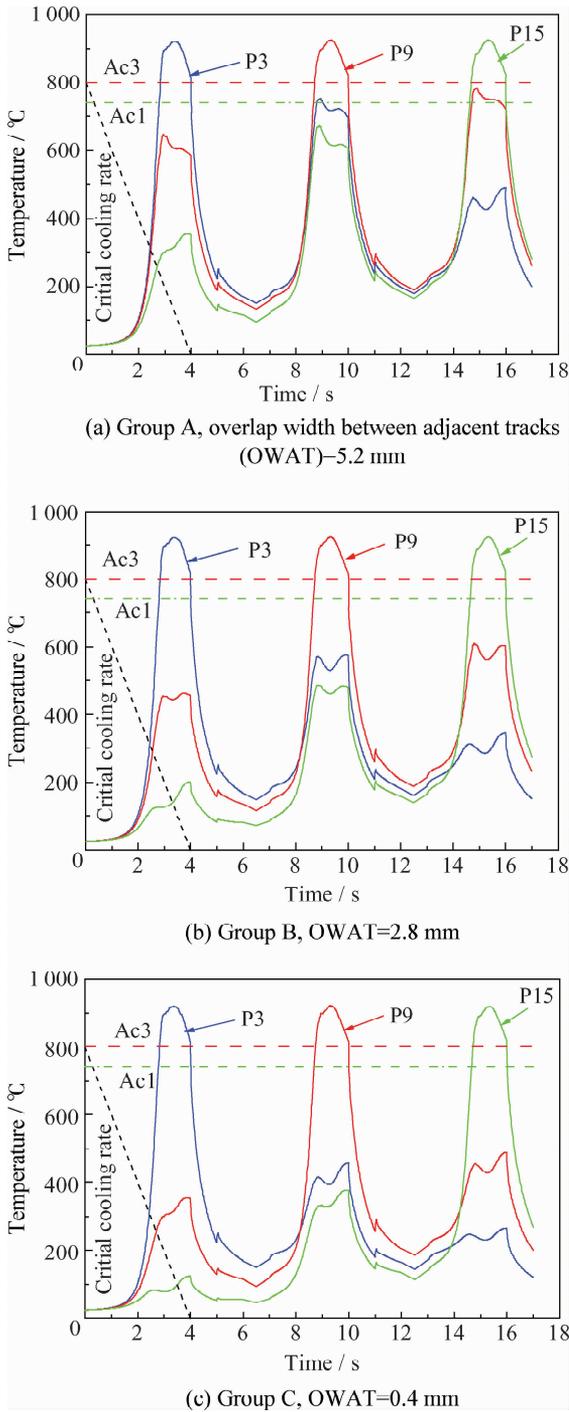


图6 各组参数条件下所选点的时间-温度曲线

Fig. 6 Temperature-time curves of the selected points (P3, P9 and P15) under different process conditions

>B组>C组),前一道轨迹观测点受后一道加热过程的影响变小,回火温度降低,后一道轨迹受前一道预热温度也会降低。从图6(a)可以看出,当重叠宽度为5.2 mm时,一道中心线上的P3点第一次的回火温度达到了752℃,超过了AISI 1045钢的Ac1温度,理论上在此点附近的

区域会发生部分奥氏体转变,且冷却速度大于马氏体转变的临界冷却速度,可以推断在第二道感应淬火完成后,第一重叠区(OZ1)会生成部分马氏体组织以及高温回火索氏体;在进行第三道感应淬火时,P3点最高加热温度约为490℃,达到中温回火温度,因而根据模拟结果,第一重叠区(OZ1)在经历两次回火后,其组织成分应为铁素体、回火索氏体和回火屈氏体组织。第二重叠区(OZ2)只受到一次回火影响,从图6(a)可以看出,P9点在回火过程中最高温度达到了782℃,高于了P3点第一次回火温度,且P9点冷却速度也大于马氏体转变的临界冷却速度,这就造成了第二重叠区(OZ2)最终为铁素体和马氏体的混合组织。

从图6(b)可以看出,当重叠宽度为2.8 mm时,P3点第一次的回火温度达到了高温回火温度,产生回火索氏体组织;第二次回火为低温回火,不会对最终组织产生太大影响。同理,位于第二道中心线上的P9点只受到一次高温回火影响,得到珠光体和回火索氏体的混合组织。从图6(c)可以看出,当重叠宽度为0.4 mm时,P3点和P9点都受到中温回火影响,得到回火屈氏体组织;一道轨迹上远离一道中心线和OZ1一侧的区域会受到低温回火的影响,实现奥氏体化的区域将得到回火马氏体组织。在A、B、C这3组参数条件下,虽然受到不同预热温度的影响,P15点最终均为马氏体组织。

