

文章编号: 1001-4888(2014)05-647-08

基于 ASME 应变限制准则的 小冲杆试验等效断裂应变^{*}

张恩勇¹, 徐彤², 喻灿¹, 章骁程¹, 陈吉¹, 关凯书¹

(1. 华东理工大学, 承压系统与安全教育部重点实验室, 上海 200237; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013)

摘要: 小冲杆试验 (Small Punch Test, SPT) 技术是一种新型微试样试验技术, 通过极少量材料就能得到材料的许多力学性能。本文以压力容器常用钢材 Q345R 为研究对象, 通过 ABAQUS 有限元软件模拟小冲杆试验过程, 得到了小冲杆试样最先失效单元的应力三轴度; 然后根据 ASME 防止局部失效的应变限制准则中求解多轴应变极限的方法, 对小冲杆试验的等效断裂应变进行了研究。研究表明: 基于 ASME 应变限制准则的等效断裂应变具有较大的保守性, 作者所提出的修正应变限制准则参数的方法是可行的。此外, 小冲杆试样的尺寸效应对等效断裂应变也有重要影响, 使得计算的等效断裂应变比有限元模拟的应变值小。

关键词: 小冲杆试验; 等效断裂应变; 应变限制准则; 尺寸效应

中图分类号: TB302.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-13-063

0 引言

20 世纪 80 年代初期, 美国 Ames 实验室 Baik 等人提出了一种新型微试样试验方法—小冲杆试验 (Small Punch Test, 简称 SPT), 并且得到了迅速的发展^[1]。小冲杆试验法是一种利用冲杆以一定速度冲压试样薄片, 记录试样从变形到失效整个过程中的载荷—位移数据, 并借此分析得出材料各种力学性能参数的试验方法^[2]。这种方法具有微损取样的优势, 是一种具有广阔应用前景的微型试样技术, 已经成功地测试出许多材料的力学参数, 如强度、塑性、韧—脆转变温度等^[3,4]。但是, 小冲杆试验法不能直接获得材料的断裂韧度, 只能通过一些经验关系来获得材料的断裂韧度。Mao^[5]等根据大量的试验数据分析后发现, 绝大部分韧性材料的断裂韧度和双轴断裂应变之间为线性关系 (对于韧性较小的材料, 则有非线性倾向), 提出了基于测量或者预估小冲杆试样等效断裂应变及其与韧性材料断裂韧度 J_{IC} 关系的求断裂韧度的方法。所以, 研究小冲杆等效断裂应变对研究材料的断裂韧度非常重要。

小冲杆试验的试样十分微小, 在受压下压过程中, 其局部变形较大, 试样的应力状态也非常复杂。小冲杆试验只能测得载荷—位移曲线, 从载荷—位移曲线无法直接得到试样的等效断裂应变值, 为了获得小冲杆试验等效断裂应变, 只能借助于数值模拟的方法。近年来, 围绕局部法的研究在各个领域都有快速的发展。在局部法的研究中, 研究者关注的不是试样的整体失效, 而是通过数值模拟得到试样从加载到最终断裂的全过程, 分析试样某个局部的应力状态和最先失效部位的应力—应变关系^[6]。在整个试验过程中, 小冲杆试样受力为三向应力状态, 存在着高度的非线性关系, 试样不同部位有着不同的应力—应变关系, 所以局部法给小冲杆试验等效断裂应变的研究带来了新思路。

^{*} 收稿日期: 2013-04-23; 修订日期: 2014-04-13

基金项目: 863 项目 (2012AA040105), 国家科技攻关项目 (2011BAK06B03)

通讯作者: 关凯书 (1962—), E-mail: guankaishu@ecust.edu.cn

本文用连续介质损伤模型,对小冲杆试验和单轴拉伸试验进行了数值模拟,将 ASME 应变限制准则中求解多轴应变极限的方法用于研究小冲杆试验的等效断裂应变。

1 小冲杆试验

1.1 试验材料

采用压力容器常用钢材 Q345R(旧国标 16MnR),它具有良好的综合力学性能和工艺性能,其化学成分见表 1。

表 1 Q345R 的化学成分(wt%)

