



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108414379 A

(43)申请公布日 2018.08.17

(21)申请号 201810216778.4

(22)申请日 2018.03.16

(71)申请人 太原理工大学

地址 030024 山西省太原市迎泽西大街79号

(72)发明人 肖革胜 金涛 刘二强 段茜
树学峰 李志刚 邢学刚

(74)专利代理机构 太原科卫专利事务所(普通合伙) 14100

代理人 朱源

(51)Int.Cl.

G01N 3/42(2006.01)

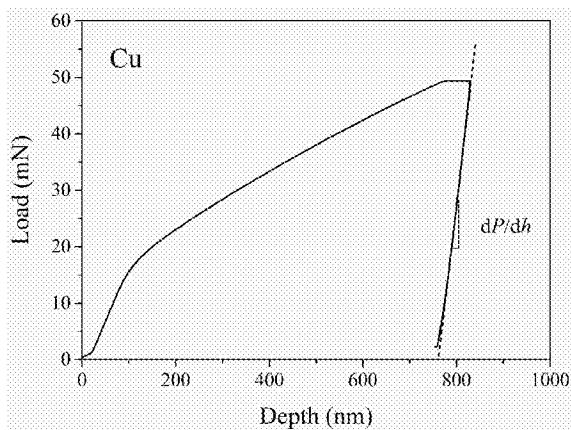
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54)发明名称

一种原位压入测试提取金属弹塑性参数的方法

(57)摘要

本发明公开了一种原位压入测试提取金属材料弹塑性参数的方法:采用圆柱形和两种不同锥角压头进行测试,得到金属的弹性模量并结合塑性应变梯度理论给出去除压入梯度效应影响的载荷-深度曲线(P_0-h),进一步通过数值模拟反演得到两种锥角压头作用下的特征应力 σ_r ,结合不同锥角下的特征应变 ϵ_r ,代入幂强化弹塑性本构关系中求解即得被测材料的屈服应力 σ_y 与硬化指数 n ;该方法准确性高、去除了压入梯度效应的影响并从数学上保证了所得弹塑性本构关系的唯一性,从而提高了基于微纳米压入法提取金属材料弹塑性参数的有效性。



1. 一种原位压入测试提取金属弹塑性参数的方法,其特征在于:所述方法是采用圆柱形金刚石压头测试结合两种不同锥角三棱锥金刚石压头测试来获取金属材料幂强化弹塑性本构关系,包括如下步骤:

1) 采用圆柱形金刚石压头对金属进行微压入测试,通过卸载曲线得到折合模量 E_r 及金属的弹性模量 E ;

$$dP/dh = 2E_r a \quad (1)$$

a 为圆柱形金刚石压头的半径, P 为压入载荷, h 为压入深度;

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (2)$$

E 和 ν 为被测材料的弹性模量与泊松比; E_i 和 ν_i 为金刚石压头的弹性模量与泊松比, $E_i = 1141\text{Gpa}$, $\nu_i = 0.07$;

2) 采用两种不同锥角的三棱锥金刚石压头并结合连续刚度测量法对金属进行压入测试,得到压入载荷-压入深度曲线($P-h$)与接触刚度的连续测量值($S-h$);

3) 基于接触面积 A_c -接触刚度 S -折合模量 E_r 关系式与硬度公式得到真实压入接触面积 A_c 及硬度 H 随压入深度 h 的变化值($A_c-h, H-h$);

$$A_c = \frac{S^2 \pi}{4\beta^2 E_r^2} \quad (3)$$

$$H = \frac{4\beta^2 E_r^2 P}{\pi S^2} \quad (4)$$

其中 $\beta = 1$;

4) 采用基于晶体细观机制的塑性应变梯度理论对2)得出的压入载荷-压入深度曲线($P-h$)修正后,得到去除压入梯度效应影响的硬度值 H_0 及载荷-深度曲线(P_0-h);

$$H^2 = H_0^2 + \frac{h^* H_0^2}{h} \quad (5)$$

$$P_0 = H_0 A_c \quad (6)$$

其中 h^* 为特征长度;

5) 通过数值模拟并结合4)所得 P_0-h 曲线得到两种不同锥角压头作用下被测材料的特征应力 σ_r ,进一步结合不同锥角压头下的特征应变值 ε_r 得到两组特征应力-特征应变值($\sigma_r-\varepsilon_r$);

$$\frac{C}{\sigma_r} = \Pi \left(\frac{E_r}{\sigma_r} \right) \quad (C = dP_0/dh^2) \quad (7)$$

$$\varepsilon_r = 0.0319 \cot \alpha \quad (8)$$

α 为三棱锥压头的等效半锥角;

6) 将5)所得结果代入幂强化弹塑性本构关系并结合1)所得弹性模量值 E ,通过求解方程组即可得到被测材料的屈服应力 σ_y 与硬化指数 n ;

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \sigma < \sigma_y \\ R\varepsilon^n & \sigma \geq \sigma_y \end{cases} \quad (9)$$

