

球形压头微纳米痕硬度解答的自相似性

李铁萍¹⁾ 魏悦广

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

压痕试验对于确定材料的弹塑性力学参量来说,是一种简单而有效的方法,因为该方法对试样加工没有特殊要求,特别适用于微小尺寸的构件。人们在采用压痕试验结果确定材料参数时发现,由于锥形压头本身具有几何形状的自相似特点,需要双压头的试验结果才能完全确定出所有材料参数^[1],而球形深压痕硬度随着压入深度的变化,从单一曲线就可以确定出所有材料参数^[2,3]。本文从传统深压痕硬度相似解的概念^[4]出发,采用有限元方法模拟了对应不同材料参数的均匀材料、薄膜体系的球形微压痕硬度曲线,讨论了硬度解答的自相似性问题,建立了材料参数与硬度试验结果之间的解析表达式,为从试验结果中直接获得材料参数做了必要准备。

在计算中,针对的是具有幂硬化特征的金属材料。微压痕尺度效应模拟采用Huang^[6]等提出的基于机制的应变梯度塑性理论的传统形式CMSSG。

对均质材料的球形微压痕模拟结果发现:应变梯度的存在使得硬度曲线由于材料参数或几何参数的不同而分散,但这种分散性随着材料幂硬化指数的增大而减小。Tabor提出的代表性应力在浅压痕时并不能很好地反映材料参数对于硬度的影响规律。为此,本文提出了新的代表性应力,使得归一化硬度只与压入深度相关,具有相似解的特征。

对于软膜/硬基体系,硬度曲线的变化对应变梯度效应较敏感,而这种敏感性随着薄膜厚度的减小而增大,随着材料幂硬化指数的增大而减小。提出了新的代表性应力,使得薄膜硬度具有相似解的特征。

在球形深压痕硬度曲线的模拟中,考虑了摩擦的影响。结果发现:摩擦力的存在使得硬度曲线分散,但这种影响与应变梯度的影响比较是微弱的。

运用相似解确定材料参数时,需要用到球形压痕的硬度-接触半径曲线。而在压痕试验中若遇到材料挤出现象,则无法准确测量接触半径。为此,本文通过有限元计算得出了接触半径-压入深度曲线随着材料参数的变化规律,最终通过载荷-深度曲线获得硬度的相似解答。

参考文献

1. Cheng YT, Cheng CM. JMR, 1999
2. Field JS, Swain MV. J Mater Res, 1995(10): 101
3. Yan Ping Cao, Jian Lu. A new method to extract the plastic properties of metal materials from an instrumented spherical indentation loading curve. *Acta Materialia*, 2004, 52: 4023-4032
4. Hill R, Storakers B, Zdunek AB. A theoretical study of the Brinell hardness test. *Proc. R. Soc. Lond.*, A436, 1989: 301-330
5. Swadener JG, George EP, Pharr GM. The correlation of the indentation size effect measured with indenters of various shapes. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2002, 50: 681-694
6. Huang Y, Qu S, Huang KC, et al. A conventional theory of mechanism-based strain gradient plasticity. *International Journal of Plasticity*, 2004, 20: 753-782

¹⁾ E-mail: litiep@lnm.imech.ac.cn