Tab. 1 Chemical compositions of Q345R in wt%

C	Mn	Si	P	S	Ca
0.18	1.33	0.42	0.015	0.021	0.0019

材料的拉伸试验按照 GB/T 228.1—2010《金属拉伸试验方法》进行,采用圆棒型试样,试验设备为 INSTRON 8800 型电液伺服万能材料试验机,拉伸的应变速率为 $6.67 \times 10^{-4}/s$,Q345R 力学性能见表 2。

表 2 Q345R 的力学性能

Tab. 2 Conventional tensile mechanical properties of Q345R

屈服强度 R_e (MPa)	抗拉强度 R_m (MPa)	断面收缩率 Z (%)	延伸率 A (%)
384.5	552.6	73	25.2

1.2 试验方法

首先将小冲杆试样加工成直径为 10mm、厚度为 0.6mm 的小圆片,然后用金相砂纸将圆片试样研磨至厚度 $0.5mm \pm 0.01mm$,主要目的是为了去除线切割引起的切割纹路和表面受热硬化层,严格控制圆片厚度和表面粗糙度,保证试验的可靠性^[7]。

图 1 是小冲杆试验装置示意图。小冲杆试样通过螺钉固定在上、下夹头之间,不能自由移动,近似于固支边界。加载机构采用液压加载传递给小冲杆,再通过冲杆及其底部的钢球传递到试样上,对试样进行加载直至试样破裂,试验机自动停止加载,并记录试验过程中的载荷一位移数据。

为验证小冲杆试验系统的有效性,以 1.5mm/min 的加载速度,对 Q345R 材料做了两组小冲杆试验,载荷一位移曲线如图 2 所示,曲线的重合性非常好。

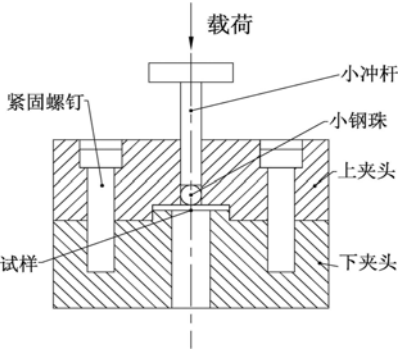


图 1 小冲杆试验装置图

Fig. 1 Schematic apparatus of SPT

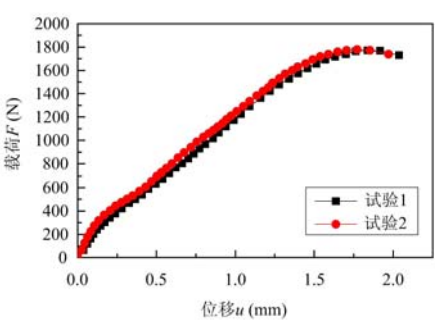


图 2 小冲杆试验载荷一位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves of SPT

2 数值模拟

2.1 小冲杆试验

利用 ABAQUS 有限元软件模拟小冲杆试验的下压过程。在有限元模拟中,通常采用连续介质损

伤模型——GTN 模型^[8],该模型以材料的微观孔隙率来描述材料的损伤程度,随着试验的进行,材料内部逐渐出现微观孔洞,这些微孔洞不断聚集、长大,最后形成宏观裂纹造成材料的失效^[9,10]。

图 3 是小冲杆试样的二维轴对称模型,采用的是线性减缩积分单元(CAX4R),在厚度方向布置了 6 个单元,试样中心附近的区域进行了网格细分,模型共包含 240 个单元和 287 个节点。对试样夹持部分的上下表面采用固定约束,中心边界采用轴对称约束,模拟中的钢球和夹具都作为解析刚体处理。模型参数按照常规小冲杆试验选取,试样厚度 0.5mm,压球直径 2.5mm,下夹具孔径 4mm,上夹具孔径 2.5mm,下夹具圆角半径是 0.2mm。由于压球和试样的上表面是有接触的,必须确定其摩擦系数,本文中的摩擦系数为 0.15,主要是根据有限元模拟和试验过程中试样最终的断裂形式和断裂位置的对比分析得出的。

由小冲杆试验和有限元模拟确定 GTN 模型参数,参数见表 3 和表 4。图 4 是小冲杆试验模拟中不同阶段的试样状态图。小冲杆试验的载荷一位移曲线与模拟曲线见图 5,试验曲线与模拟曲线的重合性非常高,因此可认为有限元模型准确、可靠。

