

文章编号: 1006-3080(2019)04-0669-06

DOI: 10.14135/j.cnki.1006-3080.20180609002

基于小冲杆试验数据的力学性能的数值模拟

罗 安¹, 王汉奎², 王建文¹

(1. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029)

摘要:小冲杆试验是研究在役设备材料性质的重要手段, 小冲杆试验的结果与传统拉伸试验的关联性研究更为重要。已有的小冲杆试验与传统拉伸试验关联性的研究均忽略了摩擦对于试验结果的影响, 得出的试验结果过于理想化, 参考意义不大, 且小冲杆试验的数据难以大量获得, 因此通过数值模拟方法在少量数据基础上建立材料的应力-应变关系具有重要的现实意义。以 304# 不锈钢材料为例, 通过已经建立的小冲杆试验数据和有限元数值模拟数据之间的关联关系, 在充分考虑摩擦对于试验关联性影响的基础上, 研究摩擦因子 μ 与试样关联参数之间的关系, 结果表明两者之间符合程度较高。

关键词:小冲杆试验; 传统拉伸试验; 数值模拟; 关联系数; 摩擦因子

中图分类号:TH692

文献标志码:A

小冲杆试验技术(Small Punch Test, SPT)是一种微型试样力学性能测试技术, 最早由美国 Handford 实验室^[1]于 1981 年提出并应用于测试核电装置中材料经过中子辐射后的延展性变化, 它记录试样从加载到失效整个过程中材料的载荷-位移数据, 得出系列材料力学性能的关联式。小冲杆试验技术作为一种新型微试样试验技术近年来发展很快, 它只需要微小的试验样本和简单的试验装置, 通过极少量试样材料进行试验就可以得出材料的诸多性能^[2-6]。从在役设备本体上微损取样, 通过小冲杆试验获得的材料的性能变化状况, 既可以对在役设备的安全状况进行评估, 又可以对设备寿命进行预测, 更进一步可以为获得或改进延寿技术提供技术依据, 在测试材料基本力学性能方面得到了较广泛的应用和发展。尽管小冲杆试验所需试样微小, 但是在工程应用中允许取样的设备有限, 作者尝试在少量有限元试样数据基础上采用数值方法拟合出小冲杆试验数据与单轴拉伸数据之间的关联关系, 以减少试验次数。

尽管前人对于小冲杆试验与传统单轴拉伸试验

的关联性已经进行了研究, 但往往都是在忽略摩擦的理想化模型的基础上对试验进行简化, 得出的试验结果也偏于理想化, 在实际运用中参考意义不大。本文在考虑摩擦对于试验影响的前提下, 通过对 304# 不锈钢的单轴拉伸试验数据和小冲杆试验数据进行对比, 以获得单轴拉伸试验数据与小冲杆试验数据之间的关联关系。

1 小冲杆试验

小冲杆试验是利用圆头冲杆以一定的速度冲压圆形薄片试样, 同时记录圆形薄片试样从变形到失效断裂的整个过程中的载荷-位移(变形挠度)数据。小冲杆试验装置如图 1 所示。试验用的试验片为圆形, 直径为 3 ~ 10 mm, 厚度为 0.1 ~ 0.5 mm。圆形薄片试样在上下模之间夹紧, 采用螺丝紧固试样避免试样在受载后边缘翘起, 实验过程中记录圆形薄片试样的载荷-位移关系曲线^[7]。

小冲杆试验装置由加载机构、加温机构、气体保护机构和数据测量机构等组成。加载机构主要包

收稿日期: 2018-06-26

基金项目: 国家重点研发计划“国家质量基础的共性技术研究与应用”(2016YFF0203000)

作者简介: 罗 安(1994-), 男, 安徽人, 主要研究方向为材料性能微损测试关键技术研究及仪器研制。E-mail: 1658006124@qq.com

通信联系人: 王建文, E-mail: wangjianwen@ecust.edu.cn

引用本文: 罗 安, 王汉奎, 王建文. 基于小冲杆试验数据的力学性能的数值模拟[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2019, 45(4): 669-674.

Citation: LUO An, WANG Hankui, WANG Jianwen. Numerical Simulation of Mechanical Properties Based on Data of Small Punch Test[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2019, 45(4): 669-674.

