2019 年 11 月 November 2019

DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2019.11.15

金属材料弹塑性参数仪器化聚集式 Vickers 压入识别方法



石新正¹,陈 伟¹,陈 平²,马德军¹,孙 亮¹
(1.陆军装甲兵学院 车辆工程系,北京 100072;
2.陆军装甲兵学院 基础部,北京 100072)

摘 要:选用单一 Vickers 压头对被测材料实施压痕具有特殊位置关系的三次仪器化压入实验,根据第三次载荷-位移曲线和初次载荷-位移曲线提出一个独立的仪器化压入响应参数-第三次和初次仪器化压入比功之比 [(*W_e*/*W₁*)₃/(*W_e*/*W₁*)₁]。基于量纲分析和有限元仿真,建立初次仪器化压入比功(*W_e*/*W₁*)₁、第三次和初次仪器化压入比 功之比[(*W_e*/*W₁*)₃/(*W_e*/*W₀*)₁]、初次仪器化压入名义硬度 *H*₀与材料弹塑性参数之间的无量纲函数关系,并以此为基础 建立了金属材料弹塑性参数仪器化聚集式 Vickers 压入识别方法。该方法仅利用单一 Vickers 压头便可识别被测材 料的应变硬化指数 *n*、弹性模量 *E*、条件屈服强度 σ_{0.2}和强度极限 σ_b,并且通过实验验证了此方法的有效性。 关键词:仪器化聚集式压入;金属材料;弹塑性参数

文章编号: 1004-0609(2019)-11-2582-12

中图分类号: TH140

文献标志码: A

随着各种涂层材料、纳米材料以及其他新型材料 的发展,传统的拉伸、弯曲、扭转等方法已经难以满 足其力学性能测试的要求。仪器化压入技术因具有微 区和非破坏性的特点,对材料试样要求低,广泛应用 于材料力学性能测试。近些年,利用仪器化压入技术 识别金属材料的弹塑性参数已经成为人们研究的热点 领域。

在利用仪器化压入技术识别金属材料弹性模量方面, 经典的材料弹性模量仪器化压入识别方法— "Oliver-Pharr 方法"^[1]未考虑被测材料的塑性行为和 几何大变形,使得该方法在测试低硬化水平材料的弹 性模量时误差较大,最大偏差可达 30%,后来基于

"Oliver-Pharr 方法"的改进方法降低测试误差^[2-5]。 另一种弹性模量仪器化压入识别方法—"纯能量法" 由于被测材料应变硬化指数预先未知,在识别金属材 料弹性模量时仍有较大的理论误差,最高为±13%^[6-8]。

在利用仪器化压入技术识别金属材料塑性参数方 面,所采用的压头有锥形压头和球形压头两种。在利 用锥形压头识别金属材料塑性参数时,人们发现单一 锥形压头一次仪器化压入所得载荷-深度曲线不能唯 一的确定材料的弹塑性参数,因而,利用多个具有不 同锥顶角的锥形压头识别金属材料塑性参数成为研究 的热点,其中一类是直接建立被测材料弹塑性参数与 材料仪器化压入响应参数之间的函数关系,识别时通 过函数关系求得被测材料的弹塑性参数^[9-13];另一类 是通过建立代表性应力与代表性应变与仪器化压入响 应参数之间的函数关系,识别时利用不同的压头获得 代表性应力和代表性应变坐标点,拟合出被测材料的 幂硬化曲线,结合弹性模量的识别结果,从而获得被 测材料的塑性参数^[14-17]。但多压头法存在锥形压头角 度选取问题,并且在识别时需要更换压头操作繁 琐^[16-18]。在利用球形压头识别金属材料塑性参数时, 识别精度不但取决于方法本身,还取决于球形压头的 加工精度;此外,应用球形压头压入不同硬质金属材 料时,相同最大压入深度所对应的最大压入载荷变化 较大,这就要求实验仪器具有较宽的输出载荷范 围^[19-21]。

本文作者把实验压痕作为一个独立的仪器化压入 响应参数,结合载荷--位移曲线获得的两个独立的仪 器化压入响应参数,建立与材料弹塑性参数的函数关 系,实现基于 Berkovich/Vickers 压头的金属材料弹塑 性参数仪器化压入识别方法,该方法利用单个压头便 可识别金属材料的弹塑性参数^[18,22]。但该方法在操作 过程中,实验压痕量取困难且易产生较大测量误差。

实际上,在仪器化压入实验时,仪器化压入卸载 后,靠近压痕的材料存在一定的塑性变形。根据应变

收稿日期: 2018-10-09; 修订日期: 2019-03-25

通信作者: 陈 伟, 讲师, 博士; 电话: 15120029137; E-mail: chen04041530@163.com

硬化指数的不同,材料在塑性变形区内表现出强度强 化的水平亦不同,例如应变硬化指数为零的材料表现 为无强化,而应变硬化指数不为零的材料必然表现为 强度水平的提升。因此,如果两种具有不同应变硬化 指数的材料的初次仪器化压入载荷-位移曲线完全相 同,那么它们在各自的压痕塑性变形区内再次获得的 仪器化压入载荷-位移曲线将完全不同。基于上述原 理,本文作者根据压痕塑性变形区内再次仪器化压入 所得载荷-位移曲线引入一个独立的仪器化压入响应 参数,结合初次载荷-位移曲线所得两个独立的仪器 化压入响应参数,通过量纲分析和有限元仿真建立 3 个仪器化压入响应参数与材料弹塑性参数仪器化聚集式 Vickers 压入识别方法。通过对 5 种金属材料进行仪器 化聚集式 Vickers 压入实验,验证了方法的有效性。