其中 σ 和 ε 分别为本构关系中的应力和应变, R 为强度系数;

$$\sigma_r = R \left(\frac{\sigma_r}{E} + 2\varepsilon_r \right)^n = \frac{E^n}{\sigma_y^{n-1}} \left(\frac{\sigma_r}{E} + 2\varepsilon_r \right)^n \quad (10)。$$

一种原位压入测试提取金属弹塑性参数的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及材料力学性能的测试表征方法,具体为一种原位压入测试提取金属弹塑性参数的方法。

背景技术

[0002] 工程材料(尤其是金属材料)的力学行为是其工程应用的重要基础,相关力学性能参数的有效获取是工程设计分析的重要前提。传统测试金属弹塑性性能的拉伸/压缩法要求试样尺寸较大且须满足相关标准,随着微加工制造领域的不断发展,相关器件材料的特征尺寸已越来越小,传统拉压法已经不能满足该领域的测试需求。

[0003] 基于接触力学理论发展起来的仪器化微纳米压入测试法目前已广泛应用于表面工程、微机电系统及生物工程领域中功能材料力学性能的测试表征,该方法使用不同形状的硬质压头(一般为金刚石)原位压入被测材料表面,压入过程中仪器自动记录实时压入载荷与压入深度(P-h),并通过相关力学模型得到材料的力学性能参数;相比于传统拉伸/压缩测试,压入法对材料形状尺寸无过多要求,只需提供一定光滑平整的表面即可。

[0004] 通过微纳米压入测试提取金属材料弹塑性参数的相关研究目前主要存在以下问题:压入接触面积的准确获取,弹塑性本构关系的唯一性及压入梯度效应的影响等,急需发展一种高效准确的提取金属弹塑性参数的压入测试表征方法。

发明内容

[0005] 本发明为了解决微纳米压入测试中,压入接触面积准确获取以及弹塑性本构关系的唯一性及压入梯度效应的影响的问题,提供了一种原位压入测试提取金属弹塑性参数的方法。

[0006] 本发明是通过如下技术方案来实现的:一种原位压入测试提取金属弹塑性参数的方法,所述方法是采用圆柱形金刚石压头测试结合两种不同锥角三棱锥金刚石压头测试来获取金属材料强化弹塑性本构关系,包括如下步骤:

[0007] 1) 采用圆柱形金刚石压头对金属进行微压入测试,通过卸载曲线得到折合模量 E_r 及金属的弹性模量 E ;

[0008] $dP/dh=2E_r a$ (1)

[0009] a 为圆柱形金刚石压头的半径, P 为压入载荷, h 为压入深度;

[0010]
$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i}$$
 (2)

[0011] E 和 ν 为被测材料的弹性模量与泊松比; E_i 和 ν_i 为金刚石压头的弹性模量与泊松比, $E_i=1141\text{Gpa}$, $\nu_i=0.07$;

[0012] 2) 采用两种不同锥角的三棱锥金刚石压头并结合连续刚度测量法(CSM, W.C.Oliver, J.B.Pethica, U.S. Patent No. 4848141, 1989)对金属进行压入测试,得到压入载荷-压入深度曲线(P-h)与接触刚度的连续测量值(S-h);

[0013] 3) 基于接触面积 A_c -接触刚度 S -折合模量 E_r 关系式与硬度公式得到真实压入接触面积 A_c 及硬度 H 随压入深度的变化值(A_c - h 、 H - h)；

$$[0014] \quad A_c = \frac{S^2 \pi}{4\beta^2 E_r^2} \quad (3)$$

$$[0015] \quad H = \frac{4\beta^2 E_r^2 P}{\pi S^2} \quad (4)$$

[0016] 其中 $\beta=1$ (张泰华, 微/纳米力学测试技术及其应用, 北京: 机械工业出版社, 2004.10.); 4) 采用基于晶体细观机制的塑性应变梯度理论 (MSG, William D. Nix, Huajian Gao. Indentation size effects in crystalline materials: A law for strain gradient plasticity, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1998, 46 (3): 411-425) 对2) 得出的压入载荷-压入深度曲线 (P - h) 修正后, 得到去除压入梯度效应影响的硬度值 H_0 及载荷-深度曲线 (P_0 - h)；

$$[0017] \quad H^2 = H_0^2 + \frac{h^* H_0^2}{h} \quad (5)$$

$$[0018] \quad P_0 = H_0 A_c \quad (6)$$

[0019] 其中 h^* 为特征长度 (参考文献中有 h^* 的确定方法)；

[0020] 5) 通过数值模拟并结合4) 所得 P_0 - h 曲线得到两种不同锥角压头作用下被测材料的特征应力 σ_r , 进一步结合不同锥角压头下的特征应变值 ε_r 得到两组特征应力-特征应变值 (σ_r - ε_r)；

$$[0021] \quad \frac{C}{\sigma_r} = \Pi \left(\frac{E_r}{\sigma_r} \right) \quad (C = dP_0/dh^2) \quad (7)$$

$$[0022] \quad \varepsilon_r = 0.0319 \cot \alpha \quad (8)$$

[0023] α 为三棱锥压头的等效半锥角；

[0024] 6) 将5) 所得结果代入幂强化弹塑性本构关系 (Xi Chen, Nagahisa Ogasawara, Manhong Zhao, Norimasa Chiba. On the uniqueness of measuring elastoplastic properties from indentation: The indistinguishable mystical materials, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55: 1618-1660.) 并结合1) 所得弹性模量值 E , 通过求解方程组即可得到被测材料的屈服应力 σ_y 与硬化指数 n ；

$$[0025] \quad \sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \sigma < \sigma_y \\ R\varepsilon^n & \sigma \geq \sigma_y \end{cases} \quad (9)$$