为了分析多道次点式连续移动感应淬火过程中深度方向上温度变化规律,选择A、B、C这3组条件下P3、P9、P15点及其沿z轴深度方向上各点作为研究对象(每隔0.2 mm选一点,共9点),提取各点温度随时间变化曲线,如图7、8和9所示。其中,图示曲线从上到下依次表示距表层0~1.6 mm处各点的时间温度曲线,点间距为0.2 mm。

图7是A组深度方向上各点的时间温度变化曲线,图8是B组深度方向上各点的时间温度曲线,图9是C组深度方向上各点的时间温度曲线。由3组图可以看出,后一道相比前一道在相同深度条件下最高温度有不同程度的升高,这是由于在感应加热过程中,前一道感应加热过程给后一道将要热处理区域产生了预热作用,使其在深度方向上温度梯度减小,完全奥氏体化深度(h1)和部分奥氏体化深度(h2)有不同程度的增加。由图7可知,距表面0.8 mm处的最高温度

约为 816 °C, 1.0 mm 处的最高温度约为 772 °C, 1.2 mm 处的最高温度约为 731 °C。为了估算出完全奥氏体化深度 (h1) 和部分奥氏体化深度 (h2), 不妨假设温度在此区域内呈线性下降, 同时认为超过 Ac3 和 Ac1 温度时发生了完全奥氏体化和部分奥氏体化, 则根据模拟结果在 A 组参数下, 一道中心线区域完全奥氏体化深度约为 0.87 mm, 部分奥氏体化深度约为 1.16 mm。同理可得 A、B、C3 组各道中心线区域 h1 和 h2 深度如表 2 所示。

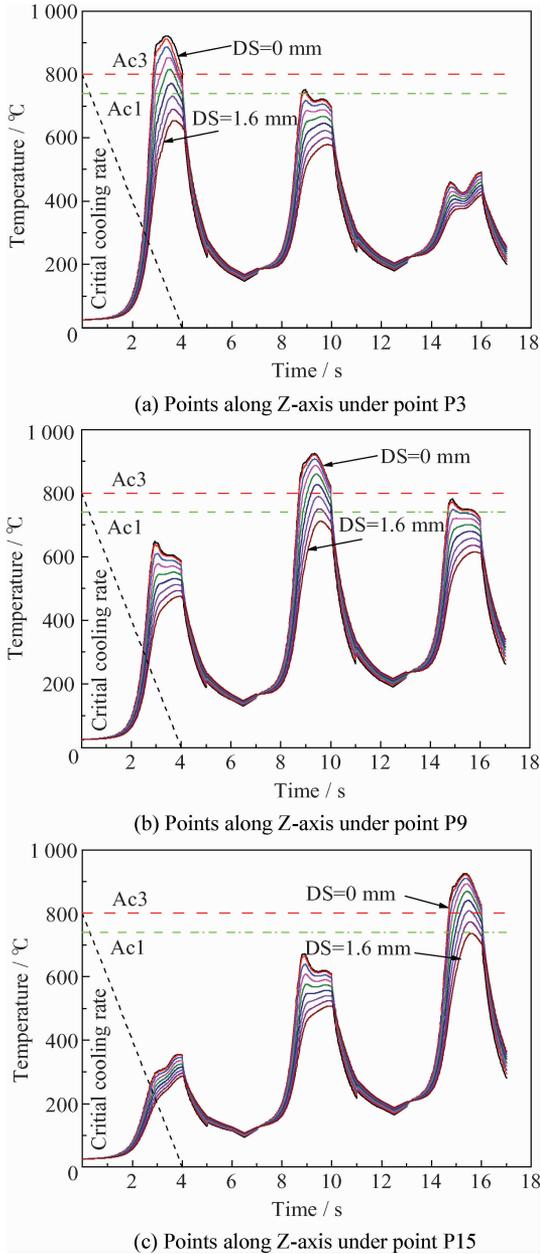


图 7 A 组深度方向上各点的时间-温度曲线

Fig. 7 Temperature-time curves of the selected points along Z-axis in group A (DS: Distance from the surface)