1 量纲分析

Vickers 压头为正四棱锥形,其几何形状如图1所示,仪器化压入载荷-位移曲线如图2所示。定义名



图1 Vickers 压头及其八分之一示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Vickers indenter(a) and oneeighth for simulation(b)





Fig. 2 Schematic illustration of load-displacement curves by instrumented indentation

义硬度 $H_0=p_m/A(h_m)$,其中 p_m 为最大压入载荷, $A(h_m)$ 为最大压入深度 h_m 所对应的 Vickers 压头的横截面积; 定义加载功 W_t 和卸载功 W_e 分别为 Vickers 压头在仪器 化压入加载和卸载阶段所做的功,仪器化压入比功 W_e/W_t 为卸载功 W_e 与加载功 W_t 的比值。

单一 Vickers 压头对被测材料实施最大压入载荷 均为 p_m 的三次仪器化压入实验所得压痕的相对位置 关系如图 3 所示。第二次压痕与初次压痕的距离为初 次仪器化压入最大压入深度 h_m 的 5 倍,第三次压痕处 于初次压痕与第二次压痕的中间位置,定义压痕具有 特殊位置关系的多次仪器化压入为仪器化聚集式 Vickers 压入。定义第三次仪器化压入比功(W_c/W_{1})3 卸载功 W_{c3} 与加载功 W_{c3} 的比值,其中卸载功 W_{c3} 等于 第三次仪器化压入卸载曲线与载荷-位移曲线横坐标 所围面积,加载功 $W_{c3}=p_mh_{m3}/3$, h_{m3} 为第三次仪器化 压入最大压入深度。进而确定第三次和初次仪器化压 入比功之比[(W_c/W_{1})₃/(W_c/W_{1})₁。



First indentation impression Second indentation impression

图 3 仪器化聚集式 Vickers 压入所得压痕的相对位置关系 示意图

Fig. 3 Schematic diagram of special position relationships of indentation impressions by instrumented gathered indentation with Vickers indenter

假设被测材料为各向同性的均质、率无关固体, 定义其在弹性变形阶段的真实应力-应变关系遵循线 弹性关系: $\sigma = E\varepsilon$ ($\varepsilon \le \varepsilon_y$),塑性变形阶段的真实应力-应变关系遵循 Hollomon 幂硬化关系: $\sigma = \sigma_y(\varepsilon/\varepsilon_y)^n$ ($\varepsilon > \varepsilon_y$),其中和 ε_y 和 σ_y 分别表示材料屈服强度和屈服应变, n代表材料应变硬化指数。假设 Vickers 压头为弹性体, 弹性模量为 E_d , 泊松比为 ν_d 。

假设 Vickers 压头与被测材料之间无摩擦^[22],则 初次仪器化压入比功(*W_e*/*W_t*)₁、第三次和初次仪器化压 入比功之比[(*W_e*/*W_t*)₃/(*W_e*/*W_t*)₁]、初次仪器化压入名义 硬度 H_0 可分别表示为被测材料的弹性模量 E、泊松比 v、屈服强度 σ_y 、应变硬化指数 n 与 Vickers 压头的弹 性模量 E_d 、泊松比 v_d 以及初次最大压入深度 h_m 的函数:

$$(W_{\rm e}/W_{\rm t})_{\rm l} = \Gamma_{\rm W1}(\sigma_{\rm y}, n, E/(1-v^2), E_{\rm d}/(1-v^2_{\rm d}), h_{\rm m})$$
 (1)

$$[(W_{\rm e}/W_{\rm t})_3/(W_{\rm e}/W_{\rm t})_1] = \Gamma_{\rm R1}(\sigma_{\rm v}, n, E/(1-v^2), E_{\rm d}/(1-v^2_{\rm d}), h_{\rm m})$$
(2)

$$H_0 = \Gamma_{\rm H1}(\sigma_{\rm y}, n, E/(1-v^2), E_{\rm d}/(1-v^2_{\rm d}), h_{\rm m})$$
(3)

式中: $E/(1-v^2)$ 和 $E_d/(1-v_d^2)$ 分别为被测材料和Vickers 压头的平面应变弹性模量。

引入折合弾性模量 $E_r = [(1-v^2)/E + (1-v_d^2)/E_d]$ 及平 面应变弹性模量之比 $\eta = [E/(1-v^2)]/[E_d/(1-v_d^2)]$,应用 量纲 П 定理,式(1)、(2)和(3)可简化为

$$(W_{\rm e}/W_{\rm t})_{\rm l} = \Gamma_{\rm W2}(\sigma_{\rm y}/E_{\rm r}, n, \eta) \tag{4}$$

$$[(W_{\rm e} / W_{\rm t})_3 / (W_{\rm e} / W_{\rm t})_1] = \Gamma_{\rm R2}(\sigma_{\rm y} / E_{\rm r}, n, \eta)$$
(5)

$$H_0 / E_r = \Gamma_{\rm H2}(\sigma_y / E_r, n, \eta) \tag{6}$$

由式(4)可得

$$\sigma_{\rm y} / E_{\rm r} = \Gamma_{\rm W2}^{-1} [(W_{\rm e} / W_{\rm t})_{\rm l}, \, n, \eta]$$
⁽⁷⁾