[0026] 其中 σ 和 ε 分别为本构关系中的应力和应变, R 为强度系数, 均可由参考文献中得知, 可由上述公式演变出以下公式：

$$[0027] \quad \sigma_r = R \left(\frac{\sigma_r}{E} + 2\varepsilon_r \right)^n = \frac{E^n}{\sigma_y^{n-1}} \left(\frac{\sigma_r}{E} + 2\varepsilon_r \right)^n \quad (10)$$

[0028] 本发明采用圆柱形和两种不同锥角压头进行测试, 得到金属的弹性模量并结合塑性应变梯度理论给出去除压入梯度效应影响的载荷-深度曲线 (P_0 - h), 进一步通过数值模拟反演得到两种锥角压头作用下的特征应力 σ_r , 结合不同锥角下的特征应变 ε_r , 代入幂强化

弹塑性本构关系中求解即得被测材料的屈服应力 σ_y 与硬化指数 n 。

[0029] 与现有技术相比本发明具有以下有益效果:本发明所述的原位压入测试提取金属弹塑性参数的方法准确性高、去除了压入梯度效应的影响并从数学上保证了所得弹塑性本构关系的唯一性,从而提高了基于微纳米压入法提取金属材料弹塑性参数的有效性。

附图说明

[0030] 图1:柱形压头作用下晶体铜的压入载荷-深度曲线。

[0031] 图2:不同锥角压头作用下晶体铜的连续刚度测量值。

[0032] 图3:不同锥角压头作用下晶体铜的载荷-深度曲线(P-h)及修正后的 P_0 -h曲线。

[0033] 图4:晶体铜的幂强化弹塑性本构关系。

[0034] 图5:柱形压头作用下晶体铝的压入载荷-深度曲线。

[0035] 图6:不同锥角压头作用下晶体铝的连续刚度测量值。

[0036] 图7:不同锥角压头作用下晶体铝的载荷-深度曲线(P-h)及修正后的 P_0 -h曲线。

[0037] 图8:晶体铝的幂强化弹塑性本构关系。

具体实施方式

[0038] 以下结合具体实施例对本发明作进一步说明。

[0039] 一种原位压入测试提取金属弹塑性参数的方法,所述方法是采用圆柱形金刚石压头测试结合两种不同锥角三棱锥金刚石压头测试来获取金属材料幂强化弹塑性本构关系,包括如下步骤:

[0040] 1)采用圆柱形金刚石压头对金属进行微压入测试,通过卸载曲线得到折合模量 E_r 及金属的弹性模量 E ;

$$[0041] \quad dP/dh=2E_r a \quad (1)$$

[0042] a 为圆柱形金刚石压头的半径, P 为压入载荷, h 为压入深度;

$$[0043] \quad \frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (2)$$

[0044] E 和 ν 为被测材料的弹性模量与泊松比; E_i 和 ν_i 为金刚石压头的弹性模量与泊松比, $E_i=1141\text{Gpa}$, $\nu_i=0.07$;

[0045] 2)采用两种不同锥角的三棱锥金刚石压头并结合连续刚度测量法对金属进行压入测试,得到压入载荷-压入深度曲线(P-h)与接触刚度的连续测量值(S-h);

[0046] 3)基于接触面积 A_c -接触刚度 S -折合模量 E_r 关系式与硬度公式得到真实压入接触面积 A_c 及硬度 H 随压入深度的变化值(A_c -h、 H -h);

$$[0047] \quad A_c = \frac{S^2 \pi}{4\beta^2 E_r^2} \quad (3)$$

$$[0048] \quad H = \frac{4\beta^2 E_r^2 P}{\pi S^2} \quad (4)$$

[0049] 其中 $\beta=1$;