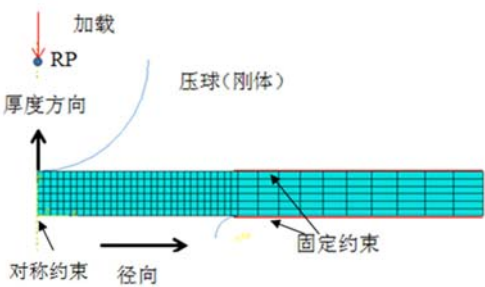


图 3 小冲杆试验有限元模型
Fig. 3 Finite element model of SPT

表 3 拉伸试验得出的 GTN 模型参数
Tab. 3 Parameters of GTN model
determined by tensile test

E(MPa)	ν	K	n
190000	0.3	1008.27	0.2111

表 4 小冲杆试验得出的 GTN 模型参数
Tab. 4 Parameters of GTN model determined by SPT

损伤参数	参数描述	取值
q_1	材料参数	1.5
q_2	材料参数	1.0
q_3	材料参数	2.25
f_0	初始材料孔隙率	0.002
f_c	材料临界孔隙率	0.21
f_F	材料失去承载能力时的孔隙率	0.28
f_n	第二项粒子的体积分数	0.0375
ϵ_N	空洞形核的平均应变	0.3
S	ϵ_N 的标准差	0.01

2.2 圆棒拉伸试验

通过 ABAQUS 软件模拟 Q345R 圆棒拉伸试验。由于关注的是试样发生颈缩处的局部应变,所以只建立了拉伸试样标距段的有限元模型。基于其对称性,只需建立二维轴对称模型,采用的是线性减缩积分单元(CAX4R)。将整个试样的中心部分(颈缩处)进行网格的细化,模型包括 1456 个单元,1350 个节点,拉伸试验的有限元模型见图 6。试样的一端施加位移约束,一端施加固定约束。使用 GTN 模型进行模拟,将小冲杆试验模拟中的参数代入拉伸的模型中,模拟的断面收缩率与标准拉伸试验的断面收缩率相同,说明了模型的正确性。