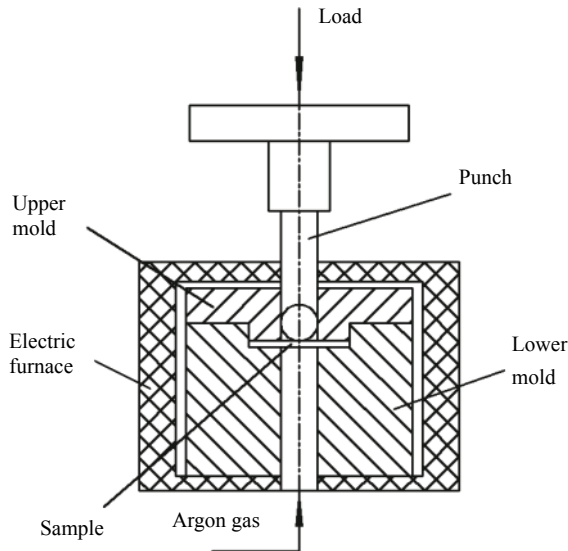


图1 SPT 试验装置示意图

Fig. 1 Scheme of the SPT test

括圆头冲杆和支撑。试验中用砝码加载以保证载荷恒定;加温机构包括电炉和温度控制仪表等;氩气的作用是为了防止高温氧化。

将试样薄片置放在上下夹头之间,小冲杆加上球珠冲头放在试样的中心并施加向下的载荷,试样的弯曲变形随载荷逐步加大,发生突出直至破裂。试样前后经历4个变形阶段:弹性弯曲阶段、塑性弯曲阶段、薄膜伸张阶段、塑性失稳阶段。图2示出了典型的小冲杆试验所得到的载荷-位移(挠度)曲线和4个变形阶段。由于材料性能及加载变形过程中含有过多的非线性问题,要得到问题的解析解极为复杂及艰巨。小冲杆试验的直接测试结果是得到载荷-位移关系曲线。通过这些参数可以求出材料的屈服强度值、抗拉强度值、断后伸长率值、冲击韧性值甚至材料的断裂韧性值等。其中 P_y 为小冲杆试验过程中的屈服载荷点, $P_{\max}$ 为小冲杆试验过程中的最大载荷点。

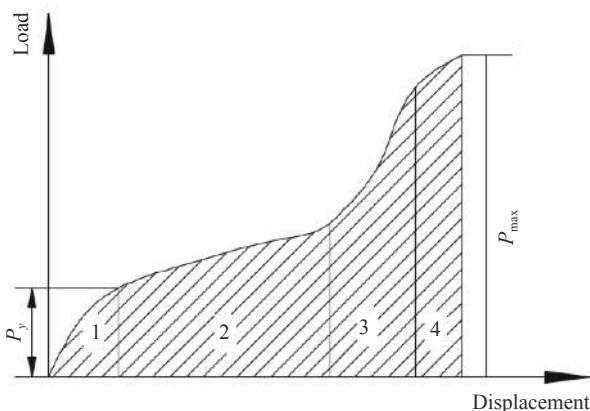


图2 典型小冲杆试验的载荷-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement trace for small punch test

2 小冲杆试验数据拟合

构建小冲杆试验中所获得的载荷-位移曲线与材料的应力-应变之间的关联是小冲杆试验的关键。在进行关联分析时常作如下假设:

(1) 冲杆与试样之间的摩擦因子为0;

(2) 以试样中心点的应变、挠度状态来表示整个圆形薄片试样的应力应变;

(3) 材料为刚塑性材料。

在小冲杆试验中,对于试样变形应变关系的分析,Chakrabarty^[8]提出的薄膜伸张模型具有很高的参考意义,薄膜伸张模型见图3。图中, R 是冲头半径; a 是试样在支撑面之间的最大半径; θ_0 是试样非接触区域与接触区域的分界线法向与冲杆的夹角; δ 是变形试样的中心位移值; θ 是试样平行于冲杆轴与边界法向的夹角; δ_0 是 θ_0 角度对于接触边界的高度; z 是试样上点的位移; r 是冲杆轴与试样上任意一点的距离; ϕ 是冲杆轴与试样上任意一点法向的夹角。

对于实际的小冲杆试验,摩擦往往是对试验结果产生影响的不可忽略的要素,因而传统的关联性假设过于理想化。本文在薄膜伸张模型和前人其他理论的基础上,尝试引入摩擦这一影响因素,使关联结果更加合理、可靠。