[0050] 4)采用基于晶体细观机制的塑性应变梯度理论对2)得出的压入载荷-压入深度曲线(P-h)修正后,得到去除压入梯度效应影响的硬度值 H_0 及载荷-深度曲线(P_0 -h);

$$[0051] \quad H^2 = H_0^2 + \frac{h^* H_0^2}{h} \quad (5)$$

$$[0052] \quad P_0 = H_0 A_c \quad (6)$$

[0053] 其中 h^* 为特征长度；

[0054] 5) 通过数值模拟并结合4) 所得 P_0-h 曲线得到两种不同锥角压头作用下被测材料的特征应力 σ_r , 进一步结合不同锥角压头下的特征应变值 ε_r 得到两组特征应力-特征应变值($\sigma_r-\varepsilon_r$)；

$$[0055] \quad \frac{C}{\sigma_r} = \Pi \left(\frac{E_r}{\sigma_r} \right) \quad (C = dP_0/dh^2) \quad (7)$$

$$[0056] \quad \varepsilon_r = 0.0319 \cot \alpha \quad (8)$$

[0057] α 为三棱锥压头的等效半锥角；

[0058] 6) 将5) 所得结果代入幂强化弹塑性本构关系并结合1) 所得弹性模量值 E , 通过求解方程组即可得到被测材料的屈服应力 σ_y 与硬化指数 n ；

$$[0059] \quad \sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \sigma < \sigma_y \\ R\varepsilon^n & \sigma \geq \sigma_y \end{cases} \quad (9)$$

[0060] 其中 σ 和 ε 分别为本构关系中的应力和应变, R 为强度系数；

$$[0061] \quad \sigma_r = R \left(\frac{\sigma_r}{E} + 2\varepsilon_r \right)^n = \frac{E^n}{\sigma_y^{n-1}} \left(\frac{\sigma_r}{E} + 2\varepsilon_r \right)^n \quad (10)$$

[0062] 实施例1

[0063] 本实施例是对晶体铜弹塑性参数的提取。包括如下步骤：

[0064] 1) 采用直径为 $5.5\mu\text{m}$ 的圆柱形金刚石压头对晶体铜进行微压入测试, 由卸载曲线(如图1) 得到其折合模量 E_r 为: 129.5GPa , 相应的弹性模量 E 为: 130.1GPa (铜泊松比 ν 设置为 0.33)；

[0065] 2) 采用两种不同锥角的三棱锥金刚石压头(等效半锥角分别为 61.43° 、 70.32°) 并结合连续刚度测量法(CSM) 对金属铜进行压入测试, 得到压入载荷-深度曲线($P-h$) 与接触刚度的连续测量值($S-h$), 如图2；

[0066] 3) 基于接触面积-刚度-折合模量关系式与硬度公式得到压入过程中压头与铜的真实接触面积及其硬度随压入深度的变化值(A_c-h 、 $H-h$)；

[0067] 4) 采用基于晶体细观机制的塑性应变梯度理论(MSG), 对 $H^2 = \frac{1}{h}$ 曲线进行线性拟合, 同时对压入载荷-压入深度曲线($P-h$) 进行修正, 即得去除压入梯度效应影响的铜硬度值 H_0 及相应的载荷-深度曲线(P_0-h), 如图3；

[0068] 5) 对修正后的 P_0-h 曲线进行拟合得到不同锥角压头作用下铜的加载常数 C , 假设材料为理想弹塑性, 通过数值模拟反推得到不同锥角压头作用下铜的特征应力 σ_r , 进一步结合不同锥角压头下的特征应变 ε_r 即得到两组特征应力-特征应变值($\sigma_r-\varepsilon_r$)；

[0069] 6) 结合1) 所得弹性模量 E , 将5) 所得两组特征应力-特征应变值代入幂强化弹塑性本构关系, 经求解方程组得到铜的屈服应力 σ_y 与硬化指数 n 及二者的幂强化弹塑性本构关系, 如图4。

[0070] 实施例2

[0071] 1) 采用直径为 $5.5\mu\text{m}$ 的圆柱形金刚石压头对晶体铝进行微压入测试,由卸载曲线(如图5)得到其折合模量 E_r 为 76.6GPa ,相应的弹性模量 E 为 73.2GPa (铝的泊松比 ν 设置为 0.33);

[0072] 2) 采用两种不同锥角的三棱锥金刚石压头(等效半锥角分别为 61.43° 、 70.32°)并结合连续刚度测量法(CSM)对金属铝进行压入测试,得到压入载荷-深度曲线($P-h$)与接触刚度的连续测量值($S-h$),如图6;

[0073] 3) 基于接触面积-刚度-折合模量关系式与硬度公式得到压入过程中压头与铝的真实接触面积及其硬度随压入深度的变化值(A_c-h 、 $H-h$);

[0074] 4) 采用基于晶体细观机制的塑性应变梯度理论(MSG),对 $H^2 - \frac{1}{h}$ 曲线进行线性拟合,同时对压入载荷-压入深度曲线($P-h$)进行修正,即得去除压入梯度效应影响的铝硬度值 H_0 及相应的载荷-深度曲线(P_0-h),如图7;

[0075] 5) 对修正后的 P_0-h 曲线进行拟合得到不同锥角压头作用下铝的加载常数 C ,假设材料为理想弹塑性,通过数值模拟反推得到不同锥角压头作用下铝的特征应力 σ_r ,进一步结合不同锥角压头下的特征应变 ε_r 即得到两组特征应力-特征应变值($\sigma_r-\varepsilon_r$);

[0076] 6) 结合1)所得弹性模量,将5)所得两组特征应力-特征应变值代入幂强化弹塑性本构关系,经求解方程组得到铝的屈服应力 σ_y 与硬化指数 n 及二者的幂强化弹塑性本构关系,如图8。

