

残余应力对材料循环压痕响应的影响

李莉佳¹, 李虹瑞¹, 谢朋书², 杨士通¹, 崔 达², 呼 咏^{2,3}

(1. 长春工业大学 机电工程学院, 长春 130012; 2. 吉林大学 机械与航空航天工程学院, 长春 130022; 3. 吉林大学 数控装备可靠性教育部重点实验室, 长春 130022)

摘 要: 为了表征残余应力对材料压入响应的影响规律, 本文利用有限元模拟和循环压痕方法研究了残余应力下材料在压入实验中的力学行为和循环变形特性, 揭示了材料力学性能参数和残余应力对材料循环压痕响应的影响。通过单因素压痕实验, 得到了材料力学特性随屈服应力、硬化指数和残余应力的变化规律, 并且研究了不同屈服应力、硬化指数和残余应力材料在循环载荷下的动态行为。结果表明: 压痕深度和塑性位移随着屈服应力、硬化指数和残余应力的增加而减小; 在循环过程中, 压痕深度和塑性位移随着循环周次的增加而增加, 并更快趋于稳定。

关键词: 纳米压痕; 残余应力; 循环变形; 力学行为

中图分类号: TB303 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)07-2193-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231132

Influence of residual stress on cyclic indentation behavior of materials

LI Li-jia¹, LI Hong-rui¹, XIE Peng-shu², YANG Shi-tong¹, CUI Da², HU Yong^{2,3}

(1. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China; 2. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. Key Laboratory of CNC Equipment Reliability Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to investigate the influence pattern of residual stress on material indentation response, this paper investigates the mechanical behavior and cyclic deformation characteristics of materials under residual stress in indentation experiments using finite element simulation and cyclic indentation method, the influence of material mechanical property parameters and residual stress on the cyclic indentation behavior of materials is revealed. The variation of material mechanical properties with yield stress, hardening index and residual stress was obtained by single factor indentation experiments, and the dynamic behavior of materials with different yield stress, hardening index and residual stress under cyclic loading is also studied. The results show that the indentation depth and plastic displacement decrease with the increase of yield stress, hardening index and residual stress. In the cycle, the indentation depth and plastic displacement increase

收稿日期: 2023-10-08.

基金项目: 吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20220676KJ); 吉林省科技厅重点研发项目(20220201027GX); 吉林省青年科技人才托举工程项目(QT202209); 数控装备可靠性教育部重点实验室开放基金项目(JLU-cncr-202208); 重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ-MSX0278).

作者简介: 李莉佳(1992-), 女, 副教授, 博士. 研究方向: 材料力学测试技术. E-mail: lilijia@ccut.edu.cn

通信作者: 崔达(1991-), 男, 讲师, 博士. 研究方向: 结构优化设计. E-mail: cuida@jlu.edu.cn

and stabilize faster with the increase of cycle weeks.

Key words: nanoindentation; residual stress; cyclic deformation; mechanical behavior

0 引言

在机械零部件的制造加工过程中,如铸造、焊接、切削、磨削和热处理等,都会使零部件内出现不同程度的残余应力。而大多数的残余应力对材料的静强度、动强度、疲劳寿命、应力腐蚀和形状精度会产生较大的影响^[1]。目前,残余应力测试已经成为材料加工制造中必须的检测和控制手段^[2]。

残余应力测试技术起始于 20 世纪 30 年代,经过近一个世纪的长足发展和进步,其种类多样。根据测试技术是否具有破坏性^[3],可以将其分为有损测量法和无损测量法^[4]。有损测量法虽然具有成熟的计算理论,但是在测量时会对材料产生结构损伤,导致被测材料性能弱化,失去服役工作能力。尽管传统的残余应力测试技术经历了长足的发展,但由于各种测试方法的局限性,目前尚未形成一种高效、统一的测试标准^[5]。

纳米压痕法属于一种微损的表面力学性能测试技术,可表征出材料硬度、弹性模量和残余应力等丰富的力学信息^[6]。与传统的残余应力测试方法相比,基于压痕技术的测试方法具有高效快捷、无损检测、绿色环保、准确性高、通用性强等优点,因此,也具有较好的应用前景。Tsui 等^[7]和 Bolshakov 等^[8]通过有限元模拟和试验分析了等轴残余应力对锥形压头压入响应的影响,发现在相同的压入深度下,与无应力状态相比,残余压应力导致载荷-位移曲线上升,残余拉应力导致曲线下降。2018 年和 2020 年, Peng 等^[9,10]采用球形压入,选用压入深度 $h/R=0.1$ 处的压入载荷变化率和 $h/R=0.01$ 处的加载曲率变化率,通过有限元模拟、理论推导和实验验证分别建立了等轴残余应力和非等轴残余应力的仪器化压入检测方法。2021 年, Greco 等^[11]应用改进后的 Berkovich 压头,提出了一种用于测量非等双轴残余应力的新方法。该方法通过理论分析和有限元模拟可计算出主应力的方向和大小,测量的平均误差均 $<10\%$ 。纳米压痕法介于有损测量和无损测量之间,操作简单、方便快捷^[12],在检测残余应力方面得到了快速的发展,与有损测量和无损测量形成

很好的互补。

近年来,随着测量技术、控制和检测元件的快速发展,纳米压痕测试技术的测量精度和测量速度不断提高,循环压痕测试技术日渐成熟。循环压痕测试技术是指在传统压痕测试技术基础上,采用载荷控制方法,按照规定的载荷加载模式,在试件表面进行多周次的循环压痕。试验结果可用于研究局部接触疲劳、硬度表征、微观结构变化、蠕变和材料的动态力学行为等。循环压痕方法也逐渐应用于对材料残余应力的表征。

本文利用循环压痕方法,表征了材料性能参数和残余应力对循环加载中材料的动态力学行为和响应特性的影响。通过有限元模拟获取了不同材料的压入响应规律,揭示了循环压痕测试中不同材料的纳米力学行为和变形演化特征,为仪器化循环压入法测定材料残余应力提供了重要的理论指导和科学依据。