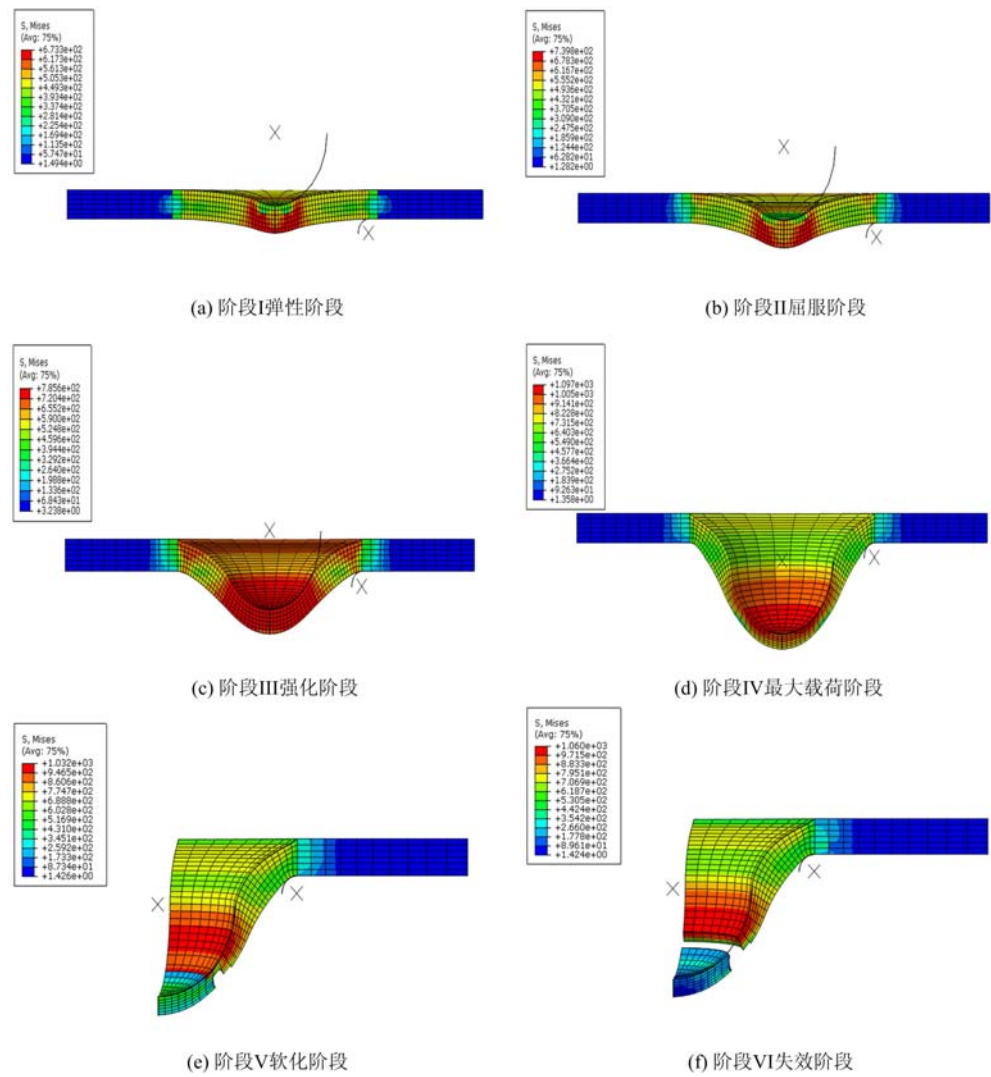


图 4 小冲杆试验模拟中各阶段的试样状态图
Fig. 4 Different stages in the FE simulation of SPT

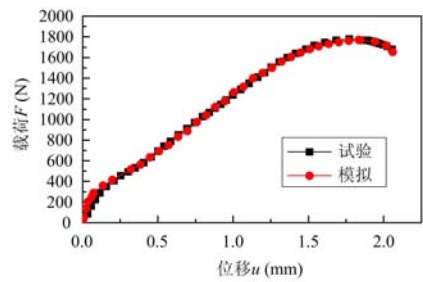


图 5 小冲杆试验载荷位移曲线与模拟曲线的对比
Fig. 5 Experimental load-displacement curve compared with FE simulation

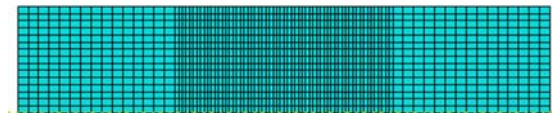


图 6 拉伸试验有限元模型
Fig. 6 Finite element model of smooth tensile specimen

3 小冲杆试验等效断裂应变

3.1 ASME 应变限制准则

ASME VIII-2 2007 为防止压力容器的局部塑性失效,提出了基于弹塑性分析的应变限制准则^[11]。在这一准则中,将整体等效塑性应变和成形应变(加工残余应变)之和控制在多轴应变极限(应变极限是

指断裂时刻所对应的最大应变值)内,应变限制准则中的多轴应变极限是:

$$\epsilon_L = \epsilon_{L,u} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\alpha_{sl}}{1 + m_2} \right) \left(TF - \frac{1}{3} \right) \right] \quad (1)$$

式中, ϵ_L 为多轴应力状态下的应变极限; $\epsilon_{L,u}$ 为单向应力状态下的应变极限, 根据 m_2 、材料单向拉伸延伸率 A 和断面收缩率 Z 的值, 取三者中的最大值; m_2 为系数, 以材料的屈服强度与抗拉强度的比值为基础, 根据材料的类型计算, 对于铁素体钢 $m_2 = 0.6(1 - R_e/R_m)$, 对于奥氏体不锈钢 $m_2 = 0.75(1 - R_e/R_m)$; α_{sl} 为系数, 对于铁素体钢取 2.2, 对于奥氏体不锈钢取 0.6; TF 为应力三轴度。

$$TF = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3}{\sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]/2}} \quad (2)$$

从式(1)可以看出, 只要知道材料单向拉伸的延伸率和断面收缩率, 就能确定材料单向应力状态下的应变极限 $\epsilon_{L,u}$ 。如果材料的应力状态已知, 则其应力三轴度是可以计算的, 从而由式(1)就能确定多轴应力状态下的应变极限值。

3.2 等效断裂应变

在小冲杆试验中, 试样的失效是一个应变控制的过程, 即最先失效的部位是整个试样中应变最大的地方。小冲杆试验是用小钢珠冲压小圆片, 当下压到一定程度后, 钢球和试样上表面大面积的接触, 可以把试样的受力状态近似为压力容器受内压的状态。因为小冲杆试样非常薄(0.5mm), 相对其直径而言, 其厚度可以忽略不计。Mao^[5]等在研究小冲杆的断裂韧性时, 就采用了 Chakrabarthy 提出的薄膜理论。小冲杆试样受三向应力状态, 其断裂处是试样应变最大的位置, 也就是说最先断裂处的多轴应变极限就是小冲杆试验的等效断裂应变。所以, 本文将 ASME 应变限制准则中求多轴应变极限的方法用于研究小冲杆试验的等效断裂应变。

