

引文格式: 谢志勇, 解丽静, 高飞农, 等. 基于纳米压痕技术的齿根渗碳层力学特征表征[J]. 航空制造技术, 2023, 66(23/24): 70-78.
XIE Zhiyong, XIE Lijing, GAO Feinong, et al. Characterization on mechanical properties of carburized layer at gear root based on nano-indentation technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(23/24): 70-78.

基于纳米压痕技术的齿根渗碳层力学特征表征*

谢志勇¹, 解丽静¹, 高飞农¹, 王西彬¹, 任雁², 李宏伟²

(1. 北京理工大学机械与车辆学院先进加工技术国防重点实验室, 北京 100081;
2. 中国兵器工业集团北京北方车辆集团有限公司, 北京 100072)

[摘要] 18Cr2Ni4WA 齿轮齿根的渗碳层具有不同于基体的力学特性, 准确表征其力学特性对于研究齿轮齿根的裂纹萌生和疲劳性能至关重要。将纳米压痕技术作为渗碳层局部力学特性表征的试验手段, 针对渗碳层开展纳米压痕试验, 结合有限元仿真, 根据不同本构参数组合下的载荷-位移曲线的曲率、残余深度、塑性功与总功之比 3 项参数预测的综合误差, 确定 18Cr2Ni4WA 齿轮齿根渗碳层的本构参数。试验验证结果表明, 由纳米压痕试验得到的载荷-位移曲线能够可靠地反映渗碳层的力学行为。

关键词: 齿根; 纳米压痕试验; 材料本构参数; 载荷-位移曲线; 主应力

Characterization on Mechanical Properties of Carburized Layer at Gear Root Based on Nano-Indentation Technology

XIE Zhiyong¹, XIE Lijing¹, GAO Feinong¹, WANG Xibin¹, REN Yan², LI Hongwei²

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. NORINCO Group Beijing North Vehicle Group Corporation, Beijing 100072, China)

[ABSTRACT] The carburized layer at 18Cr2Ni4WA steel gear root has mechanical behavior different from the substrate. Its accurate characterization is important for the analysis on the crack initiation and fatigue properties of the gear root. The nano-indentation test is taken as the test measure for the characterization of the local mechanical behavior in the carburized layer. Nano-indentation tests are carried out within the carburized layer. The finite element simulations of nano-indentation tests with different sets of constitutive model parameters combination are performed. Based on the simulated and the experimental load-displacement curves, the combined prediction errors of curvature, residual depth and the ratio of plastic deformation work to total deformation work are calculated. In result, the constitutive model parameters are defined for the carburized layer. It is verified that the constitutive model derived by this method can reflect the mechanical behavior of the carburized layer.

Keywords: Gear root; Nano-indentation test; Constitutive model parameters; Load-displacement curve; Principal stress

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.23/24.070

一般材料的力学特性往往通过开展准静态力学试验、霍普金森压杆 SHPB 试验等进行检测, 为了开展这些试验, 试样需要根据具体的试验要求加工成特定的形状, 检测结果反映了试样的平均 / 宏观力学性能。对于

需要揭示微区力学特性的非均质材料和薄膜材料, 纳米压痕技术则是非常适合的局部力学特性表征试验手段, 具有分辨率高、试样制备简单^[1]等特点。纳米压痕技术是将纳米尺寸压头^[2]以适当的速率压入被测材料表面,

* 基金项目: 国家自然科学基金(51575051)。

收集加卸载过程中的载荷、位移数据,通过分析载荷-位移曲线可以得到被测材料的相关力学参数^[3]。研究人员基于纳米压痕技术开展了材料塑性本构建模的相关研究工作。Antunes等^[4]提出了一种利用数值模拟来进行压痕反演分析材料力学特性的方法,获得了多种不同材料的屈服应力、应变硬化指数;Dao等^[5]利用量纲分析方法,构造无量纲函数并结合有限元仿真,建立了由压痕数据提取弹塑性性能的反向分析算法;Kumar等^[6]用纳米压痕法对NiTi合金的小尺度变形特性和应力-应变行为进行了研究;Ruiz-moreno等^[7]采用球形压头,通过纳米压痕技术获得了P91钢在不同温度下的应力-应变曲线和力学特性参数。

18Cr2Ni4WA钢具有优良的力学性能,包括良好的强度和韧性^[8]以及较低的回火脆性等,被广泛用于制造传动系统的重要齿轮。在齿轮制造过程中,齿轮表面在经历了渗碳热处理和切削、磨削等加工工艺后,完全不同于内部基体材料,但是齿轮表面层的力学特性关系到齿轮齿根的裂纹萌生和弯曲疲劳寿命以及齿面的接触疲劳,量化齿轮表面层的力学特性对于齿轮疲劳寿命的预测至关重要。

本文首先通过18Cr2Ni4WA齿轮齿根部分的金相和元素分析确定渗碳层区域,在距离齿根表面不同深度的位置开展纳米压痕试验,研究渗碳层区域内力学特性的差异,确定渗碳层塑性本构建模的代表性压痕试验点和相应的载荷-位移曲线。根据纳米压痕试验的实际工况建立有限元模型,并对可能影响纳米压痕结果的参数进行研究。模拟18Cr2Ni4WA齿根渗碳层的纳米压痕过程,在一定范围内选取不同的本构参数值,将各参数值进行组合并应用到有限元仿真模拟,将仿真得到的载荷-位移曲线与纳米压痕试验得到的载荷-位移曲线进行对比,确定误差最小的本构参数组合,从而得到渗碳层的本构函数。

1 纳米压痕原理

在纳米压痕试验的加载过程中,随着压头压入被测材料深度的逐渐增加,被测材料先后经历了弹性变形和塑性变形阶段^[9];在卸载过程中,弹性变形逐渐恢复,载荷逐渐减小,在压头与被测材料脱离接触后,载荷减小至0,被测材料表面留下压痕,残余深度为 h_f 。纳米压痕加卸载示意图如图1所示。对于加载过程,一般采用 $P_{\text{加载}}=Ch^2$ 拟合加载曲线;对于卸载过程,可以采用式(1)拟合卸载曲线。

$$P_{\text{卸载}}=\alpha(h-h_f)^m \quad (1)$$

式中, α 为拟合系数; m 为拟合指数; h 为实时深度; h_f 为残余深度。根据试验数据可以拟合得到 α 和 m 的值。

通过对式(1)进行微分可以得到压头压入最大深度时的弹性接触刚度 S 。

$$S = \left. \frac{dP}{dh} \right|_{h=h_{\max}} = \alpha m (h_{\max} - h_f)^{m-1} \quad (2)$$