将式(7)代入式(5)和式(6)可得

$$[(W_{\rm e} / W_{\rm t})_3 / (W_{\rm e} / W_{\rm t})_1] = \Gamma_{\rm R3}[(W_{\rm e} / W_{\rm t})_1, n, \eta]$$
(8)

$$H_0 / E_r = \Gamma_{\rm H3}[(W_e / W_t)_1, \, n, \eta]$$
(9)

由式(7)和式(9)可得

$$\sigma_{\rm v} / H_0 = \Gamma_4[(W_{\rm e} / W_{\rm t})_1, \, n, \eta]$$
(10)

2 有限元仿真

为获得式(8)、(9)和(10)的显示表达式,应用有限 元软件 ABAQUS 建立三维模型对仪器化聚集式 Vickers 压入被测材料的压入响应进行数值模拟。根据 图 1 所示的 Vickers 压头及图所示的三次仪器化压入 压痕的对称性,以图 1 所示的面 *A'OC*'为对称面,选 取 Vickers 压头的 1/2 及与压头相对应的被测材料的 1/2 用于有限元仿真。有限元划分的 Vickers 压头及被 测材料的总体网格和靠近压头尖端的局部网格如图 4 所示,Vickers 压头划分了 30000 个一阶四面体单元, 被测材料划分了 35000 个一阶六面体单元和 200000 个一阶四面体单元,有限元模型的网格收敛性和远场 无关性均符合要求。Vickers 压头的弹性模量 *E*d=1141



图 4 Vickers 压头与被测材料的有限元网格 Fig. 4 FE mesh of Vickers indenter and indented material: (a) Overall mesh; (b) Partial mesh

GPa, 泊松比 $\nu_{d} = 0.07$ 。被测材料弹性模量 *E* 取值为 70、200 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、0.30 和 0.45, 泊松比 ν 取固定值 $0.3^{[3,16]}$ 。被测材料和压头的平面应 变弹性模量之比 η 分别为 0.0671、0.1917 和 0.3834。 被测材料和压头间的库伦摩擦系数 *u* 取值为 0^[22]。

图 5 所示为有限元仿真所得对应不同 n 和 η 的 $[(W_e/W_t)_3/(W_e/W_t)_1]-(W_e/W_t)_1$ 关系。由图 5 可以看出,



图 5 不同 n 和 η 时[$(W_e/W_t)_3/(W_e/W_t)_1$]和 $(W_e/W_t)_1$ 的关系 Fig. 5 Relationship between [$(W_e/W_t)_3/(W_e/W_t)_1$] and $(W_e/W_t)_1$ curves at different values of n and η

对于确定的 n, η 对[$(W_e/W_t)_3/(W_e/W_t)_1$]- $(W_e/W_t)_1$ 关系的 影响较为有限。因此,利用二次多项式函数对 n 的 4 个不同取值情况下的[$(W_e/W_t)_3/(W_e/W_t)_1$]- $(W_e/W_t)_1$ 关系 进行拟合,其结果为

$$[(W_{\rm e} / W_{\rm t})_3 / (W_{\rm e} / W_{\rm t})_1]_i = \sum_{j=0}^2 a_{ij} (W_{\rm e} / W_{\rm t})_1^j$$
(11)

式中: *i*=1,…,4 分别对应应变硬化指数 *n* 的 4 个不同 取值: 0, 0.15, 0.30, 0.45; 系数 *a_{ij}(i*=1,…,4; *j*=0,1,2) 的取值见表 1。

表 1 系数 *a_{ij}(i=1,…,4; j=*0,1,2)的取值 **Table 1** Values of *a_i(i=1,…,4; i=*0,1,2)

Table I	values of $u_{ij}(i - 1)$, ,1,, 0,1,2)	
i	a_{i0}	a_{i1}	a_{i2}
1	0.955437	-1.167263	3.366529
2	0.969457	-0.103305	0.653656
3	1.161821	-0.202997	0.176002
4	1.339156	0.021071	-1.064269

图 6 所示为有限元仿真所得对应不同 n 和 η 的 $H_0/E_r 和(W_e/W_t)_1$ 关系。由图 6 可以看出,对于确定的 n 和 η 对 $H_0/E_r 和(W_e/W_t)_1$ 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 Vickers 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 $E_c=[(1-v^2)/E+1.32(1-v_d^2)/E_d]$,并替代折合弹 性模量 E_r ,可得 H_0/E_c 和(W_e/W_t)_1关系,其结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,对于确定的应变硬化指数 n, H_0/E_c 和(W_e/W_t)_1关系几乎不受 η 的影响。因此,利用 六次多项式函数对 n 的 4 个不同取值情况下的 H_0/E_c 和(W_e/W_t)_1关系进行拟合,其结果为

$$(H_0 / E_c)_i = \sum_{j=1}^{6} b_{ij} (W_e / W_t)_1^j$$
(12)