3.2.1 基于应变限制准则的等效断裂应变

Q345R 为铁素体材料, α_{sl} 取 2.2, $m_2 = 0.1825$ 。由 Q345R 的力学性能(表 2)知, 断面收缩率 Z 为 73%, 延伸率 A 为 25.2%, 所以 Q345R 在单向应力状态下的应变极限 $\epsilon_{L,u} = 0.73$ 。在小冲杆试验有限元模拟中, 提取最先失效单元的三个主应力, 计算应力三轴度。图 7 是小冲杆试样最先失效单元应力三轴度一位移的变化曲线, 失效时的应力三轴度是 0.6346。

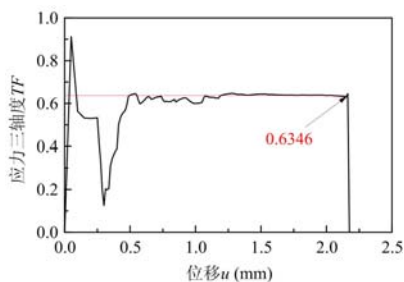


图 7 小冲杆试验最先失效单元应力三轴度一位移曲线

Fig. 7 The SPT TF-displacement curve of the first failure element

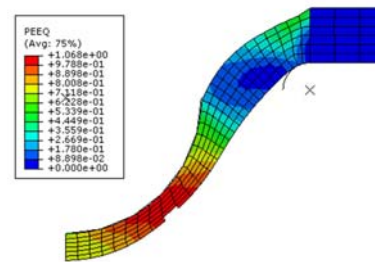


图 8 断裂时刻的应变分布

Fig. 8 Strain distribution on fracture

根据式(1)得小冲杆试验的等效断裂应变:

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_L = 0.73 \cdot \exp \left[- \left(\frac{2.2}{1 + 0.1825} \right) \left(0.6346 - \frac{1}{3} \right) \right] = 0.4167 \quad (3)$$

图 8 是小冲杆试样在断裂时刻的应变分布, 可以看出最先失效处的应变值是最大的。在数值模拟中, 直接提取最先失效单元的应变, 如图 9 所示。断裂开始时, 该单元的断裂应变为 0.9176, 比 ASME 应变限制准则方法得到的等效断裂应变 0.4167 要大很多。这说明 ASME 防止局部失效的应变限制准则, 在求解多轴应变极限时是非常保守的, 所得小冲杆等效断裂应变值偏小。

3.2.2 应变限制准则参数的修正

在用应变限制准则求解小冲杆等效断裂应变时,单向应力状态下的应变极限 ϵ_{Lu} 根据参数 m_2 、材料单向拉伸延伸率 A 和断面收缩率 Z 的值,取三者中的最大值,这三个量都是一个整体的概念,所以 ASME 应变限制准则中的应变极限 ϵ_{Lu} 始终是一个整体的平均量。但是,小冲杆等效断裂应变是一个局部(最先失效处)的应变,从而导致有限元模拟的等效断裂应变比基于应变限制准则的等效断裂应变值大很多,这就需要对单向应变极限 ϵ_{Lu} 做出修正,使得其更符合实际情况。