对于弹性接触,接触深度 h_c 与压头压入深度 h 满足式(3)所示关系式^[10]。

$$h_c = h - \varepsilon \frac{P_{\max}}{S} \quad (3)$$

式中, ε 为与压头形状相关的常数,玻氏压头对应的 ε 值为0.75^[9]。TB26375玻氏压头的实际接触投影面积在忽略压头磨损误差时可简化为

$$A_c = 24.5h_c^2 \quad (4)$$

压痕硬度 H 可由式(5)得出。

$$H = \frac{P_{\max}}{A_c} \quad (5)$$

利用式(6)可以求得等效弹性模量 E_r ^[11]。

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} S}{2\beta \sqrt{A_c}} \quad (6)$$

式中, β 是和压头形状相关的常数,对于玻氏压头, $\beta=1.034$ 。等效弹性模量 E_r 与被测材料弹性模量 E 、压头弹性模量 E_i 的关系为

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-v^2}{E} + \frac{1-v_i^2}{E_i} \quad (7)$$

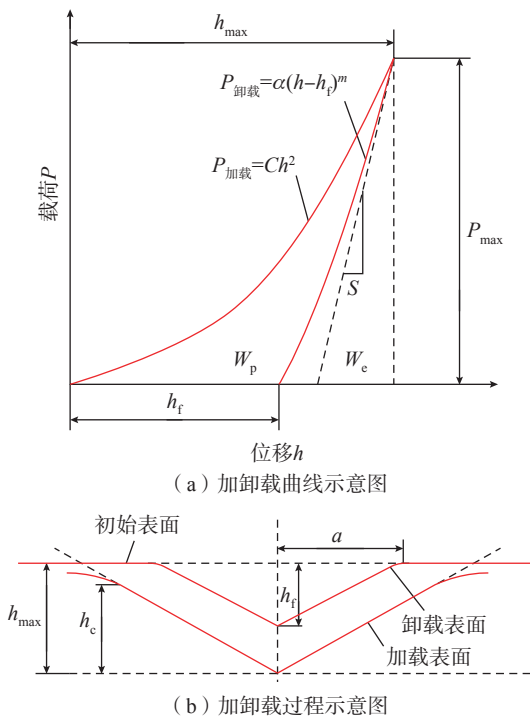


图1 纳米压痕加卸载示意图

Fig.1 Loading and unloading diagram of nano-indentation

式中, ν 、 ν_1 分别为被测材料与压头的泊松比, 对于金刚石压头, $E_1=1141$ GPa, $\nu_1=0.07$ 。在纳米压痕加-卸载过程中, 压头下压所做的总机械功为 $W_t=W_p+W_e$, 其中 W_p 为塑性变形所消耗的不可逆功, W_e 为弹性变形所消耗的可逆功。机械功的定义为 $W=\int Pdh$, 因此总功 W_t 计算为

$$W_t = \int_0^{h_{\max}} P_{\text{加载}} dh \quad (8)$$

弹性变形可逆功 W_e 计算公式为

$$W_e = \int_{h_f}^{h_{\max}} P_{\text{卸载}} dh \quad (9)$$

可以利用 $W_p=W_t-W_e$ 求得塑性变形所消耗的不可逆功 W_p , 从而可求得塑性功与总功之比 W_p/W_t 。

2 纳米压痕试验

2.1 试样制备和组织分析

在齿轮制造过程中, 齿轮先后经历了热处理、铣削、表面渗碳和磨削的制造工艺过程, 渗碳、表面渗碳和磨削的作用造成试样在化学元素、微观组织形态和力学特性上存在沿深度方向的梯度分布特征, 磨削后齿根渗碳层的厚度约为 0.7 mm。纳米压痕分析试样取自螺旋伞齿轮的齿根部位, 线切割成 8 mm × 8 mm × 9 mm 的齿根试样, 之后经砂纸打磨并研磨抛光至镜面, 如图 2 所示。对齿根部位进行扫描电镜分析, 可以确定齿根部位的组织以针状马氏体为主, 如图 3 所示。

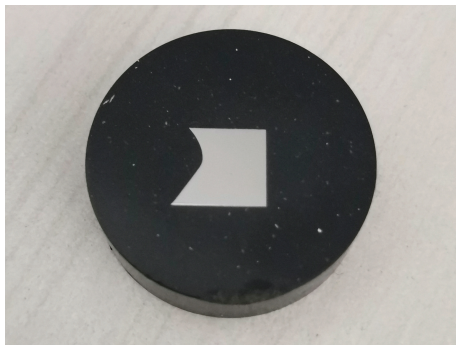


图 2 纳米压痕齿根试样图

Fig.2 Gear root sample of nano-indentation

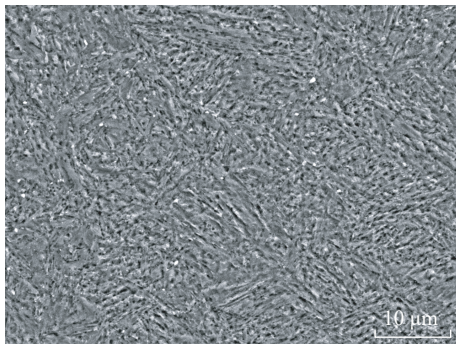


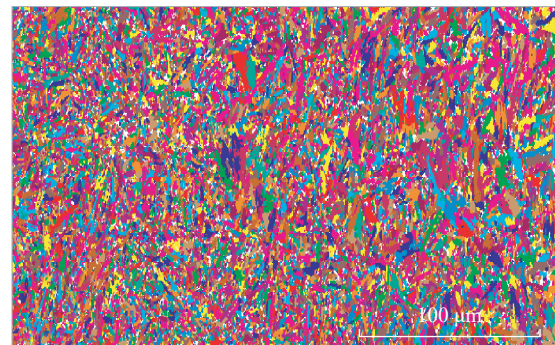
图 3 齿根组织图(2000x)