1 实验过程

1.1 有限元建模

本文采用有限元分析软件对锥形压入过程进行模拟。首先需要建立压痕模型,由于模型的结构具有对称性,因此建立轴对称的压入模型,压头选用半锥角为 70.3° 的刚性圆锥,试样设计为半径和高均为 5 mm 的圆柱体。压头通常为金刚石材,其硬度远大于被压材料,因此将其设为刚体。离散网格和相应的应用边界条件如图 1 所示,试样和压头内侧中心轴设置轴对称约束,试样底面仅施加竖直方向约束,限制其压入方向位移。通过在试件外侧面施加不同的均匀压力,模拟试样内部产生的等效残余应力。假设试样为弹塑性状态,试件尺寸远大于接触半径可以避免边界效应对模拟结果的影响。该模型具有均匀的网格结构,为提高计算效率和精度,在压痕中心接触区域附近网格被细化,远离中心接触区域网格密度逐渐减小。整个试件模型共有 76 618 个四边形轴对称线性缩减积分单元。

采用该模型对不同材料参数和不同应力组合进行压入过程模拟,提取计算结果中压入过程能

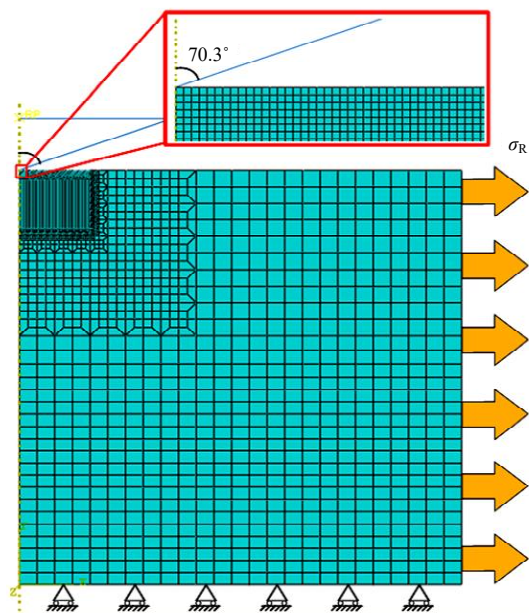


图1 有限元仿真模型

Fig.1 Finite element simulation model

量演变以及压头支反力和位移数据进行压入响应分析。

1.2 材料性能参数设置

为模拟金属材料弹塑性变形,试样的力学性能可以从线弹-幂硬化曲线中提取,其本构方程为:

$$\sigma = \begin{cases} E\epsilon, \epsilon \leq \epsilon_y \\ E\epsilon_y^{1-n}\epsilon^n, \epsilon > \epsilon_y \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ 为真实应力; ϵ 为真实应变; E 为弹性模量; ϵ_y 为屈服应变; n 为硬化指数; σ_y 为屈服应力。

对于绝大部分的金属材料, n 的取值在0.1~0.5之间^[13]。为明确研究关系,本文的材料参数屈服应力 σ_y 取300、400、500 MPa,硬化指数 n 取0.1、0.2、0.3,弹性模量 E 取72 GPa,泊松比 ν 取0.33,如表1所示。在有限元分析中采用9种不同的材料性能参数组合。

表1 参数取值范围

Table 1 Parameter value range	
性能参数	取值
弹性模量/GPa	72
泊松比	0.33
屈服应力/MPa	300、400、500
硬化指数	0.1、0.2、0.3

除了确定材料性能参数外,有限元模型中必须添加压头与试样接触的摩擦因数。为了研究摩擦因数对结果的影响,在正式的模拟开始前,分别模拟了摩擦因数为0、0.1、0.2、0.3、0.4和0.5时

的压痕过程。不同摩擦因数的载荷-位移曲线如图2所示,从图中可以看出,摩擦因数对载荷-位移曲线几乎无影响。本文选取压头与试样之间摩擦因数为0.3。

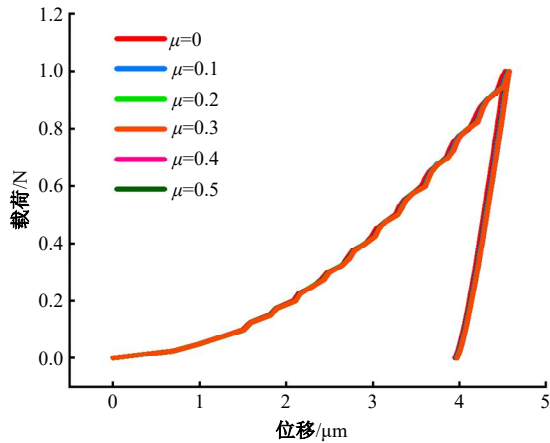


图2 不同摩擦因数的载荷-位移曲线

Fig.2 Load-displacement curves for different friction coefficient

1.3 纳米压痕数据分析方法

本文所提循环压痕方法是在单次压痕方法的基础上,采用压入载荷控制的模式,设置每次循环加载最大峰值载荷为1 000 mN,每次循环卸载至峰值载荷的1%,进行20次加载和卸载循环。循环载荷随时间变化如图3所示,单次压痕循环试件为4 s,加载速率和卸载速率相同,并且载荷随时间的变化对于所有循环都是相同的。由于模型中未设置阻尼或与速率相关的材料性质,因此不考虑时间对压痕结果的影响,在试验中记录每次压痕循环过程中的载荷-位移曲线。

1992年,Oliver等^[14]系统地提出了一个应用于压痕测试的数据分析方法,并于2014年对其进

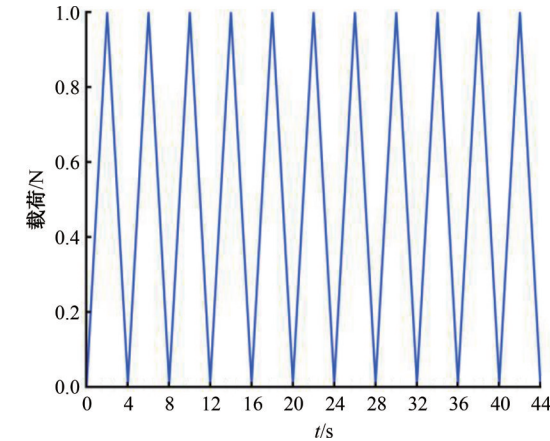


图3 循环载荷幅值

Fig.3 Cyclic load amplitude

行了发展和完善,该方法作为最经典的 O&P 压痕数据分析方法,广泛应用于评价材料压痕特性的研究中。

一个完整的压痕过程包括加载阶段和卸载阶段。通常情况下,基于经典的 Kick 模型,压痕载荷-位移曲线的载荷加载阶段符合抛物线形函数关系,压痕加载阶段曲线可以拟合为:

