

文章编号:1671-6833(2021)04-0058-05

# 表面变质层硬度的压痕表征方法

徐广涛, 孙 博, 陈海宽, 郑雪峰

(郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:**为了解决关键构件经表层改性后产生的表面变质层硬度参数难以测量的问题,提出了一种表面变质层硬度的压痕表征方法。根据硬度与深度的关系,使用连续压痕加载表征表面变质层硬度。只要压入深度超过表面变质层深度就能提取整个表面变质层的硬度信息。通过 ANSYS 有限元仿真建立表面变质层-基体梯度模型,施加连续压痕,验证发现,表征出的硬度和真实硬度很接近。对 18CrNiMo7-6 合金钢进行渗碳热处理,并用该方法表征了热处理后的 18CrNiMo7-6 合金钢的表面变质层硬度。将测量结果与沿表面变质层侧面表征的显微硬度结果进行比较,发现 2 种方法得到的表面变质层硬度最大误差不超过 6%。该方法能用来表征材料表面变质层的真实硬度场,具有一定的工程应用价值。

**关键词:**压痕硬度;表面变质层;热处理;18CrNiMo7-6 合金钢

**中图分类号:** TH140.2

**文献标志码:** A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2021.04.017

## 0 引言

硬度是指材料抵抗因机械压入或磨损引起的局部塑性变形的能力。它既可理解为材料抵抗弹性变形、塑性变形或破坏的能力,也可表述为材料抵抗残余变形和破坏的能力。在企业工程应用中,材料强度经常由材料硬度来定量表示。而飞机起落架、高铁齿轮钢等经过表层改性后的机械性能是梯度变化的,硬度也是梯度变化的,如何用简单易行的办法将硬度梯度特性表征出来就显得尤为重要。

Brinell<sup>[1]</sup>用一个直径为  $D$  的小球进行压痕试验,被测表面由于塑性变形形成一个直径为  $d$  的小圆坑。之后 Smith 等<sup>[2]</sup>改进了 Brinell 公式,将硬度定义为  $H = P/A$ 。维氏压头及其大规模应用使硬度测试普及化,用金刚石维氏压头代替球形压头,得到维氏硬度。汪利斌等<sup>[3]</sup>采用纳米压痕法测量了氧化膜的纳米硬度和弹性模量,发现了形状记忆合金在不同氧化条件下硬度是不断变化的。何声馨等<sup>[4]</sup>通过对喷丸表面的轮廓特征进行分析,选取三维粗糙度参数  $S_q$ ,探究了其与材料硬度之间的关系,发现硬度随粗糙度参数  $S_q$  的

减小而增加。黄永昌等<sup>[5]</sup>研制出一种基于数字影像分析进行布氏硬度压痕自动测量装置,实现布氏硬度压痕的非接触测量。Ma 等<sup>[6]</sup>研究压痕尺寸和基体对薄膜硬度测定的影响,提出了一种简单的薄膜本征硬度预测模型。Zhao 等<sup>[7]</sup>通过对表面变质层试样分层的方法,对线切割后的试样进行压痕试验,得到了 18CrNiMo7-6 合金钢的表面变质层硬度分布。Fu 等<sup>[8]</sup>通过压电阻尼,设计了一种新型的指尖式压痕仪,通过接触面积和共振频率等来测硬度,有效解决了传统压痕仪无法测量齿轮根部等特殊部位硬度的问题。

国内外针对硬度的研究已经非常普遍,对表面变质层硬度的研究也多以破坏性的方法为主。工程应用中如何通过微损非破坏的方式来表征表面变质层硬度非常重要,但是这方面的研究还较少。本文提出了一种表面变质层硬度的表征方法,通过 ANSYS 软件建立表面变质层-基体塑性梯度压痕仿真模型,验证了表面变质层硬度表征方法的正确性。热处理之后的 18CrNiMo7-6 合金钢会产生表面变质层<sup>[9]</sup>,本文方法通过 MTS 压痕试验平台表征了渗碳热处理后 18CrNiMo7-6 合金钢的梯度硬度。

**收稿日期:**2020-12-04;**修订日期:**2021-02-23

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(11702252);河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2019GGJS005)