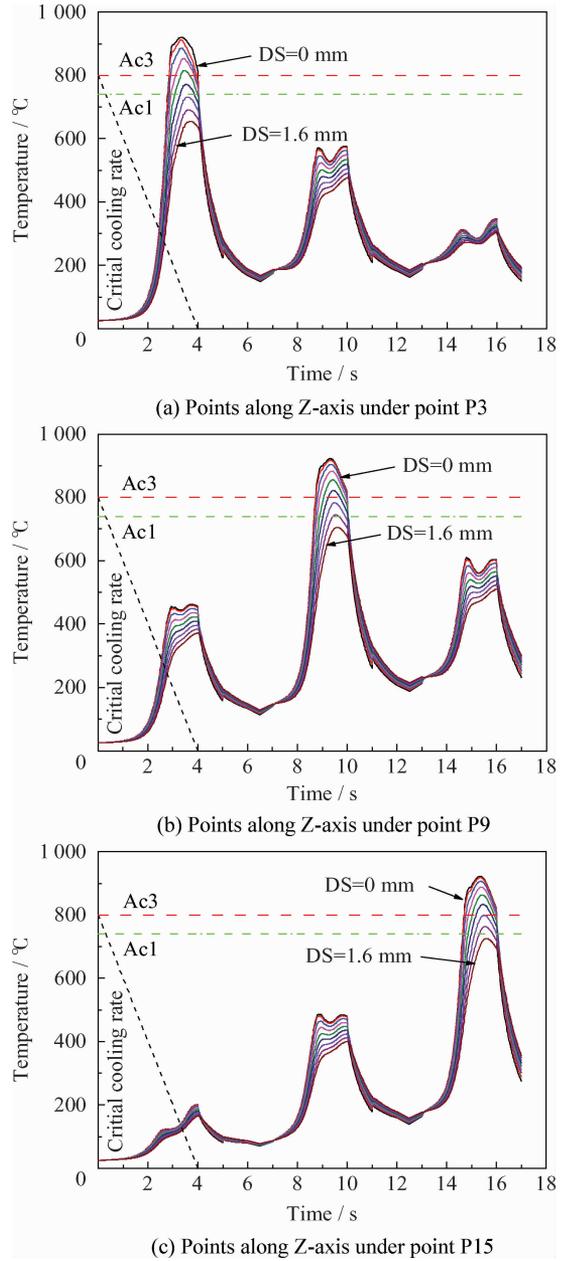


图 8 B 组深度方向上各点的时间-温度曲线

Fig. 8 Temperature-time curves of the selected points along Z-axis in group B (DS: Distance from the surface)

由于 A、B、C 这 3 组工艺的区别只是轨迹的重叠宽度发生了变化, 从表 2 可以看出, 3 组参数条件下的第一道轨迹 h1 和 h2 深度完全一致。在多道次连续移动感应淬火过程中, 工件内部由于热积累效应, 后一道相比前一道 h1 和 h2 深度都有一定程度的增加; 随着重叠区域的减小, 热积累效应减弱, 使得 A、B、C 这 3 组的二道和三道完全奥氏体化深度和部分奥氏体化深度依次减小。从图 7~9 可知, 工件深度方向上各点

