

小冲杆测试法在评定材料性能的应用进展

李 璞* 关凯书

(华东理工大学)

摘 要 综述了小冲杆试验的发展历史以及在评价材料性能(基本力学性能、韧脆转变温度、材料断裂性能和蠕变性能)等方面的研究进展,同时指出了研究中存在的问题和今后的研究方向。

关键词 小冲杆试验 材料性能 韧脆转变温度 断裂韧性

中图分类号 TQ016.1

文献标识码 A

文章编号 0254-6094(2006)05-0262-06

石油、化工以及核能等行业的大多数压力容器与管道长期在高温、高压及临氢腐蚀条件下运行,会发生材质劣化使其性能下降。这些设备,如加氢裂化、加氢精制、制氢、重整、催化、乙烯、焦化等装置及电站锅炉高温蒸汽系统等成为比较容易发生事故的特殊设备^[1~4]。如何评价和预测这些特殊设备的当前性能和剩余寿命一直是国内外研究的热点问题。传统的无损检测大多只能探测出当前使用材料的微观缺陷和宏观材料形貌,而在评价材料性能(基本力学性能、韧脆转变温度、材料断裂性能和蠕变性能)等方面存在着不足。其他传统的材料性能评价实验方法大多基于破坏性取样或破坏性实验,对在役设备的取样往往具有一定的损伤和破坏,从而限制了对在役设备的评定。针对这种情况,需要一种可以通过从在役设备中取得微小尺寸试样来获取材料的各种性能参数,且对设备本身无损的微试样测试方法。

正是基于“无损取样”的实验要求,80年代初期出现一种新型微试样试验方法——小冲杆试验(Small Punch Test,简称SPT)。这种试验技术早期主要集中在核工业领域,直到20世纪90年代初才渐渐扩展到非核工业高温服役材料性能测试上,但目前还处于实验室研究阶段,没有广泛应用到工程实践中^[5,6]。本文综述了小冲杆试验方法的发展历史以及在评价材料性能方面的最新研究进展,为今后该试验方法的发展提供必要的基础知识和研究思路。

1 小冲杆试验的原理

小冲杆试验是一种利用冲杆以一定速度冲压试样薄片,同时记录试片从变形到失效整个过程中的载荷-位移(变形挠度)数据,并借此分析得出材料各种性能参数的试验方法。其典型装置如图1所示,试验用试样可为圆形或方形,其尺寸很小,一般直径或方形边长为3~10mm不等,厚度在0.1~0.5mm范围之内。试样在受载瞬间及随后的蠕变过程中将发生变形,其基本变形形貌如图2所示。试验得到的典型载荷-位移曲线(简称P-δ曲线,图3),与典型的蠕变曲线(图4)类似,试样前后经历4个变形阶段:弹性弯曲阶段;塑性变形阶段;塑性失稳阶段;开裂破裂阶段。从中可以确定一些用来表征材料变形和断裂性能的参数,如屈服载荷 P_0 、最大载荷 P_{max} 、失效挠度 δ_{max} 和断裂能 E_f 等,然后利用理论和试验分析的方法,将图3中得到的这些表征参数转化为强度、塑性及断裂韧性等一系列材料性能数据^[6]。

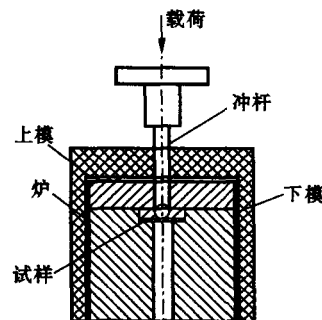


图1 典型小冲杆试验装置图

* 李 璞,男,1981年7月生,硕士研究生。上海市,200237。

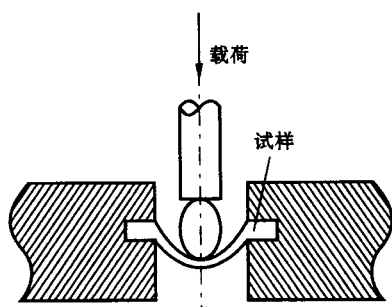


图2 小冲杆实验变形形貌

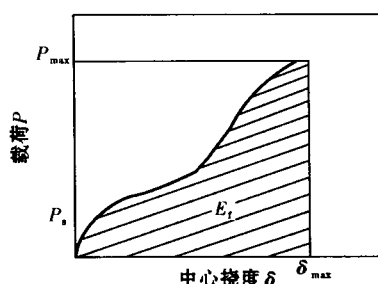


图3 典型小冲杆试验的载荷-位移曲线

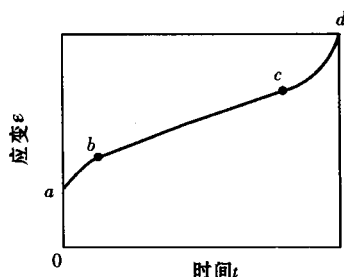


图4 典型的蠕变曲线

2 小冲杆试验法的发展

Small Punch Test 这一称谓最早见于 Baik 等人的文章^[7]。随后美国 Handford 工程发展实验室的 Huang^[8]等人于 1981 年设计出首台圆片弯曲试验设备,采用圆板弯曲理论将简支圆片在冲杆作用下的载荷-变形曲线转变为应力-应变关系,作为与传统拉伸试验之伸长率相对应的弯曲延性指标,从而实现用小圆片试样测知材料延性的目的。从 Huang 的圆片弯曲试验开始,到现在约 20 年的时间里以小冲杆试验技术为代表的小试样试验技术经历了几个阶段的工作。

