

# 钢板连续移动感应淬火温度场 数值模拟及实验研究

陈庆安, 王艳辉, 张建宇, 马鹏辉, 李河宗

(河北工程大学 机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘 要:** **目的** 通过数值模拟, 研究电源频率、电流密度、钢板移动速度对感应淬火过程中钢板温度场的影响规律, 为实际应用中的参数选取提供参考。**方法** 利用 ANSYS APDL 语言建立钢板连续移动感应淬火过程的有限元计算模型, 对不同工艺参数下的钢板温度场进行数值模拟。以优化后的工艺参数对 20 mm 厚的 40Cr 钢板进行感应淬火实验, 利用热电偶对钢板关键点温度进行测量, 通过金相显微镜和显微硬度计对淬火后的钢板进行微观组织和硬度分析。**结果** 钢板关键点温度计算结果与测量结果的最大误差率约为 4%, 表明该模型具有较高的计算精度。不同工艺参数下钢板温度场的分析结果表明: 电源频率越高, 电流密度越大, 则加热速度越快, 且随着电源频率的升高, 高温区深度先增大后减小; 而电流密度越大, 钢板移动速度越慢, 则高温区深度越大。钢板淬火后, 其厚度方向上的微观组织基本上分为三个区: 相变硬化区、热影响过渡区和未相变区。相变硬化区组织为细小的针状马氏体, 最高硬度达 700HV, 淬硬层深度约 6 mm; 热影响过渡区中马氏体逐渐减少; 未相变区仍保持原始珠光体和铁素体组织。**结论** 模拟计算结果与实验结果基本吻合, 可用来指导实际应用中的参数选取。

**关键词:** 感应淬火; 连续移动; 温度场; 数值模拟; 性能差异化钢板

**中图分类号:** TG15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0332-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.038

## Numerical Simulation and Experiment Research on the Temperature Field of Continual Induction Hardening for a Steel Plate

CHEN Qing-an, WANG Yan-hui, ZHANG Jian-yu, MA Peng-hui, LI He-zong

(School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the effects of power frequency, current intensity and steel plate moving speed on

收稿日期: 2019-09-10; 修订日期: 2020-07-21

Received: 2019-09-10; Revised: 2020-07-21

**基金项目:** 河北省自然科学基金 (E2019402433); 河北省高等学校科学技术研究项目 (QN2018078, QN2019084); 邯郸市科技专项计划项目 (19422101008-18, 19422111008-19)

**Fund:** Natural Science Foundation of Hebei Province (E2019402433), University Science and Technology Research Project of Hebei Province (QN2018078, QN2019084), Science and Technology Special Plan Project of Handan City (19422101008-18, 19422111008-19)

**作者简介:** 陈庆安 (1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为金属材料强韧化。

**Biography:** CHEN Qing-an (1986—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: strengthening and toughening of metal materials.

**通讯作者:** 王艳辉 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为金属材料强韧化。邮箱: wangyanhui@hebeu.edu.cn

**Corresponding author:** WANG Yan-hui (1986—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: strengthening and toughening of metal materials. E-mail: wangyanhui@hebeu.edu.cn

**引文格式:** 陈庆安, 王艳辉, 张建宇, 等. 钢板连续移动感应淬火温度场数值模拟及实验研究[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 332-338.

CHEN Qing-an, WANG Yan-hui, ZHANG Jian-yu, et al. Numerical simulation and experiment research on the temperature field of continual induction hardening for a steel plate[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 332-338.

temperature field of the steel plate during induction hardening by numerical simulation, to provide a reference for the selection of parameters in practical application. The finite element calculation model of continual induction hardening process for steel plate was established by ANSYS APDL language to simulate the temperature field of steel plate under different process parameters numerically. The induction hardening experiment was carried out to 20 mm thick 40Cr steel plate with optimized process parameters. The temperature of key point on the steel plate was measured by a thermocouple. The microstructure and hardness of quenched steel plate were analyzed by metallographic microscope and microhardness tester. The maximum error rate between the calculation results and the measurement results of key point temperature was about 4%, which indicated that the model had high calculation accuracy. The analysis results of the temperature field under different process parameters showed that: the higher the power frequency and current density were, the faster the heating speed was. With the increase of power frequency, the depth of high temperature region increased at first and then decreased. As the current density increased and the moving speed of steel plate decreased, the depth of high temperature region became large. The microstructure in thickness direction of steel plate after quenching was basically divided into three regions: phase transformation hardening region, heat affected transitional region and untransformed region. The microstructure of phase transformation hardening region was fine acicular martensite with the highest hardness of 700HV, and the depth of hardened layer was about 6 mm. The martensite in heat affected transitional region decreased gradually, while untransformed region was still original pearlite and ferrite. All the simulation results coincide with experimental results well, which can be used to guide the selection of parameters in practical application.