其中, *i*=1,…,4 分别对应 *n* 的 4 个不同取值: 0, 0.15, 0.30, 0.45; 系数 *b_{ij}(i*=1,…,4; *j*=1,…,6)的取值见表 2。 式(12)所代表的应变硬化指数 *n* 分别取 0、0.15、0.30 和 0.45 时, *H*₀/*E*_c和(*W*_c/*W*_t)₁关系如图 8 所示。

图 9 所示为有限元仿真所得对应不同应变硬化指数 n和 η 的 σ_v/H_0 和(W_c/W_t)₁关系。利用六次多项式函



图 6 对应不同 n和 η 时 H_0/E_r 和 $(W_e/W_t)_1$ 的关系

Fig. 6 Relationship between H_0/E_r and $(W_c/W_t)_1$ at different values of n and η : (a) n=0; (b) n=0.15; (c) n=0.30; (d) n=0.45



图7 对应不同 $n 和 \eta$ 时 $H_0/E_c 和(W_e/W_t)_1$ 的关系

表2 系数 b_{ii}(i=1,…,4; j=1,…,6)的取值

Fig.7 Relationship between H_0/E_c and $(W_e/W_t)_1$ at different values of *n* and η : (a) n=0; (b) n=0.15; (c) n=0.30; (d) n=0.45

Table 2 Values of $b_{ij}(i=1,\dots,4; j=1,\dots,6)$									
i	a_{i1}	a_{i2}	<i>a</i> _{<i>i</i>3}	a_{i4}	a_{i5}	a_{i6}			
1	0.193	-0.240	0.250	-0.220	0.139	-0.045			
2	0.176	-0.183	0.189	-0.212	0.157	-0.051			
3	0.161	-0.133	0.123	-0.171	0.148	-0.052			
4	0.148	-0.104	0.119	-0.221	0.214	-0.079			

$$\begin{array}{c} 0.08 \\ 0.07 \\ 0.06 \\ 0.05 \\ H \\ 0.03 \\ 0.02 \\ 0.01 \\ 0 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.02 \\ 0.01 \\ 0 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1.0 \\ (We/Wi)_1 \end{array}$$

图8 对应不同 n 时 H₀/E_c和(W_e/W_t)₁的关系

Fig. 8 Relationship between H_0/E_c and $(W_c/W_t)_1$ at different values of *n*

数对对应不同 n和 η 的 $\sigma_y/H_0 - (W_c/W_t)_1$ 关系进行拟合, 其结果为

$$(\sigma_{y} / H_{0})_{ij} = \sum_{k=0}^{6} c_{ijk} (W_{e} / W_{t})_{1}^{k}$$
(13)

式中: *i*=1,…,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}(i*=1,…,4; *j*=1,2,3; *k*=0,…,6) 的取值见表 3。

3 识别方法的建立

根据关系式(11)、(12)和(13),建立材料弹塑性参数仪器化聚集式 Vickers 压入识别方法,具体包括以下步骤。

 利用仪器化压入仪和 Vickers 压头对被测材料 实施设定某一最大压入载荷 pm 的初次仪器化压入测 试,获得初次仪器化压入载荷-位移曲线。利用该曲 线确定初次仪器化压入最大压入深度 hm、名义硬度 H₀和压入比功(We/Wt)1。







Fig. 9 Relationship between σ_y/H_0 and $(W_e/W_t)_1$ at different values of *n* and η : (a) η = 0.0671; (b) η =0.1917; (c) η =0.3834

表 3 系数 *c*_{*ijk*}(*i*=1,…,4; *j*=1,2,3; *k*=0,…,6)的取值 **Table 3** Values of *c*_{*ijk*}(*i*=1,…,4; *j*=1,2,3; *k*=0,…,6)

j	i	c_{ij0}	c_{ij1}	c_{ij2}	C _{ij3}	c _{ij4}	c _{ij5}	c_{ij6}
1 1 3 4	1	0.263	-0.551	12.162	-50.197	109.316	-113.567	45.809
	2	0.156	-0.453	13.557	-62.197	140.174	-146.744	58.705
	0.090	-0.825	16.452	-75.466	168.659	-175.193	69.424	
	4	0.074	-1.823	23.079	-100.624	215.981	-217.908	84.269
$ \begin{array}{c} 1\\ 2\\ 3\\ 4 \end{array} $	1	0.313	-2.199	28.156	-118.521	248.871	-247.817	94.584
	2	0.121	0.463	4.301	-23.030	60.139	-69.254	30.192
	3	0.060	-0.039	8.373	-41.023	97.274	-104.971	43.201
	4	0.037	-0.785	12.864	-58.256	130.119	-135.155	53.960
1 3 2 3 4	0.272	-0.893	14.444	-61.456	136.372	-143.144	57.540	
	2	0.149	-0.775	17.260	-81.189	182.141	-188.571	74.070
	3	0.064	-0.314	10.252	-47.981	109.674	-115.654	46.766
	4	0.012	0.042	3.365	-15.692	40.864	-49.056	23.324