Fig.3 Microstructure of gear root (2000x)

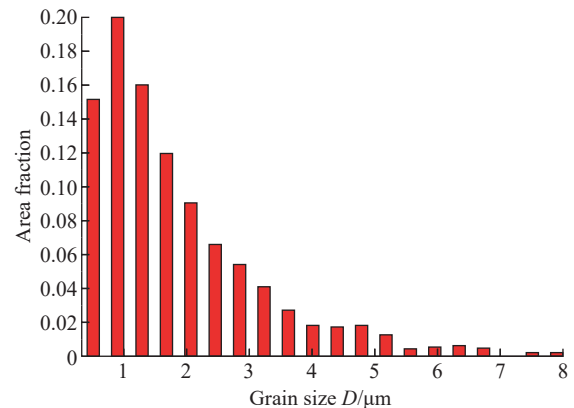
进一步的 EBSD 分析表明(图 4), 齿根在距表面 0~300 μm 的深度范围(图 4 (a)左侧为表面), 晶粒尺寸主要为 0.5~2 μm, 晶体取向分布均匀。在距表面 0~150 μm 的深度范围内的晶粒较细; 在 150~300 μm 的深度范围内可以观察到晶粒尺寸呈现出一定的梯度分布规律, 晶粒逐渐变得粗大。这可能是因为渗碳层表层碳含量高, 其第二相析出数量多, 在一定程度上有利于晶粒细化, 从而使由表层向内部的晶粒尺寸呈现一定的梯度分布规律。

2.2 试验结果分析

纳米压痕试验所用设备为 Keysight G200 型纳米压痕仪, 压头为金刚石标准玻氏压头, 轴线与侧面夹角为 65.3°, 高为 2 μm, 显微硬度为 10000 kg/mm²。由于压点不能过于接近表面, 第 1 个压点位置距齿根表面为 30 μm (图 5 (a)左侧为齿根表面), 由表及里每间隔 30 μm 设置一个压点, 均匀设置 10 个压点, 如图 5 (a) 所示, 试验中压头压入深度为大约 1000 nm。采用飞纳 XL G2 扫描电镜进行能谱分析, 检测各压点处的含碳量, 确定渗碳工艺引起的含碳量在层深上的分布情况, 以便于用于纳米压痕试验结果的分析。从图 5 (b) 可以看到, 随着深度的增加, 含碳量逐渐降低, 不过在 300 μm 深度处的含碳量仍高于原材料的含碳量(0.13%~0.19%)。



(a) 齿根晶体取向



(b) 晶粒尺寸占比

图 4 EBSD 分析

Fig.4 EBSD analysis

纳米压痕的检测结果表明, 10 个压点处的硬度与弹性模量相差不大, 只有距齿根表面 90 μm 处压点的硬度值及弹性模量值相对其他位置较小, 如图 6 (a) 所示。相应地, 在此处也检测到了含碳量的极小值, 这可能是因为渗碳热处理的试样内部存在少量的低硬度低含碳量的残余奥氏体, 试样的晶粒尺寸恰好与纳米压痕压头的尺寸相当, 距齿根表面 90 μm 处纳米压痕压点的位置恰好为残余奥氏体。同样, 从图 6 (b) 可以观察到, 距离齿根表面 90 μm 处压点的加载曲线稍低于其余压点的加载曲线, 其他各压点的载荷-位移曲线重合度较好; 距离齿根表面 180 μm 处压点的压入深度明显小于其他压点, 不过加载曲线与其他压点的重合度很好。以上分析表明, 渗碳层内各压点处材料的力学特性相差不大, 渗碳层的材料本构方程可以选取有代表性的压点压痕试验进行计算分析。本文中以距齿根表面 30 μm 处压点的试验数据为基础, 结合纳米压痕的有限元仿真, 分析计算齿根渗碳层的本构方程参数。

3 基于纳米压痕过程仿真的本构参数计算

3.1 纳米压痕仿真

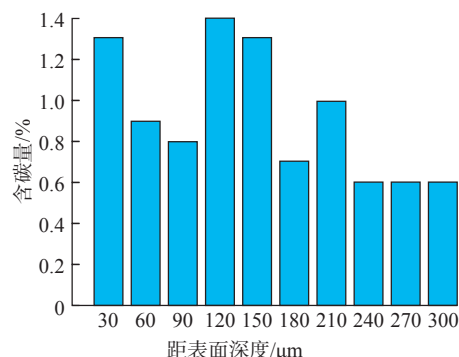
虽然通过纳米压痕试验可以获得压头压入材料过程的载荷-位移曲线, 并可以进一步计算得到材料的硬度及弹性模量, 但要获取材料的塑性本构关系却并不容易, 本文将结合有限元数值模拟来确定材料的塑性本构方程。

鉴于本纳米压痕试验采用了三棱锥形的玻氏压头, 利用 Abaqus 有限元仿真软件对纳米压痕试验过程进行三维仿真, 以提高仿真准确性。仿真中, 选取以压痕为中心的 40 μm \times 40 μm \times 24 μm 的长方体作为试样模型, 保证试样的各向尺寸超过最大压痕深度的 10 倍; 金刚石三棱锥玻氏压头的轴线与侧面夹角为 65.3°, 由于在试验过程中压头的变形量很小, 设置为刚体^[12]。试样采用 C3D8R 单元进行网格划分, 在接近压头的区域进行了网格局部细化^[13]。试样底面的所有节点约束了 6 个自由度, 压头的加-卸载过程通过控制压头参考点位移来实现, 由于纳米压痕试验中压头的加-卸载过程为准静态的, 一般材料在准静态的变形速率范围表现为应变率不敏感, 材料本构中可以不包括应变率影响项, 压头的加-卸载速率设置对仿真结果造成的影响很小, 因此后续仿真中压头的加-卸载速率为 972 nm/s。仿真计算结束后, 提取压头参考点的位移与反作用力的过程变量, 绘制载荷-位移曲线。