**KEY WORDS:** induction hardening; continual; temperature field; numerical simulation; steel plate with differentiation properties

感应淬火作为一项传统技术,早在 19 世纪 30 年代就开始应用于曲轴颈的表面淬火,虽然传统的感应淬火技术在处理曲轴、齿轮、轴承等零部件上取得了良好的效果<sup>[1-4]</sup>,但在处理材料上,尤其是在处理钢板上的研究和应用还很少。国外曾做过 1 mm 厚 AISI8620 薄钢带的感应淬火实验,淬火处理后其强度达 1694 MPa,比马氏体高强钢(强度 1585 MPa)提高了 7%<sup>[5-6]</sup>。与上述工作不同的是,本文提出采用厚钢板进行感应淬火,来制备一种新型的厚向性能差异化耐磨钢板<sup>[7]</sup>,图 1 为厚钢板感应淬火实验装置示意图。如图所示,将钢板置于感应器下方,并使钢板以一定速度向前运动,感应线圈对钢板进行扫描式加热,通过调整电源频率、电源输出功率和钢板移动速度,使钢板表层及表层以下一定深度被加热到预期温度后,进行喷水冷却。淬硬层深度是感应淬火的一项重要指标,然而现有实验条件一般根据经验公式选择大致的工艺参数范围,难免会有偏差。因此本文拟通过数值模拟研究,来较为精确地制定工艺参数和预测淬硬层深度。

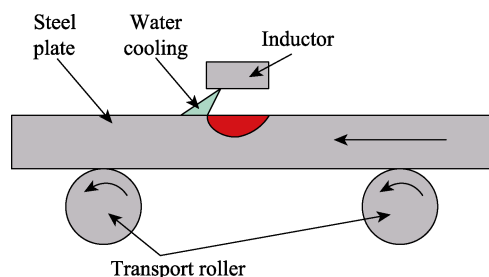


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic illustration of experimental set-up

静止感应加热过程的数值模拟已比较成熟<sup>[8-10]</sup>,而连续移动感应加热过程数值模拟研究相对较少。周宏等<sup>[11]</sup>采用三维移动拟合函数式模型,对船板感应加热弯曲成形过程进行了分析,但该模型感应加热过程没有磁热耦合计算。姜建华等<sup>[12]</sup>对厚壁筒形工件连续感应热处理过程进行了有限元模拟,截取一小段工件进行建模,忽略其轴向热传导,但当工件较长时,该方法存在较大误差。高恺等<sup>[13]</sup>对多道次点式连续移动感应淬火过程进行了数值模拟,将感应器的连续移动分解为多个子步,每个子步计算时都需要重新建模、划分网格、施加边界条件。该方法可以实现任意路径的连续移动感应淬火过程,但求解过程繁杂,计算速度较慢。Shokouhmand 等<sup>[14]</sup>对空心圆筒形工件的连续移动感应淬火过程进行了数值模拟,该模型考虑了空气对圆筒形工件内外表面的自然对流,提高了计算结果的可信度,但其结果没有经过实验验证。

鉴于此,本文在前期探索<sup>[15]</sup>的基础上,针对厚钢板感应淬火的特点建立了有限元模型,采用线圈单元网格随时间移动代替工件连续移动,利用 ANSYS APDL 语言实现感应加热和喷水冷却的动态加载,采用物理环境法对电磁场和温度场进行了耦合计算,通过计算结果与实验结果的对比,验证了所建立模型的有效性,并在此基础上分析了典型工艺参数对该过程温度场的影响规律。

## 1 ANSYS 感应淬火数值模拟

### 1.1 计算方法

感应淬火过程涉及到两个物理场,即电磁场和温

度场。交变电磁场使钢板中产生涡流,涡流所产生的焦耳热会影响温度场,而钢板磁导率、电阻率等材料参数受温度影响很大,进而影响电磁场,因此感应淬火过程中,电磁场和温度场之间相互影响、相互耦合。ANSYS 电磁-热耦合问题一般采用物理环境法进行求解,分析流程如图2所示。基本过程如下:首先创建电磁场模型和温度场模型,并分别写入两个不同的物理环境文件中;第一个时间步,先根据初始条件求解电磁场,将电磁场生成的焦耳热作为内热源加载到温度场中,然后求解温度场的变化,并根据温度场的变化,更新电磁场中的材料参数。第二个时间步,根据更新后的材料参数求解电磁场,然后按照上述过程求解温度场,并更新材料参数,如此循环计算,直至达到终止时间。

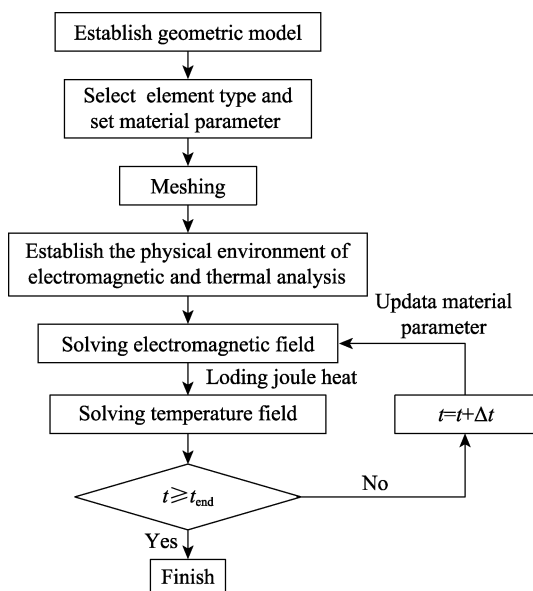


图2 电磁-热耦合计算流程

Fig.2 Electromagnetic-thermal coupling calculation process

## 1.2 有限元模型的建立

对钢板连续移动感应淬火过程进行二维数值模拟,几何模型由钢板、线圈和空气三部分构成,各部分的单元类型和材料参数如表1所示。在电磁分析物

表1 模型各部分的单元类型和材料参数

Tab.1 Element type and material parameters of each part of model

Geometric model	Electromagnetic field		Temperature field	
	Element type	Material parameter	Element type	Material parameter
Steel plate	PLANE 13	MURX, RSVX	PLANE 55	KXX, DENS, C
Coil	PLANE 13	MURX	NULL	—
Air	PLANE 13	MURX	NULL	—
Surface of steel plate	NULL	—	SURF 19	EMIS