$$P = Ch^2 \quad (2)$$

式中: P 为压痕载荷; C 为与测试材料性质和压头形貌相关的拟合参数; h 为压痕位移。

而在压痕卸载阶段,载荷-位移曲线可以用幂律函数关系表示为:

$$P = \alpha(h - h_i)^m \quad (3)$$

式中: α 和 m 均为拟合参数; h_i 为压头卸载后的最终压痕深度。

h_c 为压头与试件的接触深度, $h_{\max}$ 为最大压入深度, h_c 与 $h_{\max}$ 的关系可表示为:

$$h_c = h_{\max} - h_s \quad (4)$$

式中: h_s 为压头从材料表面卸载后,表面产生的凹陷量。其表示为:

$$h_s = \lambda \frac{P_{\max}}{S} \quad (5)$$

式中: λ 为与压头几何相关的常数,圆锥压头的 $\lambda=0.72$,平压头的 $\lambda=1.00$,抛物型压头(玻氏、维氏、球形)的 $\lambda=0.75$; $P_{\max}$ 为最大峰值载荷; S 为接触刚度,根据卸载曲线在最大压入深度处的斜率 $\left(\frac{dP}{dh}\right)$ 确定,即:

$$S = \frac{dP}{dh} \Big|_{h=h_{\max}} \quad (6)$$

此时,根据式(7)计算接触硬度 H_c :

$$H_c = \frac{P_{\max}}{A(h_c)} \quad (7)$$

式中: $A(h_c)$ 为理想压头接触面积, $A(h_c)=\pi r^2$,其中 r 为最大压入位置时的接触半径。

根据式(8)直接计算折合模量 E_r :

$$E_r = \frac{S\sqrt{\pi}}{2\beta\sqrt{A(h_c)}} \quad (8)$$

式中: β 为与压头形状相关的校正因子,取值范围为 1 ± 0.05 (对于玻式压头, $\beta=1.034$)。

根据式(9)计算杨氏模量 E :

$$E = (1 - \nu^2) \left[\frac{1}{E_r} - \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i} \right]^{-1} \quad (9)$$

式中: ν 为材料的泊松比; E_i 和 ν_i 分别为压头的杨氏模量和泊松比。本文取 $E_i=1\,141\,\text{GPa}$, $\nu_i=0.07$ 。

基于 O&P 法评价材料的压痕特性,为了更加深入地评估不同材料的弹塑性行为,本文引用了 Sakai^[15]所提模型用于评价材料弹塑性行为,其主要方法为总接触位移 h_t 是弹性位移 h_e 和塑性位移 h_p 之和,即:

$$h_t = h_e + h_p \quad (10)$$

基于 Sakai^[15]和 Oyen^[16]的研究,式(10)可以改写成:

$$h_t = \sqrt{\frac{P_{\max}}{\alpha_2 E'}} + \sqrt{\frac{P_{\max}}{\alpha_1 H_T}} \quad (11)$$

式中: α_1 和 α_2 为关于压头形状的无量纲几何参数, $\alpha_1 = \pi \tan^2 \varphi$, $\alpha_2 = \frac{\pi}{2 \cot \varphi}$,其中 φ 为压头半锥角; E' 为塑性应变,表示为 $E' = \frac{E}{1 - \nu^2}$; H_T 为材料抗塑性。基于 Alao 等^[17]的研究,抗塑性 H_T 表示为:

$$H_T = \frac{H_c \alpha_2 E'}{\left(\sqrt{\alpha_2 E'} - \sqrt{\alpha_1 H_c} \right)^2} \quad (12)$$

将弹性位移 h_e 和塑性位移 h_p 拆分出来,可分别表示为:

$$h_e = \sqrt{\frac{P_{\max}}{\alpha_2 E'}} \quad (13)$$

$$h_p = \sqrt{\frac{P_{\max}}{\alpha_1 H_T}} \quad (14)$$

2 计算结果与分析

2.1 循环压痕结果

基于表1的参数取值设置有限元仿真试验,绘制仿真结果并进行分析。图4为当屈服应力为300 MPa,硬化指数 $n=0.3$ 时,无应力状态下的循环压痕载荷-位移曲线。其中在 $P_{\max}=1\,000\,\text{mN}$ 的峰值载荷和相同的加载速率和卸载速率下进行了20次加载-卸载循环。

从首次加载至第一峰值载荷,加载曲线平滑上升,与 Kick 拟合模型一致。从第一峰值载荷卸载时,卸载曲线满足幂律函数关系。由图4可知,在第一次循环中,具有最大的压痕深度和压痕能量,这是因为首次压痕过程是在材料平坦表面的初始状态中开始的。在随后的压痕循环中,载荷-位移曲线也平滑上升和下降,但是压痕深度相对

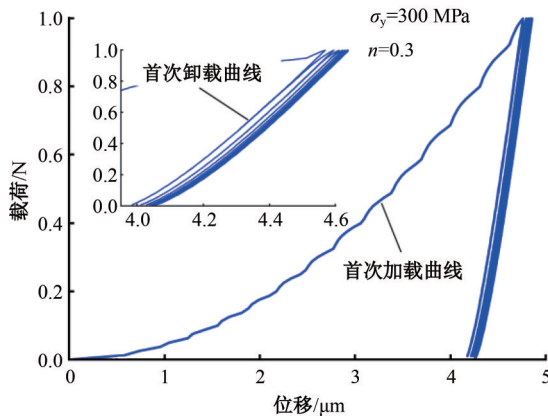
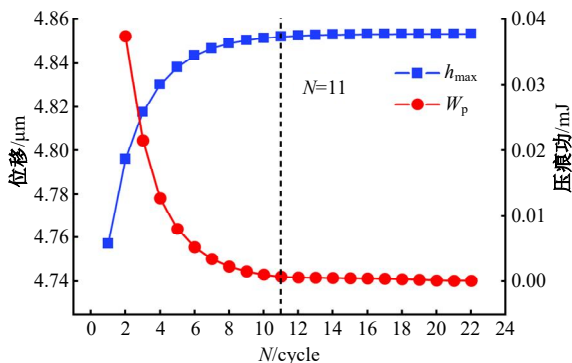