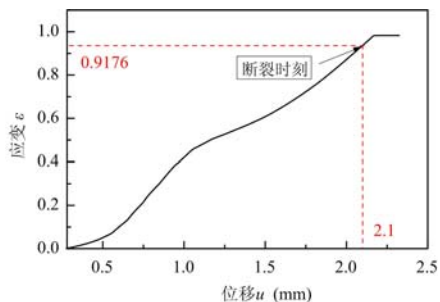


图 9 小冲杆试验最先失效单元的应变-位移曲线

Fig. 9 The SPT strain-displacement curve of the first failure element

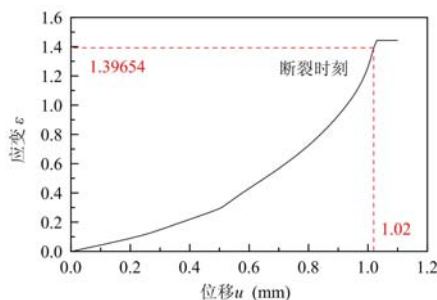


图 10 单轴拉伸最先失效单元应变-位移曲线

Fig. 10 The tensile strain-displacement curve of the first failure element

在单轴拉伸试验过程中,试样在颈缩前也会发生试样长度的伸长和横截面的减小,这些变化都是均匀的,整个试样都存在这些变化。一旦试样开始进入颈缩阶段,试样局部的横截面积开始大幅度减少,试样长度开始快速增长,此时的变化主要集中在试样的局部,这时候颈缩部位的应变是很大的。但是,在最终断裂后求取整个断裂应变时,却是把应变平均到整个试样上进行求取,这就使得单轴拉伸试验的断裂应变比实际断裂时的应变值小。根据这个思路,作者对应变限制准则中确定单向应变极限 ϵ_{Lu} 的方法进行了修正:直接通过 Q345R 圆棒拉伸试验的有限元模拟,提取其最先失效单元(这与准则中应力三轴度保持了一致性)的断裂应变作为单向应变极限 ϵ_{Lu} 。

在 Q345R 圆棒拉伸试验的模拟中,最先失效单元应变-位移变化曲线见图 10。最先失效单元的断裂应变为 1.39654,把这个值作为单向应变极限 ϵ_{Lu} ,代入式(1)中得:

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_L = 1.39654 \exp \left[- \left(\frac{2.2}{1 + 0.1825} \right) \left(0.6316 - \frac{1}{3} \right) \right] = 0.8017 \quad (4)$$

这个值与小冲杆试验模拟中最先失效单元的断裂应变值 0.9176 比较接近,说明这种方法是可行的。但是,其值 0.8017 仍然小于小冲杆试验模拟得到的断裂应变值 0.9176,说明应变限制准则中除单向应变极限值 ϵ_{Lu} 取值具有保守性外,还有一些其他原因使计算的小冲杆等效断裂应变小于模拟结果。

4 分析与讨论

基于 ASME 应变限制准则求解多轴应变极限的方法,得出的小冲杆试验等效断裂应变与模拟得到的断裂应变值存在一定的差距。其原因是多方面的,一方面是应变限制准则中参数的保守性,另一方面是小冲杆试样的尺寸效应也是一个重要的影响因素。Bohumr Strnadel^[12], Farideh Hajy Akbary^[13] 等人曾对圆棒及平板拉伸试样的尺寸效应进行过研究。通过选取不同半径的圆棒拉伸试样和不同厚度的平板拉伸试样进行试验,发现两种试样的尺寸对强度的影响都很小,但是对试样的断面收缩率的影响较大。试样的断面收缩率与试样的断裂应变有着直接的关系,这说明试样的尺寸对断裂应变有着显著的影响。

Brigdman^[14] 通过试验发现,无论是圆棒还是平板拉伸,随着试样尺寸的减小,试样的断裂应变都呈增大的趋势。对小冲杆试验而言,可以看成是厚度更小的圆形薄板,根据 Brigdman 的试验结果,拉伸圆棒的应变极限值明显小于小冲杆单向应力状态下的应变极限值。在上述求解过程中,将标准圆棒拉伸试验模拟的断裂应变作为小冲杆试验单向应变极限 ϵ_{Lu} ,带入应变限制准则中求解小冲杆等效断裂应

变, 从而使得基于应变限制准则的小冲杆试验等效断裂应变比数值模拟的结果小。

5 结论

本文运用有限元数值模拟和 ASME 应变限制准则的方法对小冲杆试验等效断裂应变进行了分析和求解, 主要结论如下:

(1) 利用延性损伤—GTN 模型对小冲杆试验和单轴拉伸试验进行了数值模拟, 确定了 GTN 模型参数, 并由数值模拟得到小冲杆试样最先失效单元的应力三轴度和断裂应变。

(2) 根据 ASME 应变限制准则求解多轴应变极限的方法, 求出的小冲杆试验等效断裂应变为 0.4167, 与数值模拟的断裂应变 0.9176 相差较大, 说明 ASME 应变限制准则在求解多轴应变极限时具有保守性。