理环境中,将模型外围空气边界处的磁势设置为零,并在线圈上施加电流密度作为电磁场的载荷。在热分析物理环境中,只考虑钢板的对流换热和热辐射,因此温度场模型中线圈和空气的单元类型设置为空。考虑到感应加热时存在集肤效应,在划分钢板的网格时,将靠近线圈的部位划分得细些,保证集肤深度内至少有2~4层网格,以提高计算精度;而远离线圈的部位划分得粗糙些,以节省计算时间。

## 1.3 工件运动的处理

利用ANSYS模拟连续移动感应淬火的一个关键问题在于,如何处理工件的运动。采用线圈单元网格随时间移动代替工件连续移动,利用APDL语言实现感应加热和喷水冷却的动态加载,如图3所示。建立有限元模型时,将线圈经过的路径全部赋予线圈的单元类型和材料参数,并将该路径进行网格划分。施加电流密度载荷时,仅在感应线圈等效尺寸范围内进行加载,并且加载位置随时间向前推移,同时喷水位置也随时间沿着钢板表面向前推移,直至达到结束时间。

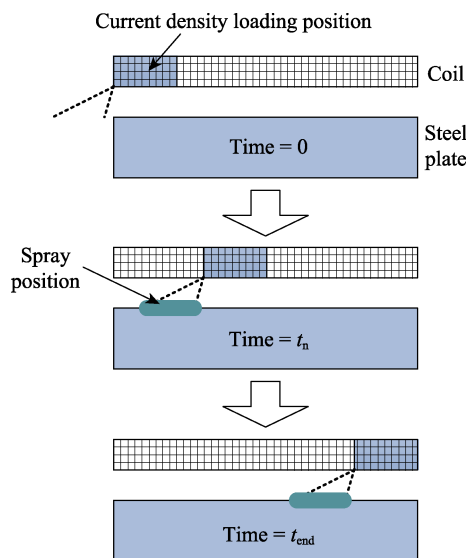


图3 连续移动感应淬火动态加载示意图

Fig.3 Schematic illustration of dynamic loading for continual induction hardening

## 1.4 模拟参数的选取

感应淬火实验选用尺寸为400 mm×200 mm×20 mm的40Cr钢板,其材料热物性参数随温度的变化如表2所示<sup>[16]</sup>。当温度超过居里点温度时,其相对磁导率为1。感应线圈采用12 mm×12 mm的铜管制成,其壁厚为1.5 mm。为节省计算时间,在二维有限元模型中取钢板尺寸100 mm×20 mm,感应线圈等效尺寸42 mm×3 mm。

在钢板感应淬火过程中,电源频率、电流强度、钢板移动速度、钢板与感应线圈间距是非常重要的参数,它们不但决定钢板的加热速度,同时决定钢板的

表 2 40Cr 钢热物性参数  
Tab.2 Thermal physical property data of 40Cr steel

Temperature/℃	Relative permeability	Resistivity/ ( $\times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ )	Thermal conductivity/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	Specific heat/ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
25	200	—	—	—
100	195	0.341	—	—
200	186.6	0.433	44.0	553
300	178.1	0.528	42.3	599
400	167.1	0.629	39.6	636
500	154.9	0.770	37.4	704
600	137.8	0.916	34.8	—
700	92.5	—	32.9	—

淬硬层深度。其中钢板与感应线圈间距对加热效率有较大影响，间距越小，加热效率越高，但间距过小容易造成钢板与感应线圈短路。综合考虑加热效率和安全性，取间距为 3 mm<sup>[17]</sup>。主要研究电源频率、电流强度、钢板移动速度对感应淬火过程中钢板温度场的影响，为此在实验设备能力范围内，将各参数设计如下：电源频率分别取 2、4、6、8、10 kHz，电流密度（由电流强度和感应线圈等效尺寸计算得出）分别取  $3 \times 10^6$ 、 $3.5 \times 10^6$ 、 $4 \times 10^6$ 、 $4.5 \times 10^6$ 、 $5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ ，钢板移动速度分别取 1、1.5、2、2.5、3 mm/s。

2 计算结果与分析

2.1 钢板感应淬火温度场结果

图 4 为钢板在不同时刻（电源频率 6 kHz，电流密度  $4 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ ，钢板移动速度 2 mm/s）的温度分布云图。由于感应加热存在集肤效应，高温区（超过 40Cr 钢 Ac<sub>3</sub> 温度的区域）集中在钢板表层一定深度内；又由于连续移动感应淬火过程中，钢板加热后立即进行喷水冷却，高温区只集中在感应器下方的一定宽度内。为了便于了解该过程中钢板温度的分布规律，后文主要分析不同工艺参数对钢板表面温度历史及高温区范围大小的影响。