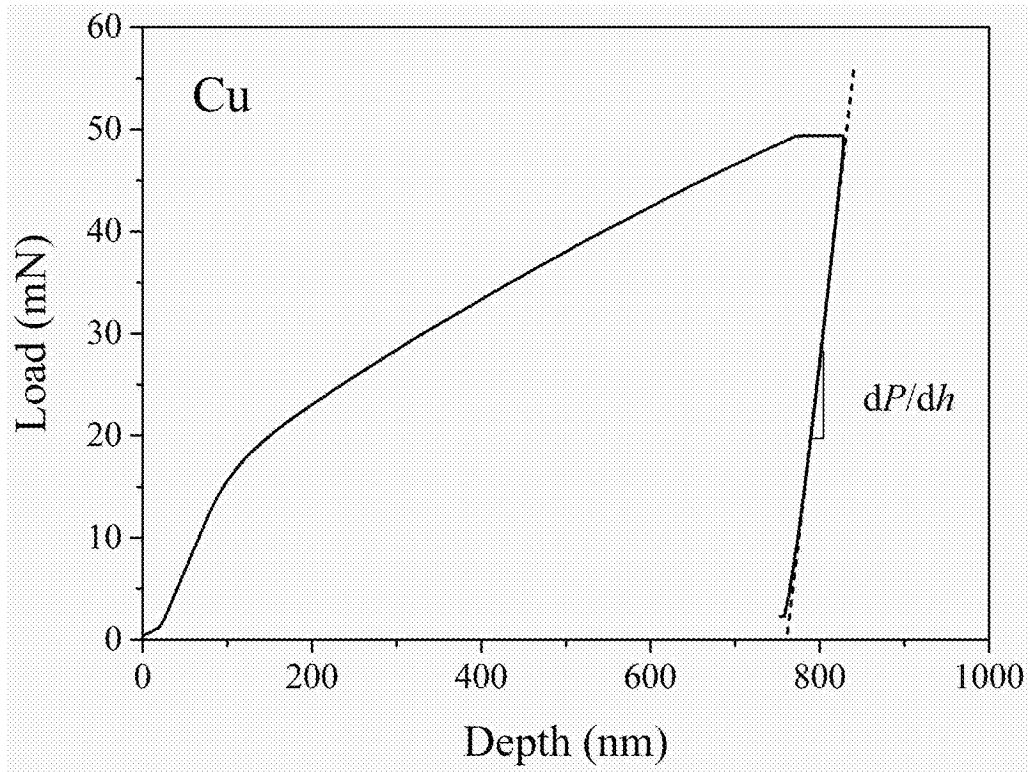


图1

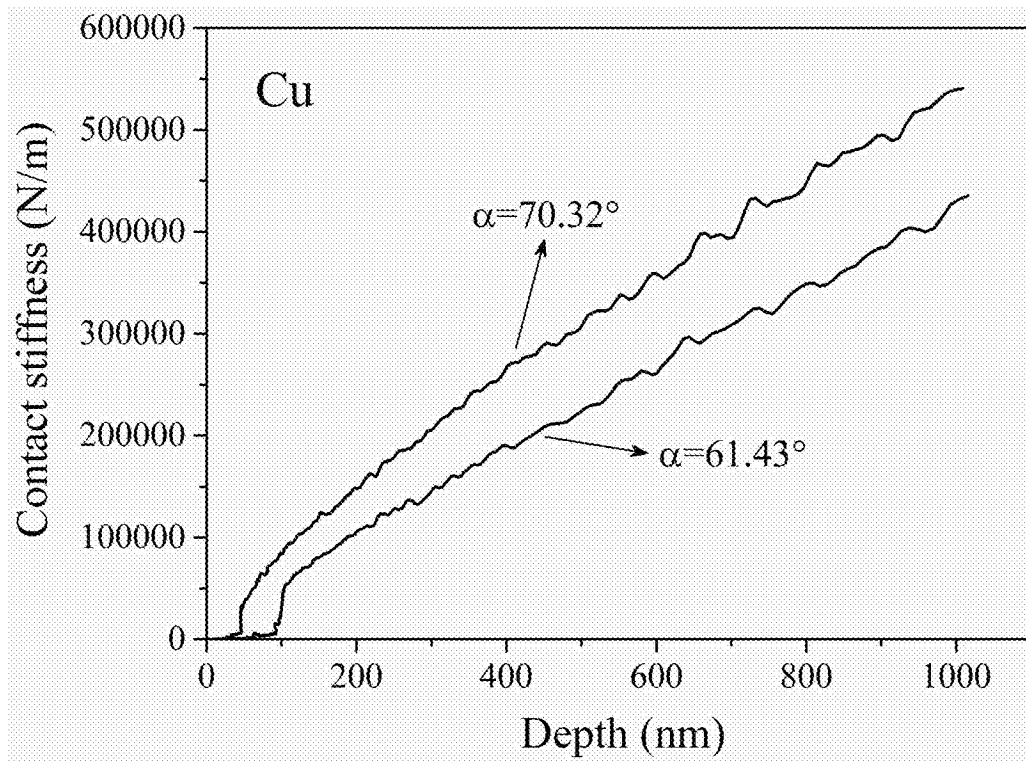


图2