(3) 将标准圆棒拉伸数值模拟中最先失效单元的断裂应变作为单轴应变极限 ϵ_{Lu} , 求解出的等效断裂应变为 0.8017, 与有限元模拟结果较为接近。此外, 小冲杆试样的尺寸效应也是造成计算的等效断裂应变较数值模拟小的原因。

参考文献:

- [1] Baik J M, Kameda J, Buck O. Small Punch Test Evaluation of Intergranular Embrittlement of an Alloy Steel [J]. Scripta Metallurgical, 1983, 17(12): 1443—1447.
- [2] 艾芒, 杨镇, 王志文. 小冲孔试验法的起源、发展和应用[J]. 机械强度, 2000, 22(4): 279—282 (AI Mang, YANG Zhen, WANG Zhiwen. Origination, Development and Application of Small Punch Test Method [J]. Journal of Mechanical Strength, 2000, 22(4): 279—282 (in Chinese))
- [3] Roger Hurst, Karel Matocha. The European Code of Practice for Small Punch Testing[C]. Metallurgical Journal, 2010, 8: 5—11.
- [4] Bulloch J H. A Study Concerning Material Fracture Toughness and Some Small Punch Test Data for Low Alloy Steels[J]. Engineer Failure Analysis, 2004, 11(4): 635—653.
- [5] 丁克勤, 吴永礼. 在役设备材料断裂力学参数测定方法综述—小冲杆实验力学研究进展之二[J]. 实验力学, 2009, 12(6): 545—557 (Ding Keqin, Wu Yongli. An Overview of Methods for Material Fracture Parameter Measurement of in-Service Equipments—The Advance of Small Punch in Experimental Mechanics II[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 12(6): 545—557 (in Chinese))
- [6] Benseddiq N, Imad A. A Ductile Fracture Analysis using a Local Damage Model[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(4): 219—227.
- [7] 关凯书, 徐彤, 宋明等. 小冲杆试验确定材料拉伸断后延伸率的研究[J]. 实验力学, 2011, 26(2): 209—214 (Guan Kaishu, Xu Tong, Song Ming, et al. An Assessment of the Elongation of Fractured Specimen Subjected to Tensile Testing Based on Small Punch Testing[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(2): 209—214 (in Chinese))
- [8] Tvergaard V, Needleman A. Analysis of the Cup-cone Fracture in a Round Tensile Bar [J]. Acta Metallurgica, 1984, 32(1): 157—169.
- [9] Gurson A L. Continuous Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1977, 99(1): 2—15.
- [10] Tvergaard V. Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Condition[J]. International Journal of Fracture, 1981, 17: 389—407.
- [11] ASME BPVC SECTION VIII Pressure Vessels Division 2 Alternative Rules[S]. 2007.
- [12] Bohumir Strndael, Jan Brumek. The Effect of Size in Tensile Tests of Steels [C]. The 2nd International Conference SSTT, 2012.
- [13] Farideh Hajy Akbary, Maria Jesus Santofimia. Specimen-Size Effects on the Tensile Behavior of Various Steels [J]. Metallurgical Journal, 2012, 8: 233—238.
- [14] Bridgman P W. Studies in Large Plastic Flow and Fracture [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1953, 1(2): 146.

On the Equivalent Fracture Strain in Small Punch Test based on ASME Strain Limit Criterion

ZHANG En-yong¹, XU Tong², YU Can¹, ZHANG Xiao-cheng¹, CHEN Ji¹, GUAN Kai-shu¹

(1. The Key Laboratory of Safety Science of Pressurized System, Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. China Special Equipment Inspection & Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Small punch test (SPT) is a new micro-sample test technology, which provides a practical method of obtaining a lot of material mechanical properties by using a very small amount of material. In this paper, taking Q345R common steel used in pressure vessel as study object, a SPT finite element model was established by ABAQUS code and the test process was simulated. Stress triaxiality of the first failed unit in SPT specimen was obtained by finite element. Then, equivalent fracture strain in small punch test was studied, based on the method for solving multi-axis strain limit in ASME strain limit criterion for protecting against local failure. Results indicate that the equivalent fracture strain based on ASME strain limit criterion is conservative, and the method proposed by authors for modifying strain limit criterion parameters is feasible. Besides, the specimen size effect in small punch test has significant influence on the equivalent fracture strain; the calculated equivalent fracture strain is smaller than that obtained from finite element simulation.

Keywords: small punch test; equivalent fracture strain; strain limit criterion; size effects