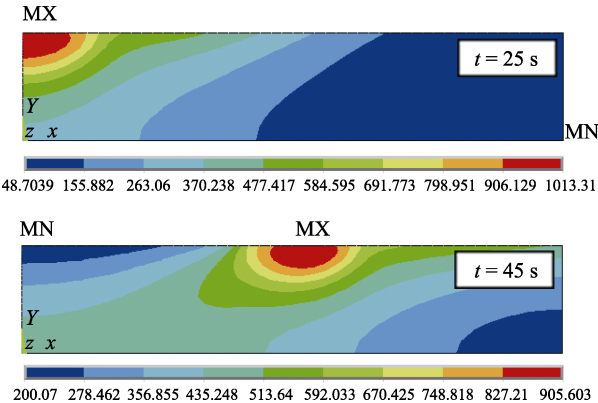


图 4 钢板在不同时刻的温度分布  
Fig.4 Temperature distribution of steel plate at different time

2.2 电源频率对温度场的影响

电流密度载荷为  $4 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ ，钢板移动速度为 2 mm/s，不同频率条件（2、4、6、8、10 kHz）下，钢板表面温度随时间的变化曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出，在电流密度和钢板移动速度不变的情况下，频率越高，加热速度越快。当频率为 2 kHz 时，钢板表面的平均加热速度约为 20 °C/s，而当频率为 10 kHz 时，平均加热速度达 38 °C/s。其主要原因是由于感应加热时，频率越高，集肤效应越明显，涡流透入深度越小，其产生的焦耳热越集中于钢板表层。另外可以看出，整个感应淬火过程中，钢板表面温度变化曲线基本上可分为四个阶段：第一阶段温升较慢，主要原因是由于常温时钢板的电阻率较小，涡流在钢板内产生的焦耳热较少；第二阶段，随着温度的升高，钢板的电阻率逐渐增大，钢板内产生的焦耳热也逐渐增多，此阶段温升速度较快；第三阶段，当钢板表层温度超过居里点温度后，其磁性迅速消失，导磁率下降，钢板表层的涡流密度减小，而次表层的涡流密度开始增大，涡流透入深度增加，此时涡流主要在钢板次表层产生焦耳热，进而向钢板表面传递热量，同时钢板表面通过辐射及对流换热，向外界散发热量，当吸收的热量与散发的热量相当时，钢板表面温度达到短暂的平衡；第四阶段进入水冷阶段，在该阶段，由于冷却水量比较充足，不同频率下钢板表面的冷却速度区别不大。

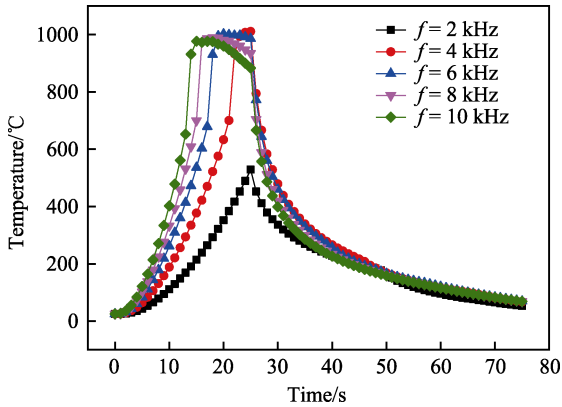


图 5 不同频率下的钢板表面温度历史  
Fig.5 Temperature history of steel plate surface at different frequency

不同频率条件下的钢板高温区范围如图 6 所示。由图 6 可以看出，在电流密度和钢板移动速度设为定值的情况下，随着频率的增加，钢板高温区宽度持续增大，而高温区深度先增大后减小。涡流透入深度对高温区范围有很大影响，当频率较低时，涡流透入深度较大，此时感应加热的电效率较低，高温区范围较小。随着频率的增加，涡流透入深度减小，电效率升高，加热速度变快，导致在相同的条件下，高温区宽度和深度都迅速增大。当频率增加到一定值后，电效



率达到最大值,此时的电效率为感应加热理论极限,该值为86.5%,即透入深度层内的电流全部转化为热能用于加热金属。继续增加频率时,涡流透入深度持续减小,而电效率基本保持不变,并且由于集肤效应增强,金属表面温度升速加快,相对热量损失增大,高温区深度又开始减小。由此可见,当电流密度和钢板移动速度一定时,电源频率存在一个最佳的范围,来获得比较理想的加热效果。

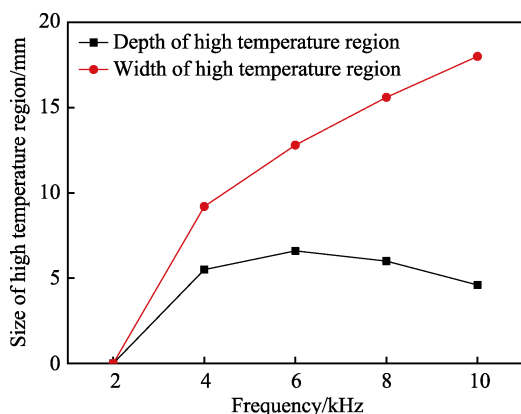


图6 不同频率下的钢板高温区范围

Fig.6 Size of high temperature region of steel plate at different frequency

## 2.3 电流密度对温度场的影响

电源频率为6 kHz,钢板移动速度为2 mm/s,不同电流密度( $3 \times 10^6$ 、 $3.5 \times 10^6$ 、 $4 \times 10^6$ 、 $4.5 \times 10^6$ 、 $5 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>)条件下,钢板表面温度随时间的变化曲线如图7所示。由图7可知,电流密度越大,加热速度越快,且钢板表面温度越高。电流密度体现的是感应加热的功率,功率越高,则加热效率越高,所以加热速度和钢板表面温度均与电流密度呈正相关关系。图8为不同电流密度条件下钢板高温区范围,当电流密度较小时,不足以将钢板表层加热至Ac<sub>3</sub>温度以上。随着电流密度的增大,高温区的深度和宽度均迅速增