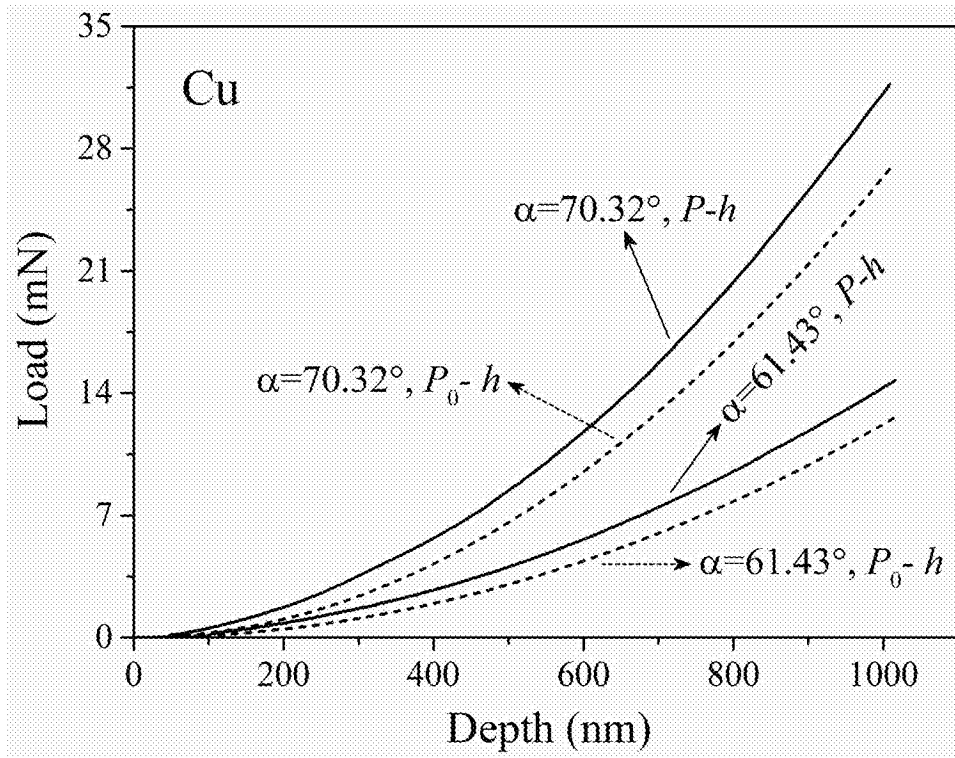


图3

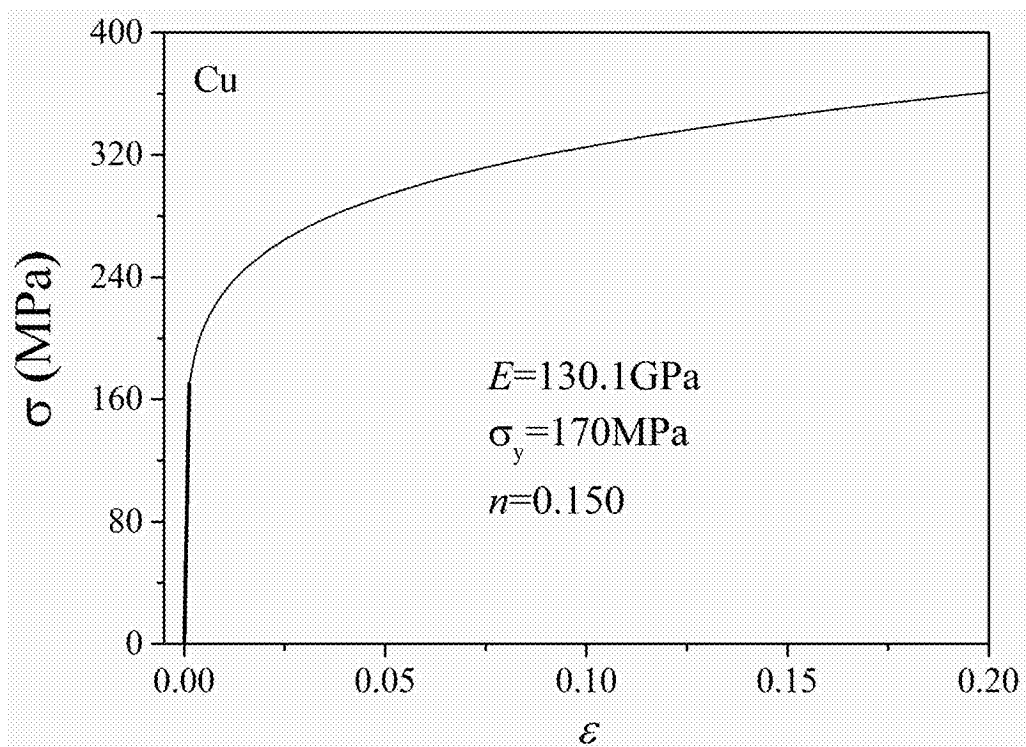


图4