图 4 循环压痕载荷-位移曲线

Fig. 4 Cyclic indentation load-displacement curve

于第一次循环小了很多。对于随后的循环,压痕深度较小,这是因为压痕测试是在前一循环的残余印记中进行的,使得表面不再平坦,并且这也导致材料的局部硬化。

不同材料性能参数条件下的最大压入深度-循环周期演化曲线主要分为两个阶段,第一阶段为瞬态阶段,第二阶段为准稳态阶段。为了更加清楚地表达压痕循环过程与压痕深度和压痕塑性功之间的关系,图 5 为 $h_{\max}$ 、 W_p 随 N 变化曲线,最大压痕深度 $h_{\max}$ 与循环周期 N 之间的关系如图 5 蓝线所示。由于压痕区域材料发生局部弹塑性变形,在瞬态阶段,首次循环的压痕深度最大,循环压痕引起的最大压入深度快速增加, $h_{\max}$ 随循环周期的增加呈非线性增加。在随后的循环加载中最大压痕深度 $h_{\max}$ 随循环周期 N 的增加呈线性增加,随着循环周次的增加其增加速率逐渐减小。从第 6 次循环周期开始,压痕位移不再继续大幅度地增加。约 10 个周次后,进入准稳态阶段,此时压入深度增加速率较小,并趋于稳定,相对于瞬态压痕深度可以忽略。

图 5 $h_{\max}$ 、 W_p 随 N 变化曲线Fig. 5 $h_{\max}$ and W_p change curve with N

在压入过程中,压头通过外力做功转化试件材料的应变能和摩擦损耗。应变能又包括弹性应变能和塑性应变能。通过图 2 可知,不同摩擦因数对载荷-位移曲线的影响很小几乎为零,因此摩擦所造成的摩擦损耗可以忽略不计。所有加载过程中的外力做功全部转化成塑性应变能和弹性应变能,并且大部分转化为塑性应变能,弹性应变能所占部分很少。卸载过程中塑性应变能始终保持不变,弹性应变能部分释放。在每一次的循环压入过程中都按照上述的能量转换,并且每次循环应变能都不同。在压痕循环中,在加载和卸载期间执行的功之差等于在测试期间耗散到材料中的能量,通常称该能量为压痕塑性功 W_p ,可以通过计算载荷-位移曲线下方面积得到。图 5 中红线为循环压痕塑性功 W_p 与循环次数 N 之间的关系。在瞬态阶段,由于材料表面平整未受到任何破坏,首次循环压痕的塑性功最大,在第二次循环后塑性功急剧下降,逐渐减少,并且在 10 次循环后逐渐趋于稳定,进入准稳态阶段,并且每个压痕循环过程都以此规律。因此,为了节省实验资源并能清楚表达实验规律,后面的实验数据都只表达前 11 次。

2.1.1 材料性能参数对循环压痕结果的影响

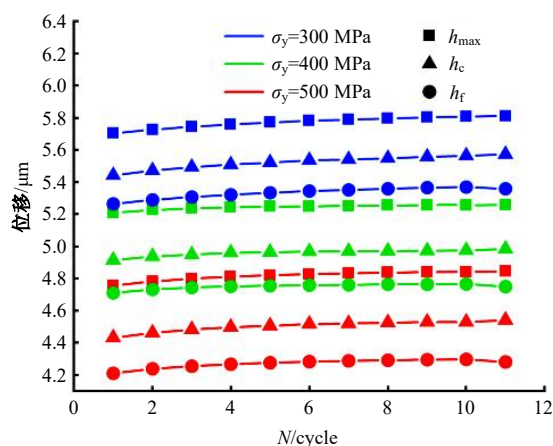
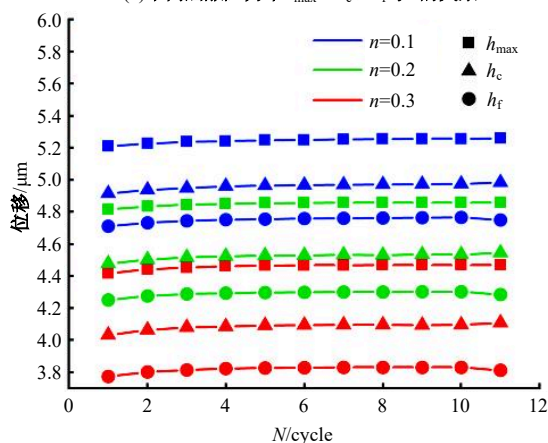
为了表达不同的材料性能参数对循环压痕结果的影响,下面控制参数变量,选取代表性载荷-位移数据,描述材料力学性能参数(σ_R 、 σ_y 、 n)对压痕响应的影响。

基于前面的测试理论,通过 O&P 方法计算得到最大压痕深度 $h_{\max}$ 、接触压痕深度 h_c 和最终压痕深度 h_f 。在无应力作用条件下,对于硬化指数相同($n=0.1$)、屈服应力 σ_y 不同的材料, $h_{\max}$ 、 h_c 和 h_f 的变化趋势如图 6(a) 所示,三者整体呈线性关系, $h_{\max}$ 、 h_c 和 h_f 随着屈服应力的增加而减小,并且 $h_{\max} > h_c > h_f$,证明了屈服应力对材料有着显著影响。

对于屈服应力相同($\sigma_y=400$ MPa)、硬化指数不同的材料, $h_{\max}$ 、 h_c 和 h_f 的变化趋势如图 6(b) 所示,三者整体呈线性关系, $h_{\max}$ 、 h_c 和 h_f 随着硬化指数的增加而减小。在循环过程中,前 6 次循环周期中参数变化速率较大。