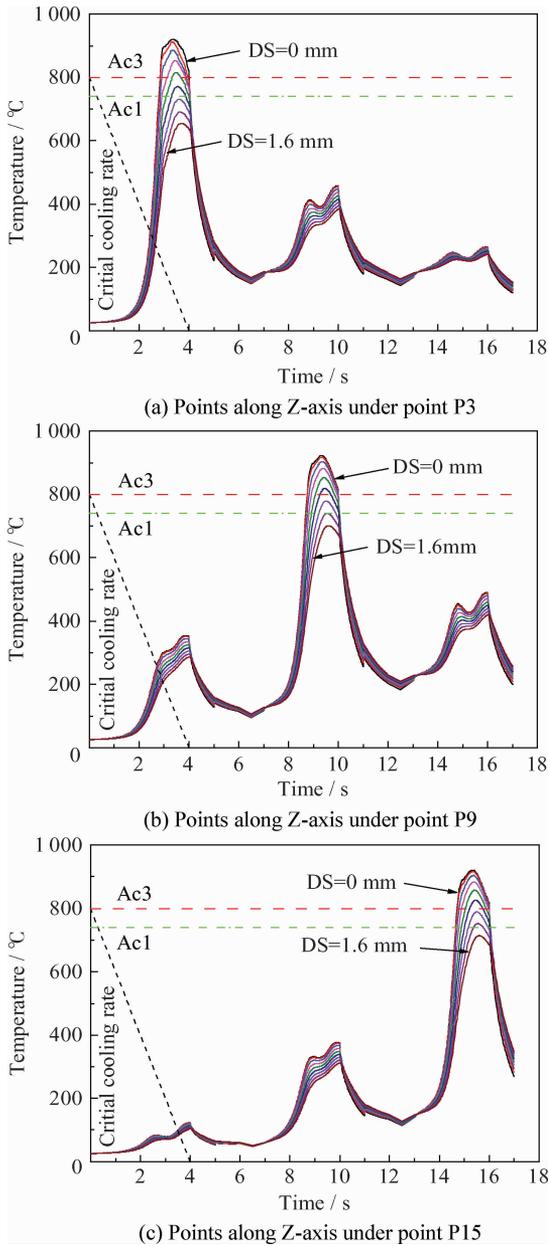


图9 C组深度方向上各点的时间-温度曲线

Fig. 9 Temperature-time curves of selected points along Z-axis in group C (DS: Distance from the surface)

的冷却速度均大于马氏体转变的临界冷却速度,因此在下一道感应加热开始前,所有奥氏体化区域都会发生马氏体转变, h_1 深度即为 100% 马氏体硬化层深, h_1 深度与 h_2 深度之间的区域即为过渡区,为马氏体和珠光体的混合组织。在受到后续道次感应加热的影响时,由于回火温度和回火时间的不同,在相应热处理区会产生不同的回火组织。

为了验证模拟结果的准确性,按表 1 参数设置 3 组实验,选择各组参数条件下 P3、P9 和 P15 点进行金相测试,经热处理前得到的金相组织如

图 10 所示,按表 1 热处理后得到各参数下各点的组织图如图 11 所示。

从图 10 可以看出,P3 点在热处理前的组织为白色铁素体以及片状的珠光体组织,即为工件的初始组织形态。从图 11(a)~(f)可知,在重叠宽度为 5.2 mm 时(A组),P3 点为回火索氏体和回火屈氏体组织,其中还有少量铁素体,P9 点为珠光体和少量马氏体组织;当在轨迹重叠宽度为 2.8 mm 时(B组),P3 点为回火索氏体和铁素体混合组织,P9 点为回火索氏体和铁素体混合组织;当在轨迹重叠宽度为 0.4 mm 时(C组),P3 点为回火屈氏体和回火马氏体混合组织,P9 点为回火屈氏体和少量马氏体混合组织。从图 11(g)~(i)可知,在 A、B、C 这 3 组参数条件下,P15 点均为马氏体组织,但由于受到前面两道感应加热时不同预热温度的影响,马氏体组织在晶粒大小方面呈现一定差异。从金相结果可知,模拟分析结果与实验结果基本吻合,除了金相结果中,C 组参数条件下 P3 点出现了回火马氏体组织,这是回火时间和回火温度共同作用的结果。碳钢的回火性能主要受到含碳量、回火温度和回火时间的影响,在含碳量一定的情况下,回火温度越高,达到相同回火性能所需回火时间越短^[10]。在多道次连续移动感应淬火过程中,每一个道次时间为 5 s,从图 6~9 可知,后一道对前一道的回火时间只有 1~2 s,P3 点在第一道结束后为 100% 马氏体组织,在 A 组和 B 组参数条件下,第二道产生的回火温度很高,在很短的时间内就发生了组织转变,所以模拟结果与实验结果相吻合;在 C 组参数条件下,第二道对 P3 点产生了中温回火的效果,但由于回火时间短,回火过程不充分,使得部分马氏

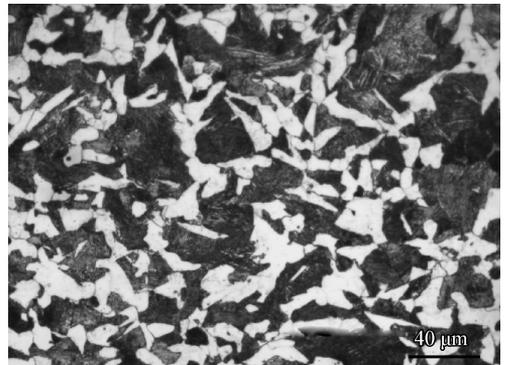


图 10 热处理前 AISI 1045 钢的金相组织

Fig. 10 Microstructure of the AISI 1045 steel before heat treatment

表 2 A、B、C 三组参数下各道中心线区域完全奥氏体化深度(h1)和部分奥氏体化深度(h2)