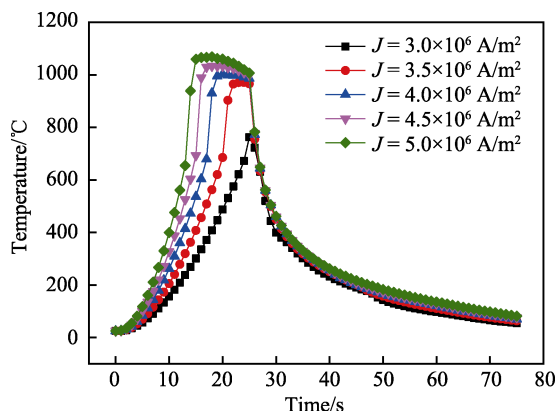


图7 不同电流密度下钢板表面温度变化情况

Fig.7 Temperature changes of steel plate surface at different current density

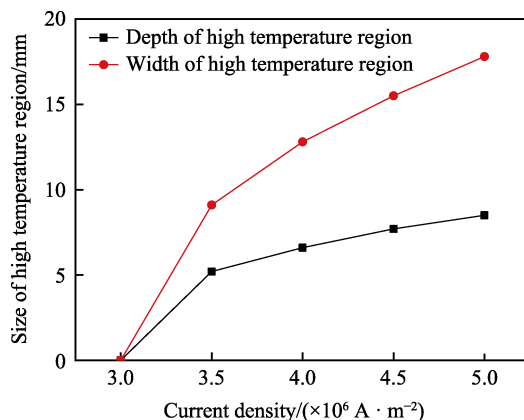


图8 不同电流密度下的高温区范围

Fig.8 Size of high temperature region of steel plate at different current density

大。当电流密度进一步增大时,高温区宽度和深度增大的速度变缓。这主要是由于钢板本身受热传导能力的限制,不能在有限的时间内将热量传递到更深处。另外,随着电流密度的增加,钢板表面温度升高,向周围环境中的热损失增大。

## 2.4 移动速度对温度场的影响

电源频率为6 kHz,电流密度载荷为 $4 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>,不同移动速度(1、1.5、2、2.5、3 mm/s)条件下,钢板表面温度随时间的变化曲线如图9所示。由图9可以看出,当钢板移动速度较小时,其对加热速度和钢板表面温度影响很小,当移动速度增加至3 mm/s时,钢板表面只被加热至640 °C,即进入水冷阶段。另外可以看出,移动速度越慢,钢板在高温区的停留时间越长,而高温停留时间对钢板的奥氏体化有较大的影响:若高温停留时间太短,碳原子没有得到充分扩散,淬火后会形成高碳和低碳马氏体两种组织,导致零件出现软点<sup>[18-19]</sup>;若高温停留时间太长,奥氏体晶粒可能会过分长大,淬火后形成粗大的马氏体组织,也会降低淬火后的硬度。图10为不同移动速度条件下的钢板高温区范围,随着移动速度的加快,高

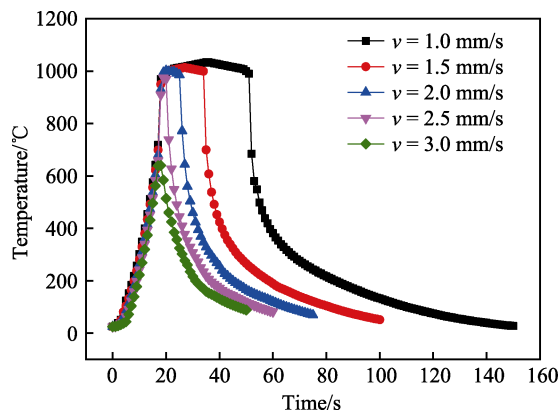


图9 不同移动速度下钢板表面温度变化情况

Fig.9 Temperature changes of steel plate surface at different moving speed

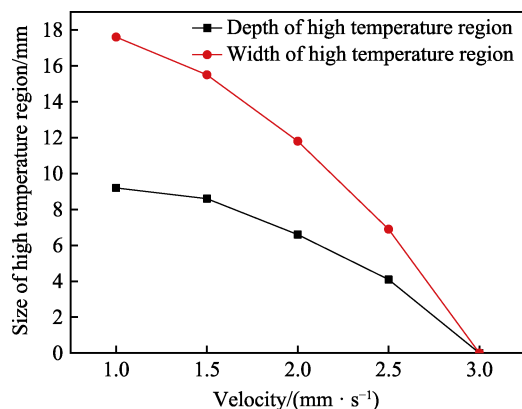


图 10 不同移动速度下的钢板高温区范围

Fig.10 Size of high temperature region of steel plate at different moving speed

温区范围逐渐减小。移动速度实际上体现的是钢板的加热时间,当移动速度较慢时,钢板有足够的时间进行热传导,进而获得更深的高温区。综上所述,在进行移动速度的选择时,不仅要考虑高温区深度的要求,还应保证钢板有合适的高温停留时间。

