



基于 Berkovich 压痕的金属材料弹塑性参数 仪器化压入识别方法

陈伟¹, 马德军¹, 郭俊宏², 宋仲康¹, 王家梁¹

- (1. 装甲兵工程学院 机械工程系, 北京 100072;
2. 陆军航空兵研究所 信息情报室, 北京 101121)

摘要: 针对 Berkovich 压痕提出一个独立的仪器化压入响应参数—中边距与名义中边距之比 d/d_n , 用于衡量压痕鼓凸/沉陷程度。基于量纲分析和有限元数值仿真, 建立中边距与名义中边距之比 d/d_n 、名义硬度 H_n 、比功 W_e/W_t 与金属材料弹塑性参数之间的无量纲函数关系式, 并以此为基础建立了基于 Berkovich 压痕的金属材料弹塑性参数仪器化压入识别方法。该方法仅利用单一 Berkovich 压头仪器化压入金属材料所得载荷—位移曲线及 Berkovich 压痕即可确定金属材料的弹性模量 E 、应变硬化指数 n 、条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 及强度极限 σ_b 。4 种常用金属结构材料弹塑性参数的仪器化压入识别结果验证了该方法的有效性。

关键词: 金属材料; 仪器化压入; 压痕; 弹塑性参数

中图分类号: TH140

文献标志码: A

Method for determining elastic-plastic properties of metals by instrumented indentation with Berkovich indentation impression

CHEN Wei¹, MA De-jun¹, GUO Jun-hong², SONG Zhong-kang¹, WANG Jia-liang¹

- (1. Department of Mechanical Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;
2. Information and Intelligence Unit, Army Aviation Research Institute, Beijing 101121, China)

Abstract: The ratio of the center-to-border distance of Berkovich indentation impression to the nominal center-to-border distance was introduced as an independent instrumented indentation response parameter to describe the extent of pile-up/sink-in around Berkovich indentation impression. Based on the dimensional analysis and finite element simulations, the explicitly dimensionless relationships among three independent instrumented indentation response parameters (the other two parameters extracted from load-depth curve are nominal hardness and the ratio of elastic work to total work) and elastic-plastic properties of metals were established. Further more, a new method based on Berkovich indentation impression was proposed for determining elastic modulus E , strain hardening exponent n , conditional yield strength $\sigma_{0.2}$, ultimate strength σ_b of metals. Finally, the effectiveness of the method was verified by the determination results of four kinds of structural metal.

Key words: metal; instrumented indentation; indentation impression; elastic-plastic properties

金属材料经过机械加工后, 其表层材料的力学性能就会不同于次表层或芯部材料的力学性能, 特别是表层材料在强度强化的同时必然伴随着塑性、韧性的

劣化。然而受尺寸限制, 标准的材料力学性能测试技术及手段无法满足金属表层材料力学性能测试的需要。而用于评价材料局部力学性能的硬度试验, 只能

基金项目: 装甲兵工程学院创新基金项目(2012CJ032)

收稿日期: 2014-07-23; 修订日期: 2015-02-10

通信作者: 马德军, 教授, 博士; 电话: 010-66717048; 传真: 010-66717048; E-mail: dejunma@yahoo.com

提供金属表层材料的硬度,不能提供关于其强度、塑性及韧性的准确信息。

近年来,在硬度试验的基础上,人们发展了一种新的材料力学性能测试技术—仪器化压入技术^[1-2]。仪器化压入技术可以连续同步记录特定几何形状的金金刚石压头压入及撤离材料表面的载荷—位移关系,通过力学分析可识别材料的诸多力学性能参数^[3-8]。OLIVER 等^[1]提出了材料弹性模量的仪器化压入识别方法。而相关研究表明,该方法低估了低应变硬化水平材料的真实接触深度,造成弹性模量的高估,最大偏差可达 30%^[9]。MA 等^[10-11]提出了用于材料弹性模量仪器化压入识别的“纯能量法”。“纯能量法”在识别金属材料弹性模量时仍存在一定的理论误差,最高为 $\pm 12.5\%$ ^[12],该理论误差源于金属材料应变硬化指数预先未知。利用仪器化压入技术识别金属材料的塑形参数(应变硬化指数和屈服强度)已成为人们研究的热点问题^[13-19]。为实现这一目标,建立仪器化压入响应参数与金属材料弹塑性参数间的一一对应关系是关键。DAO 等^[20]试图利用单一锥形压头仪器化压入所得载荷—位移曲线来识别金属材料的弹塑性参数。然而,相关研究表明,锥顶角固定的锥形压头仪器化压入一组具有不同弹塑性参数组合的材料所得载荷—位移曲线几乎相同,并且根据载荷—位移曲线获得的独立的仪器化压入响应参数仅有两个。这意味着利用单一锥形压头仪器化压入所得载荷—位移曲线无法唯一的识别金属材料的弹塑性参数。基于此,人们将研究焦点转移到两个或者多个具有不同锥顶角的锥形压头上来。目前,基于两个或多个锥形压头建立的金属材料弹塑性参数仪器化压入识别方法可分为两类:间接法^[21-26]和直接法^[27-30]。间接法根据载荷—位移曲线确定的仪器化压入响应参数与特征应变和特征应力的无量纲函数关系获得与不同锥形压头相对应的(特征应变和特征应力)数据点,通过数据拟合并结合弹性模量的识别结果来确定金属材料的塑形参数。直接法则直接建立载荷—位移曲线确定的仪器化压入响应参数与金属材料弹塑性参数的无量纲函数关系,以此为基础来识别金属材料的弹塑性参数。CHEN 等^[31]通过有限元数值仿真对利用两个或多个锥形压头仪器化压入识别材料弹塑性参数的唯一性问题进行了研究。CHEN 等^[31]发现锥半角为 60°到 80°的任一圆锥压头仪器化压入一组具有不同弹塑性参数组合的神秘材料,均获得相同的载荷—位移曲线。CHEN 等^[31]同时指出,神秘材料的神秘性仅针对具有特定角度差的两个圆锥压

头来说,如果增加角度差,其神秘性将退去。

上述方法均利用仪器化压入所得载荷—位移曲线来识别金属材料的弹塑性参数。然而,仪器化压入响应除载荷—位移曲线外,还包括压入生成的压痕。相对于载荷—位移曲线,人们针对锥形压头压痕的研究较少见诸报道。TABOR^[32]在研究金属材料维氏硬度时发现,对于已经发生充足形变硬化的金属材料,压痕周围材料存在鼓凸现象;对于退火处理的金属材料,压痕周围材料存在沉陷现象。ALCALA 等^[33]在总结大量维氏硬度试验结果的基础上初步提出了压痕周围材料鼓凸/沉陷程度与材料应变硬化指数之间的函数关系式,在此基础上,ALCALA 等^[33]指出应变硬化指数约为 0.2 的金属材料的压痕既不存在鼓凸也不存在沉陷。CHENG 等^[34]通过有限元数值仿真发现,锥半角为 70.3°的圆锥压头压痕周围材料的鼓凸/沉陷程度不仅取决于材料的应变硬化指数,同时取决于屈服强度和弹性模量之比。MATSUDA^[35]则通过有限元数值仿真建立了鼓凸情况下的 Vickers 压痕几何参数及维氏硬度和弹性—线性硬化材料的弹塑性参数之间的无量纲函数关系。MA 等^[36]针对锥半角为 70.3°的圆锥压头仪器化压入 CHEN 等^[31]和 CHENG 等^[34]提出的多组具有不同弹塑性参数组合的材料的压入响应进行了有限元数值仿真。结果表明:虽然同一组内不同材料的载荷—位移曲线几乎相同,但是压痕的鼓凸/沉陷情况却存在较大差别。MA 等^[36]的研究结果表明仪器化压入压痕和载荷—位移曲线是相互独立的。综上所述可知,作为独立的仪器化压入响应,压痕同样可以提供反映材料力学性能的宝贵信息。因此,根据压痕可引入一个独立的仪器化压入响应参数,结合载荷—位移曲线提供的两个独立的仪器化压入响应参数,可与金属材料的弹性模量、屈服强度和应变硬化指数建立一一对应关系。这从原理上说明了利用单一锥形压头来唯一的识别金属材料的弹塑性参数是可行的。

本文作者选择 Berkovich 压头用于仪器化压入识别金属材料的弹塑性参数,定义 Berkovich 压痕中边距与名义中边距之比作为衡量 Berkovich 压痕鼓凸/沉陷程度的独立的仪器化压入响应参数。本文作者通过量纲分析和有限元数值仿真建立了 Berkovich 压痕中边距与名义中边距之比、名义硬度及压入比功和金属材料弹塑性参数间的无量纲函数关系,并以此为基础建立了基于 Berkovich 压痕的金属材料弹塑性参数仪器化压入识别方法,该方法的有效性得到了实验验证。

