

三维点式感应淬火电磁热耦合场数值模拟^{*}

陈 浩^{a,c}, 秦训鹏^{b,c}, 汪 舟^b, 高 恺^a

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

摘 要: 针对 45 钢三维点式感应淬火工艺进行参数设计, 建立点式感应淬火过程的电磁场及温度场的非线性偏微分方程组, 在有限元软件 ANSYS 中使用耦合场分析的方法实现了对加热功率为 36 kW, 电流频率为 50 kHz 的感应热处理工艺的数值模拟。结果表明, 在综合考虑表面组织完全奥氏体化及感应加热效率的情况下, 该工艺的最佳加热时间约为 2 s。通过模拟分别得到使用冷却水和冷却油作为冷却介质时的感应淬火过程中的温度变化规律, 结合 45 钢的连续冷却转变曲线, 以马氏体转变临界冷却速度为判断依据, 对淬火后工件表面组织进行预测, 结果表明两种淬火条件均可以实现表面组织马氏体转变, 实现工件的表面强化, 且淬硬深度均约为 1.0 mm。

关键词: ANSYS; CCT 图; 感应淬火

中图分类号: TG156.3; O241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)01-0079-07

Finite Element Analysis of Coupled Electromagnetic Thermal Field for 3D Spot Induction Hardening

CHEN Hao^{a,c}, QIN Xun-peng^{b,c}, WANG Zhou^b, GAO Kai^a

(a. School of Materials Science and Engineering, b. School of Automotive Engineering, c. Hubei Key Laboratory of Advanced technology of Auto Mobile Parts, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract: The process parameters of 3D spot induction hardening of 45 steel were studied. To describe the electromagnetic and temperature fields during the spot induction hardening process, a 3D spot induction hardening model with parameters of heating power of 36 kW and frequency of 50 kHz was built via finite element software ANSYS using coupled field method according to nonlinear partial differential equation of electromagnetic and temperature fields. The results show that considering the austenitizing of surface area and induction heating efficiency, the optimal heat time during heating process is about 2 s. The quenching effects of different quenching medium (water and oil) were discussed by considering the simulated results and the continual cooling transformation curve of 45 steel, and the martensite transform critical cooling rate was used as the criterion for structure prediction. Results show that martensite structure can be obtained on the surface area under both conditions, and the quench depth is about 1.0 mm.

Key words: ANSYS; CCT curve; induction hardening

0 引 言

点式感应淬火是一种新型的局部感应淬火工艺, 该工艺通过在线圈中通入交变电流, 产生交变磁场, 置于该磁场中的工件因电磁感应原理

在表面产生大量涡流, 使温度在短时间内迅速升高, 在钢件组织奥氏体化后, 以大于临界冷却速度的冷速快冷到 M_s 以下实现马氏体转变。该工艺不仅具有传统感应淬火工艺加热速度快、加热

收稿日期: 2012-10-15; **修回日期:** 2013-01-04; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51175392); 武汉市重点科技攻关项目(201210221074); 材料成形与模具技术国家重点实验室开放基金(2010-P13)

作者简介: 陈浩(1990—), 男(汉), 湖北荆州人, 硕士生; **研究方向:** 车身模具表面感应热处理

网络出版日期: 2013-01-14 12:14; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130114.1214.010.html>

引文格式: 陈浩, 秦训鹏, 汪舟, 等. 三维点式感应淬火电磁热耦合场数值模拟 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(1): 79-85.

效率高、热处理质量好、易于实现机械化及自动化、环保节能等优点^[1],而且由于其受热面积小,感应加热线圈形状多样,适用于各类具有复杂表面形状的工件表面的热处理,有效弥补了传统感应热处理技术只对轴向零件或者其他规则形状零件进行表面热处理的不足。点式感应淬火技术还可通过与五轴联动数控伺服机构相结合,实现对大型汽车覆盖件模具型面等复杂曲面表面的均匀强化^[2]。