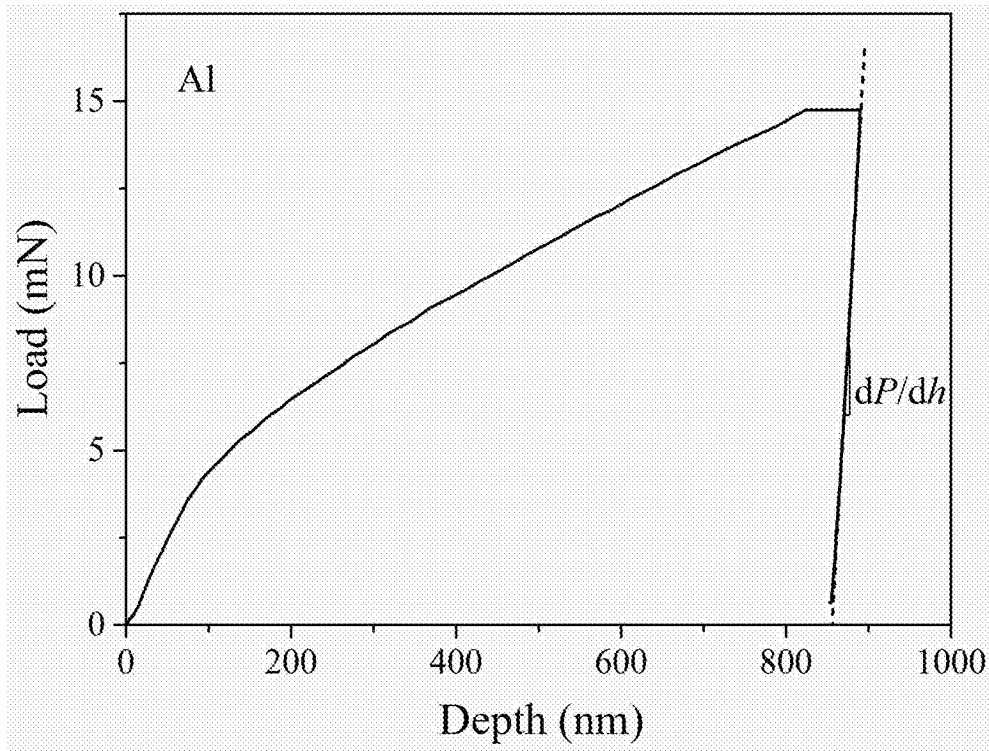


图5

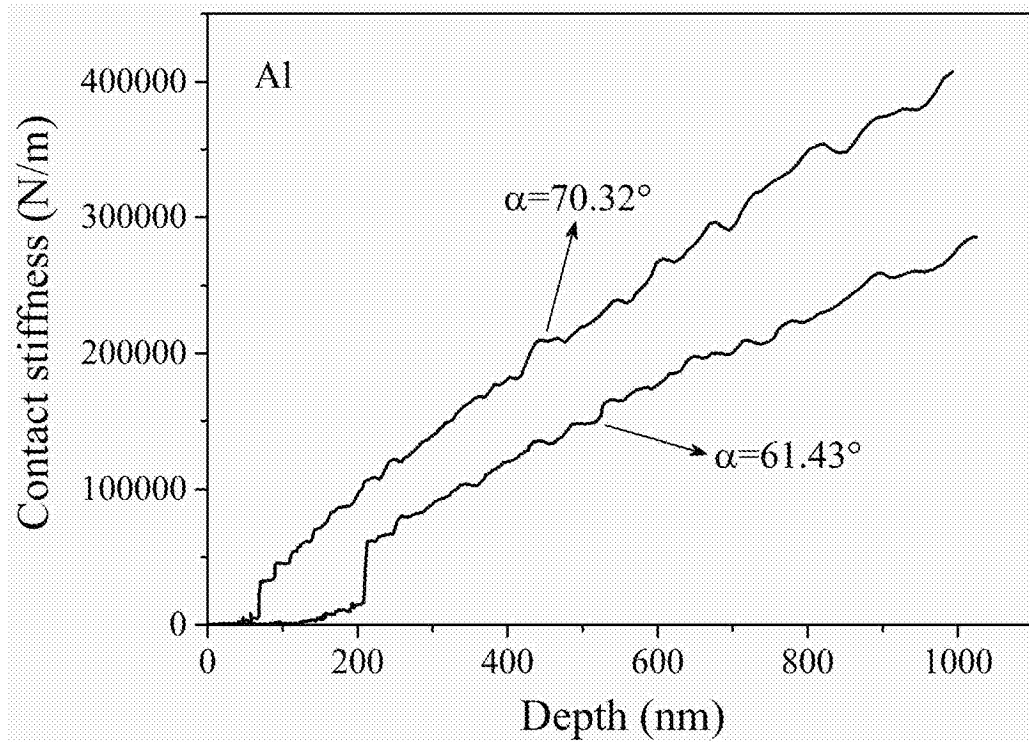


图6