1 仪器化压入的量纲分析

Berkovich 压头的几何形状见图 1，根据最大压入深度 h_m 定义 Berkovich 压痕名义中边距 $d_n = h_m \tan(65.27^\circ)$ 。典型的 Berkovich 压痕如图 2 所示，定义 Berkovich 压痕中边距 d 为 Berkovich 压痕中心至 3 个压痕边界距离 d_1 、 d_2 和 d_3 的平均值，即 $d = (d_1 + d_2 + d_3)/3$ 。Berkovich 压痕中边距与名义中边距之比 d/d_n 为 Berkovich 压痕中边距 d 与 Berkovich 压痕名义中边距 d_n 的比值。典型的仪器化压入载荷-位移曲线如图 3 所示，最大压入载荷为 F_m ，与之相对应的最大压入深度为 h_m 。定义仪器化压入名义硬度 $H_n = F_m / A(h_m)$ ， $A(h_m)$ 为最大压入深度 h_m 所对应的 Berkovich 压头的横截面积。定义仪器化压入加载功 W_l 和卸载功 W_e 分别为实施仪器化压入时 Berkovich 压头在加载阶段和卸载阶段所做的功，其值分别等于加载曲线和卸载曲线与仪器化压入载荷-位移曲线横坐标所围面积。仪器化压入比功 W_e/W_l 为卸载功 W_e 与加载功 W_l 的比值。

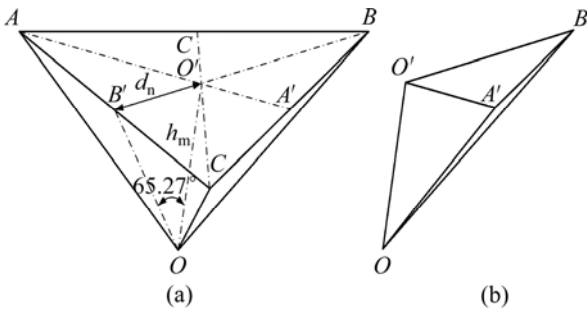


图 1 Berkovich 压头及其六分之一示意图
 Fig. 1 Schematic illustration of Berkovich indenter(a) and one-sixth(b) for simulation

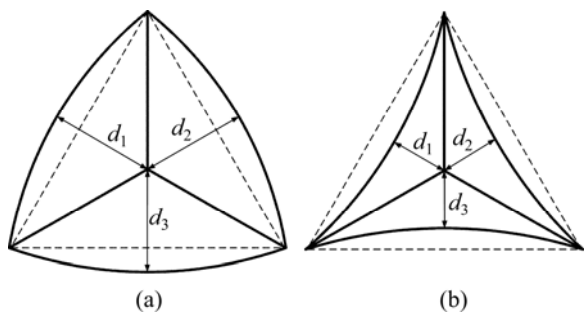


图 2 Berkovich 压痕示意图
 Fig. 2 Schematic illustration of Berkovich indentation impression with piling-up(a) or sinking-in(b)

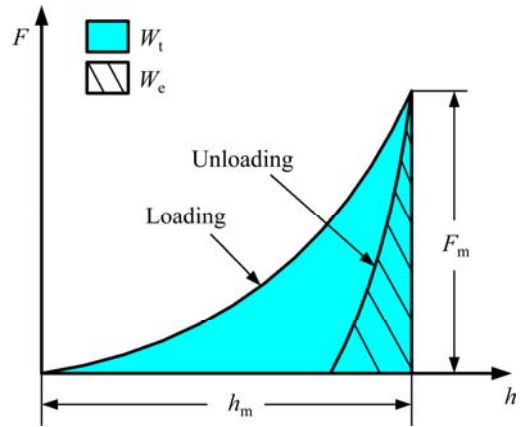


图 3 仪器化压入载荷-位移曲线及加、卸载功示意图
 Fig. 3 Schematic illustration of load-displacement curves (W_l is total work, W_e is elastic work)

假设被测材料为均匀、各向同性、率无关的固体材料，且遵循 Von Mises 屈服准则和纯各向同性强化准则；同时假设被测材料的单轴真实应力-应变关系由线弹性和 Hollomon 幂硬化函数组成，即

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma_y(\varepsilon/\varepsilon_y)^n, & \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases} \quad (1)$$

式中： σ 和 ε 为真实应力和真实应变； E 为弹性模量； σ_y 和 $\varepsilon_y = \sigma_y / E$ 为屈服强度和屈服应变； n 为应变硬化指数。假设 Berkovich 压头为弹性体，弹性模量为 E_i ，泊松比为 ν_i 。Berkovich 压头与被测材料之间无摩擦。基于上述假设，Berkovich 压痕中边距与名义中边距之比 d/d_n 、名义硬度 H_n 和压入比功 W_e/W_l 可分别表示为被测材料的屈服强度 σ_y 、应变硬化指数 n 、弹性模量 E 、泊松比 ν 与 Berkovich 压头的弹性模量 E_i 、泊松比 ν_i 以及最大压入深度 h_m 的函数：

$$d/d_n = \Gamma_{D1}[\sigma_y, n, E/(1-\nu^2), E_i/(1-\nu_i^2), h_m] \quad (2)$$

$$H_n = \Gamma_{H1}[\sigma_y, n, E/(1-\nu^2), E_i/(1-\nu_i^2), h_m] \quad (3)$$

$$W_e/W_l = \Gamma_{W1}[\sigma_y, n, E/(1-\nu^2), E_i/(1-\nu_i^2), h_m] \quad (4)$$

式中： $E/(1-\nu^2)$ 和 $E_i/(1-\nu_i^2)$ 分别为被测材料和 Berkovich 压头的平面应变弹性模量。利用折合弹性模量 $E_r = 1/[(1-\nu^2)/E + (1-\nu_i^2)/E_i]$ 及平面应变弹性模量之比 $\eta = [E/(1-\nu^2)]/[E_i/(1-\nu_i^2)]$ 可分别将被测材料和 Berkovich 压头的平面应变弹性模量表示为

$$E/(1-\nu^2) = (\eta + 1)E_r \quad (5)$$

$$E_i/(1-\nu_i^2) = [(\eta + 1)E_r]/\eta \quad (6)$$

根据式(5)和式(6), 式(2)、(3)和(4)可改写为

$$d/d_n = \Gamma_{D2}(\sigma_y, n, E_r, \eta, h_m) \quad (7)$$

$$H_n = \Gamma_{H2}(\sigma_y, n, E_r, \eta, h_m) \quad (8)$$

$$W_e/W_t = \Gamma_{W2}(\sigma_y, n, E_r, \eta, h_m) \quad (9)$$

应用量纲 Π 定理, 式(7)、(8)和(9)可简化为

$$d/d_n = \Gamma_{D3}(\sigma_y/E_r, n, \eta) \quad (10)$$

$$H_n/E_r = \Gamma_{H3}(\sigma_y/E_r, n, \eta) \quad (11)$$

$$W_e/W_t = \Gamma_{W3}(\sigma_y/E_r, n, \eta) \quad (12)$$

由式(12)可得

$$\sigma_y/E_r = \Gamma_{W3}^{-1}(W_e/W_t, n, \eta) \quad (13)$$

将式(13)代入式(10)和式(11)得

$$d/d_n = \Gamma_{D4}(W_e/W_t, n, \eta) \quad (14)$$

$$H_n/E_r = \Gamma_{H4}(W_e/W_t, n, \eta) \quad (15)$$

根据式(13)和式(15)可得

$$\sigma_y/H_n = \Gamma_5(W_e/W_t, n, \eta) \quad (16)$$

2 仪器化压入的有限元仿真

为获得式(14)、(15)和(16)的显示表达式, 本文作者应用有限元软件 ABAQUS 建立三维模型对具有理想形状的金金刚石 Berkovich 压头仪器化压入被测材料的压入响应进行数值模拟。根据 Berkovich 压头的对称性, 选取压头的 $1/6(\Delta O'AB')$ 及与压头相对应的被测材料的 $1/6$ 用于有限元仿真, 如图 1 所示。有限元划分的 Berkovich 压头与被测材料的总体网格和靠近压头尖端的局部网格见图 4。Berkovich 压头划分了 20000 个一阶四面体单元, 被测材料划分了 120000 个一阶四面体单元和 30000 个一阶六面体单元。有限元模型的网格收敛性和远场无关性均符合要求。在图 4(a)内, 以 Berkovich 压头尖点为坐标原点 O , 定义空间直角坐标系 $O-XYZ$, 其中 X 轴方向为 Berkovich 压头横截面内压头中心与棱边中心连线方向(图 1 中 $O'A'$ 方向), Z 轴方向为 Berkovich 压头轴线方向, Y 轴方向根据右手法则确定。Berkovich 压头的弹性模量 $E_i=1141$ GPa, 泊松比 $\nu_i=0.07$ 。被测材料弹性模量 E 取值为 70GPa、200 GPa 和 400 GPa; 屈服强度 σ_y 的取值范围为 1~45000 MPa; 应变硬化指数 n 取值为 0、