2) 将被测材料沿 Vickers 压痕两对角线的角平分线所确定的 4 个方向中的任一方向平移 5hm的距离,然后对被测材料实施最大载荷与初次压入最大载荷相同的第二次仪器化压入测试,获得与第一个 Vickers 压痕相毗邻的第二个 Vickers 压痕。

3)将被测材料平移至初次与第二次压入位置中间,然后对被测材料实施最大载荷与初次压入最大载荷相同的第三次仪器化压入测试,获得相应的载荷-位移曲线。利用该曲线确定第三次仪器化压入比功(W_c/W_t)₃,进而确定被测材料第三次和初次仪器化压入

4) 根据初次仪器化压入比功(*W_e*/*W_t*)₁ 及关系式 (11)确定[(*W_e*/*W_t*)₃/(*W_e*/*W_t*)₁]_{*i*}(*i*=1,…,4)值, 然后根据 *n_i*(*i*=1,…,4)值(*n*=0, *n*=0.15, *n*=0.30, *n*=0.45),利用拉格 朗日插值公式确定 *n*:

$$n' = \sum_{i=1}^{4} n_i \prod_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{4} \{\{[(W_e / W_t)_3 / (W_e / W_t)_1] - [(W_e / W_t)_3 / (W_e / W_t)_1]_k\} / \{[(W_e / W_t)_3 / (W_e / W_t)_1]_i - [(W_e / W_t)_1]_i - [(W_e / W_t)_3 / (W_e / W_t)_1]_i - [(W_e / W_t)_3 / (W_e / W_t)_i]_i - [(W_e / W_t)_3 / (W_e / W_t)_i]_i - [(W_e / W_E / W_t)_i]_i - [(W_E / W_t)_i]_i - [(W_E / W_t)_i]_i -$$

 $[(W_e / W_t)_3 / (W_e / W_t)_1]_k \} \}$ (14)

从而进一步根据非负原则确定被测材料的应变硬 化指数 *n*:

$$n = \max(n', 0) \tag{15}$$

5) 根据初次仪器化压入比功(*W_e*/*W_t*)₁ 及关系式 (12)确定(*H₀/E_c*)_{*i*}(*i*=1,…,4)值, 然后根据 *n_i*(*i*=1,…,4)值 (*n*=0, *n*=0.15, *n*=0.30, *n*=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 *H₀/E_c*:

$$H_0 / E_c = \sum_{i=1}^4 (H_0 / E_c)_i \prod_{\substack{k=1\\k \neq i}}^4 [(n - n_k) / (n_i - n_k)]$$
(16)

根据名义硬度 $H_0 \gtrsim H_0 / E_c$ 值确定被测材料与金刚石 Vickers 压头的联合弹性模量 E_c :

$$E_{\rm c} = H_0 / (H_0 / E_{\rm c}) \tag{17}$$

进而确定被测材料的弹性模量 E:

$$E = (1 - v^2) / [1 / E_c - 1.32(1 - v_d^2 / E_d)]$$
(18)

式中:金刚石 Vickers 压头的弹性模量 E_d =1141 GPa, 泊松比 v_d =0.07,被测材料的泊松比v可根据材料手册 确定,如若不能,建议针对金属材料,泊松比v取值 0.3。

6) 根据初次仪器化压入比功(W_e/W_i)₁ 及关系式 (13)确定(σ_y/H_0)_{ij}(*i*=1,…,4; *j*=1,2,3)值, 然后根据被测材 料应变硬化指数识别结果 *n*、被测材料与金刚石 Vickers 压头的平面应变弹性模量之比 $\eta=[E/(1-v^2)]/[E_d/(1-v_d^2)]及 n_i(i=1,…,4)值(n_1=0, n_2=0.15, n_3=0.30, n_4=0.45)和 \eta_j(j=1,2,3)值(\eta_1=0.0671, \eta_1=0.1917, \eta_1=0.3834), 利用拉格朗日插值公式确定$ $<math>\sigma_y/H_0$:

$$\sigma_{y} / H_{0} = \sum_{i=1}^{4} \{ \sum_{j=1}^{3} (\sigma_{y} / H_{0})_{ij} \prod_{\substack{m=1\\m \neq j}}^{3} [(\eta - \eta_{m}) / (\eta_{j} - \eta_{m})] \}$$

$$\prod_{\substack{k=1\\k \neq i}}^{4} [(n - n_{k}) / (n_{i} - n_{k})]$$
(19)

根据名义硬度 H_0 及比值 σ_y / H_0 确定被测材料的 屈服强度 σ_y :

$$\sigma_{\rm y} = H_0(\sigma_{\rm y} / H_0) \tag{20}$$

进一步确定被测材料的条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为 $-\sigma^{1-n}[\sigma_{0.2}]$

$$\sigma_{0.2} = \sigma_{y}^{1-n} [\sigma_{0.2} + 0.002E]^{n}$$
⁽²¹⁾

7) 确定被测材料的屈服应变 $\varepsilon_y = \sigma_y / E$,由关系式 $\varepsilon_b = n[1 + (1 - 2\nu)\varepsilon_y^{1-n}\varepsilon_b^n]$ 确定 ε_b ,最后确定被测材料 的强度极限 $\sigma_b^{[23]}$:

$$\sigma_{\rm b} = \begin{cases} \sigma_{\rm y} / \exp(2\nu\varepsilon_{\rm y}) & \varepsilon_{\rm b} \leq \varepsilon_{\rm y} \\ \sigma_{\rm y} (\varepsilon_{\rm b} / \varepsilon_{\rm y})^n / \exp[\varepsilon_{\rm b} + (2\nu - 1)\varepsilon_{\rm y}^{1-n}\varepsilon_{\rm b}^n] & \varepsilon_{\rm b} > \varepsilon_{\rm y} \end{cases}$$

$$(22)$$

4 实验验证

本文选择 6061 铝合金、S45C 碳钢、SS316 不锈 钢、SS304 不锈钢和黄铜用于检验本文所建立方法的 有效性。标准单轴拉伸试验所得 5 种金属材料弹塑性 参数见表 4。

表4 单轴拉伸试验所得金属材料弹塑性参数的数值

 Table 4
 Elastic-plastic parameters of metals determined by uniaxial tensile test

Metal	п	E/GPa	$\sigma_{0.2}/\mathrm{MPa}$	$\sigma_{\rm b}/{ m MPa}$
6061 aluminum alloy	0.052	71	299.4	366.3
S45C carbon steel	0.176	201	431.1	612.8
SS316 stainless steel	0.134	184	610.1	827.5
SS304 stainless steel	0.189	170	510.0	870.5
Brass	0.125	83	346.7	421.2

利用宏观仪器化压入仪和金刚石 Vickers 压头对 上述 5 种金属材料不同区域重复进行 5 次仪器化聚集 式 Vickers 压入测试,最大压入载荷设定为 50 N,图 10 所示为 5 种金属材料仪器化聚集式 Vickers 压入 5 种金属材料所得压痕形貌,图 11 所示为仪器化聚集式 Vickers 压入 5 种金属材料所得的初次及第三次载荷一 位移曲线。

根据本文所提方法对 5 种金属材料聚集式压入所 得载荷-位移曲线进行分析,可分别确定 5 种金属材 料的初次仪器化压入比功(W_e/W_t)₁、第三次和初次仪器 化压入比功之比[(W_e/W_t)₃/(W_e/W_t)₁]和初次仪器化压入 名义硬度 H_0 ,最终确定 5 种金属材料的应变硬化指数 $n、弹性模量 E、条件屈服强度 \sigma_{0.2}和强度极限 \sigma_b。并$ 与单轴拉伸试验数值进行比较,结果列于表 5 中。从表 5 中可以看出, 5 种金属材料的应变硬化指数 <math>n识 (c)

(e)

(d)



First indentation impression Second indentation impression



Third indentation impression



First indentation impression Second indentation impression



Third indentation impression



First indentation impression Second indentation impression



Third indentation impression



First indentation impression







First indentation impression Second indentation impression



Third indentation impression

图 10 金属材料单一 Vickers 压头聚集式仪 器化压入的压痕形貌

Fig. 10 Indentation impressions obtained from instrumented gathered indentation with Vickers indenter of metals: (a) 6061 aluminum alloy; (b) S45C carbon steel; (c) SS316 stainless steel; (d) SS304 stainless steel; (e) Brass



图 11 仪器化聚集式 Vickers 压入金属材料所得初次及第三次载荷-位移曲线

Fig. 11 First and third load-displacement curves obtained from instrumented gathered indentation with Vickers indenter of metals: (a) 6061aluminum alloy; (b) S45C carbon steel; (c) SS316 stainless steel; (d) SS304 stainless steel; (e) Brass

第 29 卷第 11 期

别绝对误差为-0.026~0.063, 弹性模量 E 识别相对误 差为-8.62%~12.84%,条件屈服强度 σ_{0.2} 识别相对误差 为-8.58%~8.06%,强度极限 σ_b 识别相对误差为 -1.24%~13.99%。进一步根据仪器化聚集式 Vickers 压

入识别所得 5 种金属的应变硬化指数 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 关系,该关系与单轴拉伸试验所得真实应力-应变关 系的比较如图 12 所示。由图 12 可以看出,两者具有