2.1 位移与应变试验数据拟合

Chakrabarty 提出圆形薄片试样的塑性大变形薄膜伸张模型,认为试样未承载区域处于平衡的双向拉伸状态^[9],有

$$\sigma_\theta = \sigma_r \quad (1)$$

其中: σ_θ 为周向应力; σ_r 为径向应力。

同样,当忽略摩擦的情况下,也可以认为承载区的应力满足式(1)。根据刚塑性体的 Levy-Mises 流动法则,在试样上任意一点有

$$\dot{\epsilon}_\theta = \dot{\epsilon}_r \quad (2)$$

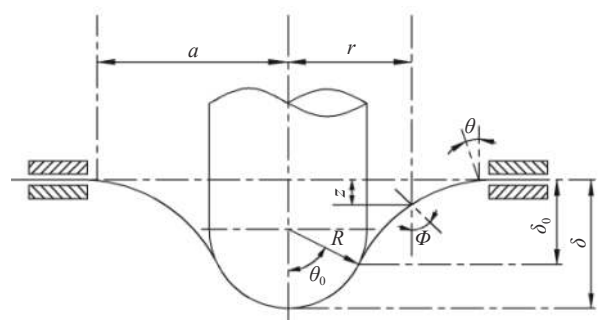


图3 薄膜伸张模型示意图

Fig. 3 Geometry of membrane stretch model

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_r \quad (3)$$

根据体积不可压缩原理,试样厚度方向上的应变变为

$$\varepsilon_t = -(\varepsilon_\theta + \varepsilon_r) \quad (4)$$

试样上任意一点的 Mises 等效应变为

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_\theta - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_t - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_t - \varepsilon_\theta)^2} \quad (5)$$

其中: θ_r 是试样径向与边界法向的夹角; θ_t 是试样厚度方向与边界法向的夹角。

可以发现试样中心点等效应变最大,见式(6),它可以表征整个圆形薄片试样的应变。

$$\varepsilon_{\max} = 2 \ln \frac{2(1 + \cos \theta)}{(1 + \cos \theta_0)^2} \quad (6)$$

在计算圆形薄片试样表面上任意一个变形点的垂直高度 z 时,可以发现试样中心点的高度最大,此时的 $z_{\max}$ 即中心点挠度 δ 。任一时间点的挠度为

$$\delta = a \sin \theta \ln \frac{\tan(\theta_0/2)}{\tan(\theta/2)} + R(1 - \cos \theta_0) \quad (7)$$

参数 θ_0 与 θ 之间有何几何关系:

$$\sin \theta = \frac{R}{a} \sin^2 \theta_0 \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)和式(7)中,并代入试样尺寸 $a=2.5 \text{ mm}$, $R=1.2 \text{ mm}$,可以获得以 θ_0 表示的 $\varepsilon_{\max}$ 和 δ :

$$\varepsilon_{\max} = 2 \ln \frac{2 \left(1 + \cos \left(\arcsin \left(\frac{12}{25} \sin^2 \theta_0 \right) \right) \right)}{(1 + \cos \theta_0)^2} \quad (9)$$

$$\delta = 1.2 \sin^2 \theta_0 \ln \frac{\tan(\theta_0/2)}{\tan \left[\arcsin \left(\frac{12}{25} \sin^2 \theta_0 \right) / 2 \right]} + 1.2(1 - \cos \theta_0) \quad (10)$$

根据式(9)以及式(10),可以很容易看出最大应变和挠度之间存在一一对应的关系。根据试验数据将最大应变 $\varepsilon_{\max}$ 和挠度 δ 进行二次拟合。

经过二次多项式拟合后的可靠性系数为 1,得到的关系式为

$$\varepsilon_{\max} = 0.211\delta^2 + 0.330\delta \quad (11)$$

2.2 载荷与应力试验数据拟合

Dobes 等^[10]提出了小冲杆试验中试验载荷和应力之间的关联方程。Tettamanti 等^[11]在试验的基础上建立了试验载荷和等效应力之间的关联,但都存在一定的局限性。本文通过对试验中试样变形过程的推导,建立了如下载荷和应力关系:

$$\frac{\sigma}{F_0} = K \left[\pi h_0 R \left(\frac{a}{R} - \chi \right) \right] \quad (12)$$