除了试样和压头的几何模型以及工件材料的本构模型, 纳米压痕过程仿真计算结果的有效性还需要考虑



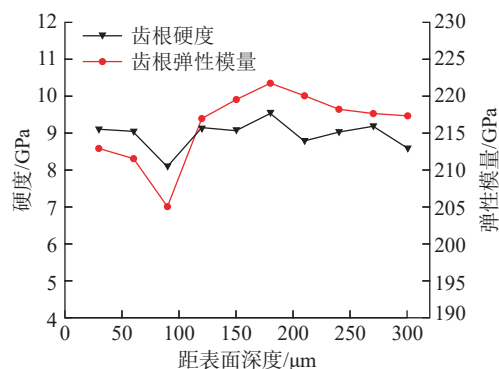
(a) 齿根压痕分布



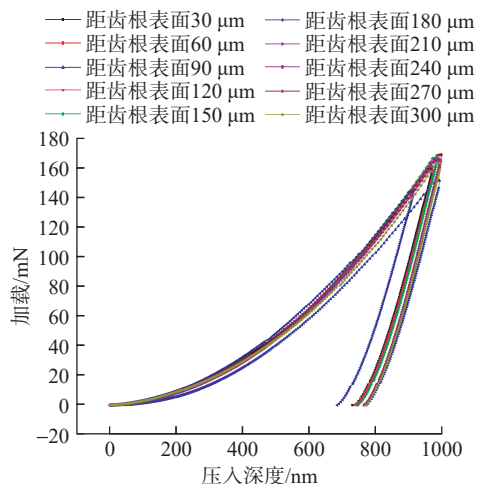
(b) 含碳量分布

图 5 齿根压痕及含碳量分布

Fig.5 Indentation and carbon content distribution of gear root



(a) 硬度与弹性模量分布



(b) 载荷-位移曲线

图 6 齿根压点数据分布

Fig.6 Distribution of gear root indentation data

以下模型参数的影响：(1)压头与试样间的摩擦系数；(2)工件材料的泊松比。

3.1.1 摩擦系数

在纳米压痕试验中,压头与被测试样之间的接触区域小,接触界面的摩擦系数不易准确确定,摩擦系数对载荷-位移曲线的影响关系到本构拟合的准确性。因此,本研究通过改变纳米压痕仿真模型中摩擦系数的大小并分析对应的仿真结果,以得到摩擦系数对纳米压痕试验的影响。由图7可见,不同摩擦系数 f 下的加-卸载曲线基本重合,卸载残余深度 h_f 基本相同;摩擦系数增加时,对应压头相同压入深度下的载荷略有变化,但由于玻氏压头锥角较大,压头与试样之间的摩擦力在加载方向上的分量很小,整体上,摩擦系数对加-卸载的影响甚微,在后续仿真中将摩擦系数设置为0.1。

3.1.2 泊松比

钢的泊松比一般为0.25~0.30,为了研究试样材料的泊松比参数对纳米压痕过程仿真的影响,选取0.25、

0.27和0.29这3种泊松比模拟纳米压痕过程,研究载荷-位移曲线、加载曲率 C 和卸载残余深度 h_f 的变化。由图8可知,泊松比增加,加载曲线曲率稍有增加,对应相同压头压入深度的载荷略有增加,但是卸载残余深度相同。整体上,泊松比对加-卸载的影响甚微,在后续仿真中,将泊松比设置为0.25。

3.2 材料本构参数计算

对于各向同性的材料,其弹塑性性能可以表达为幂强化模型,即

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \sigma \leq \sigma_y \\ \sigma_y \left(1 + \frac{E}{\sigma_y} \varepsilon_p\right)^n, & \sigma > \sigma_y \end{cases} \quad (10)$$

式中, E 为弹性模量,根据纳米压痕试验,这里渗碳层的弹性模量为212000 MPa; σ_y 为初始屈服强度; n 为应变硬化指数; ε_p 为塑性应变。其中,初始屈服强度 σ_y 及应变硬化指数 n 为待确定的本构参数,无法由纳米压痕试