0

0.04

0.08

З

0.12

0.16

, , ,

Table 5 Elastic-plastic	e parame	ters detern	nined by instrumented	gathere	d indenta	tion with	Vickers	indenter	ſ		
Metal	H ₀ / GPa	$(W_{\rm e}/W_{\rm t})$	$[(W_{\rm e}/W_{\rm t})_3/(W_{\rm e}/W_{\rm t})_1]$	n	Δn	E/ GPa	E _{Err} / %	$\sigma_{0.2}$ / MPa	σ _{0.2,Err} / %	σ _b / MPa	$\sigma_{ m b, Err}$ / %
6061 aluminum alloy	1.19	0.103	0.877	0.040	-0.012	67.01	-5.63	323.49	8.06	344.86	7.36
S45C carbon steel	2.12	0.080	0.978	0.150	-0.026	186.74	-7.10	409.84	-4.93	604.97	-1.24
SS316 stainless steel	2.71	0.116	1.010	0.197	0.063	168.14	-8.62	557.77	-8.58	935.85	13.99
SS304 stainless steel	2.58	0.110	1.027	0.212	0.023	168.56	-0.85	503.58	-1.26	906.29	3.36
Brass	1.49	0.101	0.955	0.136	0.011	93.66	12.84	332.21	-4.17	449.56	-0.40
400				90	0						
350 (a)				80	(b)					_	
200				70	0-						
300-				60	00-	/					
²⁵⁰				e ^{re} 50	0-	1	-				
200				₩ 40	in the						
150-				30							
100-	— Unia	xila tensile	test No.1	20		– Uniaxi	ila tensile	e test No.	1		
50 -	— Uniaz	cila tensile	test No.2	10		– Uniaxi	ila tensile	e test No.	2		
-	- Instru	imented ga	thered indentation	10	" – ["]	- Instru	mented g	gathered 1	ndentatio	n	
0	0.02	0.04	0.06 0.08		0 0.	.02 0.0	0.0	06 0.08	0.10	0.12	
1200		3		120	0		3				
(c)					(d)						
1000 -				100	0						
800				80	0-	1-					
Pa (•			a							
				₩ 60	0						
400				40							
	- Uniax	ila tensile t	est No.1		_	– Uniaxi	la tensile	e test No.	1		
200 —	– Uniax	ila tensile to	est No.2	20	0 —	– Uniaxi	la tensile	e test No.	2		
-	- Instru	mented gat	hered indentation		-	- Instru	mented g	athered in	ndentatio	n	
0	0.04	0.08	0.12 0.16	5	0	0.05	0.1	0	0.15	0.20	
600		3					3				
(6)				<u>冬</u>	12 金	属材料影	聚集式 仪	〈器化压	入所得	真实	
500-				应	力-应变	关系与	单轴拉	伸试验周	所得真实	实应	
400				力	-应变关	系的比较	ζ				
				Fig	g. 12 C	ompariso	n of tru	e stress-	strain cu	rves	
₹ 300				ob	tained by	y instrur	nented	gathered	indenta	ation	
6				wi	th Vicke	rs indent	ter and	uniaxial	tensile	true	
200		uilo to	test No 1	str	ess-strair	1 curves	of metal	ls: (a) 60	61alumi	num	
100	— Uniaz	xila tensile	test No.1	all	oy; (b) S	45C carb	on steel	l; (c) SS	316 stair	nless	
-	- Instr	amented ga	thered indentation	ste	el; (d) SS	304 staiı	iless ste	el; (e) Br	ass		

表5 金属弹塑性参数仪器化聚集式 Vickers 压入识别结果

较好的一致性。综观以上实验结果表明,本文所建立 的金属材料弹塑性参数仪器化聚集式 Vickers 压入识 别方法是可行的和非常有效的。

5 结论

 本文应用量纲分析和有限元数值仿真建立了 单一 Vickers 压头三次聚集式仪器化压入响应参数与 金属材料弹塑性参数间的函数关系,以此为基础建立 了金属材料弹塑性参数仪器化聚集式 Vickers 压入识 别方法。首先,利用初次仪器化压入比功(W_e/W_t)₁ 与 第三次和初次仪器化压入比功之比[(W_e/W_t)₃/(W_e/W_t)₁] 确定金属材料的应变硬化指数 n;其次,利用初次仪 器化压入比功(W_e/W_t)₁、初次仪器化压入名义硬度 H₀ 及识别所得应变硬化指数 n 确定金属材料的弹性模量 E;最后,利用初次仪器化压入比功(W_e/W_t)₁、初次仪 器化压入名义硬度 H₀及识别所得弹性模量 E 和应变 硬化指数 n 确定金属材料的条件屈服强度 σ_{0.2},进而 确定确定金属材料的强度极限 σ_b。

2) 6061 铝合金、S45C 碳钢、SS316 不锈钢、SS304 不锈钢和黄铜 5 种金属材料的应变硬化指数 n、弹性 模量 E、条件屈服强度 σ_{0.2}和强度极限 σ_b的聚集式仪 器化 Vickers 压入识别结果均满足工程需要,且识别 所得五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,验证了本文所提方法的有效性。

REFERENCES

- 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] 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.
- [3] 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.
- [4] GALANOV B A, DUB S N. Critical comments to the Oliver-Pharr measurement technique of hardness and elastic modulus by instrumented indentations and refinement of its

basic relations[J]. Journal of Superhard Materials, 2017, 39(6): 373-389.