0.15、0.3 和 0.45; 泊松比 ν 取固定值 0.3。被测材料和 Berkovich 压头的平面应变弹性模量之比 η 分别为 0.0671、0.1917 和 0.3834。Berkovich 压头与被测材料间的接触摩擦因数取值为 0。

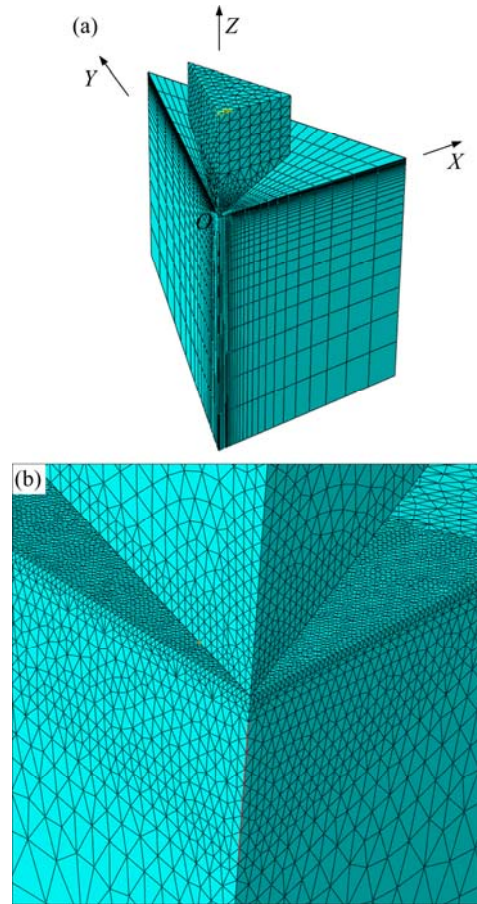


图 4 Berkovich 压头与被压材料有限元网格划分的总体网格和靠近压头尖端的局部网格

Fig. 4 FE mesh designs of Berkovich indenter and indented material overall mesh(a) and detailed mesh(b) near tip of Berkovich indenter

仪器化压入卸载后, 在 XOZ 平面内提取 Berkovich 压痕轮廓, 图 5(a)显示了一组弹性模量 $E=200$ GPa 并具有不同屈服强度 σ_y 和应变硬化指数 n 的材料的压痕轮廓, 横坐标为节点到 Z 轴的距离 d_z 与最大压入深度 h_m 的比值 d_z/h_m , 纵坐标为节点在 Z 轴方向发生的位移 u_z 与最大压入深度 h_m 的比值 u_z/h_m , 负号表示节点位移方向与 Z 轴正方向相反。进一步确定 $d_z/h_m=\tan(65.27^\circ)$ 附近的轮廓曲线曲率半径变化最小处与 Z 轴的距离为 Berkovich 压痕中边距 d 。图 5(b)所示为对应于图 5(a)所示材料的仪器化压入载荷-位移曲线, 可以看出, 该组材料的载荷-位移曲线几乎相同。

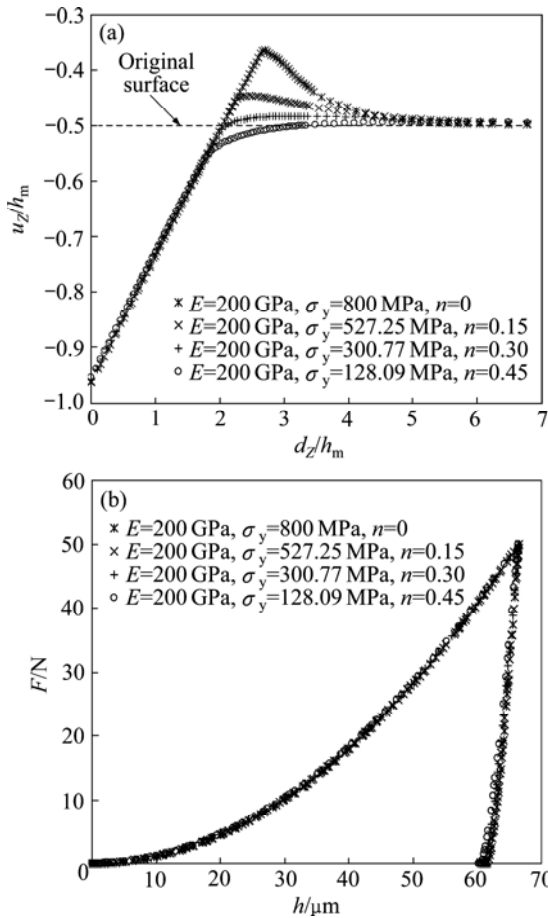


图5 一组材料的压痕轮廓及载荷-位移曲线
Fig. 5 Instrumented indentation responses of a set of materials with distinct plastic properties: (a) Profiles of Berkovich indentation impressions in XOZ plane; (b) $F-h$ curves

图6所示为有限元数值仿真得到的对应于不同 n 和 η 的 $d/d_n - W_e/W_t$ 关系。可以看出，对于确定的 n ， η 对 $d/d_n - W_e/W_t$ 关系的影响极为有限。因此，利用多项式函数对 n 的4个不同取值情况下的 $d/d_n - W_e/W_t$ 关系进行拟合，结果表示为

$$(d/d_n)_i = \sum_{j=0}^2 a_{ij} (W_e/W_t)^j \quad (17)$$

式中： $i=1, \dots, 4$ 分别对应 n 的4个不同取值：0, 0.15, 0.3, 0.45；系数 a_{ij} ($j=0, 1, 2$) 的取值见表1。

图7所示为有限元数值仿真得到的对应于不同 n 和 η 的 $H_n/E_r - W_e/W_t$ 关系。可以看出，对于确定的 n 和 η 对 $H_n/E_r - W_e/W_t$ 关系存在一定的影响，这表明折合弹性模量 E_r 不能准确反映金刚石 Berkovich 压头和被测材料之间的联合弹性效应。为此，定义联合弹性模量 $E_c = 1/[(1-\nu^2)/E + 1.32(1-\nu_1^2)/E_1]$ ，并替代折合弹性模量 E_r 可得 $H_n/E_c - W_e/W_t$ 关系，其结果如图8所示。

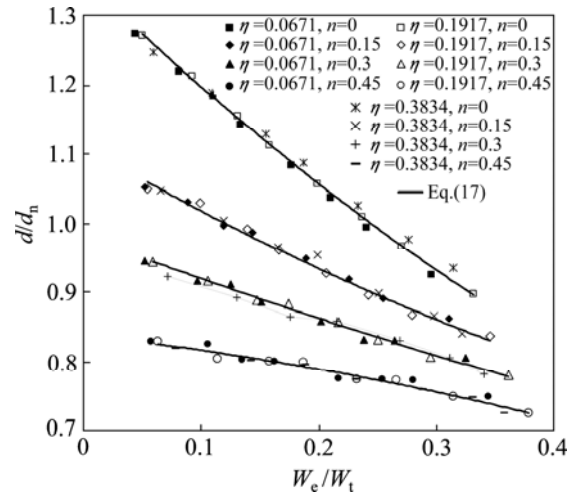


图6 对应于不同 n 和 η 的 $d/d_n - W_e/W_t$ 关系
Fig. 6 Plots of d/d_n versus W_e/W_t with different values of n and η

表1 系数 a_{ij} ($i=1, \dots, 4; j=0, 1, 2$) 的取值

Table 1 Values of a_{ij} ($i=1, \dots, 4; j=0, 1, 2$)

i	a_{i0}	a_{i1}	a_{i2}
1	1.354	-1.636	0.773
2	1.113	-1.000	0.533
3	0.981	-0.626	0.181
4	0.839	-0.191	-0.286

由图8可以看出，对于确定的 n ， $H_n/E_c - W_e/W_t$ 关系几乎不受 η 的影响。因此，利用多项式函数对 n 的4个不同取值情况下的 $H_n/E_c - W_e/W_t$ 关系进行拟合，其关系可表示为

$$(H_n/E_c)_i = \sum_{j=0}^6 b_{ij} (W_e/W_t)^j \quad (18)$$

其中， $i=1, \dots, 4$ 分别对应 n 的4个不同取值：0, 0.15, 0.30, 0.45；系数 b_{ij} ($j=0, \dots, 6$) 的取值见表2。式(18)所代表的 n 分别取 0、0.15、0.30 和 0.45 时的 $H_n/E_c - W_e/W_t$ 关系如图9所示。

图10所示为有限元数值仿真得到的对应于不同 n 和 η 的 $\sigma_y/H_n - W_e/W_t$ 关系图。利用多项式函数对 $\sigma_y/H_n - W_e/W_t$ 关系进行拟合，其关系可表示为

$$(\sigma_y/H_n)_{ij} = \sum_{k=0}^6 c_{ijk} (W_e/W_t)^k \quad (19)$$

式中： $i=1, \dots, 4$ 分别对应 n 的4个不同取值：0, 0.15, 0.30, 0.45； $j=1, 2, 3$ 分别对应 η 的3个不同取值：0.0671, 0.1917, 0.3834；系数 c_{ijk} ($k=0, \dots, 6$) 的取值见表3。