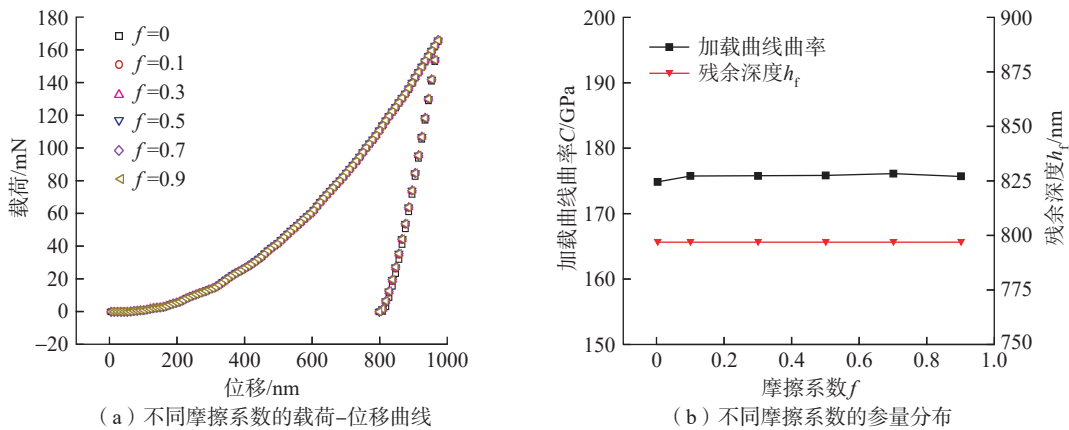


图7 不同摩擦系数的仿真结果分析

Fig.7 Analysis of simulation results of different friction coefficients

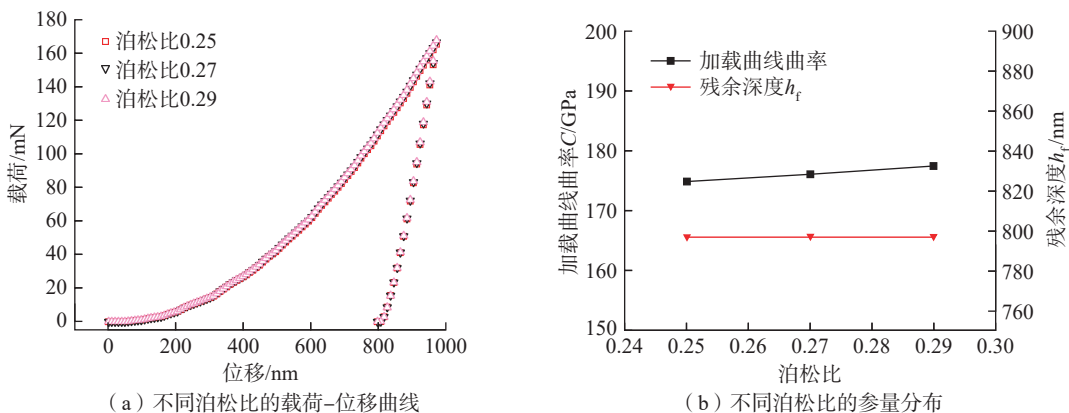


图8 不同泊松比的仿真结果分析

Fig.8 Analysis of simulation results of different Poisson ratios

验的载荷-位移曲线直接推知。不过,可以在本构参数的可能取值范围内选取不同初始屈服强度值与不同应变硬化指数值进行组合,基于不同本构参数组合的本构模型开展纳米压痕过程仿真,将仿真得到的载荷-位移曲线与纳米压痕试验曲线进行对比,确定误差最小的本构参数组合。

18Cr2Ni4WA 材料的屈服强度为 1010 MPa^[4],因此确定初始屈服强度的可能取值范围为 1000~1600 MPa,间隔 200 MPa 取值;应变硬化指数的取值范围为 0.43~0.52,间隔 0.03 取值。从而得到初始屈服强度和应变硬化指数的 16 个参数组合,对应 16 个材料本构方程。基于 16 个材料本构方程开展纳米压痕过程仿真,得到对应的载荷-位移曲线,并计算加载曲线曲率 C 、塑性功与总功之比 W_p/W_t 、残余深度 h_f 等量,与试验结果对比,确定相应的误差,如图 9 所示。可知,加载曲

线曲率 C 随初始屈服强度及应变硬化指数的增大而增大,说明初始屈服强度与应变硬化指数越大,压头压入相同的深度所需要的力越大。塑性功与总功之比 W_p/W_t 随初始屈服强度及应变硬化指数的增大而减小,说明初始屈服强度及应变硬化指数越大,塑性功占比越小,弹性功占比增大。残余深度 h_f 与 W_p/W_t 有相似的变化趋势,随初始屈服强度及应变硬化指数的增大而减小。试验所得到的载荷-位移曲线对应的加载曲线曲率为 $C=173.42$ GPa,残余深度为 $h_f=732.3$ nm,塑性功与总功之比为 $W_p/W_t=0.6831$ 。将加载曲线曲率 C 、残余深度 h_f 、塑性功与总功之比 W_p/W_t 这 3 项参量的仿真值与试验值之差的绝对值与试验值之比作为参量的误差值,将 3 项参量的误差值进行加权平均,加权系数均为 1/3,得到不同参数组合下的参量综合误差,确定在初始屈服强度 $\sigma_y=1000$ MPa,应变硬化指数 $n=0.46$ 时,综合误差