国内外学者在感应加热数值模拟研究上做了大量工作,但针对电磁场和温度场进行耦合分析的文献很少,部分文献在分析时将两个物理场分开处理^[3],而研究耦合场的文献所处理的对象大多为轴对称工件或者整体式加热,其建模过程可以简化为 2D 模型^[4-7],不适用于对有明显具有三维几何特征零件感应淬火过程的模拟,少数国外学者通过自编 PDE 软件包,或者是对其他大型有限元软件进行二次开发,进行耦合模拟^[8-10],但该方法未能在通用有限元软件中建立模型,操作复杂,不适合点式感应淬火技术的分析过程。

文中通过建立电磁场及温度场的控制方程,在通用有限元软件 ANSYS 中实现了电磁热耦合场的数值模拟。同时对点式感应淬火过程中的温度场变化规律进行了分析,对在使用不同淬火介质时工件表面淬硬深度进行了合理的预测。

1 点式感应淬火物理场控制方程

1.1 电磁场理论模型

在感应淬火中,可以将涡流问题分为涡流区和非涡流区(如图 1 所示),涡流区为被加热的工件局部,而非涡流区为与加热部分相连接的空气和源电流区。在涡流区和非涡流区中,电磁场的基本定律可以由麦克斯韦方程组描述如下:

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

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

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

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

式(1)~(4)中, $\mathbf{J}$ 为场电流密度, A/m²; $\mathbf{E}$ 为电场强度矢量, V/m; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度矢量, T; $\mathbf{D}$ 为位移电流矢量, C/m²; ρ_e 为电荷体密度, C/m³; $\mathbf{H}$ 为磁场强度矢量, A/m; t 为时间, s。

由于在感应加热过程中产生的电磁场频率

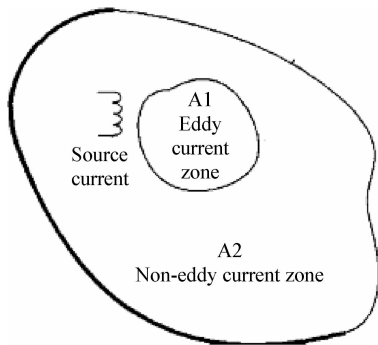


图 1 涡流区示意图

Fig. 1 Eddy current zone schematic

较低,场源随时间的变化足够慢,因而可以看作是似稳电磁场。在似稳电磁场中,位移电流很小,因此可以忽略电场变化引起的磁场变化^[7]。由此可以得出涡流区的简化麦克斯韦方程组:

$$\text{curl} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (5)$$

$$\text{curl} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\text{div} \mathbf{B} = 0 \quad (7)$$

非涡流区的简化麦克斯韦方程组:

$$\text{curl} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (8)$$

$$\text{div} \mathbf{B} = 0 \quad (9)$$

电磁场本构方程:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (10)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (11)$$

式(10)~(11)中, μ 为介质的磁导率, σ 为介质的电导率,由于直接求解式(10)~(11)两个麦克斯韦方程组极为困难,因而引入矢量磁势 $\mathbf{A}$ 和标量电势 ϕ ,两参数的定义如下:

$$\mathbf{B} = \text{curl} \mathbf{A} \quad (12)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (13)$$

将公式(12)~(13)代入公式(5)~(9),根据矢量场的唯一性定理,磁矢势 $\mathbf{A}$ 的旋度虽然已经确定,但其散度尚未规定,因此文中采用经典电磁场中的库伦规范对 $\mathbf{A}$ 的散度进行规定:

$$\text{div} \mathbf{A} = 0 \quad (14)$$

$$\text{div}(\nabla \phi) = 0 \quad (15)$$

可以得到在涡流区的场方程如下:

$$\frac{1}{\mu} \text{curl}[\text{curl} \mathbf{A}] = \mathbf{J} - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (16)$$

1.2 温度场理论模型

在感应加热及淬火过程中,工件局部在加热和冷却过程中温度变化剧烈,沿厚度方向有很大的温度梯度,应采用三维非线性微分方程来描述变化的温度场,工件的热分析模型可采用瞬态热分析的模型,使用傅里叶方程描述温度场的变化规律如下公式所示:

$$\text{div}(k \nabla \boldsymbol{T}) + Q = \rho C_p \left(\frac{\partial \boldsymbol{T}}{\partial t} \right) \tag{17}$$