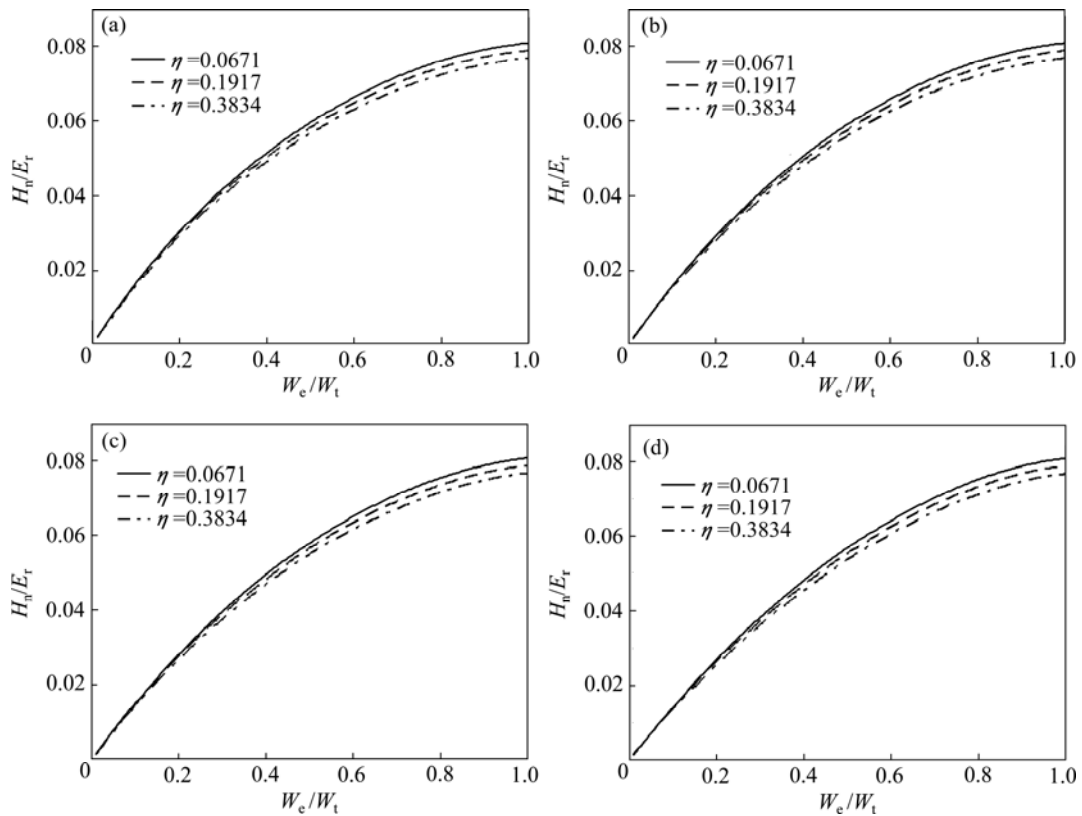


图7 不同 n 和 η 时的 $H_n/E_r-W_c/W_t$ 关系

Fig. 7 $H_n/E_r-W_c/W_t$ curves at different values of n and η : (a) $n=0$; (b) $n=0.15$; (c) $n=0.30$; (d) $n=0.45$

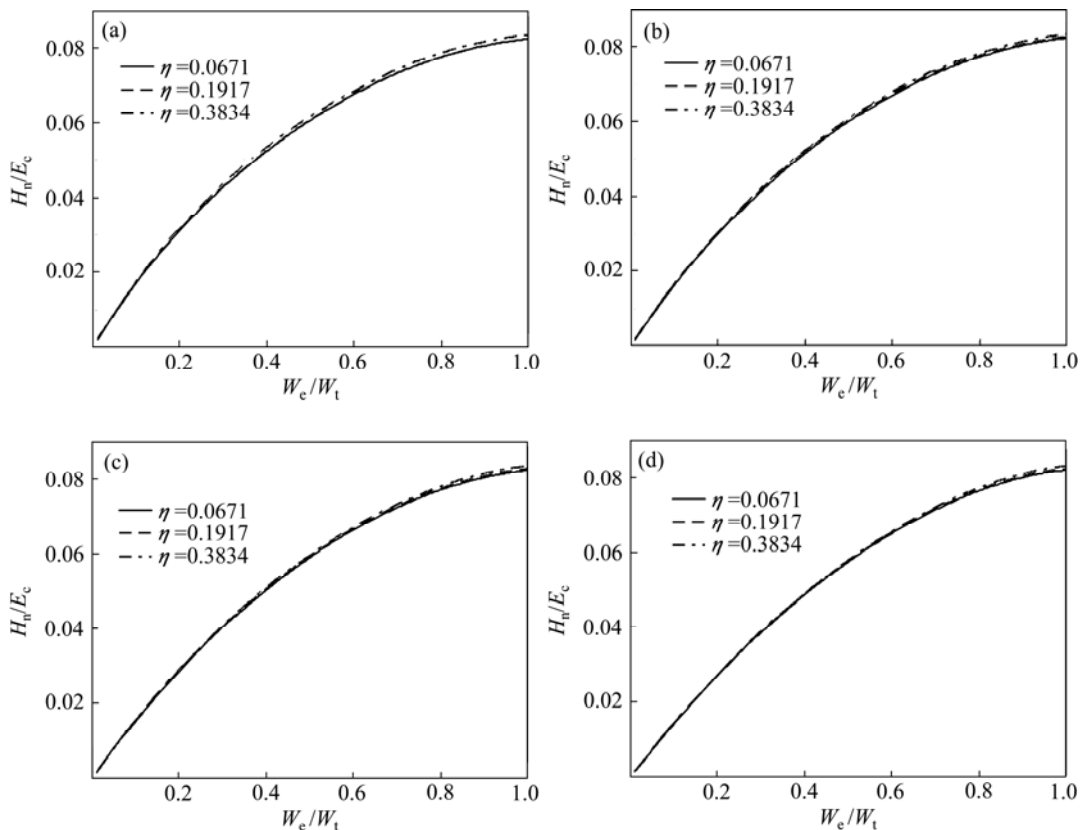


图8 不同 n 和 η 时 $H_n/E_c-W_c/W_t$ 关系

Fig. 8 $H_n/E_c-W_c/W_t$ curves at different values of n and η : (a) $n=0$; (b) $n=0.15$; (c) $n=0.30$; (d) $n=0.45$

表2 系数 b_{ij} ($i=1, \dots, 4; j=0, \dots, 6$) 的取值

Table 2 Values of b_{ij} ($i=1, \dots, 4; j=0, \dots, 6$)

i	b_{i0}	b_{i1}	b_{i2}	b_{i3}	b_{i4}	b_{i5}	b_{i6}
1	-0.0003	0.1908	-0.1796	0.0621	0.1279	-0.1914	0.0736
2	-0.0004	0.1841	-0.2017	0.2691	-0.3275	0.2229	-0.0636
3	-0.0003	0.1705	-0.1548	0.2000	-0.2833	0.2232	-0.0723
4	0	0.1508	-0.0689	-0.0143	0.0331	-0.0157	-0.0021

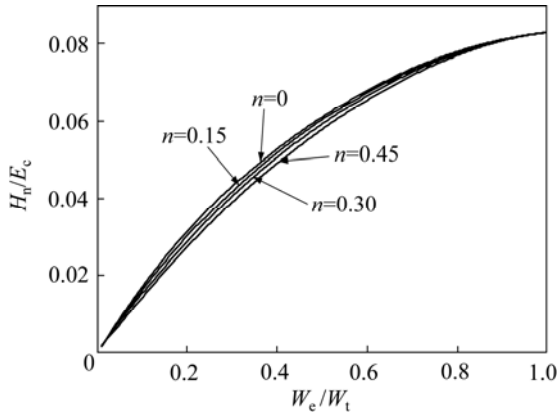


图9 不同 n 时 $H_n/E_c-W_c/W_t$ 关系

Fig. 9 $H_n/E_c-W_c/W_t$ curves at different values of n

3 方法建立

根据关系式(17)、(18)、(19)，本文作者建立基于 Berkovich 压痕的金属材料弹塑性参数仪器化压入识别方法，具体包括以下步骤：

1) 利用仪器化压入仪和金刚石 Berkovich 压头对被测材料实施最大压入载荷为 F_m 的仪器化压入测试，获得载荷-位移曲线，同时利用该曲线确定最大压入深度 h_m 和名义硬度 $H_n=F_m/A(h_m)$ (不考虑压头尖端钝化时， $A(h_m)=24.5h_m^2$ ；考虑压头尖端钝化时， $A(h_m)$ 由金刚石 Berkovich 压头的面积函数 $A(h)$ 来确定，即 $A(h_m)=A(h)|_{h=h_m}$)；