**作者简介:**徐广涛(1983—),男,河南漯河人,郑州大学副教授,博士,主要从事抗疲劳制造研究,E-mail:xgtzzu@zzu.edu.cn。

## 1 压痕硬度理论

### 1.1 均质压痕硬度理论

使用 Oliver 等<sup>[10]</sup>提出的方法来表征压痕硬度,主要利用卸载部分的载荷-深度关系计算出等效接触面积,典型的载荷-深度曲线如图 1 所示。压痕硬度计算式为

$$HV = 94.495 \frac{P_{\max}}{A}; \quad (1)$$

$$A(h_c) = 24.5h_c^2; \quad (2)$$

$$h_c = h_{\max} - 0.75 \frac{P_{\max}}{S}; \quad (3)$$

$$S = \frac{dP}{dh}. \quad (4)$$

式中:  $HV$  为维氏硬度;  $P_{\max}$  为最大加载载荷;  $A$  为接触面积;  $h_c$  为残余压入深度;  $h_{\max}$  为最大压入深度;  $S$  为卸载刚度;  $P$  为卸载载荷;  $h$  为卸载深度。

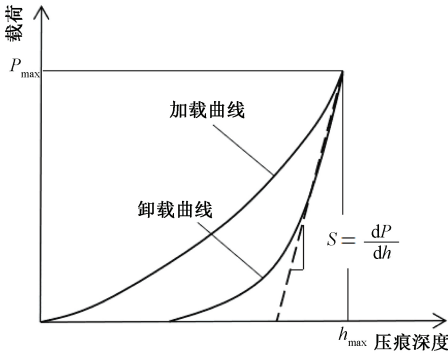


图 1 典型的载荷-深度曲线

Figure 1 Typical load-depth curve

而对于非均质材料来说,硬度沿深度方向是梯度变化的,压痕所表征的硬度是压头与材料接触部分集中贡献的结果,如图 2 所示。所以用均质理论直接计算硬度的方式已经不适用于表面变质层。

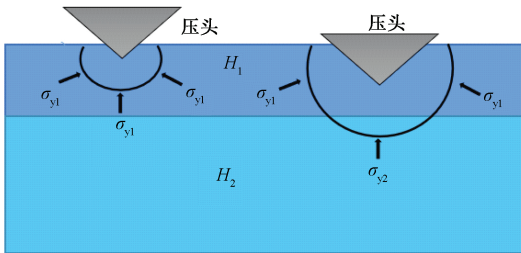


图 2 表面变质层材料压痕示意图

Figure 2 Indentation diagram model for the surface-modified layer (SML) material

### 1.2 表面变质层压痕硬度理论

假设将非均质材料分成不同的层,载荷不同

时变形不同<sup>[11]</sup>,根据变形大小将不同层的贡献分开。研究表明,压入的深度和引起的塑性变形区域是成比例的<sup>[12]</sup>。采用连续压入不同深度的压痕试验来表征材料的真实硬度也就是微米压痕尺度下得到的硬度,测试模型如图 3 所示。

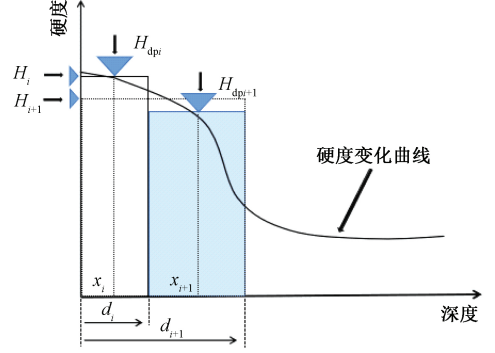


图 3 连续表面硬度测试模型

Figure 3 Continuous surface hardness test model

第 1 次压入时,压入深度较浅,此时可认为压痕的表观硬度与真实硬度相同。对于第  $i$  次下压的深度  $d_i$ ,对应表观硬度  $H_{dp_i}$ ;第  $i+1$  次压入深度为  $d_{i+1}$ ,对应的表观硬度是  $H_{dp_{i+1}}$ ,而该深度对应的真实硬度  $H_{i+1}$  是两层深度材料共同作用的结果。根据塑性功原理,该过程可以表示为

$$H_1 = H_{dp1}; \quad (5)$$

$$H_{i+1} = \frac{H_{dp_{i+1}}(d_{i+1} - d_i) + (H_i \times d_i)}{d_{i+1}}. \quad (6)$$

式中:  $H_{dp_i}$  为该深度的表观硬度;  $H_i$  为该深度的真实硬度;  $d_i$  为此时的压入深度。

## 2 有限元分析

### 2.1 压痕仿真模型的建立

如图 4 所示,在笛卡尔坐标下建立二维轴对称维氏压痕的有限元 ANSYS 模型,模型为  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的表面变质层-基体模型,表面变质层厚  $0.1 \text{ mm}$ ,基体厚  $0.9 \text{ mm}$ 。模型最上边为  $x$  轴,模型最左边为  $z$  轴,同时也是对称轴。对  $x, z$  轴施加位移约束,其他部位不进行位移约束。压头的角度为  $70.3^\circ$ ,为简化计算,压头被设定为刚体,压缩不产生变形。模型最小网格尺寸为  $2 \text{ }\mu\text{m}$ ,计算结果达到收敛性的要求。