### 3 感应淬火实验

为了验证模拟结果的准确性,选取优化后的工艺参数进行感应淬火实验,工艺参数如下:电源频率 6 kHz,电流 500 A (电流密度约  $4 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>),钢板移动速度 2 mm/s。实验前在钢板表面下方 2 mm 处钻一个小孔,然后将热电偶插入小孔中,并将热电偶与温度记录仪相连,实验过程中记录该点的温度历史数据。同时按照上述工艺参数进行模拟计算,计算完成后,通过 ANSYS Mechanical 的 TimeHist Postpro 后处理模块,提取相应节点的温度历史数据。温度测量结果和模拟计算结果对比如图 11 所示。可以看出,模拟计算结果与实测结果的最大误差率约为 4%,两者具有较好的吻合度,表明数学模型具有较高的计算精度和可靠度。感应淬火后,利用显微硬度计对钢板断面不同深度处的硬度进行测量,并利用金相显微镜对钢板断面进行组织观察。图 12 为钢板断面硬度测量结果与温度模拟结果,钢板的高温区深度约 6.2 mm,

最终的淬硬层深度约 6 mm,两者基本一致,这表明 40Cr 钢具有良好的淬透性。

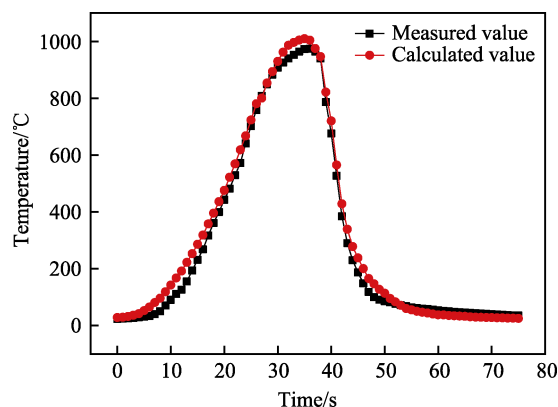


图 11 温度测量结果与计算结果对比

Fig.11 Comparison between temperature measurement results and calculation results

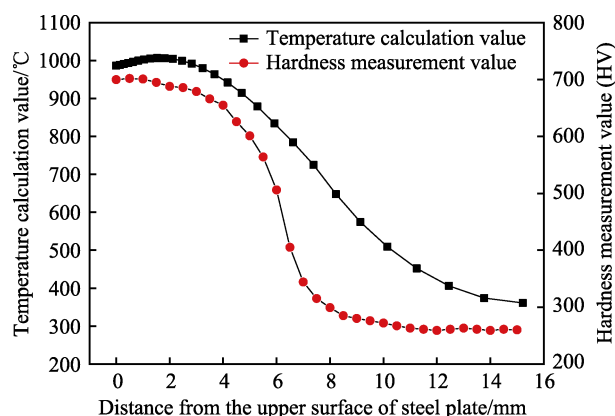


图 12 钢板厚度方向上温度计算值和硬度测量值

Fig.12 Temperature calculation value and hardness measurement value in thickness direction of steel plate

通过控制感应淬火过程中高温区的深度,可大致确定淬硬层深度。组织观察结果如图 13 所示,结果表明,钢板厚度方向上基本分为三个区:相变硬化区、热影响过渡区和未相变区。相变硬化区主要为细小的针状马氏体和少量残余奥氏体;热影响过渡区相变不充分,不能完全奥氏体化,马氏体组织逐渐减少,并开始出现珠光体和铁素体;未相变区仍保持原始的珠光体和铁素体组织。

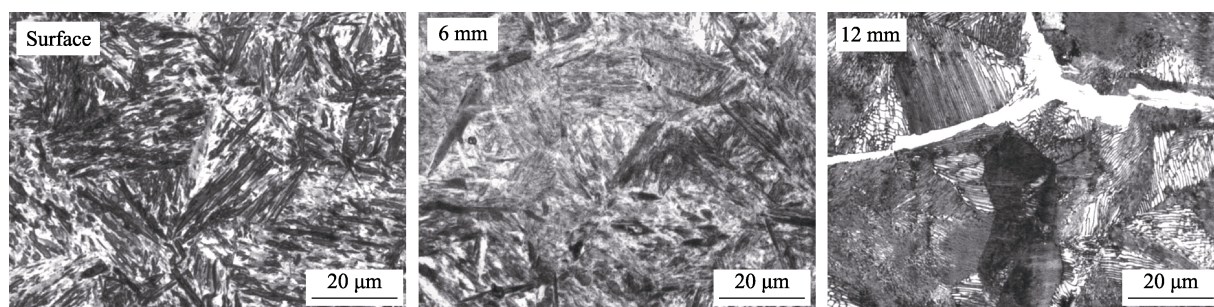


图 13 钢板断面不同深度处的微观组织

Fig.13 Microstructure at different depth of steel plate section

## 4 结论

1) 利用 ANSYS APDL 语言建立了钢板连续移动感应淬火过程的有限元计算模型, 并通过计算得到了钢板的温度场, 计算结果与实测结果有较好的吻合度, 验证了模型的有效性。