2) 根据载荷-位移曲线的加载部分和卸载部分计算压入加载功 W_t 和卸载功 W_c ，并计算仪器化压入比功 W_c/W_t ；

3) 借助显微镜分别量取 Berkovich 压痕中心至 3 个压痕边界的距离： d_1 、 d_2 和 d_3 ，并确定 Berkovich 压痕中边距 $d=(d_1+d_2+d_3)/3$ 及其与名义中边距 $d_n=h_m \tan 65.27^\circ$ 之比 d/d_n ；

4) 根据仪器化压入比功 W_c/W_t 和关系式(17)确定 $(d/d_n)_i$ ($i=1, \dots, 4$) 值，然后根据 n_i ($i=1, \dots, 4$) 值 ($n_1=0, n_2=0.15, n_3=0.30, n_4=0.45$)，利用拉格朗日插值公式确定 n' ：

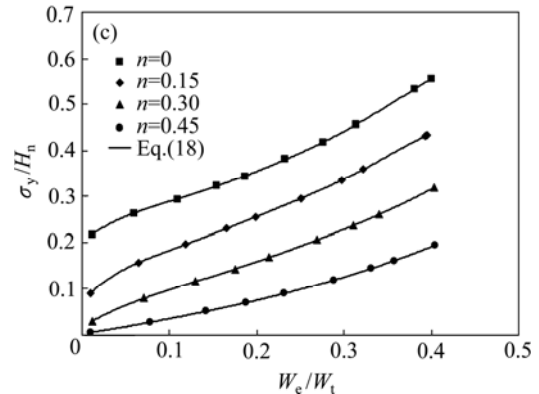
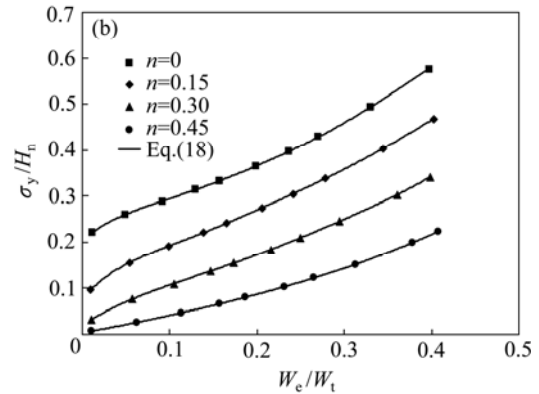
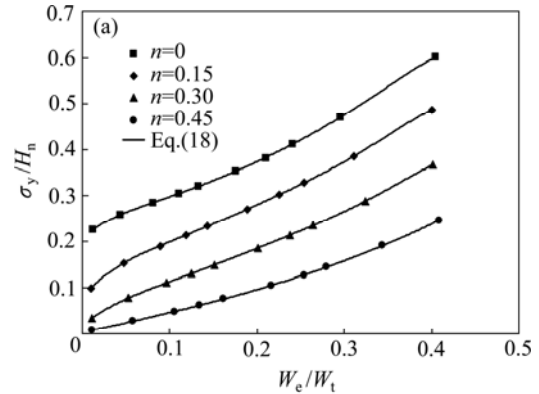


图10 对应于不同 n 和 η 的 $\sigma_y/H_n-W_c/W_t$ 关系

Fig. 10 Plots of σ_y/H_n versus W_c/W_t with different values of n corresponding to (a) $\eta=0.0671$, (b) $\eta=0.1917$, and (c) $\eta=0.3834$

$$n' = \sum_{i=1}^4 n_i \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^4 \{ [(d/d_n) - (d/d_n)_k] / [(d/d_n)_i - (d/d_n)_k] \} \quad (20)$$

进一步根据非负原则确定被测材料的应变硬化指

表 3 系数 c_{ijk} ($i=1, \dots, 4; j=1, 2, 3; k=0, \dots, 6$) 的取值

Table 3 Values of c_{ijk} ($i=1, \dots, 4; j=1, 2, 3; k=0, \dots, 6$)

j	i	c_{ij0}	c_{ij1}	c_{ij2}	c_{ij3}	c_{ij4}	c_{ij5}	c_{ij6}
1	1	0.238	0.226	7.929	-71.226	325.347	-681.467	535.135
	2	0.074	2.096	-13.744	68.627	-169.321	200.663	-82.956
	3	0.033	0.951	-2.200	8.429	-12.195	6.131	3.506
	4	0	0.503	-0.827	4.621	-4.983	-4.735	12.280
2	1	0.239	0.161	8.844	-75.537	326.940	-657.569	502.597
	2	0.095	1.477	-9.076	55.019	-172.054	278.416	-179.760
	3	0.052	0.010	11.914	-99.767	415.868	-830.777	641.366
	4	-0.001	0.512	-1.990	15.689	-55.953	105.172	-77.335
3	1	0.242	0.022	9.431	-74.914	309.951	-608.115	459.423
	2	0.112	0.657	1.079	-7.047	18.554	-6.488	-16.016
	3	0.040	0.391	4.430	-39.626	171.708	-348.301	272.878
	4	0.002	0.300	0.759	-6.068	30.100	-61.597	48.025

数 n :

$$n = \max \{n', 0\} \tag{21}$$

5) 根据仪器化压入比功 W_c/W_i 和关系式(18)确定 $(H_n/E_c)_i$ ($i=1, \dots, 4$)值, 然后根据 n_i ($i=1, \dots, 4$)值 ($n_1=0, n_2=0.15, n_3=0.30, n_4=0.45$)及被测材料应变硬化指数的识别结果 n , 利用拉格朗日插值公式确定 H_n/E_c :

$$H_n/E_c = \sum_{i=1}^4 (H_n/E_c)_i \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^4 [(n-n_k)/(n_i-n_k)] \tag{22}$$

根据名义硬度 H_n 及 H_n/E_c 值确定被测材料与金刚石 Berkovich 压头的联合弹性模量 E_c :

$$E_c = H_n / (H_n/E_c) \tag{23}$$

进而确定被测材料的弹性模量 E :

$$E = (1-\nu^2) / [1/E_c - 1.32(1-\nu_i^2)/E_i] \tag{24}$$

式中: 金刚石 Berkovich 压头的弹性模量 $E_i=1141$ GPa, 泊松比 $\nu_i=0.07$, 被测材料的泊松比 ν 可根据材料手册确定。如果被测材料的泊松比 ν 不能由材料手册确定, 则取值为 0.3。

6) 根据仪器化压入比功 W_c/W_i 及关系式(19)确定 $(\sigma_y/H_n)_{ij}$ ($i=1, \dots, 4; j=1, 2, 3$)值, 然后根据被测材料与金刚石 Berkovich 压头的平面应变弹性模量之比 $\eta = [E/(1-\nu^2)]/[E_i/(1-\nu_i^2)]$ 以及 η_j ($j=1, 2, 3$) 的值 ($\eta_1=0.0671, \eta_2=0.1917, \eta_3=0.3834$), 利用拉格朗日插值公式确定 σ_y/H_n :

$$\sigma_y/H_n = \sum_{i=1}^4 \left\{ \sum_{j=1}^3 (\sigma_y/H_n)_{ij} \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^3 [(\eta-\eta_m)/(\eta_j-\eta_m)] \right\} \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^4 [(n-n_k)/(n_i-n_k)] \tag{25}$$

进一步根据名义硬度 H_n 及比值 σ_y/H_n 确定被测材料的屈服强度 σ_y :

$$\sigma_y = H_n (\sigma_y/H_n) \tag{26}$$

及由关系式 $\sigma_{0.2} = \sigma_y^{1-n} [\sigma_{0.2} + 0.002E]^n$ 确定被测材料的条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$:

7) 确定被测材料的屈服应变 $\varepsilon_y = \sigma_y/E$, 进一步根据关系式 $\varepsilon_b = n[1 + (1-2\nu)\varepsilon_y^{1-n}\varepsilon_b^n]$ 确定 ε_b , 最后确定被测材料的强度极限 σ_b :

$$\sigma_b = \begin{cases} \sigma_y / \exp(2\nu\varepsilon_y), & \varepsilon_b \leq \varepsilon_y \\ \sigma_y (\varepsilon_b / \varepsilon_y)^n / \exp[\varepsilon_b + (2\nu-1)\varepsilon_y^{1-n}\varepsilon_b^n], & \varepsilon_b > \varepsilon_y \end{cases} \tag{27}$$