式(17)中, k 为各向同性材料的热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; $\boldsymbol{T}(x, y, z)$ 为温度矢量, Q 为内热源强度, W/m^3 ; ρ 为材料密度, kg/m^3 ; C_p 为材料比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; t 为时间, s 。

温度场边界条件应根据加热及淬火时的条件而定,温度场的变化包括热对流,热辐射以及模具表层向心部的热传导。由于感应淬火整个过程进行的时间非常短,通常只有几秒左右,淬

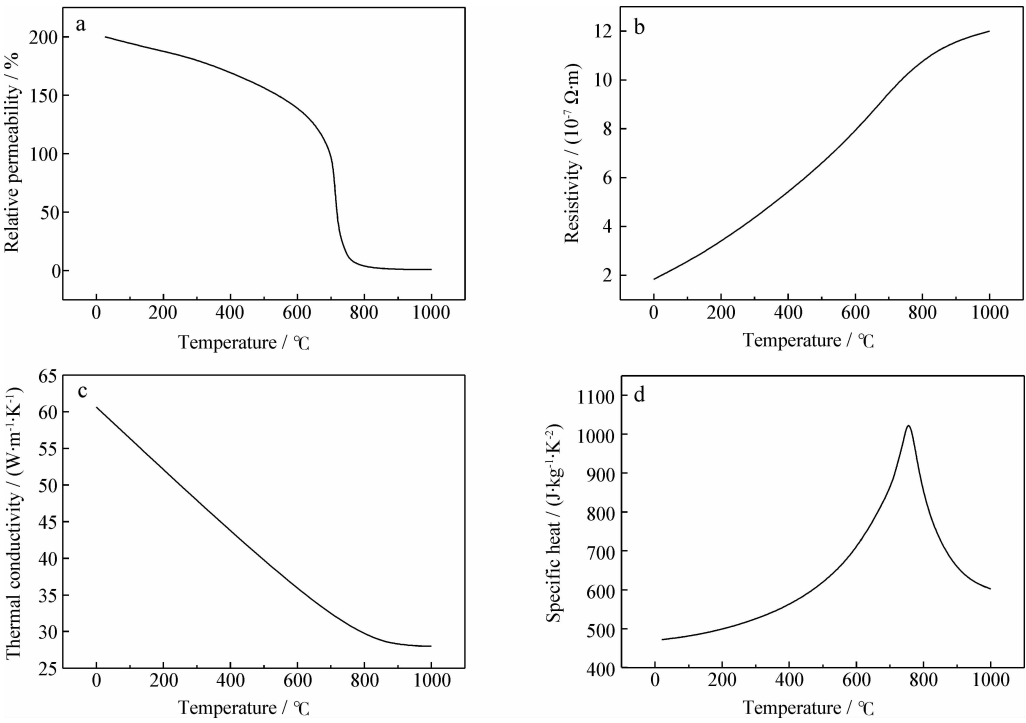
火时,热辐射的热损耗与对流的热损耗效果相比可以忽略不计,为简化模型,可以不考虑淬火过程中热辐射因素对温度场的影响,故温度场的边界条件为^[10]:

$$-k \nabla T = h(T_S - T_{CM}) \tag{18}$$

公式(18)中, h 为对流换热的表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_S 为工件表面温度; T_{CM} 为工件表面介质的温度。

2 点式感应淬火有限元建模

在文中点式感应淬火的数值模拟中,选用 45 钢,尺寸为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,线圈的材料选择为纯铜,截面尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,U 型线圈长为 30 mm ,高 100 mm 。在感应淬火过程中,材料的性能参数都是随着温度呈非线性变化的,45 钢的磁导率、电阻率、热导率随温度变化的规律如图 2 所示^[11]。



(a) Relative permeability (b) Resistivity (c) Thermal conductivity (d) Specific heat

图 2 各性能参数随温度变化曲线

Fig. 2 Temperature dependencies of the parameters

在三维造型软件 UG 建立空气、线圈和工件的几何模型,将其导入到 ANSYS 中,由于感应加热的趋肤效应,在工件表面聚集大量的涡流,因此需要特别对表面的网格进行细分,以得到精确的表层温度分布。为对工件表面的网格进行细化,网