Table 2 Complete austenitizing (h1) and partial austenitizing depths (h2) in A, B, C three groups (mm)

Group depth	A			B			C		
	First track	Second track	Third track	First track	Second track	Third track	First track	Second track	Third track
h1	0.87	1.14	1.24	0.87	1.11	1.20	0.87	1.09	1.14
h2	1.16	1.45	1.58	1.16	1.42	1.52	1.16	1.40	1.46

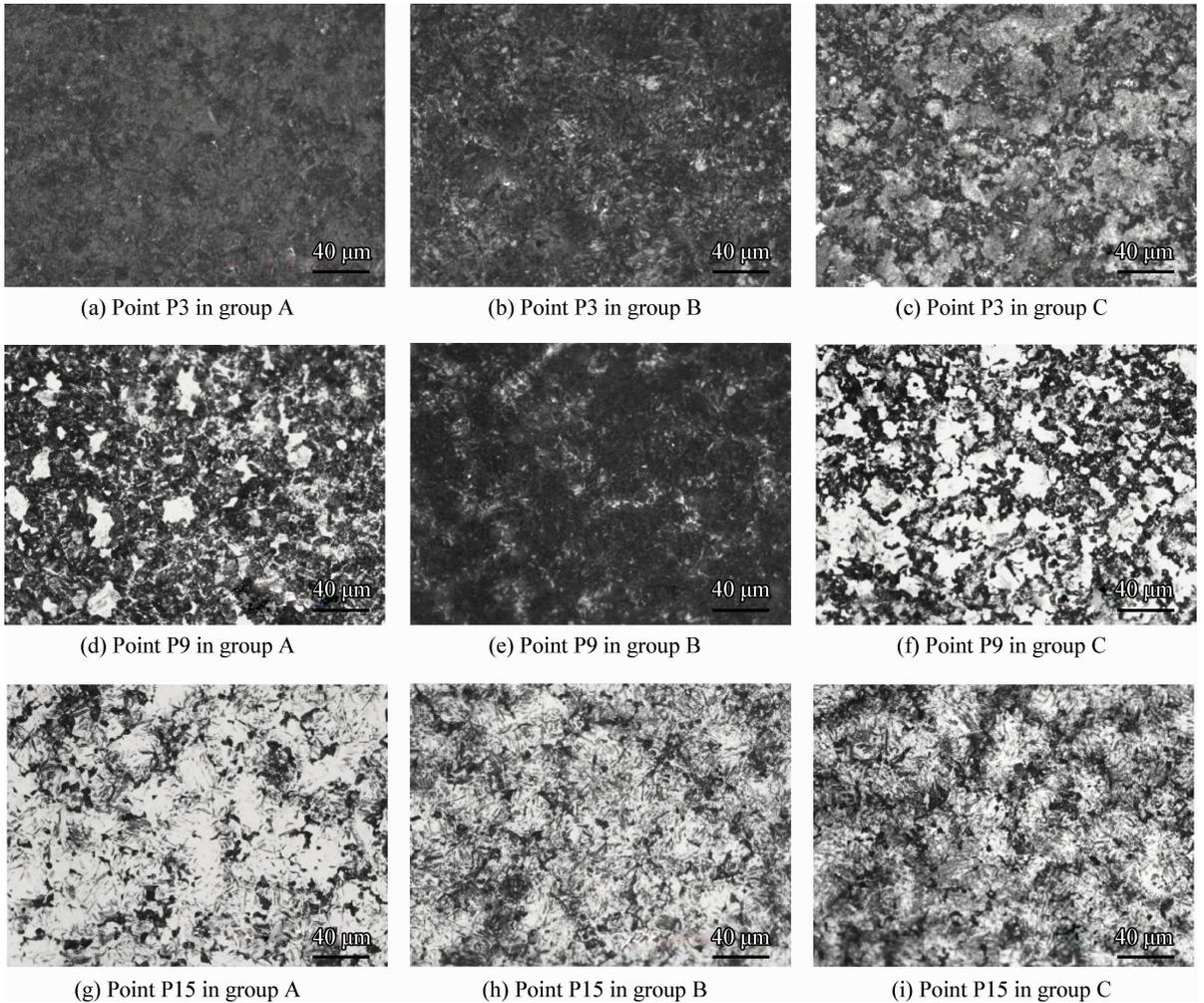


图 11 AISI 1045 钢在不同处理条件下各点的金相组织

Fig. 11 Microstructure of the AISI 1045 steel in selected points under different conditions