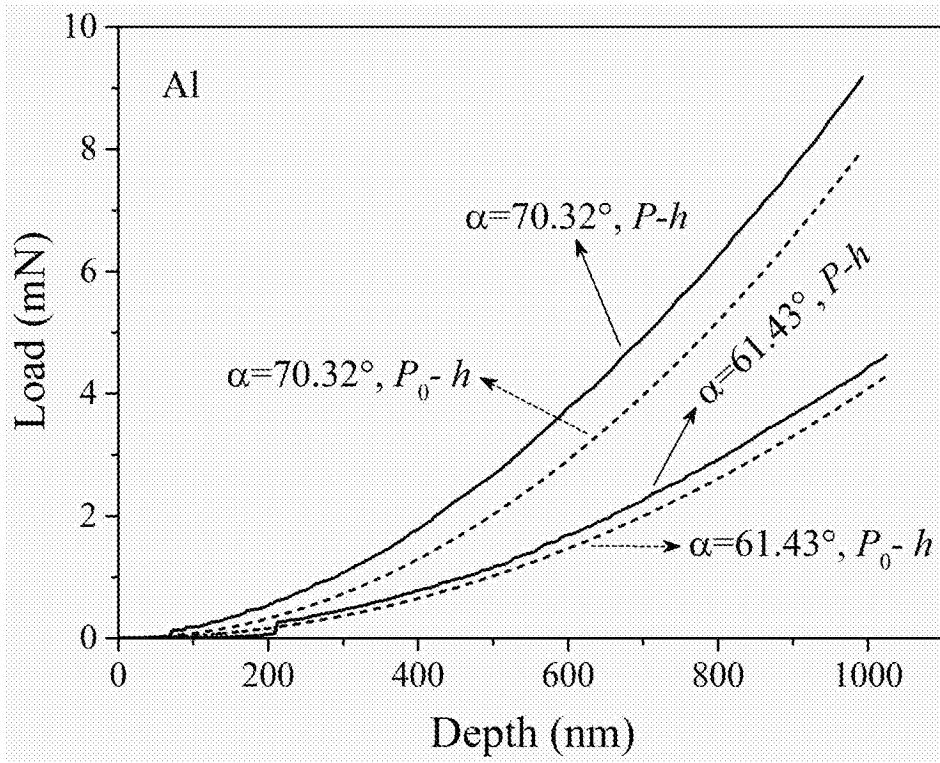


图7

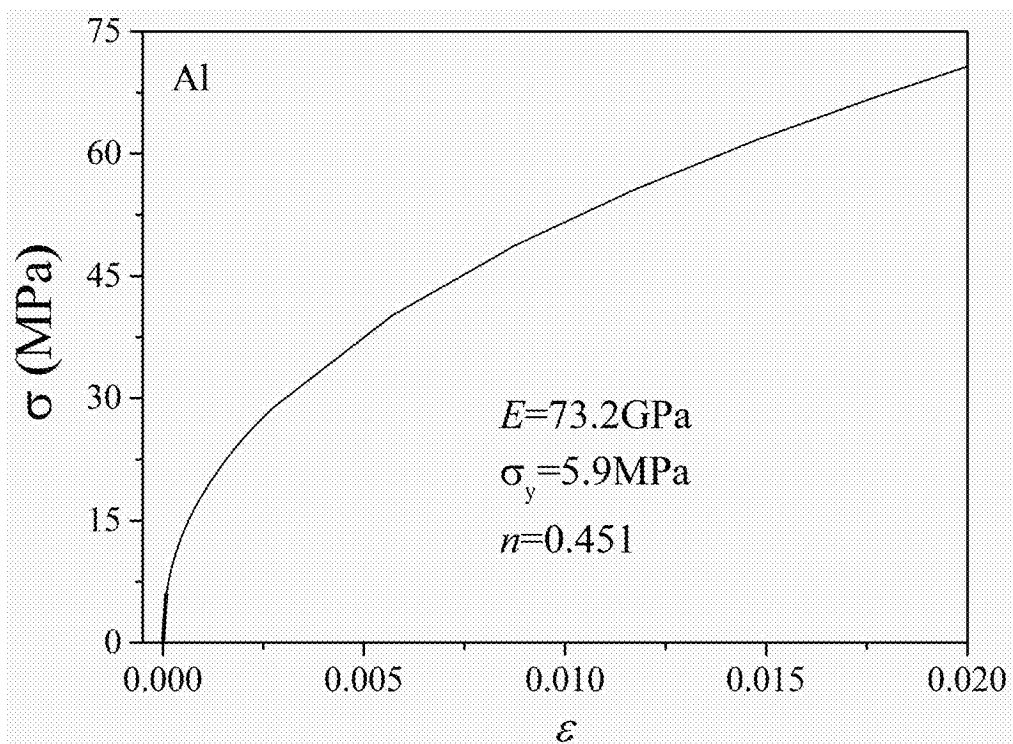


图8