式中: F_0 为载荷(N); h_0 为试样厚度(mm); R 为冲杆头半径; σ 为单轴蠕变试验的应力(MPa); a 为下模

中心直径(mm); K 为试样边缘与下模之间的阻碍系数; χ 为摩擦因子。

由于理论分析结果与试验结果之间存在着一定的差异,引入一个小冲杆试验关联参数 K_{sp} ,对式(12)进行修正,在不同尺寸下进行试验,载荷应力转变关系为

$$\frac{F_{sp}}{\sigma} = 3.33 K_{sp} a^{-0.2} R^{1.2} h_0 \quad (13)$$

3 小冲杆试验数值模拟

采用有限元软件 ANSYS 模拟 304#不锈钢的小冲杆试验中材料的应力-应变关联关系,模拟时作出以下假设^[12]:

- (1)材料具有各向同性;
- (2)变形中遵守体积不变原理;
- (3)采用单向应力作为多向应力下的等效应力。

3.1 有限元建模

原模型中圆形试样被上模与下模夹紧,且试样与上下模之间基本不发生滑动现象,故而可以将圆形试样外围视为全约束;球形冲头硬度较大,在冲压过程中可简化为刚体进行研究;冲头与试样之间施加摩擦约束。模型简图见图4和图5。

微试样材料为 304#不锈钢,力学性能见表1。将其通过单轴拉伸试验得到的工程应力-应变曲线转化为真应力应变曲线,如图6所示。再将真应力应变

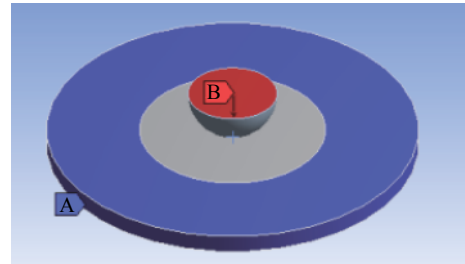


图4 小冲杆试验有限元简化建模

Fig. 4 Finite element simplified modeling of small punch test

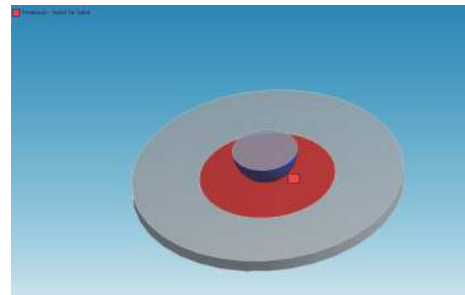


图5 冲头与试样的摩擦接触示意图

Fig. 5 Friction contact diagram of punch and sample

表1 304#合金钢力学性能

Table 1 Mechanical properties of 304# alloy steel

Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa
175	0.3	291	663

关系输入 ANSYS 参数库中进行数值模拟。试验中,球形冲头与圆形试样之间的摩擦会对结果造成一定的影响。而在小冲杆试验中,多数情况下摩擦因子还没有引入试验,因此本文在考虑摩擦对试验结果影响的前提下,通过设置不同的摩擦因子对该试验进行进一步探究,以期获得较为合理的参考依据。

3.2 数值模拟结果

本文选取摩擦因子为 0.2 进行试验。通过 ANSYS 进行仿真实验,将仿真实验结果拟合合成载荷-位移曲线,如图 7 所示。由图可以看出,有限元试验得出的载荷位-移曲线与单轴拉伸试验测得的应力-应变曲线,无论是弹塑性阶段还是塑性阶段都极为相似,故而可以证明小冲杆试验与单轴拉伸试验之间具有关联性。

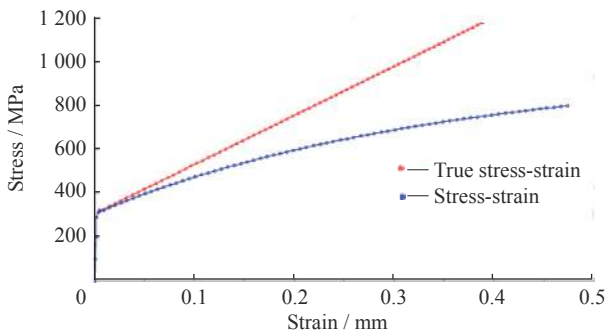


图6 304#钢简化真应力应变曲线及应力-应变曲线

Fig. 6 Simplified true stress-strain curve and stress-strain curve for 304# steel