2.1.2 残余应力对循环压痕结果的影响

残余应力同样对材料的压痕性能产生显著影

(a)不同屈服应力下 $h_{\max}$ 、 h_c 、 h_f 与 N 的关系(b)不同硬化指数下 $h_{\max}$ 、 h_c 、 h_f 与 N 的关系图 6 屈服应力和硬化指数下 $h_{\max}$ 、 h_c 、 h_f 与 N 的关系Fig. 6 Relationship between $h_{\max}$, h_c , h_f and N under yield stress and hardening index

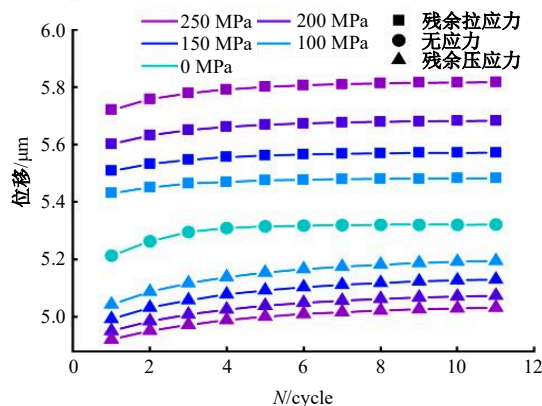
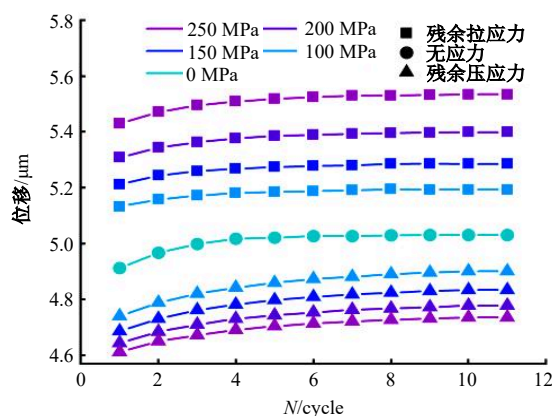
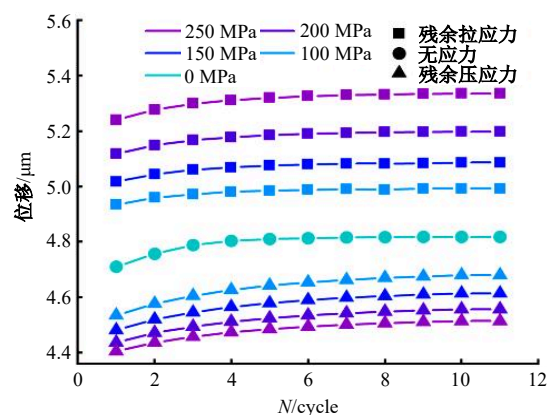
响,对于相同的屈服应力($\sigma_y=300$ MPa)和硬化指数($n=0.2$),而残余应力不同的材料, $h_{\max}$ 、 h_c 和 h_f 的变化趋势分别如图7(a)(b)(c)所示。残余应力分别与 $h_{\max}$ 、 h_c 和 h_f 三者整体呈线性关系, $h_{\max}$ 、 h_c 和 h_f 随着残余应力(设残余拉应力为负,残余压应力为正)的增加而减小,同残余应力下 $h_{\max}>h_c>h_f$ 。

2.2 纳米力学性能

2.2.1 材料性能参数对纳米力学性能的影响

不同的材料性能参数(σ_R 、 σ_y 、 n)对材料的力学性能产生不同的影响。当无应力作用,屈服应力不同、硬化指数相同($n=0.2$)时, h_e 、 h_p 和抗塑性 H_T 与循环周期的变化趋势分别如图8(a)(b)所示, h_e 和抗塑性 H_T 整体随着屈服应力的增加而增加,而 h_p 随着屈服应力的增加而减小。