被测材料有限元模型的本构关系采用经典的 Hollomon 幂律强化模型<sup>[13]</sup>:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \sigma \leq \sigma_y; \\ K\varepsilon^n, & \sigma > \sigma_y; \end{cases} \quad (7)$$

$$K = E\varepsilon_y^{1-n}. \quad (8)$$

式中: $E$  为弹性模量; $K$  为强化系数; $\sigma_y$  为屈服强度; $\varepsilon_y$  为屈服应变; $n$  为硬化系数。

有限元模型中,弹性模量设置为 200 GPa,泊松比设置为 0.3。为了使材料表现出塑性梯度这一材料属性,对所建立的表面变质层-基体梯度模型(见图 4)赋值,如式(9)、(10)所示<sup>[14]</sup>。屈服强度和硬化指数表示如下:

$$\sigma_y = \begin{cases} 800 + 930\cos(15.707z), & 0 \leq z < 0.1; \\ 800, & z \geq 0.1; \end{cases} \quad (9)$$

$$n = \begin{cases} 0.1 + 0.3\exp(-30z), & 0 \leq z < 0.1; \\ 0.1, & z \geq 0.1. \end{cases} \quad (10)$$

式中: $z$  为沿表面变质层向下变化的深度。

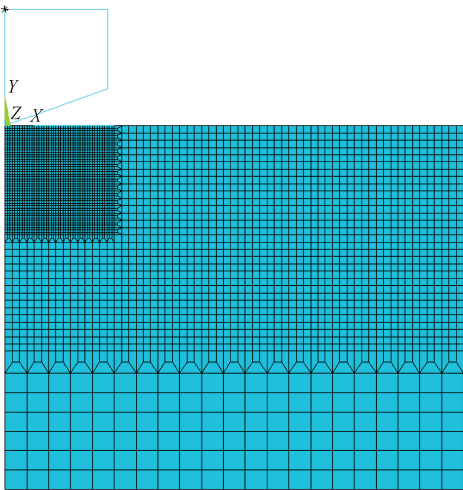


图 4 表面变质层-基体材料有限元模型  
Figure 4 SML-substrate material FEM

2.2 压痕仿真计算和结果分析

对建立的有限元模型进行压痕仿真试验,每次压入 10  $\mu\text{m}$  的深度并充分卸载,连续压入深度依次增加 10  $\mu\text{m}$ ,一共进行 13 次仿真压痕试验,得到如图 5 所示的载荷-位移曲线。

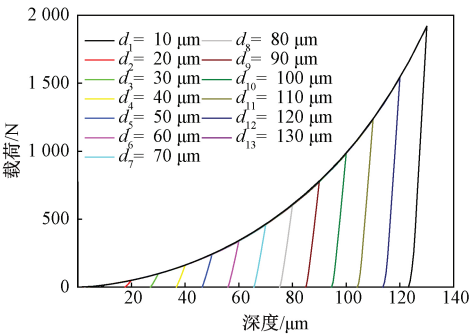


图 5 压痕有限元仿真载荷-位移曲线  
Figure 5 Load-displacement indentation curve by FEA  
根据本文提出的表面变质层硬度表征方法,

对得到的 13 条载荷-位移曲线计算得到的硬度称为计算硬度。分别取这 13 个深度对应的屈服强度和硬化指数,建立 13 个均质材料的压痕模型,然后依次对这 13 个模型进行微米压痕仿真试验,得到的硬度定义为表面变质层在该深度的真实硬度,结果如图 6 所示。

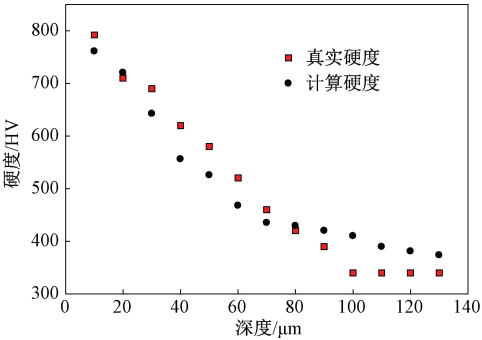


图 6 仿真硬度结果分析  
Figure 6 Analysis for the simulated hardness

经分析发现,沿表面变质层深度向下硬度逐渐减小,在压入 80  $\mu\text{m}$  前,表面变质层硬度一直略小于真实硬度,由于压入深度的增加,除了材料本身的性能以外,压入所产生的堆积等都影响压痕结果,导致后期计算硬度高于真实硬度,在压入 80  $\mu\text{m}$  后,表面变质层硬度高于真实硬度。