格划分在工件厚度方向上采用 1 : 10 的比例,划分完成后,表层单元的最小厚度可达 0.5 mm。网格划分及模型全图如图 3 所示。在感应加热时,将线圈与感应加热电源连接,高频电流从线圈 A 端通入 U 型线圈,从 B 端流出,实现对工件

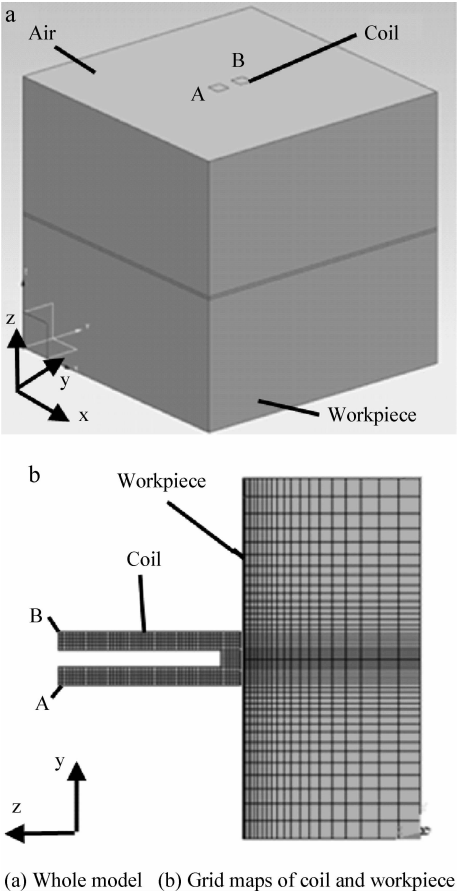


图 3 模型和线圈与工作件网格图

Fig. 3 Whole model and grid maps of coil and workpiece

表面的感应加热。

在通用有限元软件 ANSYS 中选用 solid 236 单元进行电磁场分析,选用 solid 90 单元进行温度场分析。在有限元仿真中采用间接耦合的方法,将电磁场分析中得到的涡流生热率作为温度场瞬态分析的载荷,并将温度场分析中得到的节点温度作为载荷,改变电磁计算中材料的特性参数,再进行电磁求解。耦合计算的流程如图 4 所示。

3 点式感应淬火有限元数值模拟

3.1 加热过程数值模拟

感应加热过程中,设置模拟时的加热参数如表 1 所示:

表 1 加热时的工艺参数

Table 1 Process parameters of induction heating			
Power/kW	Current/A	Voltage/V	Frequency/kHz
36	150	240	50

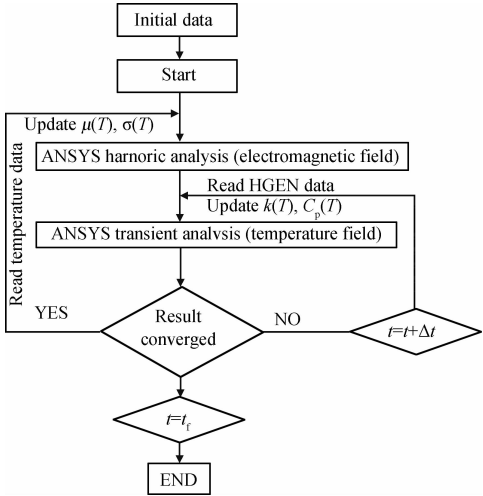


图 4 耦合分析流程图

Fig. 4 Flow chart of coupling analysis

将以上参数在 ANSYS 中进行设置,选择 ANSYS 中的电磁场模块和温度场模块进行耦合分析,设置加热时间为 3 s,加热完成后工件表面温度分布云图如图 5 所示。从图 5 可以看出,由于温度场的分布是对称的,因此可以截取该图右上角 1/4 部分进行温度分析。加热的中心点的 (x,y)坐标为 (0.1,0.1),在加热 1 s、2 s、3 s 时,工件表面各点温度分布分别如图 6、7、8 所示。