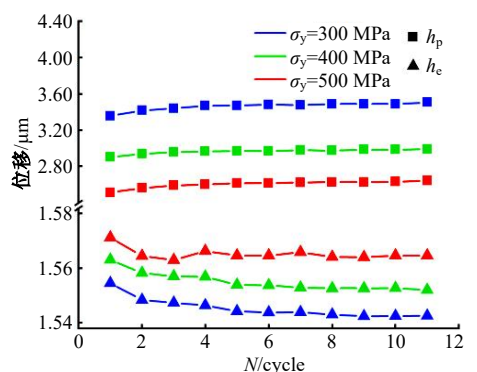
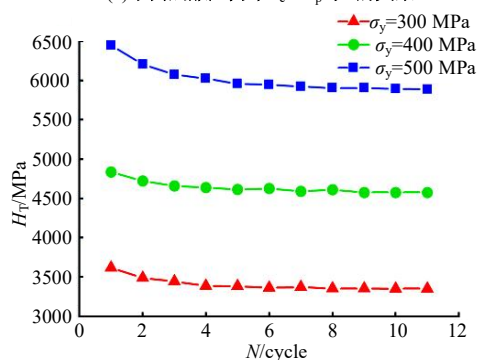
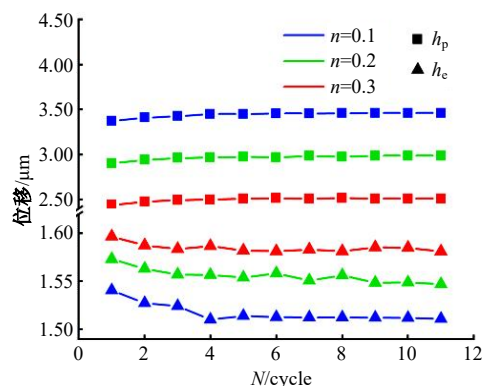
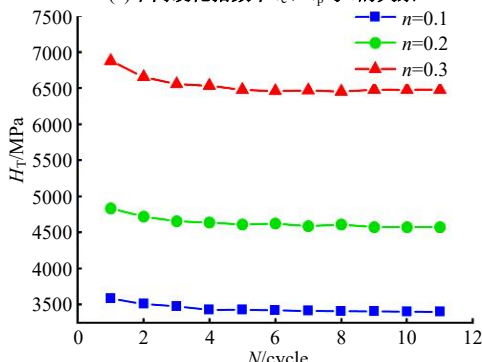
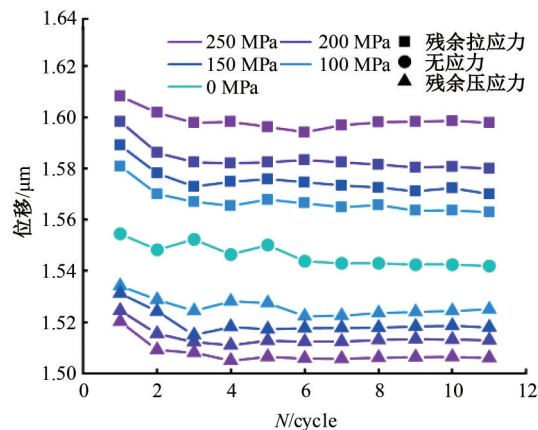
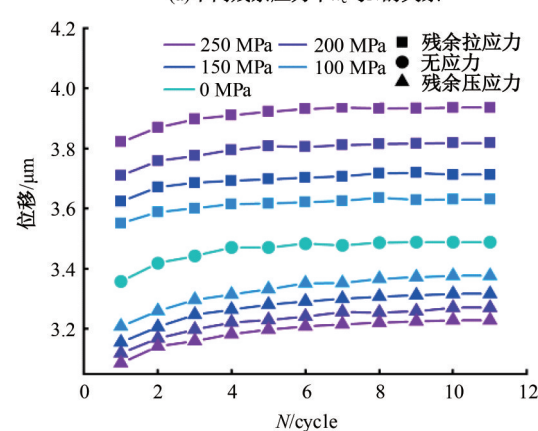
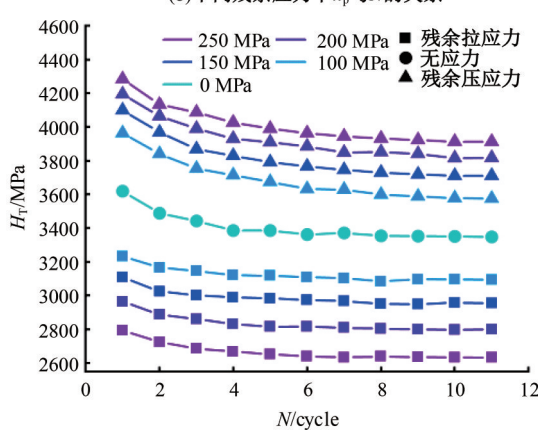
当屈服应力相同($\sigma_y=400$ MPa)、硬化指数不同时,材料的纳米力学性能与循环周期的关系如图9所示。其中, h_e 和抗塑性 H_T 整体随着硬化指

(a)不同残余应力下 $h_{\max}$ 与 N 的关系(b)不同残余应力下 h_c 与 N 的关系(c)不同残余应力下 h_f 与 N 的关系图 7 残余应力下 $h_{\max}$ 、 h_c 、 h_f 与 N 的关系Fig. 7 Relationship between $h_{\max}$, h_c , h_f and N under residual stress

数的增加而增加,而 h_p 随着硬化指数的增加而减小。

2.2.2 残余应力对纳米力学性能的影响

残余应力对材料的纳米力学性能有着显著的影响,当屈服应力 $\sigma_y=300$ MPa和硬化指数 $n=0.2$ 时, h_e 、 h_p 、抗塑性 H_T 随循环周期的变化规律分别如图10(a)(b)(c)所示。残余应力分别与 h_e 、

(a)不同屈服应力下 h_e 、 h_p 与 N 的关系(b)不同屈服应力下抗塑性 H_T 与 N 的关系图 8 屈服应力下 h_e 、 h_p 、 H_T 与 N 的关系Fig. 8 Relationship between h_e , h_p , H_T and N under yield stress(a)不同硬化指数下 h_e 、 h_p 与 N 的关系(b)不同硬化指数下抗塑性 H_T 与 N 的关系图 9 硬化指数下 h_e 、 h_p 、 H_T 与 N 的关系Fig. 9 Relationship between h_e , h_p , H_T and N under hardening index(a)不同残余应力下 h_e 与 N 的关系(b)不同残余应力下 h_p 与 N 的关系(c)不同残余应力下抗塑性 H_T 与 N 的关系图 10 残余应力下 h_e 、 h_p 、 H_T 与 N 的关系Fig. 10 Relationship between h_e , h_p , H_T and N under residual stress

h_p 两者整体呈线性关系, h_e 、 h_p 和抗塑性 H_T 随着残余应力的增加而减小。

3 讨论与分析

从压痕曲线整体来看,不同的材料性能参数和残余应力对材料的载荷-位移曲线和循环压痕响应有着明显的影响。本文通过循环压痕方法揭示了材料力学性能参数和残余应力对材料力学行

为的影响。与传统的单次压痕不同,本文采用循环压痕实验表征材料力学行为,通过 $h_{\max}$ 、 h_c 、 h_f 以及纳米力学性能参数来评价材料的压痕响应,用于评估材料力学性能。

在所有的循环曲线中 $h_{\max}$ 、 h_c 和 h_f 随着循环次数的变化趋势相同,仔细观察循环变化图发现,在前 6 次循环周期中随着循环次数的增加, $h_{\max}$ 、 h_c 和 h_f 非线性增大,从第 6 次循环周期开始, $h_{\max}$ 、 h_c 和 h_f 变化速率稳定。因此,为了更好地描述数据变化规律,采用分段拟合方式。在前 6 次循环周期中,曲线变化可以用幂律函数来描述,从第 6 次循环周期开始,采用线性拟合。拟合方程如下:

$$y = \begin{cases} a_1 x^{b_1}, & N \leq 6 \\ a_2 x + b_2, & N > 6 \end{cases} \quad (15)$$

对屈服应力为 300 MPa 和硬化指数为 0.1 的最大压痕深度进行分段拟合,拟合结果如图 11 所示,表 2 总结了 $h_{\max}$ 、 h_c 和 h_f 采用分段拟合方法的拟