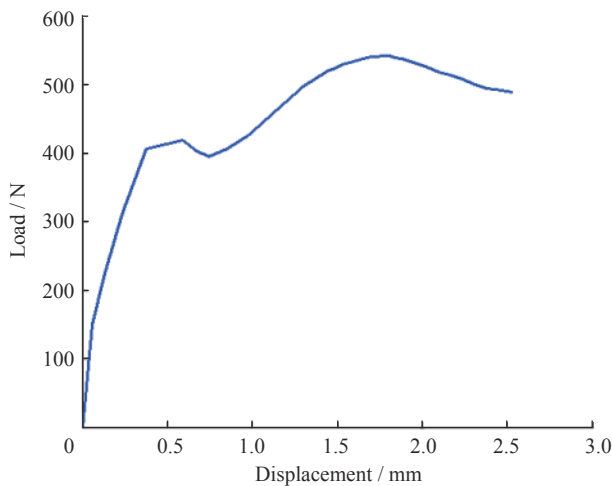
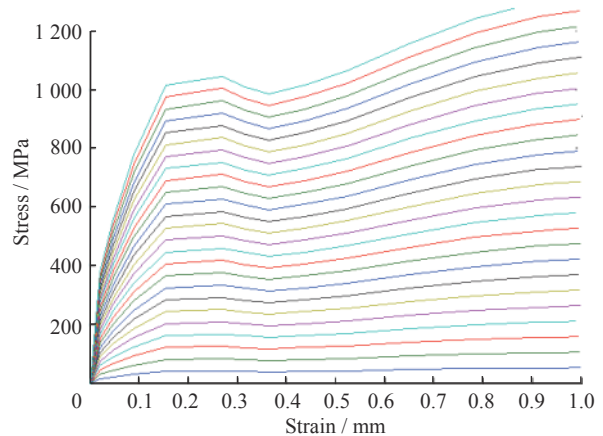


图7 ANSYS 模拟的 304#合金钢载荷-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curve of 304# alloy steel simulated by ANSYS

将试验数据分别代入式(11)和式(13),并取不同的关联参数 K_{sp} 值,得出了多组应力-应变曲线,并绘制出应力-应变位移曲线,如图 8 所示。

图8 不同 K_{sp} 值下的应力应变曲线Fig. 8 Stress-strain curves for different K_{sp} values

从图 8 可以看到,不同的关联参数 K_{sp} 条件下,模拟得到的应力-应变曲线都与传统的双斜率简化曲线类似,这也验证了前述理论的正确性。将上述曲线简化为传统的双斜率曲线,并通过将上述曲线与试样测得的应力-应变曲线及真应力应变曲线进行对照分析,可以得出合适的 K_{sp} 值。

通过对比分析得出,在摩擦因子取 0.2 的前提下, $K_{sp} \approx 1.1$ 。将此时的小冲杆试验简化应力-应变曲线与单轴拉伸试验简化真应力-应变曲线绘制成图 9。可以发现,摩擦因子取 0.2, $K_{sp} \approx 1.1$ 时,小冲杆试验简化应力应变曲线与单轴测试简化应力-应变曲线基本吻合,也说明了小冲杆试验对于检测材料性质具有正确性。

3.3 不同摩擦因子对关联系数的影响

针对不同的摩擦因子,对关联参数 K_{sp} 值进行探究,尝试建立 K_{sp} 值与摩擦因子 (μ) 的关联方程。分别针对摩擦因子为 0.10、0.15、0.25 进行多次有限元仿真实验。

将得到的结果简化为双斜率应力应变曲线,与单轴拉伸试验的简化应力应变曲线进行对比分析,确定出 K_{sp} 值,最后再将小冲杆试验数据简化为应力应变曲线,如图 10 所示,摩擦因子为 0.10、0.15、0.25 时对应的 K_{sp} 值分别为 1.043、1.07、1.13。