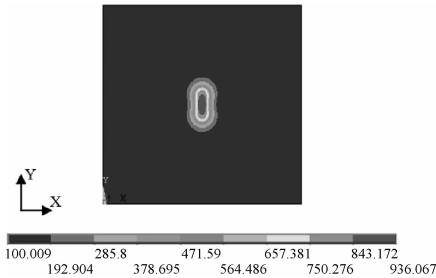


图 5 加热 3 s 后温度云图

Fig. 5 Temperature cloud map after 3 s heating

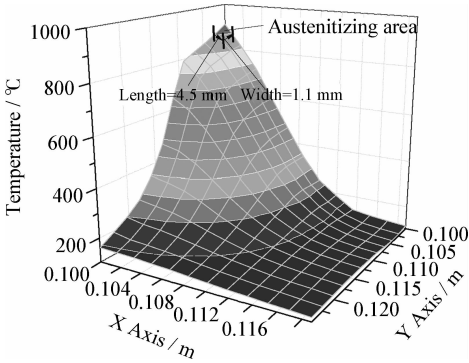


图 6 加热 1 s 后温度分布

Fig. 6 Distribution of surface temperature after 1 s heating

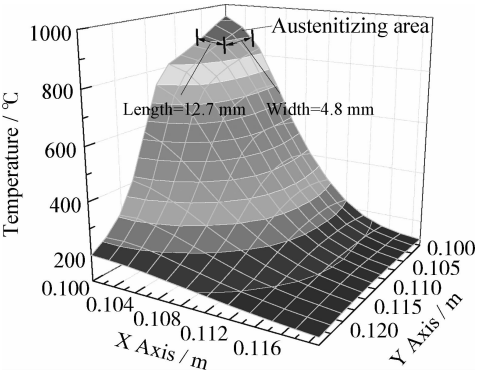


图 7 加热 2 s 后温度分布

Fig. 7 Distribution of surface temperature after 2 s heating

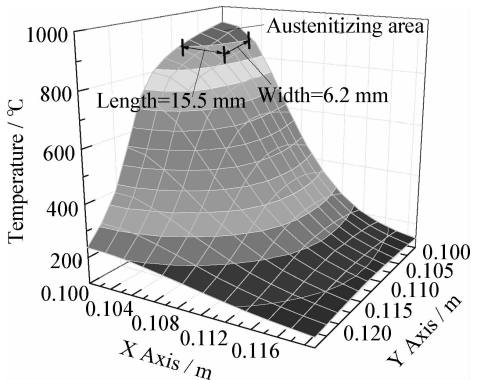


图 8 加热 3 s 后温度分布

Fig. 8 Distribution of surface temperature after 3s heating

从图 6~8 可以看出,在点式感应加热时,升温最快的位置在线圈中间正下方处,温度分布由中间向 X 轴和 Y 轴方向呈递减,在 $t=1\text{ s}$ 时温度梯度最大,而后随着钢件热传导的进行,温度梯度有所减小。由于线圈在 Y 轴、X 轴方向上长度分别为 30 mm、10 mm,导致工件最终温度分布在两个轴向上不均匀,呈现以 Y 轴为长轴的椭圆形分布。

在加热中,中心点的最高温度在加热 2 s 左右达到最高,随后下降。这是因为当温度升高到居里温度时,材料发生二级相变,由铁磁体变为顺磁体,线圈的加热效率大幅降低,而表面温度由于工件内部的热传导而降低。

分析加热 2 s 和 3 s 时工件表面达到奥氏体化温度的区域(见图 6、7、8 中上端部分)可知,2 s 时工件的最高温度为 951 °C,3 s 时最高温度为 931 °C,说明在表层温度达到居里点后,表层会失去磁性,近表层则会因为电磁感应生热而继续被加热,热传导取代感应加热成为影响表面温度变化的

主要因素。通过计算在表面达到奥氏体化温度的区域,工件表面在加热 1 s 时,该区域 Y 轴、X 轴向最大距离分别为 4.5 mm、1.1 mm;加热 2 s 时,分别为 12.7 mm、4.8 mm;加热 3 s 时,分别为 15.5 mm、6.2 mm。相对于 1 s 到 2 s 时间内热影响区扩大的程度,在感应加热 2 s 后继续加热对扩大热影响区效果较小。