合系数和决定系数。分段拟合的决定系数都在 95% 以上。分段拟合非常适用于表征金属材料的弹塑性行为,其中参数 a_1 和 b_1 代表材料的塑性行为, a_1 和 b_1 随着塑性的增加而增加,参数 b_1 和 a_2 描述了拟合曲线的斜率,即材料随循环周次变化的硬化速率。

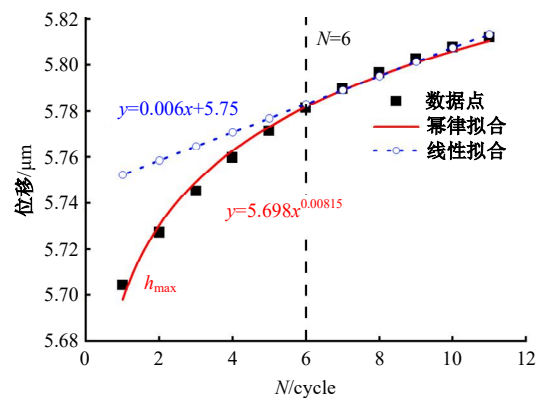


图 11 $h_{\max}$ 随 N 的变化

Fig. 11 $h_{\max}$ changes with N

表 2 拟合参数表

Table 2 Fitting parameter table

	a_1	b_1	R^2-1	a_2	b_2	R^2-2
$h_{\max}$	5.698 06	0.008 15	0.999 8	0.006 11	5.746 45	0.986 81
h_c	5.437 25	0.009 88	0.993 78	0.007 3	5.491 27	0.992 94
h_f	5.259 66	0.008 93	0.994 41	0.006 3	5.307 53	0.996 07

同种材料参数下的 $h_{\max}$ 、 h_c 和 h_f , 对于参数 a_1 和 b_2 , $h_{\max} > h_c > h_f$, 而对于参数 b_1 和 a_2 却无明显差异, 表明硬化速率相同, 与实验预设参数一致。因此, 在同种参数条件下, $h_{\max}$ 、 h_c 和 h_f 三者都与压痕循环次数满足幂律函数关系, 变化趋势相同。

在无应力作用、硬化指数不变的情况下, 将不同材料的 $h_{\max}$ 与 N 变化曲线进行拟合, a_1 随着屈服应力的增加而减小; 在屈服应力不变的情况下, a_1 同样随着硬化指数的增加而减小。相反的, b_1 随着硬化指数的增加而增加。

而材料在不同的应力作用下, 对加载曲线和卸载曲线都有着显著的影响。在残余拉应力下, 参数 b_1 随着应力的增加而减小; 但是当应力为 0 时, 参数 b_1 大幅增加; 在残余压应力下, 参数 b_1 仍然随着应力的增加而减小。这表明随着残余应力的增加, 材料的塑性行为逐渐减小, 分别在残余压应力和残余拉应状态下, 随着残余应力的增加, 材料随循环周次变化的硬化速率逐渐减小, 并且残余压应力的整体硬化速率大于残余拉应力的整体硬化速率。造成这一现象的主要原因是残余应力

会影响材料的塑性屈服, 进而影响压入响应。残余压应力抑制压头下方材料的塑性流动, 从而抑制材料的屈服, 导致压入相同载荷时, 压入深度更小; 残余拉应力有利于压头下方材料发生塑性流动, 从而促进材料屈服, 导致压入相同载荷时, 压入深度更大, 并且伴有较低的硬化速率。

Sakai 模型主要表征材料的弹性位移 h_e 和塑性位移 h_p , 因此可以通过弹性位移 h_e 和塑性位移 h_p 与循环次数之间的关系来评价材料弹塑性力学性能。在无应力作用下, 对于每种材料性能参数, 其塑性位移显著大于其弹性位移。在硬化指数不变的情况下, 弹性位移 h_e 和抗塑性 H_T 随着屈服应力的增加而增加, 塑性位移 h_p 随着屈服应力的增加而减少; 在屈服应力不变的情况下, 弹性位移 h_e 和抗塑性 H_T 随着硬化指数的增加而增加, 塑性位移 h_p 随着屈服应力的增加而减少。

塑性位移 h_p 在瞬态阶段随着循环周期的增加而逐渐增加, 但是增加速率逐渐减小, 从第 8 次循环周期开始趋于稳定, 证明随着循环次数增加在压痕位置处产生局部硬化。这表明宏观塑性变形

的饱和,随后微观塑性主导循环变形行为,相对于宏观变形可以忽略不计, h_p 循环曲线值越大表明材料具有更高的循环塑性。相反地,弹性位移随着循环次数的增加而逐渐减小。弹性变形分量和塑性变形分量也显示出与弹性位移和塑性位移同样的变化规律。

抗塑性随循环周次的变化规律可以通过指数函数描述,指数函数公式为:

$$y = a - b \cdot c^x \quad (16)$$

如图12所示,材料的抗塑性在前5次循环中下降较快,但是从第6次循环开始,材料的抗塑性逐渐趋于平稳,不再随着循环周次的增加而剧烈变化。在无应力作用下,参数 a 和参数 b 分别随着屈服应力和硬化指数的增加而增加。

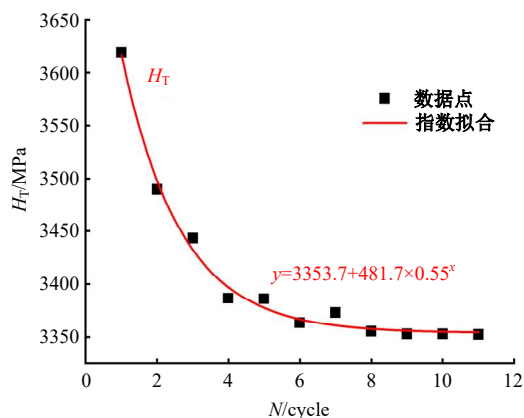


图12 H_T 随 N 的变化

Fig. 12 H_T changes with N

不同的残余应力,材料的弹塑性有着明显的差异。在残余应力的作用下,弹性位移 h_e 、塑性位移 h_p 和抗塑性 H_T 整体随着残余应力的增加而减小,这是因为残余应力的存在影响纳米压痕的弹性恢复。残余拉应力使弹性恢复减小,残余压应力使弹性恢复增加。在压痕卸载阶段只有弹性变形得到了恢复,残余拉应力倾向于使材料远离压头,残余压应力倾向于使材料接近压头,从而影响了弹性恢复。Xu等^[18]的研究通过有限元模拟单次压痕过程,得到了弹性恢复(h_i/h_{max})和残余应力之间的经验模型,并通过熔融石英等材料进行了试验验证,本文结果与Xu等^[18]的研究结果相同。