- [5] KOSSMAN S, COOREVITS T, LOST A, CHICOT D. A new approach of the Oliver and Pharr model to fit the unloading curve from instrumented indentation testing[J]. Journal of Materials Research, 2017, 32: 1–11.
- [6] 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.
- [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] 陈 伟, 马德军, 王家梁, 黄 勇. 金属材料弹性模量的 仪器化压入测试[J]. 机械工程材料, 2015, 39(8): 47-50.
 CHEN Wei, MA De-jun, WANG Jia-liang, HUANG Yong. Measurement of elastic modulus of metals by instrumented indentation[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(8): 47-50.
- [9] 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.
- [10] LE M Q. Improved reverse analysis for material characterization with dual sharp indenters[J]. International Journal of Solids and Structures. 2011, 48: 1600–1609.
- [11] 郭俊宏. 仪器化压入仪优化设计与材料弹塑性参数压入 测试方法研究[D]. 北京: 陆军装甲兵学院, 2013: 45-61. GUO Jun-hong. Methodology for evaluating elastic-plastic properties of materials by instrumented indentation and depth-sensing measuring technique[D]. Beijing: Academy of Army Armored Force, 2013: 45-61.
- [12] 孙 亮. 金属材料弹塑性参数压入识别方法研究[D]. 北京: 陆军装甲兵学院, 2015: 39-53.
 SUN Liang. Study on methods for determining the elastic-plastic properties of metals by indentation[D]. Beijing: Academy of Army Armored Force, 2015: 39-53.
- [13] 刘晓坤, 蔡力勋, 陈 辉. 获取材料应力应变关系的锥形 压入新方法[J]. 中国测试, 2016, 42(4): 5-8.
 LIU Xiao-kun, CAI Li-xun, CHEN Hui. A new conical indentation method for obtaining stress-strain relation of materials[J]. China Measurement & Test, 2016, 42(4): 5-8.
- [14] CHOLLACOOP N, DAO M, SURESH S. Depth-sensing instrumented indentation with dual sharp indenters[J]. Acta Mater, 2003, 51: 3713–3729.
- [15] 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.

[16] 马德军,陈 伟,宋仲康,郭俊宏.金属材料塑性参数仪器化压入识别方法[J].中国有色金属学报,2014,24(4):958-973.

MA De-jun, CHEN Wei, SONG Zhong-kang, GUO Jun-hong. Method for determining plastic properties of metals by instrumented indentation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(4): 958–973.

- [17] CHEN Wei, MA De-jun, WANG Jia-liang, HUANG Yong. Method for determining the plastic properties of metallic materials by instrumented indentation with dual pyramidal indenters[J]. Advanced Materials Research, 2014, 941/944: 1445–1452.
- [18] 陈 伟,马德军,郭俊宏,宋仲康,王家梁.基于 Berkovich 压痕的金属材料弹塑性参数仪器化压入识别方 法[J].中国有色金属学报,2015,25(6):1512-1524.
 CHEN Wei, MA De-jun, GUO Jun-hong, SONG Zhong-kang, WANG Jia-liang. Method for determining elastic-plastic properties of metals by instrumented indentation with Berkovich indentation impression[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(6): 1512-1524.
- [19] 张泰华. 微/纳米力学测试技术-仪器化压入的测量、分析、 应用及其标准化[M]. 北京:科学技术出版社, 2013: 48-49.

ZHANG Tai-hua. Micro and nano mechanics testing

technology-measurement, analysis, application and standardization of instrumented indentation[M]. Beijing: Science Press, 2013: 48–49.

- [20] 姚 博. 获取材料单轴本构关系的压入测试方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012: 38-43.
 YAO Bo. Indentation testing method to obtain uniaxial constitutive relationships of materials[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012: 38-43.
- [21] CHANG C. Determining the elastic-plastic properties of metallic materials through instrumented indentation[D]. Spain Madrid: The Technical University of Madrid, 2016.
- [22] 陈 伟, 马德军, 宋仲康, 王家梁, 郭俊宏. 基于 Vickers 压痕的金属材料弹塑性参数仪器化压入识别方法[J]. 塑 性工程学报, 2015, 22(3): 12-22.
 CHEN Wei, MA De-jun, SONG Zhong-kang, WANG Jia-liang, GUO Jun-hong. A method for determining the elastic-plastic properties of metals by instrumented indentation with Vickers indentation impression[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22(3): 12-22.
- [23] 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: 143-147.
 MA De-jun. Principles of measuring mechanical properties of materials by instrumented indentation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 143-147.

Method for determining elastic-plastic parameters of metals by instrumented gathered indentation with Vickers indenter

SHI Xin-zheng¹, CHEN Wei¹, CHEN Ping², MA De-jun¹, SUN Liang¹

Department of Mechanical Engineering, Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China;
 Department of Basic, Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China)

Abstract: Using single Vickers indenter, three instrumented indentation experiments of which indentation impressions have special position relationships were conducted. $[(W_e/W_t)_3/(W_e/W_t)_1]$ was introduced as an independent instrumented indentation response parameter according to the third load-displacement curve and the first load-displacement curve. Based on dimensional analysis and finite element simulations, the dimensionless relationships among three independent instrumented indentation response parameters (the other two parameters are the first ratio of indentation work $(W_e/W_t)_1$ and nominal hardness H_0 of first instrumented indentation) and the elastic–plastic parameters were established. Therefore, the method for determining elastic–plastic parameters of metals by instrumented gathered indentation with Vickers indenter was proposed. The strain hardening exponent *n*, elastic modulus *E*, conditional yield strength $\sigma_{0.2}$ and ultimate strength σ_b of metals can be identified by using the load–displacement curves obtained from instrumented gathered indentation with Vickers indenter. The effectiveness of the method is validated by the tests. **Key words:** instrumented gathered indentation; metal; elastic–plastic parameters

Corresponding author: CHEN Wei; Tel: +86-15120029137; E-mail: chen04041530@163.com

Received date: 2018-10-09; Accepted date: 2019-03-25