工件中心点 Z 轴方向的温度分布如图 9 所示。在厚度方向上,离表面越远,温度升高速度越慢。在 0.5 s 左右,表面中心温度达到居里点,温度曲线的斜率明显下降,近表面的中心点在居里点温度附近的斜率变化远没有表面剧烈,离表面更远的位置温度趋于上升。在 1.5 s 左右,由于加热效率的降低,表面附近的温度呈下降趋势,但由于热传导影响,心部温度会继续上升。

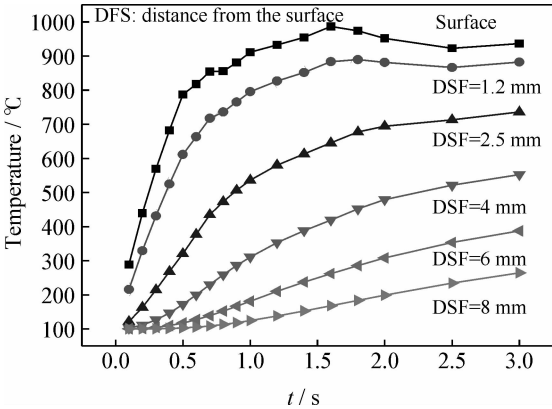


图 9 中心点 Z 轴方向温度分布

Fig. 9 Distribution of center point temperature along Z-axis

综合以上分析,在保证工件表面温度能够达到奥氏体化温度的情况下,综合考虑节约能源、提高效率等因素,选择 2 s 为此工件点式感应淬火加热时间。

3.2 冷却过程数值模拟

在淬火过程中,要实现表面的强化,提高表面硬度和耐磨性,需要在表面处得到高硬度的马氏体组织,文中的模拟采用冷却水和淬火油这两种不同的冷却介质,根据相关文献^[12],在模拟中,选取冷却水和淬火油的对流换热系数分别为 7 000 W/(m² · K)和 1 500 W/(m² · K)。45 钢的连续冷却转变曲线及中心点在文中模拟的油冷和水冷条件下的冷却曲线(图 10),其中,水淬(water-cooled)及油淬(oil-cooled)时温度变化如图 10 所示。

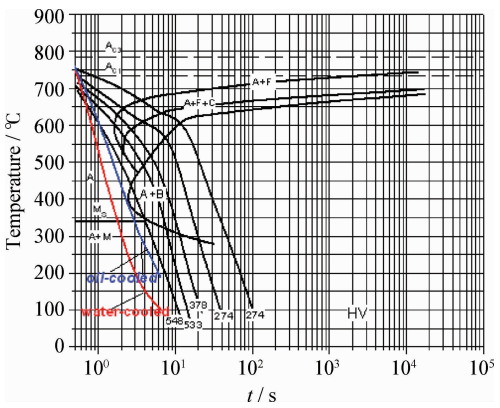


图 10 45 钢的连续冷却转变曲线^[1]

Fig. 10 Continual cooling transformation curve of 1045 steel^[1]

从图 10 中可以看出,在中心点处,水冷和油冷后的组织均为马氏体,未发生其他组织相的转变。水冷和油冷时工件表面温度在 $t=1\text{ s}$ 和 $t=4\text{ s}$ 时的分布如图 11、12 所示,可以看出,水冷时工件表面的温度变化较油冷时要剧烈很多,相邻节点间的温度梯度也非常大。