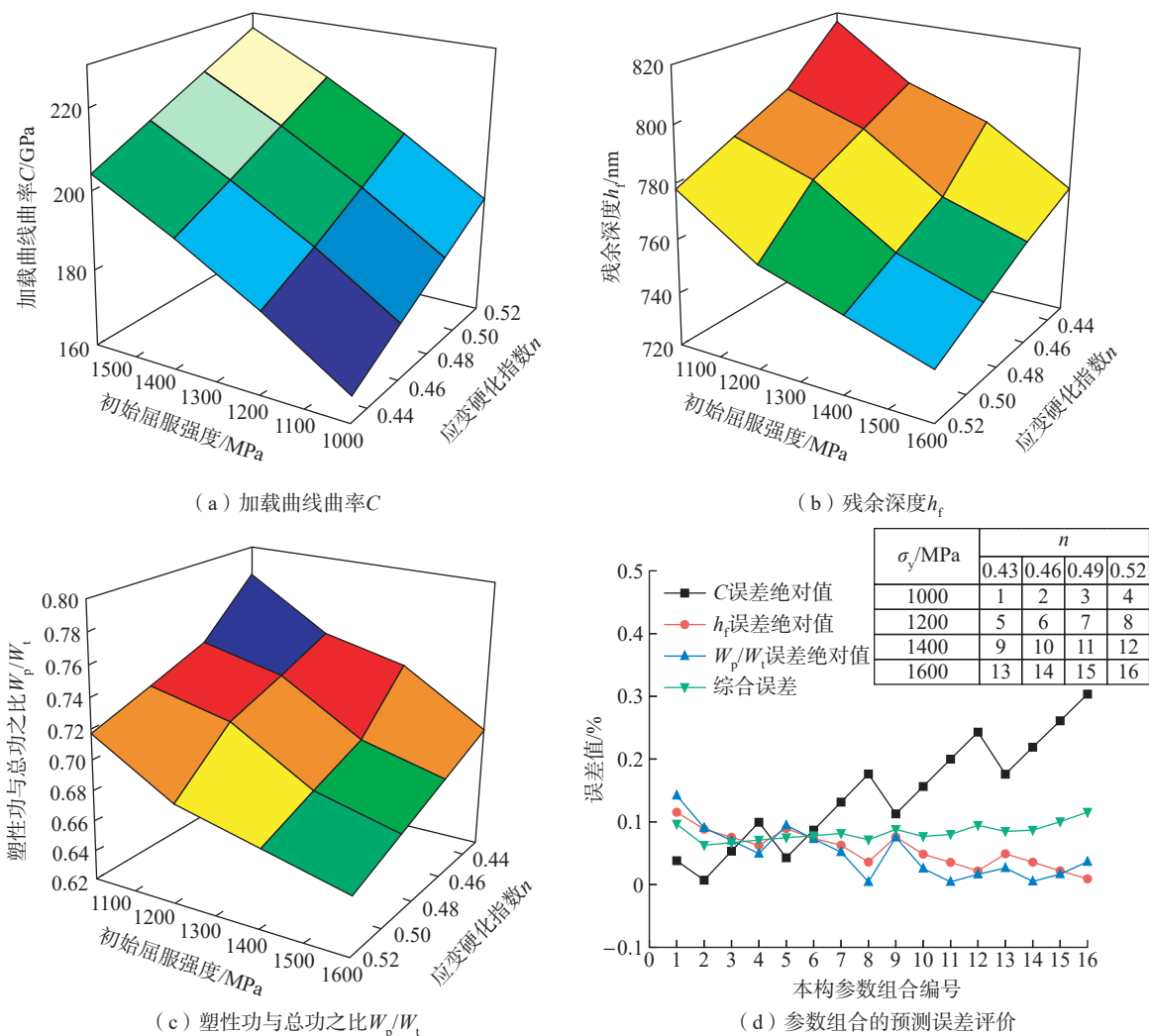


图 9 不同参数组合纳米压痕载荷-位移曲线参量及误差分布

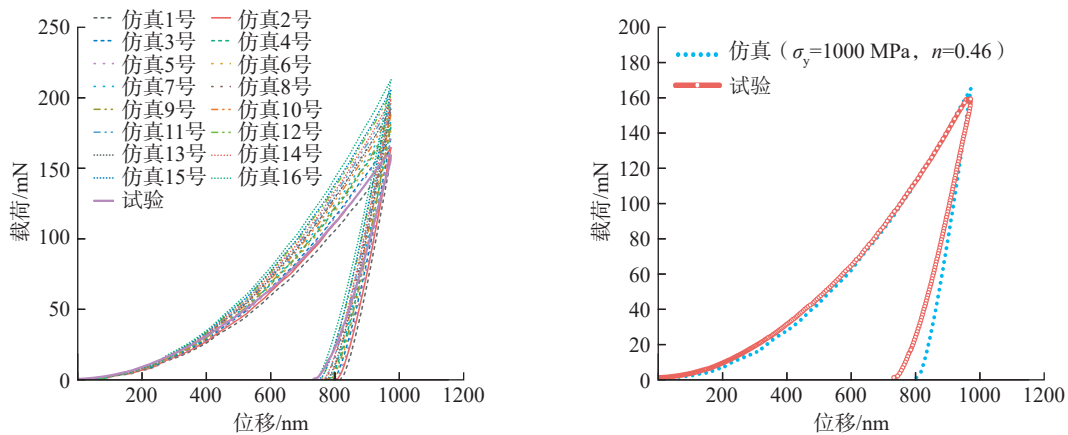
Fig.9 Parameters and errors distribution of load-displacement curves of nano-indentation with different parameter combinations

最小。图 10 (a) 为图 9 (d) 中 16 组仿真参数组合及试验对应的载荷 - 位移曲线图, 图 10 (b) 为优选仿真参数组合及试验的载荷 - 位移曲线图。从图 10 (b) 中可以看出, 优选仿真参数组合曲线与试验曲线在加载阶段重合性很好, 说明此有限元仿真模型能很好地模拟纳米压痕试验过程。

纳米压痕试验的有限元仿真可以清楚全面地展示纳米压痕过程中工件的变形和应力应变分布等情况。

图 11 (a) 和 (b) 是当压头加载至最大深度时及卸载后的 Mises 应力云图。可以看出, 压头加载至最大深度时, 压痕处的应力最大, 最大 Mises 应力为 5381 MPa。完全卸载后, 压痕区域应力值减小, 最大 Mises 应力值在压痕最深处, 为 5109 MPa。由主应力云图可知, 加载过程中, 压痕区域的主应力为压应力。

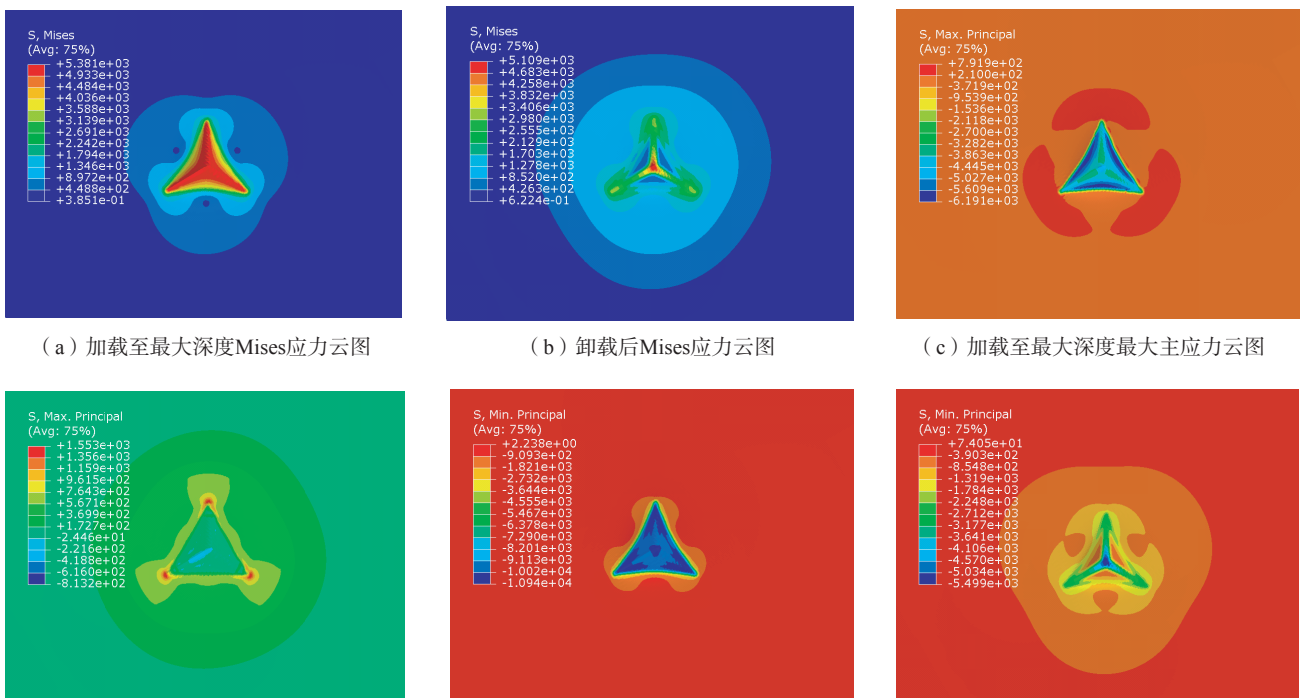
通过有限元仿真可以清楚地看到压痕在压头加载至最大深度时和卸载后的形状变化, 如图 12 所示。沿