2) 电源频率由 2 kHz 增加至 10 kHz 时, 钢板表面平均加热速度由 20 °C/s 持续增加至 38 °C/s, 同时高温区宽度由 0 mm 持续增加至 18 mm; 而高温区深度先由 0 mm 增加至 6.6 mm, 然后又减小至 4.6 mm, 电源频率为 6 kHz 时, 高温区深度达最大值。因此, 电源频率存在一个可以获得最大高温区深度的最佳范围。

3) 电流密度由  $3 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup> 增加至  $5 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup> 时, 高温区宽度由 0 mm 持续增大至 17.8 mm, 高温区深度由 0 mm 持续增大至 8.5 mm。因此为获得较大的高温区深度, 在设备允许的条件下, 应尽量选择较大电流。

4) 钢板移动速度由 1 mm/s 增加至 3 mm/s 时, 高温区宽度由 17.6 mm 减小至 0 mm, 高温区深度由 9.2 mm 减小至 0 mm, 同时钢板在高温区的停留时间也逐渐缩短。高温停留时间会影响奥氏体中化学成分的均匀性及奥氏体晶粒的大小。因此在进行速度选择时, 不仅要考虑高温区深度的要求, 还应保证钢板有合适的高温停留时间。

5) 40Cr 钢板感应淬火过程中高温区深度与最终的淬硬层深度基本一致, 因此可通过调整各关键工艺参数, 来控制高温区深度, 进而达到淬硬层深度的要求。

### 参考文献:

- [1] 徐跃明, 李俏, 罗新民, 等. 热处理技术进展[J]. 金属热处理, 2015, 40(9): 1-15.  
XU Yue-ming, LI Qiao, LUO Xin-min, et al. Technology progress in heat treatment[J]. Heat treatment of metals, 2015, 40(9): 1-15.
- [2] BARGLIK Jerzy, SMAGÓR Adrian, SMALCERZ Albert. Induction hardening of gear wheels of steel 41Cr4[J]. International journal of applied electromagnetics and mechanics, 2018, 57: 3-12.
- [3] TONG D M, GU J F, GEORGE E T. Numerical investigation of asynchronous dual-frequency induction hardening of spur gear[J]. International journal of mechanical sciences, 2018, 142-143: 1-9.
- [4] 王辉, 王晓辉, 王茂川, 等. 感应淬火对曲轴扭转疲劳性能的影响[J]. 精密成形工程, 2019, 11(1): 103-107.  
WANG Hui, WANG Xiao-hui, WANG Mao-chuan, et al. Effect of induction hardening on torsion fatigue property of crankshafts[J]. Journal of netshape forming engineering, 2019, 11(1): 103-107.
- [5] Lolla T, COLA G, NARAYANAN B, et al. Development of rapid heating and cooling (flash processing) process to produce advanced high strength steel microstructures[J]. Materials science and technology, 2011, 27(5): 863-875.
- [6] BHADSHIA H K D H. Phase transformations contributing to the properties of modern steels[J]. Bulletin of the polish academy of sciences-technical sciences, 2010, 58(2): 255-265.
- [7] 陈庆安, 刘相华. 40Cr 厚向性能差异化钢板的组织与性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 204-207.  
CHEN Qing-an, LIU Xiang-hua. Microstructure and mechanical properties of 40Cr steel plate with differential properties in thickness direction[J]. Journal of Northeastern University (natural science), 2015, 36(2): 204-207.
- [8] 陈珺, 张根元, 赵正阳. 45 钢光轴连续感应淬火过程的数值模拟[J]. 金属热处理, 2016, 41(4): 193-196.  
CHEN Jun, ZHANG Gen-yuan, ZHAO Zheng-yang. Numerical simulation of continuous induction quenching process of 45 steel plain shafts[J]. Heat treatment of metals, 2016, 41(4): 193-196.
- [9] DIETMAR Hömberg, THOMAS Petzolda, ELISABETTA Rocca. Analysis and simulations of multifrequency induction hardening[J]. Nonlinear analysis: Real world applications, 2015, 22: 84-97.
- [10] SUN Jian-liang, LI Shuo, QIU Chou-wu, et al. Numerical and experimental investigation of induction heating process of heavy cylinder[J]. Applied thermal engineering, 2018, 134: 341-352.
- [11] 周宏, 李敢, 朱红娟. 船舶板材边界条件对高频感应弯板成形的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 101-104.  
ZHOU Hong, LI Gan, ZHU Hong-juan. Influence of boundary condition on high frequency inducing plate bending[J]. Transactions of the China welding institution, 2010, 31(11): 101-104.
- [12] 姜建华, 郑华毅. 厚壁筒形工件连续感应热处理有限元模拟[J]. 材料热处理学报, 2002, 23(2): 43-48.  
JIANG Jian-hua, ZHENG Hua-yi. Numerical simulation of continuous induction heat treatment of thick wall tubes by finite element method[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2002, 23(2): 43-48.
- [13] GAO Kai, WANG Zhou, QIN Xun-peng, et al. Numerical analysis of 3D spot continual induction hardening on curved surface of AISI 1045 steel[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(5): 1152-1162.
- [14] SHOKOUHMAND H, GHAFARI 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(9): 4304-4323.