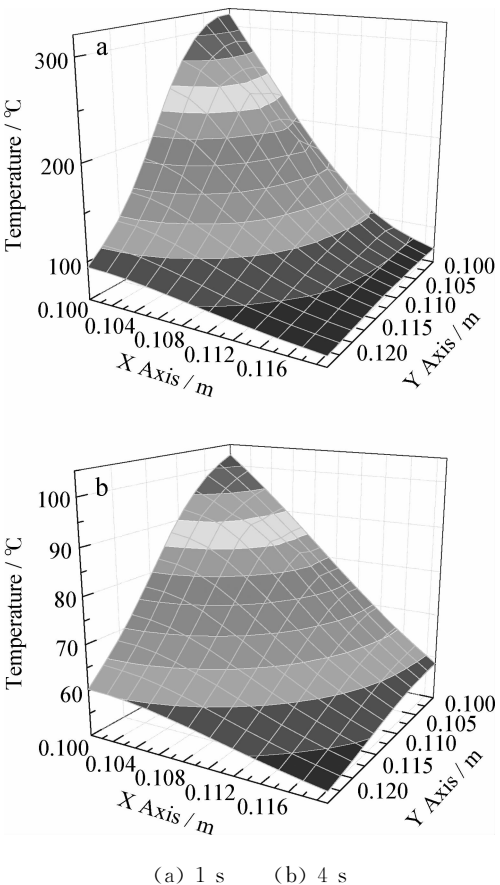


图 11 水冷时表面温度变化

Fig. 11 Distribution of surface temperature after cooling with water

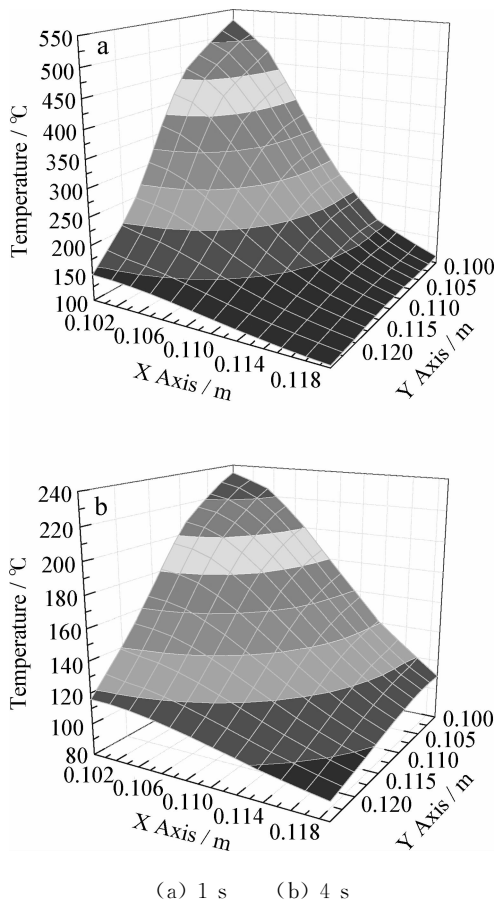


图 12 油冷时表面温度变化

Fig. 12 Distribution of temperature after cooling with oil

在厚度方向上,选取中心处距离表面 2 mm 内的节点进行分析,在水淬与油淬情况下,这些节点处的温度变化如图 13、14 所示:

由图 13、14 可以看出,在距离表面 2 mm 内的范围内,无论是水淬还是油淬,各个节点的冷却速度相差很小。在水淬条件下,表面温度冷却最快,其中前 3 s 的冷却速度非常剧烈,平均冷却速度为 270 K/s,3 s 后冷却速度相对平缓。在油淬条件下,前 3 s 表面的平均冷却速度为 240 K/s,3 s 后温度变化趋于平缓。查阅文献可知,45 钢马氏体转变的临界温度为 230 K/s^[13],可知表面在水淬和油淬条件下均可实现马氏体转化。另外,节点距表面越远,其冷却速度依次变缓,在水淬条件下,各曲线的接近程度较油淬时更为明显。根据模拟得到的各个节点在淬火前的初始温度,并结合图 9 的温度曲线,得到在感应加热过程中,达到完全奥氏体化温度的节点深度在 1.0 mm 处,距工件表面距离大于 1.0 mm 的组织无法进行奥氏体转化,结合冷却曲线分析,可知在淬火的淬

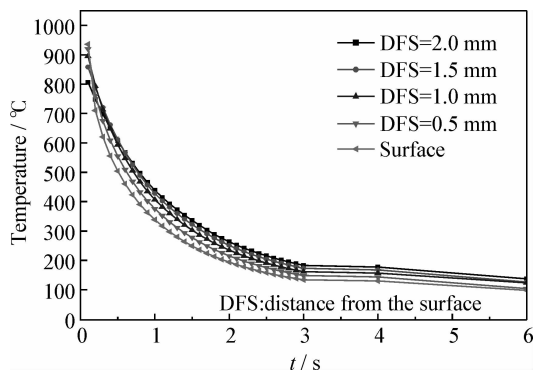


图 13 水冷时厚度方向节点温度变化

Fig. 13 Time evaluation of temperature of point along Z-axis when cooling with water