(a) 不同参数组合的载荷-位移曲线 (b) 优选的本构参数组合仿真和试验载荷-位移曲线对比

图 10 纳米压痕仿真与试验载荷 - 位移曲线对比

Fig.10 Comparison of load-displacement curves between simulation and test of nano-indentation



(a) 加载至最大深度Mises应力云图 (b) 卸载后Mises应力云图 (c) 加载至最大深度最大主应力云图 (d) 卸载后最大主应力云图 (e) 加载至最大深度最小主应力云图 (f) 卸载后最小主应力云图

图 11 加卸载应力分布云图

Fig.11 Stress nephogram of loading and unloading

着压痕的一条棱边选取观察路径,可以看到路径上各点在压头加载至最大深度时和卸载后的位移发生了较大的变化,这两条曲线也是压头加载至最大深度时

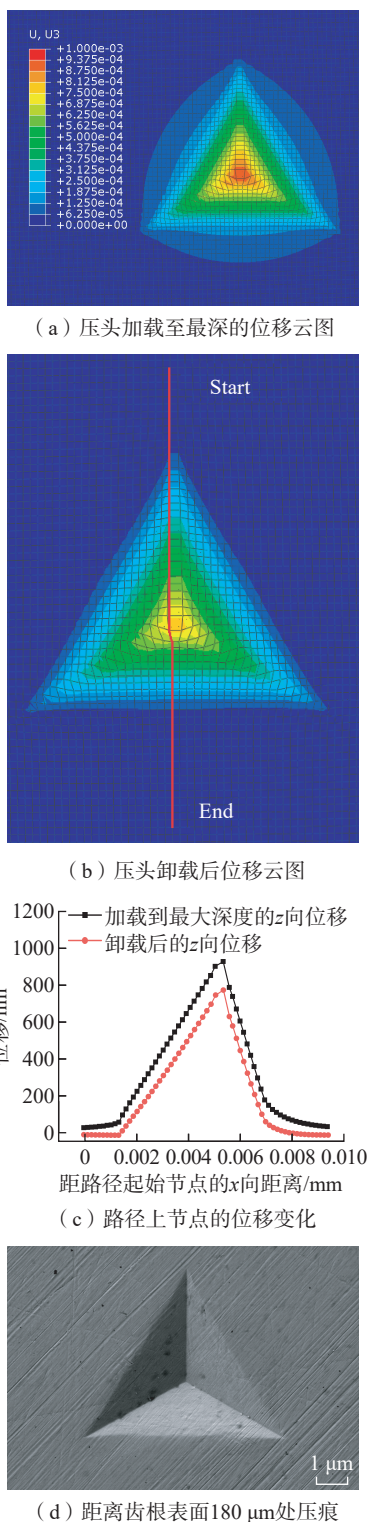


图 12 纳米压痕仿真试样位移及试验压痕

Fig.12 Sample displacement of nano-indentation simulation and test indentation

和卸载后压痕在路径所在剖面上的截形,考虑到初始屈服强度 $\sigma_y=1000$ MPa,应变硬化指数 $n=0.46$ 这组本构参数组合的 h_f 误差绝对值,压痕的实际弹性恢复量更大。虽然在纳米压痕试验中材料承受了如此高的应力,但是由于材料承受的是压应力加上尺度效应,观察图 12 (d) 中卸载后的压痕,在整个压痕区域内均未发现材料失效现象。因此,由纳米压痕试验得到的载荷-位移曲线能够可靠地反映材料的弹塑性力学行为。

4 结论

本文通过 18Cr2Ni4WA 渗碳钢齿轮齿根表面层的金相和元素分析确定了渗碳层本构研究的区域,针对渗碳层开展纳米压痕试验,将试验与有限元仿真技术相结合,确定齿根表面渗碳层的材料本构参数,得到如下结论。

(1) 在 18Cr2Ni4WA 齿轮齿根的渗碳层区域内,距离齿根表面 0~150 μm 处,晶粒较细;距离齿根表面 150~300 μm 处,晶粒逐渐变粗大,晶粒尺寸呈现一定的梯度分布特征;整体上随着深度的增加,含碳量逐渐下降。但是纳米压痕试验表明,在距离齿根表面 300 μm 的渗碳层内含碳量和晶粒尺寸在层深上的梯度分布并没有造成力学特性上的较大差异。

(2) 在 18Cr2Ni4WA 齿轮齿根渗碳层区域内布点开展纳米压痕试验,由所得的各个压点的载荷-位移曲线可知,各个压点所在位置的本构方程相差不大,以距齿根表面 30 μm 处压点的试验数据为基础计算齿根渗碳层的本构方程参数。结合有限元仿真,根据不同本构参数组合下的加载曲线曲率、卸载残余深度、塑性功与总功之比 3 项参数预测的综合误差,确定使综合误差最小的 18Cr2Ni4WA 齿轮齿根渗碳层本构参数为初始屈服强度 $\sigma_y=1000$ MPa,应变硬化指数 $n=0.46$,弹性模量为 212000 MPa,对应的泊松比为 0.25。

参考文献

- [1] 张韩斌,任成祖,张立峰,等. C/SiC 复合材料纳米压痕有限元仿真[J]. 材料科学与工程学报, 2016, (1): 49-53.
ZHANG Hanbin, REN Chengzu, ZHANG Lifeng, et al. Finite element simulation of nanoindentation of C/SiC composites[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2016, (1): 49-53.
- [2] 董齐,黎宇航,关红,等. 基于纳米压痕和有限元模拟的激光熔覆 316L 不锈钢弹塑性性能研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(2): 128-133.
DONG Qi, LI Yuhang, GUAN Hong, et al. Nano-indentation and finite element simulation study on the elastic-plastic properties of 316L stainless steel by laser cladding[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(2): 128-133.
- [3] CHEN X, OGASAWARA N, ZHAO M, et al. On the uniqueness of measuring elastoplastic properties from indentation: the

indistinguishable mystical materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55(8): 1618–1660.