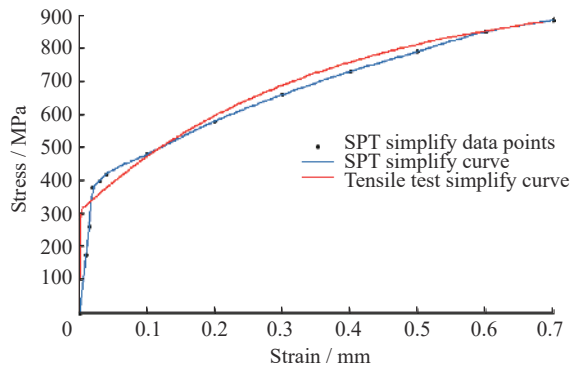


图9 K_{sp} 值为1.1时的小冲杆试验简化应力-应变曲线及单轴拉伸试验简化真应力-应变曲线

Fig. 9 Simplified stress-strain curve and uniaxial tensile test simplified true stress-strain curve for a small punch test with $K_{sp}=1.1$

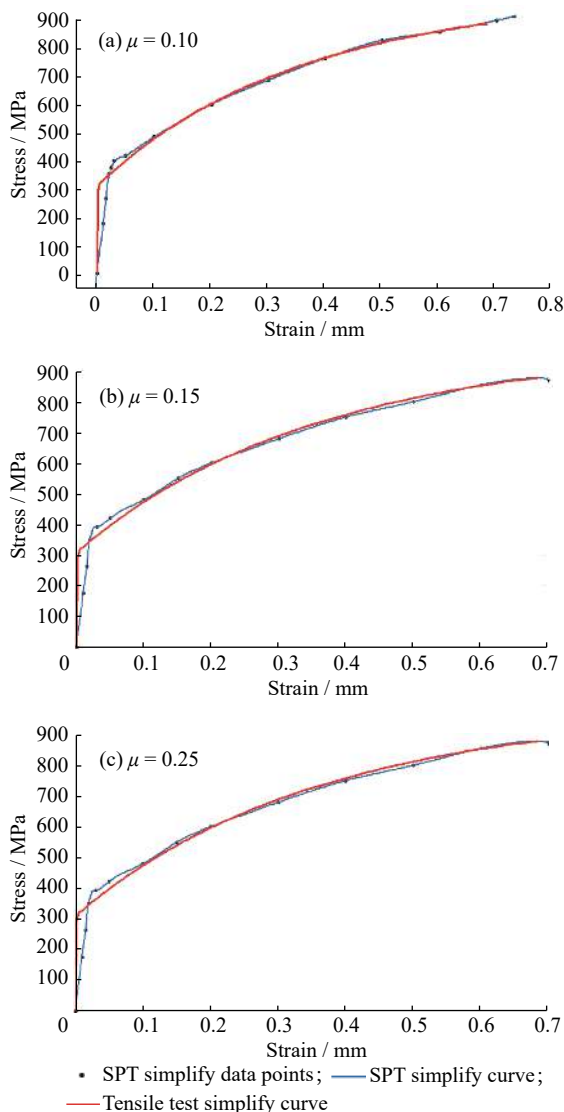


图10 不同摩擦因子时小冲杆试验简化应力-应变曲线与单轴拉伸试验简化真应力-应变曲线

Fig. 10 Simplified stress-strain curve and uniaxial tensile test simplified stress-strain curve for a small punch test with different friction coefficients

3.4 K_{sp} 值与摩擦因子的关联性

针对前述小冲杆试验中基于不同摩擦因子得到不同关联参数 K_{sp} 值的情况,将 K_{sp} 值和摩擦因子数据利用数值分析软件进行拟合,得到图11。

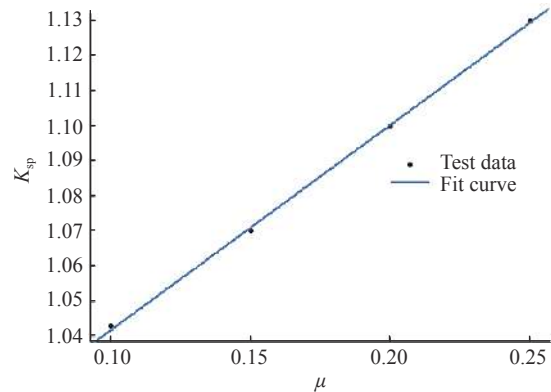


图11 摩擦因子与 K_{sp} 的拟合曲线

Fig. 11 Fitting curve of friction coefficient and K_{sp}

通过分析数据拟合结果发现,摩擦因子与 K_{sp} 值之间存在一种近似线性的关系,经过一次项多项式拟合,相关性达到0.999,可以认为拟合结果是准确的,其中,摩擦因子与 K_{sp} 之间存在关系式(14):

$$K_{sp} = 0.583\mu + 0.984 \quad (14)$$

4 结 论

(1)在小冲杆试验装置上测试了304#不锈钢的载荷-位移曲线,获得了多组试验数据。通过数据拟合建立了位移与应变以及载荷和应力之间的联系。

(2)在小冲杆试验过程中建立了有限元模型,以304#不锈钢为例,获得了数值模拟结果的载荷位移关系。并选用实际试验的拟合关系与实验结果对比,证明了有限元数值模拟的有效性。