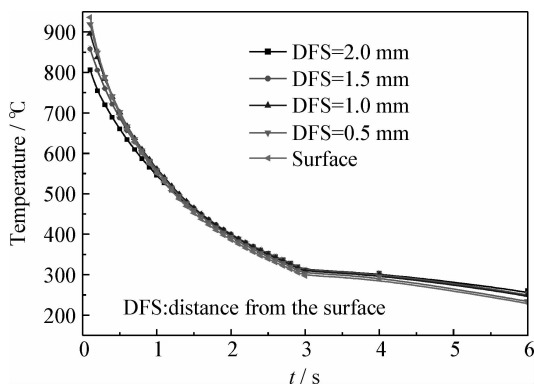


图 14 油冷时厚度方向节点温度变化

Fig. 14 Time evaluation of temperature of point along Z-axis when cooling with oil

硬深度在 1.0 mm。

综上可得,在加热温度到达完全奥氏体化,能够进行马氏体转变的区域内,因其范围较小,使用水淬或者油淬时该区域内各部分冷却速度非常接近,结合 45 钢 CCT 曲线可以得出,使用两种淬火介质进行表面淬火,因其表面冷却速度均大于马氏体生成的临界冷却速度,均可以实现表面组织从奥氏体到马氏体转变,但使用冷却水淬火时温度变化较使用淬火油时要剧烈。

4 结 论

三维点式感应淬火工艺较传统感应淬火工艺而言,线圈形状更加多样,热影响区更小,加热效率非常高,适合于加工传统工艺难以加工的各种复杂曲面,但同时工件的温度变化更为剧烈,

在中心点温度到达居里点后,温度升高的速度会迅速下降,为使表层材料达到奥氏体化温度,同时考虑节能及设备使用效率,应当在加热 2 s 左右后停止加热。

结合模拟结果和 45 钢的连续冷却曲线分析表明,点式感应淬火过程中,使用淬火油及冷却水均可以使表面发生马氏体转变,达到表面强化的目的,两种淬火条件下工件的淬硬深度均为 1.0 mm。

参考文献

- [1] 薄鑫涛,郭海洋,袁风松,等. 实用热处理手册 [M]. 上海:上海科学技术出版社,2009.
- [2] 张伟. P20 模具钢表面合金化组织与性能 [J]. 中国表面工程,2012,25(3): 68-70.
- [3] 刘晓光. 感应透热温度场仿真技术的研究 [D]. 浙江工业大学,2009.
- [4] 李卫民,巩再艳,成宗胜. 基于 ANSYS 耦合场的轴类零件高频感应淬火研究 [J]. 热加工工艺,2012,41(4):163-166.
- [5] 鄢波,程先华. 汽车减振器连杆高频感应淬火工艺应用研究 [J]. 中国表面工程,2002,55(2): 43-46.
- [6] Fuhrmann J, Homberg D. Numerical simulation of induction hardening of steel [J]. International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 1999, 18(3): 482-493.
- [7] Chaboudez C, Clain S, Glardon R, et al. Numerical modeling of induction heating for axisymmetric geometries [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(1): 739-745.
- [8] Cajner F, Smoljan B, Landek D. Computer simulation of induction hardening [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004(157/158): 55-60.
- [9] Smoljan B, Cajner F, Landek D. An analysis of induction hardening of ferritic ductile iron [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2002, 11(3): 278-282.
- [10] Pavel K, Martina D. Continual induction hardening of steel bodies [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2010, 80: 1771-82.
- [11] 张月红. 感应加热温度场的数值模拟 [D]. 无锡:江南大学,2008.
- [12] 郑泽花. 钢淬火换热系数计算及温度与微观组织模拟 [D]. 大连:大连理工大学,2010,5.
- [13] 陈锐. 钢铁工件控制淬火工艺研究 [D]. 苏州:江苏大学,2006.

作者地址: 湖北武汉市珞狮路 122 号

430070

武汉理工大学汽车学院

Tel: (027) 8785 9499-858

E-mail: chenh90@gmail.com