4 实验验证

本实验中选择 6061 铝合金、S45C 碳钢、SS316 不锈钢和黄铜 4 种金属材料用于检验本实验中建立的基于 Berkovich 压痕的金属材料弹塑性参数仪器化压入识别方法的有效性。4 种金属材料的仪器化压入试样呈圆柱状, 尺寸为 $d 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 并且测试表面均采用 Al_2O_3 研磨膏进行了抛光。利用高精度仪器化压入仪和金刚石 Berkovich 压头对上述 4 种金属材料不同区域重复进行 5 次仪器化压入测试, 最大压入载荷设定为 50 N, 加、卸载速率均为 0.3 N/s, 最大压入载荷时保载 30 s。图 11 所示为 Berkovich 压头仪器化压入 4 种金属材料所得载荷-位移曲线。图 12 所示为 4 种金属材料的 Berkovich 压痕。

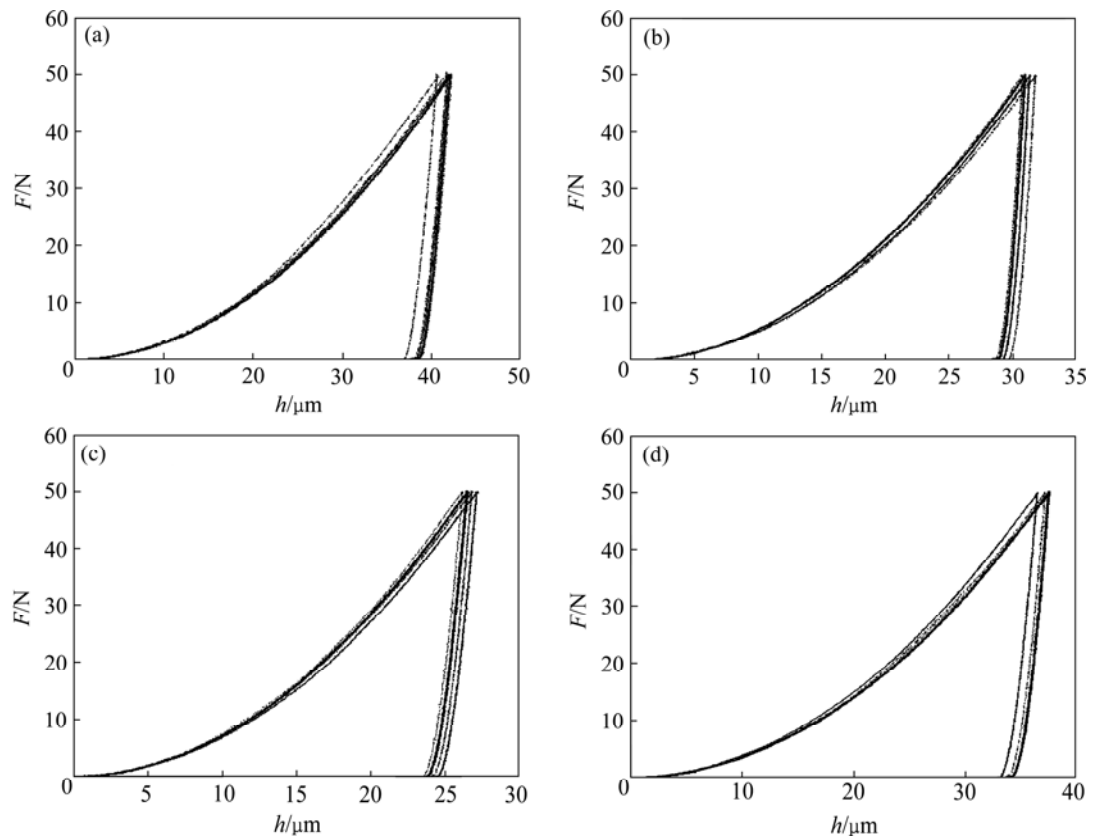


图 11 Berkovich 压头仪器化压入金属材料所得载荷-位移曲线

Fig. 11 $F-h$ curves obtained from instrumented indentation experiments with Berkovich indenter of metals: (a) 6061 aluminum alloy; (b) S45C carbon steel; (c) SS316 stainless steel; (d) Brass

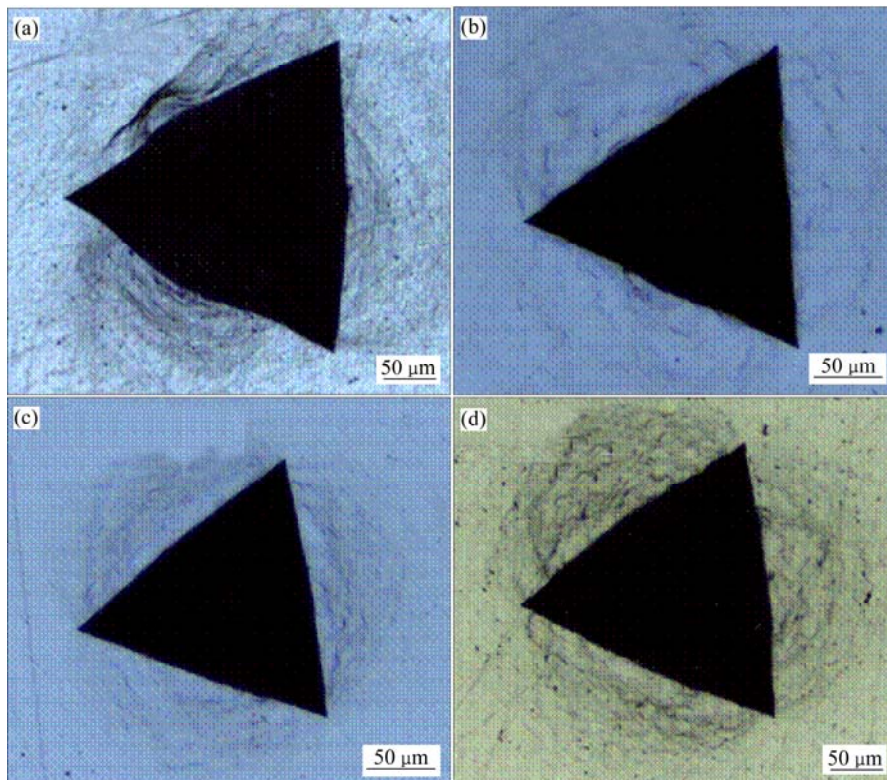


图 12 金属材料的 Berkovich 压痕

Fig. 12 Berkovich indentation impressions obtained from instrumented indentation experiments of metals: (a) 6061 aluminum alloy; (b) S45C carbon steel; (c) SS316 stainless steel; (d) Brass

根据仪器化压入测试所得载荷-位移曲线及 Berkovich 压痕, 可以分别确定 4 种金属材料的仪器化压入名义硬度 H_n 、仪器化压入比功 W_e/W_t 及 Berkovich 压痕中边距与名义中边距之比 d/d_n , 在此基础上, 应

用本文所建立的方法可确定 4 种金属材料的应变硬化指数 n 、弹性模量 E 、条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 及强度极限 σ_b , 结果见表 4。为了与标准单轴拉伸试验结果进行比较, 将仪器化压入测试所用 6061 铝合金、S45C 碳钢、

表 4 最大载荷为 50 N 时 6061 铝合金、S45C 碳钢、SS316 不锈钢和黄铜弹塑性参数仪器化压入测试结果与测试误差

Table 4 Determination results and errors of elastic-plastic properties of 6061 aluminum alloy, S45C carbon steel, SS316 stainless steel and brass at $F_m=50$ N