[4] ANTUNES J M, FERNANDES J V, MENEZES L F, et al. A new approach for reverse analyses in depth-sensing indentation using numerical simulation[J]. Acta Materialia, 2007, 55(1): 69–81.

[5] DAO M, CHOLLACOOPE N, VAN VLIET K J, et al. Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation[J]. Acta Materialia, 2001, 49(19): 3899–3918.

[6] KUMAR S, KUMAR I A, MARANDI L, et al. Assessment of small-scale deformation characteristics and stress-strain behavior of NiTi based shape memory alloy using nanoindentation[J]. Acta Materialia, 2020, 201: 303–315.

[7] RUIZ-MORENO A, HAHNER P, FUMAGALLI F, et al. Stress-strain curves and derived mechanical parameters of P91 steel from spherical nanoindentation at a range of temperatures[J]. Materials & Design, 2020, 194: 108950.

[8] 王宏伟. 18Cr2Ni4WA 的疲劳及磨损可靠性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.

WANG Hongwei. Research on fatigue and wear reliability of 18Cr2Ni4WA steel[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.

[9] 闫鹏. 基于纳米压痕技术的弹塑性材料本构关系反演测量方法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

YAN Peng. Research on the measurement method of constitutive relationship inversion of elastoplastic materials based on nano indentation technology[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.

[10] OLIVER W C, PHARR G M, JOHNSON R. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6): 1564–1583.

[11] 马增胜. 纳米压痕法表征金属薄膜材料的力学性能 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2011.

MA Zengsheng. Characterization of the mechanical properties of metallic films by nanoindentation method[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2011.

[12] 陈大清. 基于纳米压痕法的 SS316L/BNi-2 钎焊接头微区力学性能表征 [D]. 上海: 华东理工大学, 2016.

CHEN Daqing. Study on mechanical properties of SS316L/BNi-2 brazing joint based on the nanoindentation method[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2016.

[13] LI H, CHEN J, CHEN Q, et al. Determining the constitutive behavior of nonlinear visco-elastic-plastic PMMA thin films using nanoindentation and finite element simulation[J]. Materials & Design, 2021, 197: 109239.

[14] LI L, SUN L J E F A. Experimental and numerical investigations of crack behavior and life prediction of 18Cr2Ni4WA steel subjected to repeated impact loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 65: 11–25.

(上接第 69 页)

ZHAN Xiaohong, OU Wenmin, WEI Yanhong, et al. Application status of advanced welding technology of aircraft panels[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(22): 42–44.

[4] WANG P J, WANG X, LIN L, et al. The method and experimental research on seam tracking and dual-beam laser welding for T-type welding seam[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 687–691: 309–315.

[5] 臧伟锋, 陈安, 董登科. 机身壁板内压载荷试验研究 [J]. 航空工程进展, 2018, 9(1): 69–76.

ZANG Weifeng, CHEN An, DONG Dengke. Test research on fuselage panel subjected to internal pressure load[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(1): 69–76.

[6] 满开远. 换热器管-板角焊缝射线检测方法分析 [J]. 焊管, 2020, 43(8): 56–60.

MAN Kaiyuan. Radiographic method analysis of pipe & plate fillet weld[J]. Welded Pipe and Tube, 2020, 43(8): 56–60.

[7] YENUMULA L, ACHARYA R V, LINGADE B M, et al. Radiographic evaluation of gas tungsten arc welded joints used in nuclear applications by X- and gamma-rays[J]. NDT & E International, 2019, 102: 144–152.

[8] 王悦民, 李衍, 陈和坤. 超声相控阵检测技术与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

WANG Yuemin, LI Yan, CHEN Hekun. Ultrasonic phased array detection technology and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.

[9] 刘婧. 超声相控阵 T 型焊缝缺陷检测技术的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.

LIU Jing. Research on flaw detection technology of ultrasonic phased array for T-weld[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.

[10] HARARA W, ALTAHAN A. Attempt towards the replacement of radiography with phased array ultrasonic testing of steel plate welded joints performed on bridges and other applications[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2018, 54(5): 335–344.

[11] LUO H, CHEN Q H, LIN W. Graphic augmented defect recognition for phased array ultrasonic testing on tubular TKY joints[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(3): 1–10.

[12] 丁守宝, 刘富君. 无损检测新技术及应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 381.

DING Shoubao, LIU Fujun. New technology and application of non-destructive testing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 381.

[13] 陈振华, 谢长鸿, 郭文光, 等. 不锈钢焊缝缺陷的超声相控阵扫描图像特征分析 [J]. 失效分析与预防, 2014, 9(3): 146–150.

CHEN Zhenhua, XIE Changhong, GUO Wenguang, et al. Characteristic analysis on ultrasonic phased array image of defects in stainless steel weld[J]. Failure Analysis and Prevention, 2014, 9(3): 146–150.

[14] 孙芳. 超声相控阵技术若干关键问题的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.

SUN Fang. Research on several key issues of ultrasonic phased array technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

通讯作者: 解丽静, 副教授, 博士, 研究方向为先进加工工艺和装备、加工表面强化技术、刀具技术、动力传动系统关键制造技术等。

(责编 古京)

通讯作者: 陈振华, 教授, 博士, 主要研究方向为超声相控阵检测技术、超声导波检测技术、非线性超声检测技术、超声波无损检测技术及其系统等。

(责编 古京)