(3)采用有限元方法,研究了不同摩擦因子条件下材料的应力应变关系,并通过调整试验关联参数 K_{sp} 得到了与试样结果符合良好的模拟结果。表明在小冲杆试验过程中可以在获得少量试验数据的条件下,通过数值模拟方法研究材料的应力-应变关系。试验得到了可以保证准确数值模拟结果的摩擦因子与试验关联系数 K_{sp} 之间的关系。

参考文献:

- [1] BAIK J M, KAMEDA J, BUCK O. Small punch test evaluation of intergranular embrittlement of an alloy steel[J]. Script Metallurgica, 1983, 17(12): 1443-1447.

- [2] MANAHAN M P, ARGON A S, HARLING O K. The development of a miniaturized disk bend test for the determination of post-irradiation mechanical properties[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1981, 103/104: 1545-1550.
- [3] FOULDS J, VISWANATHAN R. Small punch testing for determining the material toughness of low alloy steel components in service[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1994, 116(4): 457-464.
- [4] MAO X, SHOJI T, TAKAHASHI H. Characterization of fracture behavior in small punch test by combined recrystallizationetch method and rigid plastic analysis[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 1987, 15(1): 30-37.
- [5] BULLOCK J H, HICKEY J J. Miniature specimen testing of critical components in steam raising plants [C]//ASME Conference Service Experience and Reliability Improvement PVP. Minneapolis: [s.n.], 1994: 147-153.
- [6] OKADA A, LUCAS G E, KIRITANI M. Micro-bulge test and its application to neutron-irradiated metals[J]. *Transactions of Japan Institute Metals*, 1988, 29(2): 99-108.
- [7] 李璞, 关凯书. 小冲杆测试法在评定材料性能的应用进展[J]. *化工机械*, 2006, 33(5): 262-268.
- [8] CHAKRABARTY J. A theory of stretch forming over hemispherical punch heads[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1970, 12(4): 315-325.
- [9] ONAT E T, HAYTHORNTHWAITE R M. The load carrying capacity of circular plate at large deflection[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1956, 23(3): 49-55.
- [10] DOBES F, MILICKA K. On the Monkman-grant relation for small punch test data[J]. *Materials Science and Engineering*, 2002, 336(1): 245-248.
- [11] TETTAMANTI S, CRUDELI R. A procedure for high temperature plant components life evaluation: Small punch creep test methodology[C] // *Proceedings of International Symposium on Case Histories and Failures in Industry*. Japan: The Society of Materials Sciences, 1999: 805-905.
- [12] 杨镇, 王志文. 小冲杆蠕变试样中心挠度-蠕变应变关系的有限元分析[J]. *化工机械*, 2004, 31(1): 25-27.

Numerical Simulation of Mechanical Properties Based on Data of Small Punch Test

LUO An¹, WANG Hankui², WANG Jianwen¹

(1. Institute of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: The small punch test is an important mean to study the material properties of in-service equipment. The correlation between the experimental results and the traditional tensile test is the research focus. However, in the past, the research on the correlation between the small punch test and the traditional tensile test often ignored the influence of friction on the small punch test, and the result was too idealized. Furthermore, the data of the small punch test is difficult to obtain in large quantities. It is of great practical significance to establish an accurate stress-strain relationship of materials based on a small amount of data through the method of numerical simulation. In this paper, 304 stainless steel material was taken as an example. Through the relationship between the established small punch test data and the finite element numerical simulation data, the relationship between friction coefficient and sample correlation parameters was studied (the relationship between friction and test correlation is fully considered). The study found that the friction coefficient, and the correlation coefficient between the small punch test and the traditional tensile test results were linear, which provided a way for studying the stress-strain relationship of materials using data simulation method.

Key words: small punch test; traditional tensile test; numerical simulation; correlation parameter; friction coefficient