Experiment		6061 aluminum alloy									
No.	H_n	W_e/W_t	d/d_n	n	Δn	E	$E_{err}/\%$	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{0.2,err}/\%$	σ_b	$\sigma_{b,err}/\%$
1	1.15	0.099	1.106	0.069	0.017	67.88	-4.40	293.01	-2.13	322.99	-11.81
2	1.16	0.099	1.114	0.062	0.010	68.84	-3.04	300.30	0.31	325.74	-11.06
3	1.24	0.107	1.103	0.064	0.012	68.30	-3.80	323.87	8.19	351.82	-3.94
4	1.14	0.099	1.106	0.069	0.017	67.31	-5.20	290.75	-2.88	320.78	-12.41
5	1.18	0.099	1.107	0.068	0.016	69.68	-1.86	300.35	0.33	330.56	-9.74
Average	1.17	0.101	1.107	0.067	0.015	68.40	-3.66	301.66	0.76	330.38	-9.79
Experiment		S45C carbon steel									
No.	H_n	W_e/W_t	d/d_n	n	Δn	E	$E_{err}/\%$	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{0.2,err}/\%$	σ_b	$\sigma_{b,err}/\%$
1	2.13	0.076	1.011	0.191	0.015	203.24	1.12	389.55	-9.63	678.43	10.70
2	2.08	0.074	1.021	0.182	0.006	201.12	0.06	386.91	-10.25	648.98	5.90
3	2.03	0.072	1.023	0.183	0.007	202.40	0.70	372.76	-13.53	629.67	2.75
4	2.08	0.076	1.016	0.186	0.010	197.04	-1.97	385.58	-10.55	656.18	7.07
5	2.16	0.076	1.012	0.191	0.015	207.71	3.34	394.56	-8.47	687.00	12.10
Average	2.10	0.075	1.017	0.187	0.011	202.30	0.65	385.87	-10.49	660.05	7.70
Experiment		SS316 stainless steel									
No.	H_n	W_e/W_t	d/d_n	n	Δn	E	$E_{err}/\%$	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{0.2,err}/\%$	σ_b	$\sigma_{b,err}/\%$
1	2.91	0.115	1.012	0.150	0.016	180.25	-2.04	663.38	8.73	934.39	12.92
2	2.78	0.108	1.002	0.171	0.037	184.69	0.38	590.71	-3.18	906.30	9.52
3	2.85	0.108	1.006	0.165	0.031	190.13	3.33	614.65	0.74	923.24	11.57
4	2.99	0.114	1.025	0.136	0.002	186.46	1.34	697.84	14.38	938.49	13.41
5	2.91	0.112	1.015	0.151	0.017	184.87	0.47	654.44	7.27	927.68	12.11
Average	2.89	0.111	1.012	0.154	0.020	185.28	0.69	644.20	5.59	926.02	11.90
Experiment		Brass									
No.	H_n	W_e/W_t	d/d_n	n	Δn	E	$E_{err}/\%$	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{0.2,err}/\%$	σ_b	$\sigma_{b,err}/\%$
1	1.45	0.099	1.060	0.115	-0.010	92.23	11.12	336.32	-2.99	424.77	0.84
2	1.53	0.102	1.065	0.105	-0.020	94.04	13.30	367.17	5.91	448.20	6.40
3	1.46	0.098	1.055	0.121	-0.004	94.06	13.33	333.41	-3.83	429.81	2.04
4	1.48	0.100	1.068	0.105	-0.020	92.59	11.55	351.38	1.36	429.40	1.94
5	1.45	0.096	1.063	0.115	-0.010	95.15	14.63	334.28	-3.57	423.01	0.42
Average	1.48	0.099	1.062	0.112	-0.013	93.61	12.79	344.51	-0.62	431.04	2.33

SS316 不锈钢和黄铜的相同材料分别制成标准单轴拉伸试样，在 MTS810 通用材料试验机上分别实施两次标准单轴拉伸试验，以两次试验结果的平均值作为单轴拉伸试验的测试结果。由标准单轴拉伸试验测定的 6061 铝合金的弹性模量 E_U 、应变硬化指数 n_U 、条件屈服强度 $\sigma_{0.2U}$ 及强度极限 σ_{bU} 为 71 GPa、0.052、299.37 MPa 及 366.25 MPa；由标准单轴拉伸试验测定的 S45C 碳钢的弹性模量 E_U 、应变硬化指数 n_U 、条件屈服强度 $\sigma_{0.2U}$ 及强度极限 σ_{bU} 为 201 GPa、0.176、431.08 MPa 及 612.84 MPa；由标准单轴拉伸试验测定的 SS316 不锈钢的弹性模量 E_U 、应变硬化指数 n_U 、条件屈服强度 $\sigma_{0.2U}$ 及强度极限 σ_{bU} 为 184 GPa、0.134、610.11 MPa 及 827.51 MPa；由标准单轴拉伸试验测定的黄铜的弹性模量 E_U 、应变硬化指数 n_U 、条件屈服强度 $\sigma_{0.2U}$ 及强度极限 σ_{bU} 为 83 GPa、0.125、346.67 MPa 及 421.23 MPa。将 6061 铝合金、S45C 碳钢、SS316 不锈钢和黄铜的弹性模量、应变硬化指数、条件屈服强度和强度极限的仪器化压入测试结果与单轴拉伸试验结果进

行比较，可以确定仪器化压入测试结果的测试误差： $E_{Err} = (E - E_U) / E_{UU}$ 、 $\Delta n = n - n_U$ 、 $\sigma_{0.2Err} = (\sigma_{0.2} - \sigma_{0.2U}) / \sigma_{0.2U}$ 及 $\sigma_{bErr} = (\sigma_b - \sigma_{bU}) / \sigma_{bU}$ ，结果见表 4。从表 4 中可以看出，6061 铝合金、S45C 碳钢、SS316 不锈钢、黄铜的弹性模量相对测试误差分别为 -3.66%、0.65%、0.69% 和 12.79%，应变硬化指数的绝对测试误差分别为 0.015、0.011、0.020 和 -0.013，条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 的相对测试误差分别为 0.76%、-10.49%、5.59% 和 -0.62%，强度极限 σ_b 的相对测试误差分别为 -9.79%、7.70%、11.90% 和 2.33%，均满足工程应用要求。进一步根据仪器化压入测得的 6061 铝合金、S45C 碳钢、SS316 不锈钢和黄铜的应变硬化指数 n 、弹性模量 E 和条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 的平均值绘制其真实应力-应变曲线，该曲线与标准单轴拉伸试验测得的真实应力-应变曲线的比较如图 13 所示。从图 13 中可以看出两者具有较好的一致性。纵观以上实验结果表明，本文作者所提的基于 Berkovich 压痕的金属材料弹塑性参数仪器化压入测试方法是可行和非常有效的。

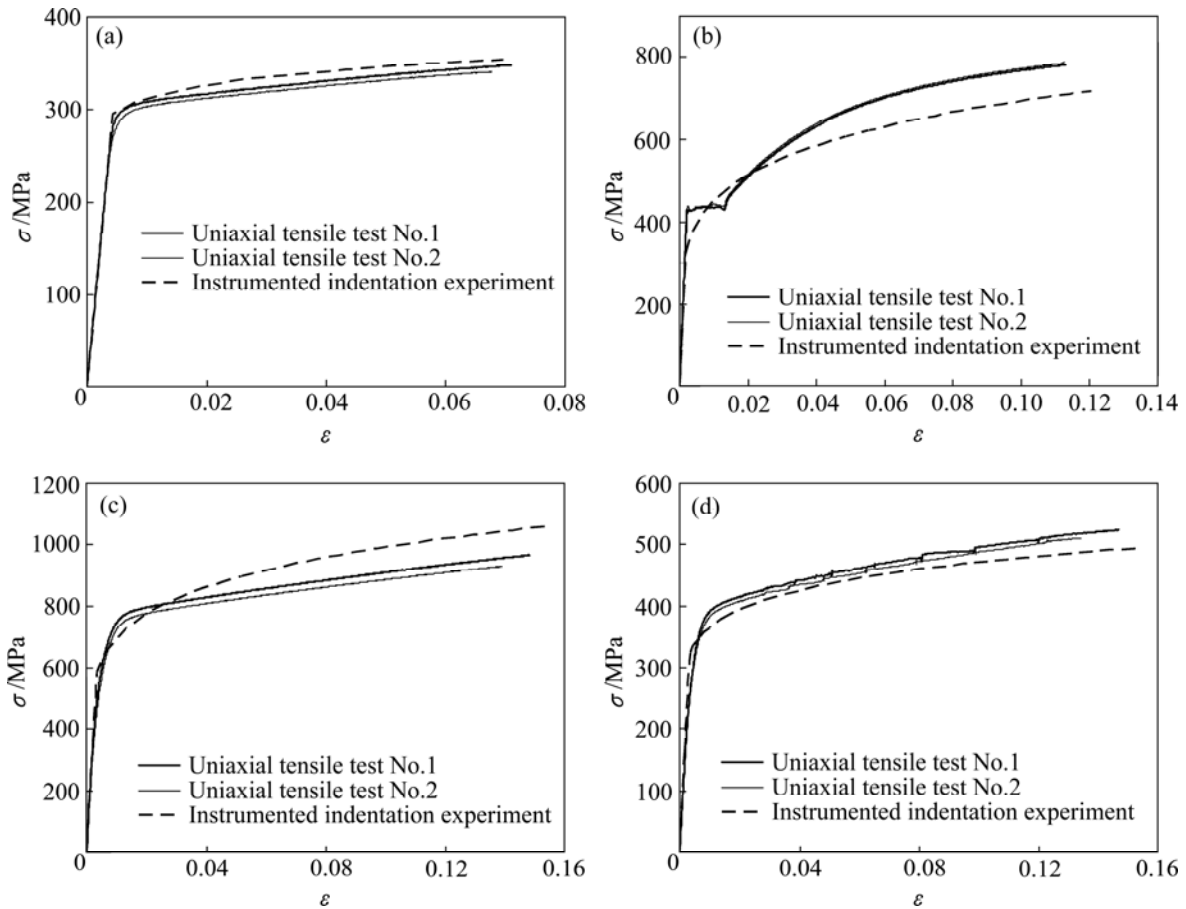


图 13 金属材料仪器化压入实验所得真实应力-应变曲线与单轴拉伸试验所得真实应力-应变曲线的比较

Fig. 13 Comparison between true stress-strain curves determined by instrumented indentation and standard uniaxial tensile tests of metals: (a) 6061 aluminum alloy; (b) S45C carbon steel; (c) SS316 stainless steel; (d) Bbrass