塑性位移在瞬态阶段随着循环周期的增加而逐渐增加,但是增加速率逐渐减小。相反地,弹性位移随着循环次数增加而逐渐减小。弹性变形分量和塑性变形分量也显示出与弹性位移和塑性位移同样的变化规律。在抗塑性拟合中,参数 a 和

参数 b 分别随着残余应力的增加而增加。综上,在材料性能参数不变的情况下,材料的循环塑性和循环弹性受到残余应力的影响,主要规律是随着残余应力的降低,材料具有更高的循环塑性,压应力下的抗循环变形能力大于拉应力。

4 结 论

(1)在循环压痕载荷下,每个压痕过程均出现了压入深度累积增加的现象,且其深度演化曲线均分为两个阶段,即瞬态阶段和准稳态阶段。在瞬态阶段压入深度快速增加,但增加速率逐渐减小;而在准稳态阶段,压入深度增加速率较低,并逐步趋向于零。

(2)最大压痕深度、接触压痕深度和最终压痕深度随屈服应力、硬化指数和残余应力的增加而减小。其中:屈服应力和硬化指数每增加100 MPa和0.1,最大压痕深度分别减少9.9%和10%;残余拉应力和残余压应力每增加50 MPa,最大压痕深度分别减少1.6%和0.82%。在各个循环周次中,最大压痕深度、接触压痕深度和最终压痕深度随循环周次的增加而增加,并更快趋于稳定。

(3)弹性位移随屈服应力和硬化指数的增加而增加,随残余应力的增加而减小;材料抗塑性随屈服应力、硬化指数和残余应力的增加而增加。塑性位移随屈服应力、硬化指数和残余应力的增加而减小。其中:屈服应力和硬化指数每增加100 MPa和0.1,塑性位移分别减小13%和14%;残余拉应力和残余压应力每增加50 MPa,塑性位移平均分别减少2.4%和1.3%。在各个循环周次中,弹性位移和材料抗塑性随循环周次的增加而减小,塑性位移随循环周次的增加而增加,并更快趋于稳定。

参考文献:

- [1] 王海斗,朱丽娜,徐滨士. 纳米压痕技术检测残余应力[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [2] 王庆明,孙渊. 残余应力测试技术的进展与动向[J]. 机电工程, 2011, 28(1): 11-15, 41.
Wang Qing-ming, Sun Yuan. Research development on the test methods of residual stress[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering. 2011, 28(1): 11-15, 41.
- [3] 董美伶,金国,王海斗,等. 纳米压痕法测量残余应力的研究现状[J]. 材料导报, 2014, 28(3): 107-113.

- Dong Mei-ling, Jin Guo, Wang Hai-dou, et al. The research status of nanoindentation methods for measuring residual stresses[J]. *Materials Reports*, 2014, 28(3): 107-113.
- [4] 王辰辰. 残余应力测试与校准方法研究现状与展望[J]. *计测技术*, 2021, 41(2): 56-63.
- Wang Chen-chen. Review on measurement and metrology methods of residual stress[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2021, 41(2): 56-63.
- [5] 彭光健, 张泰华. 表面残余应力的仪器化压入检测方法研究进展[J]. *力学学报*, 2022, 54(8): 2287-2303.
- Peng Guang-jian, Zhang Tai-hua. Progress in instrumented indentation methods for determination of surface residual stress[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(8): 2287-2303.
- [6] 李聪, 赵宏伟, 孙琳琳. 基于纳米压痕分析的往复扭转载荷下45号钢的力学性能[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2019, 49(3): 859-864.
- Li Cong, Zhao Hong-wei, Sun Lin-lin. Mechanical property of 45 steel under reciprocating torsional load based on nanoindentation analysis[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2019, 49(3): 859-864.
- [7] Tsui T Y, Oliver W C, Pharr G M. Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: part I. Experimental studies in an aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Research*, 1996, 11: 752-759.
- [8] Bolshakov A, Oliver W C, Pharr G M. Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: Part II. Finite element simulations[J]. *Journal of Materials Research*, 1996, 11: 760-768.
- [9] Peng G, Lu Z, Ma Y, et al. Spherical indentation method for estimating equibiaxial residual stress and elastic-plastic properties of metals simultaneously[J]. *Journal of Materials Research*, 2018, 33(8): 884-897.
- [10] Peng G, Xu F, Chen J, et al. Evaluation of non-equibiaxial residual stresses in metallic materials via instrumented spherical indentation[J]. *Metals*, 2020, 10(4): 440.
- [11] Greco A, Sgambitterra E, Furgiele F. A new methodology for measuring residual stress using a modified Berkovich nano-indenter[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 207: No. 106662.
- [12] Moharrami R, Sanayei M. Developing a method in measuring residual stress on steel alloys by instrumented indentation technique[J]. *Measurement*, 2020, 158: No. 107718.
- [13] 李莉佳. 残余应力下金属材料压痕响应的仿真分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学机械与航空航天工程学院, 2022.
- Li Li-jia. Simulation analysis and experimental research on indentation response of metal materials under residual stresses[D]. Changchun: School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, 2022.
- [14] 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.
- [15] Sakai M. The Meyer hardness: a measure for plasticity? [J]. *Journal of Materials Research*, 1999, 14(9): 3630-3639.
- [16] Oyen M L. Nanoindentation hardness of mineralized tissues[J]. *Journal of Biomechanics*, 2006, 39(14): 2699-2702.
- [17] Alao A R, Yin L. Assessment of elasticity, plasticity and resistance to machining-induced damage of porous pre-sintered zirconia using nanoindentation techniques[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, 32(5): 402-410.
- [18] Xu Z H, Li X. Estimation of residual stresses from elastic recovery of nanoindentation[J]. *Philosophical Magazine*, 2006, 86(19): 2835-2846.