- methodology[J]. *Surface technology*, 2016(1): 148-154.
- [20] SUBRAMANIAN M, SAKTHIVEL M, SUDHAKARAN R. Modeling and analysis of surface roughness of Al7075-T6 in end milling process using response surface methodology[J]. *Arabian journal for science & engineering*, 2014, 39(10): 7299-7313.
- [21] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.
- DENG Ju-long. Basic method of grey system[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987.
- [22] 李聪波, 肖溱鸽, 李丽, 等. 基于田口法和响应面法的数控铣削工艺参数能效优化方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(12): 3182-3191.
- LI Cong-bo, XIAO Qin-ge, LI Li, et al. Optimization method of NC milling parameters for energy efficiency based on Taguchi and RSM[J]. *Computer integrated manufacturing systems*, 2015, 21(12): 3182-3191.
- [23] 辛民, 王西彬, 解丽静, 等. 基于灰色理论的铣削参数优化方法研究[J]. *中国机械工程*, 2009(23): 39-42.
- XIN Min, WANG Xi-bin, XIE Li-jing, et al. Research on optimization method of milling parameters based on grey theory[J]. *China mechanical engineering*, 2009(23): 39-42.
- [24] PIEPEL G F. Quality control, robust design, and the Taguchi method[M]. Heidelberg: Springer, 1989.
- [25] 邓朝晖, 符亚辉, 万林林, 等. 面向绿色高效制造的铣削工艺参数多目标优化[J]. *中国机械工程*, 2017(19): 2365-2372.
- DENG Zhao-hui, FU Ya-hui, WANG Lin-lin, et al. Multi objective optimization of milling process parameters for green high-performance manufacturing[J]. *China mechanical engineering*, 2017(19): 2365-2372.

(上接第 338 页)

- [15] CHEN Q A, LIU X H. FEM analysis of partial flash processing for a plate[J]. *AIP conference proceedings*, 2013, 1532(1): 1085.
- [16] 樊新民, 黄洁雯. 结构钢热处理技术数据手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- FAN Xin-min, HUANG Jie-wen. Data manual of heat treatment technology for structural steel[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [17] 陈庆安, 彭文, 卢日环, 等. 厚钢板瞬时淬火淬硬层深度预测[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(14): 214-216.
- CHEN Qing-an, PENG Wen, LU Ri-huan, et al. Predicting for hardened depth of thick steel plate flash processing[J]. *Hot working technology*, 2015, 44(14): 214-216.
- [18] 刘方强, 林晨, 陶洪伟, 等. 加热时间对高频感应熔覆 Ni45B 合金涂层的影响[J]. *表面技术*, 2013, 42(1): 14-16.
- LIU Fang-qiang, LIN Chen, TAO Hong-wei, et al. The effect of heating time on the high-frequency induction clad Ni45B alloy coating[J]. *Surface technology*, 2013, 42(1): 14-16.
- [19] 高长刚, 孙维连, 孙铂, 等. 高频淬火加热时间对钢管表面组织和性能的影响[J]. *表面技术*, 2017, 46(1): 141-145.
- GAO Chang-gang, SUN Wei-lian, SUN Bo, et al. Effect of high frequency quenching heating time on surface microstructure and properties of steel tube[J]. *Surface technology*, 2017, 46(1): 141-145.

(上接第 363 页)

- [10] BICKER M, VON-HULSEN U, LAUDAHN U, et al. Optical deflection setup for stress measurements in thin films[J]. 1998, 69(2): 460-462.
- [11] KUME T, EGAWA S, MIMURA H. Development of internal stress measurement technique for Ni electroforming using Shack. Hartmann sensor[J]. *International journal of electrical machining*, 2016, 21: 25-30.
- [12] 许晓军, 陆启生, 刘泽金. 剪切干涉仪与哈特曼波前传感器的波前复原比较[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(3): 269-272.
- XU Xiao-jun, LU Qi-sheng, LIU Ze-jin. Comparison of wavefront reconstruction by lateral shear interferometer and hartman wavefront sensor[J]. *High power laser and particle beams*, 2000, 12(3): 269-272.
- [13] STONEY G G. The tension of metallic films deposited by electrolysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 1909, 553: 172-175.
- [14] HEARNE S J, FLORO J A. Mechanisms inducing compressive stress during electrodeposition of Ni[J]. *Journal of applied physics*, 2005, 97(1): 014901.
- [15] YU Y T, YUAN W Z, QIAO D Y. Effects of imperfections on bifurcation of multi-layer microstructures of MEMS under thermal loading[J]. *Key engineering materials*, 2007, 339: 276-280.
- [16] 宋磊. 微电铸层内应力与微模具型芯制作的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- SONG Lei. Study on stress in micro electrodeposited coating and fabrication of micro mould insert[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [17] 乔俊强, 虎学梅. 电沉积纳米晶镍镀层微结构的调控及其对力学性能的影响[J]. *材料保护*, 2018, 51(9): 66-72.
- QIAO Jun-qiang, HU Xue-mei. Microstructure regulation and its effect on the mechanical properties of electrodeposited nanocrystalline nickel coatings[J]. *Materials protection*, 2018, 51(9): 66-72.