总体来说,本文提出的计算不同深度的表面变质层压痕硬度与表面变质层在该深度的真实硬度较为接近,此方法可以用于表面变质层材料的硬度表征。

3 试验部分

3.1 试验材料

材料试样选用热处理后的 18CrNiMo7-6 合金钢,其化学成分(质量分数)如表 1 所示。热处理工艺如表 2 所示。制备连续压痕试样,用线切割将试样加工成 20 cm $\times$ 2 cm $\times$ 2 cm 的试样(依次用 200、400、600、800、1000、2 000 号碳化硅金相砂纸打磨试样顶面和侧面,然后用抛光机进行抛光)。

表 1 18CrNiMo7-6 合金钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 18CrNiMo7-6 alloy steel							%
$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{Fe})$
0.15~0.21	0.4	0.5~0.9	$\leq 0.035$	1.5~1.8	1.4~1.7	0.25~0.35	余量

3.2 硬度试验和压痕试验

硬度试验采用美国生产的 15 kN MTS 轴向疲

劳试验机,采用自制的维氏金刚石压头搭建成大载荷压痕试验平台,如图 7 所示。

表 2 渗碳工艺表

Table 2 Carburizing process table

程序段号	时间/min	温度/℃	碳势/%
1	25	850	0.60
2	5	915	0.80
3	40	915	0.80
4	5	915	1.20
5	210	915	1.20
6	5	900	1.00
7	60	900	1.00
8	5	830	0.90
9	40	830	0.90



图 7 MTS 压痕硬度试验平台

Figure 7 MTS indentation hardness test platform

连续压痕试验选用对角线为 136° 的金刚石压头;试验平台载荷能力为±15 kN;作动器量程为±50 mm;试验频率为 0~10 Hz;采样频率为 122 kHz;加载速率为 0.000 6 mm/s。连续压痕试验中加载与部分卸载的循环次数定为 5 次,每次卸载载荷设定为当前载荷值的 50%。得到的载荷-位移曲线如图 8 所示,压痕卸载表面形貌如图 9 所示。由于渗碳热处理后的金属表面较脆,压痕容易出现裂纹,从图 9 中可见有裂纹存在。裂纹对硬度结果的影响在一定误差范围内。

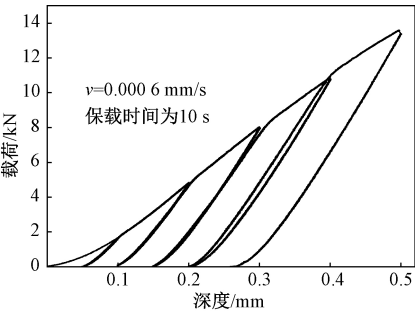


图 8 MTS 压痕载荷-位移曲线

Figure 8 MTS indentation load-displacement curve

采用 HVW-1000Z 显微硬度仪对同一块试样侧面进行硬度试验,载荷力选用 0.5 kg,保载时间



图 9 MTS 压痕残余表面形貌

Figure 9 Residual surface morphology of MTS indentation

是 10 s。从表面向下依次移动 0.1 mm 进行梯度硬度试验,从而得到不同深度的真实硬度。同一深度测试 5 个点取平均值作为该深度的硬度值。根据表面变质层硬度的计算式(6)得到表面变质层硬度值与沿材料侧面测量的真实硬度进行对比,结果如图 10 所示。

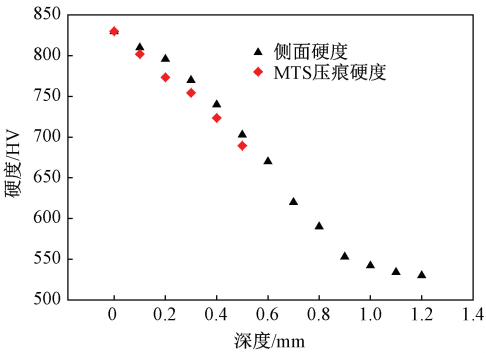


图 10 MTS 压痕硬度与侧面硬度对比

Figure 10 Comparison of MTS indentation hardness and side hardness

本次渗碳热处理工艺的渗碳层是 0.9 mm,侧面压痕硬度在深度 1 mm 附近不再发生变化。由于设备原因,正面压痕深度目前只能压到 0.5 mm,但前 0.5 mm 内的硬度与侧面真实硬度已经比较接近,两者的最大误差不超过 6%。可见该方法能更好地应用于薄膜材料和表面变质层较薄的硬度表征。