体生成了回火屈氏体组织,剩余马氏体在第三道低温回火时生成了回火马氏体组织。

4 结 论

通过耦合非稳态电磁场和温度场,在 ANSYS(13.0)中建立了多道次三维点式连续移动感应淬火的有限元模型,分析了不同轨迹重叠宽度对于多道淬火区域温度场的影响,并选取了各道

轨迹中心线上的 P3、P9、P15 点进行金相分析,说明了模型的可靠性。得到如下结论:

(1) 在多道次点式连续移动感应淬火工艺中,在线圈宽度 10 mm,移动速度 0.02 m/s,电流 1 800 A,频率 30 kHz 的情况下,当轨迹重叠宽度大于 5.2 mm 时可导致前一道已淬火区域部分发生奥氏体转变。

(2) 由于热积累效应,后一道相比前一道的

完全奥氏体深度和部分奥氏体深度都有一定程度的增大;随着重叠区域的减小,热积累效应减弱,使得第二道和第三道完全奥氏体深度和部分奥氏体深度依次减小。

(3) 在重叠宽度为 5.2 mm 和 2.8 mm 情况下,P3 点组织状态的模拟分析和实验结果相吻合;而当重叠宽度为 0.4 mm 时,受到回火时间和回火温度的共同影响,第一次回火过程不充分,部分马氏体而在第二次回火时生成了回火马氏体组织。

(4) 实现了感应线圈的连续移动和多道次的路径控制,为不规则三维曲面的连续移动感应淬火数值模拟提供了解决思路。

参考文献

- [1] 陈浩,秦训鹏,汪舟,等. 三维点式感应淬火电磁耦合场数值模拟 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(1): 79-85.
Chen H, Qin X P, Wang Z, et al. Finite element analysis of coupled electromagnetic thermal field for 3D spot induction hardening [J]. China Surface Engineering, 2013, 26(1): 79-85 (in Chinese).
- [2] Gao K, Qin X P, Wang Z. Numerical and experimental analysis of 3D spot induction hardening of AISI 1045 steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 2425-33.
- [3] Shokouhmand H, Ghaffari S. Thermal analysis of moving induction heating of a hollow cylinder with subsequent spray cooling: effect of velocity, initial position of coil, and geometry [J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36: 4304-23.
- [4] Magnabosco I, Ferro P, Tiziani A, et al. Induction heat treatment of a ISO C45 steel bar: experimental and numerical analysis [J]. Computational Materials Science, 2006, 35: 98-106.
- [5] Karban P, Donátová M. Continual induction hardening of steel bodies [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2010, 80: 1771-82.
- [6] Stratton J A. Electromagnetic Theory [M]. McGraw-Hill, 1941.
- [7] Zhou, X Y, Thomas, B G, Hernandez, C A, et al. Measuring heat transfer during spray cooling using controlled induction-heating experiments and computational models [J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 37, 3181-92.
- [8] 吴季恂,周光裕,荀毓闽. 钢的淬透性应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
Wu, J X, Zhou, G Y, Xun, L M. The application technology of steel hardenability [M]. Beijing: China Machine Press, 1994 (in Chinese).
- [9] 安继儒,刘耀恒. 热处理工艺规范数据手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
An, J R, Liu, Y H. The date book of heat treatment process specification [M]. Beijing: Chemical industry press, 2008 (in Chinese).
- [10] 钟士红. 钢的回火工艺和回火方程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
Zhong, S H. Tempering process and tempering equation of steel [M]. Beijing: China Machine Press, 1993 (in Chinese).

(责任编辑: 陈茜)

• 本刊讯 •

《中国表面工程》撤稿声明

(2015-02-05)

由于论文还需进一步完善等原因,作者向编辑部提出撤稿。本刊经查证非学术不端行为,现尊重作者意见,对该论文进行撤稿处理,特此公告。具体信息如下:

引文格式: 娄建新,刘丹,张旋,王泽华,程江波. 热喷涂 FeCrBSiNbW 涂层结构演变及空蚀性能 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 74-79. LOU Jian-xin, LIU Dan, ZHANG Xuan, WANG Ze-hua, CHENG Jiang-bo. Microstructure evolution and cavitation erosion of the fecrbsinbw coatings prepared by arc spraying process [J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 74-79.

作者单位: 沈阳工业大学 材料科学与工程学院; 渤海大学 力学与材料学院
School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology; College of Mechanics and Materials, Hehai University

《中国表面工程》编辑部