5 结论

1) 提出了一个用于衡量 Berkovich 压痕鼓凸/沉降程度的独立的仪器化压入响应参数-Berkovich 压痕中边距与名义中边距之比 d/d_n , 应用量纲分析和有限元数值仿真建立了 Berkovich 压痕中边距与名义中边距之比 d/d_n 、仪器化压入名义硬度 H_n 、仪器化压入比功 W_0/W_1 与金属材料弹性模量 E 、应变硬化指数 n 和屈服强度 σ_y 之间的无量纲函数关系式, 并以此为基础建立了基于 Berkovich 压痕的金属材料弹塑性参数仪器化压入识别方法。该方法仅利用单一 Berkovich 压头仪器化压入金属材料所得载荷-位移曲线及 Berkovich 压痕即可确定金属材料的弹性模量 E 、应变硬化指数 n 、条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 及强度极限 σ_b 。

2) 与标准单轴拉伸试验结果相比较, 应用本文所提方法识别得到的 6061 铝合金、S45C 碳钢、SS316 不锈钢和黄铜的弹性模量的相对测试误差分别为 -3.66%、0.65%、0.69% 和 12.79%, 应变硬化指数的绝对测试误差分别为 0.015、0.011、0.020 和 -0.013, 条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 的相对测试误差分别为 0.76%、-10.49%、5.59% 和 -0.62%, 强度极限 σ_b 的相对测试误差分别为 -9.79%、7.70%、11.90% 和 2.33%, 均满足工程应用要求。

3) 仪器化压入识别得到的 4 种金属材料的真实应力-应变曲线与标准单轴拉伸试验所得真实应力-应变曲线具有较好的一致性。

4) 6061 铝合金、S45C 碳钢、SS316 不锈钢和黄铜的仪器化压入识别结果验证了该基于 Berkovich 压痕的金属材料弹塑性参数仪器化压入识别方法是可行和非常有效的。

REFERENCES

[1] 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.

[2] FISCHER-CRIPPS A C. Nanoindentation[M]. New York: Springer-Verlag, 2004.

[3] ZHANG T H, FENG Y H, YANG R, JIANG P. A method to determine fracture toughness using cube-corner indentation[J]. *Scripta Materialia*, 2010, 62(4): 199-201.

[4] TRICOTEAUX A, DUARTE G, CHICOT D, BOURHIS L, BEMPORAD E, LESAGE J. Depth-sensing indentation

modeling for determination of elastic modulus of thin films[J]. *Mechanics of Materials*, 2010, 42(2): 166-174.

[5] 任明星, 李邦盛, 杨 闯, 傅恒志. 纳米压痕法测定微铸件硬度及弹性模[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(2): 231-236.

RENG Ming-xing, LI Bang-shen, YANG Chuang, FU Heng-zhi. Hardness and elastic modulus of microcastings by nanoindentation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(2): 231-236.

[6] 崔 航, 陈怀宁, 陈 静, 黄春玲, 吴昌忠. 球形压痕法评价材料屈服强度和应变硬化指数的有限元分析[J]. *金属学报*, 2009, 45(2): 189-194.

CUI Hang, CHEN Huai-ning, CHEN Jing, HUANG Chun-ling, WU Chang-zhong. FEA of evaluating material yield strength and strain hardening exponent using a spherical indentation[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, 45(2): 189-194.

[7] 马德军. 材料弹性模量的仪器化压入测试方法[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(12): 2336-2343.

MA De-jun. Method for determining elastic modulus by instrumented indentation test[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(12): 2336-2343.

[8] 宋仲康, 马德军, 郭俊宏, 陈 伟. 一种改进的纳米压入测试方法[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(2): 520-525.

SONG Zhong-kang, MA De-jun, GUO Jun-hong, CHEN Wei. A modified method of nanoindentation testing method[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(2): 520-525.

[9] BOLSHAKOV A, PHARR G M. Influences of pileup on the measurement of mechanical properties by load and depth sensing indentation techniques[J]. *Journal of Materials Research*, 1998, 13(4): 1049-1058.

[10] MA D, ONG C W. Analytical relationship among nominal hardness, reduced Young's modulus, the work of indentation, and strain hardening exponent[J]. *Journal of Materials Science*, 2010, 45(9): 2530-2533.

[11] MA D, ONG C W. Further analysis of energy-based indentation relationship among Young's modulus, nominal hardness, and indentation work[J]. *Journal of Materials Research*, 2010, 25(6): 1131-1136.

[12] 马德军. 材料力学性能仪器化压入测试原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.

MA De-jun. Principles of measuring mechanical properties of materials by instrumented indentation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

[13] HUBER N, NIX W D, GAO H. Identification of elastic-plastic material parameters from pyramidal indentation of thin films[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 2002, 458: 1593-1620.

[14] BOUZAKIS K D, VIDAKIS N. Superficial plastic response determination of hard isotropic materials using ball indentations and a FEM optimization technique[J]. *Materials Characterization*,

- 1999, 42(1): 1–12.
- [15] MULIANA A, STEWARD R, HAJ-ALI R M, SAXENA A. Artificial neural network and finite element modeling of nanoindentation tests[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002, 33(7): 1939–1947.
- [16] THO K K, SWADDIWUDHIPONG S, LIU Z S, HUA J. Artificial neural network model for material characterization by indentation[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2004, 12(5): 1055–1062.
- [17] HAJ-ALI R, KIM H K, KOH S W, SASENA A, TUMMALA R. Nonlinear constitutive models from nanoindentation tests using artificial neural networks[J]. *International Journal of Plasticity*, 2008, 24: 371–396.
- [18] COLLIN J M, MAUVOISIN G, PILVIN P. Materials characterization by instrumented indentation using two different approaches[J]. *Materials and Design*, 2010, 31: 636–640.
- [19] BOLZON G, TALASSI M. An effective inverse analysis tool for parameter identification of anisotropic material models[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, 77: 130–144.
- [20] DAO M, CHOLLACOOP N, VAN K J, VENKATESH T A, SURESH S. Computational modelling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49: 3899–3918.
- [21] BUCAILLE J L, STAUSS S, FELDER E, MICHLER J. Determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using different sharp indenters[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(6): 1663–1678.
- [22] YAN J, KARLSSON A M, CHEN X. Determining plastic properties of a material with residual stress by using conical indentation[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44: 3720–3737.
- [23] CHENG Y T, LI Z, CHENG C M. Scaling relationships for indentation measurements[J]. *Philosophical Magazine A*, 2002, 82(10): 1821–1829.
- [24] CHOLLACOOP N, DAO M, SURESH S. Depth-sensing instrumented indentation with dual sharp indenters[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51: 3713–3729.
- [25] CAO Y P, QIAN X Q, LU J, YAO Z H. An energy-based method to extract plastic properties of metal materials from conical indentation tests[J]. *Journal of Materials Research*, 2005, 20(5): 1194–1206.
- [26] OGASAWARA N, CHIBA N, CHEN X. Representative strain of indentation analysis[J]. *Journal of Materials Research*, 2005, 20(8): 2225–2234.
- [27] SWADDIWUDHIPONG S, THO K K, LIU Z S, ZENG K. Material characterization based on dual indenters[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, 42: 69–83.
- [28] LUO J, LIN J. A study on the determination of plastic properties of metals by instrumented indentation using two sharp indenters[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44(18/19): 5803–5817.
- [29] LE M Q. A computational study on the instrumented sharp indentations with dual indenters[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45: 2818–2835.
- [30] LE M Q. Improved reverse analysis for material characterization with dual sharp indenters[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48: 1600–1609.
- [31] CHEN X, OGASAWARA N, ZHAO M H, CHIBA N. On the uniqueness of measuring elastoplastic properties from indentation: The indistinguishable mystical materials[J]. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 2007, 55: 1618–1660.
- [32] TABOR D. *The hardness of metals*[M]. Oxford: Clarendon Press, 1951.
- [33] ALCALA J, BARONE A C, ANGLADA M. The influence of plastic hardening on surface deformation modes around Vickers and spherical indenters[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48: 3451–3464.
- [34] CHENG Y T, CHENG C M. Effects of ‘sinking in’ and ‘piling up’ on estimating the contact area under load in indentation[J]. *Philosophical Magazine Letters*, 1998, 78(2): 115–120.
- [35] MATSUDA K J. Prediction of stress-strain curves of elastic-plastic materials based on the Vickers indentation[J]. *Philosophical Magazine A*, 2002, 82(10): 1941–1951.
- [36] MA Z S, ZHOU Y C, LONG S G, ZHONG X L, LU C. Characterization of stress-strain relationships of elastoplastic materials: An improved method with conical and pyramidal indenters[J]. *Mechanics of Materials*, 2012, 54: 113–123.

(编辑 李艳红)