4 结论

(1)传统的压痕硬度理论方法只适用于均质材料,而且只能得到表面的硬度。本文给出了一种非破坏性的方法来表征热处理后表面变质层的硬度分布,使用该方法能更好地对表面变质层材料硬度进行表征,并通过仿真验证了方法的准确性。

(2)采用 15 kN MTS 轴向疲劳试验机搭建大



载荷压痕试验平台,对热处理后 18CrNiMo7-6 合金钢进行连续压痕试验,表征了热处理后材料的表面变质层硬度场,为以后在工程应用方面测试非均质材料硬度提供了新方法。

参考文献:

[1] BRINELL J A. Way of determining the hardness of bodies and some applications of the same[J]. Teknisk tidskrift, 1900, 5:69.

[2] SMITH R L, SANDLY G E. An accurate method of determining the hardness of metals, with particular reference to those of a high degree of hardness[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 1922, 102(1):623-641.

[3] 汪利斌,秦黎,闻寄勤,等.纳米压痕法测定 NiTi 形状记忆合金表面氧化膜纳米硬度和弹性模量[J]. 热加工工艺,2019,48(6):182-187.

[4] 何声馨,刘坤坤,王锐,等.喷丸表面的最佳粗糙度参数与材料硬度的关系[J].郑州大学学报(工学版),2019,40(1):83-86.

[5] 黄永昌,周程,陈涛,等.基于高清晰数字影像分析法的布氏硬度压痕自动测量装置研制[J].计量技术,2019(7):10-14.

[6] MA Z S,ZHOU Y C, LONG S G, et al. On the intrinsic hardness of a metallic film/substrate system; indentation size and substrate effects[J]. International journal of plasticity, 2012, 34:1-11.

[7] ZHAO M H, HAN X C, WANG G, et al. Determination of the mechanical properties of surface-modified layer

of 18CrNiMo7-6 steel alloys after carburizing heat treatment[J]. International journal of mechanical sciences, 2018, 148:84-93.

[8] FU J, LI F X. A finger-like hardness tester based on the contact electromechanical impedance of a piezoelectric bimorph cantilever [J]. Review of scientific instruments, 2015, 86(10):103902.

[9] 秦盛伟,张玉芳,张棒. 18CrNiMo7-6 钢渗碳仿真扩散系数模型的研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(2):56-60.

[10] OLIVER W C, PHARR G M. 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] LESAGE J, CHICOT D, NOSEI L, et al. Prediction of hardness-depth profile from indentations at surface of materials [J]. Surface engineering, 2009, 25(2):93-96.

[12] LAWN B R, EVANS A G, MARSHALL D B. Elastic/plastic indentation damage in ceramics: the median/radial crack system [J]. Journal of the American ceramic society, 1980, 63(9/10):574-581.

[13] HOLLomon J H. Tensile deformation[J]. Metals technology, 1945, 12:268-290.

[14] XU G T, HAO M F, QIAO Y K, et al. Characterization of elastic-plastic properties of surface-modified layers introduced by carburizing[J]. Mechanics of materials, 2020, 144:103364.

Indentation Characterization Method for Hardness of Surface-modified Layer

XU Guangtao, SUN Bo, CHEN Haikuan, ZHENG Xuefeng

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to measure the hardness parameters of the surface-modified layer(SML) of key components after surface modification, in this paper a method to characterize the hardness of the SML was proposed. According to the relationship between hardness and depth, continuous indentation loading was used to characterize the hardness of the SML. The SML-substrate model was established through ANSYS finite element simulation, and continuous indentation was applied to verify that the calculation hardness was very close to the real hardness. Carburizing heat treatment was performed on 18CrNiMo7-6 alloy steel to produce a SML on the surface, and the hardness of the SML of the heat-treated 18CrNiMo7-6 alloy steel was characterized by this method. Compared with the micro hardness results characterized along the side of the SML, it was found that the hardness error of the SML obtained by the two methods was no more than 6%. This method could be used to characterize the real hardness of the SML on the surface of the material, and had certain engineering application value.

**Key words:** indentation hardness; surface-modified layer; heat treatment; 18CrNiMo7-6 alloy steel