2.1 小冲杆试验用于材料力学性能测试的研究

小冲杆试验用于材料力学性能测试的研究早期主要以 Manahan^[9]的微型圆片弯曲试验(MD-

BT)和 Okada^[10]与 Mao^[11]的小试样微凸试验为代表。与 Huang 的试验相同,这一阶段主要以研究小冲杆试样与传统标准试样在屈服强度和材料延性等方面的关联性为特征。

Okada^[10]用两类韧性不同的材料进行凸出试验,并将记录到的典型载荷-位移曲线分为几个区域,分别对应试验过程中试片的几个变形阶段(图4):弹性弯曲阶段、塑性弯曲阶段、薄膜伸长阶段和开裂破裂阶段。另一方面,通过假设得到应力与载荷的关系,再进一步将二维状态下的应力与试样单轴拉伸应力等价,从而得到小试片材料最大载荷与抗拉强度、屈服载荷与屈服强度、位移与总拉伸应变之间的相互对应关系。

Mao^[11]通过对 HT-60、PCA、HT-9、SUS304、A533B 5 种材料的 $\phi 3\text{mm} \times 0.25\text{mm}$ 规格,HT-60、A508、HT-9、SUS304、A533B 5 种材料 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 0.3 \sim 0.5\text{mm}$ 规格的小冲杆试验,分别得到了 σ_s - P_s 和 σ_b - $P_{\max}$ 的经验关系:

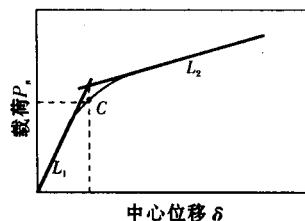
$$\sigma_s = 0.36 P_s / t_0^2 \quad (1)$$

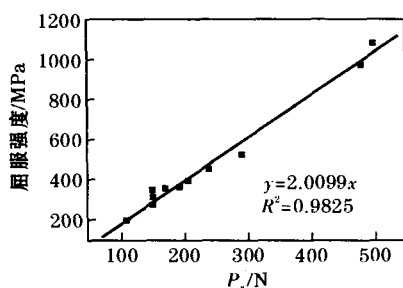
$$\sigma_b = 0.13 (P_{\max} / t_0^2) - 320 \quad (2)$$

式中 t_0 ——试样的初始厚度。

韩浩^[12]采用的方法是将小冲杆试验的前半部分曲线取出,如图5所示。将弹性弯曲部分的直线 L_1 延长,再将塑性弯曲区的曲线后段用线性回归法近似模拟为直线 L_2 ,再倒推到与弹性弯曲直线相交,其交点所对应的曲线上的 P 值即为薄圆片的特征屈服载荷 P_s 。这一方法克服了国外确定 P_s 的随意性。将 11 种测试材料的 P_s 值作为图6的横坐标,相应地用常规试样测得的 σ_s 值为纵坐标,对这些点做直线拟合,得到回归方程:

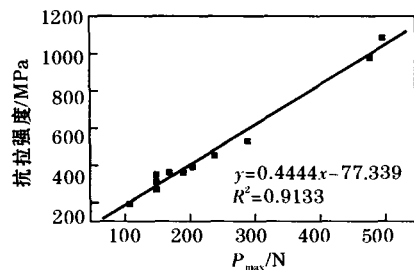
$$\sigma_s = 2P_s \quad (R^2 = 0.9825) \quad (3)$$

图5 试样屈服载荷 P_s 的确定方法

图6 屈服强度 σ_s 和 P_s 的关系

将 $t_0 = 0.5$ 代入式(1)得 $\sigma_s = 1.44P_s$,与式(3)相比有一定的差别,主要是试样几何尺寸的差异和 P_s 确定方法的差异造成的。由此可见,用小冲杆法来确定材料的 σ_s 值较为可靠,有相当高的相关系数。同样 σ_b 与 P_{max} 也存在明显的线性关系,韩浩^[12]对小冲杆试验法得到的最大载荷与用传统拉伸试验得到的抗拉强度 σ_b 绘成图7,得到的 σ_b - P_{max} 线性回归方程为:

$$\sigma_b = 0.44P_{max} - 77 \quad (R^2 = 0.9133) \quad (4)$$

图7 抗拉强度 σ_b 和 P_{max} 的关系

由于试验机规格和试样尺寸的差异,与Mao所获得的关联方程有一定的差别。

2.2 小冲杆试验用于材料冲击韧性测试技术研究

Manahan等人成功地找出小试样与传统标准试样在拉伸性能方面的关联之后,人们开始把目光转向材料冲击性能方面的关联。这一阶段的工作主要集中在对材料韧性转变温度($T_{初}$)的研究上,几乎所有关于 $T_{初}$ 的研究思路都是一致的。其内容可概括为:首先采用SPT(或MDBT)技术得到试样在不同温度下的载荷-挠度关系曲线,然后采用计算曲线下面积的方法,将载荷-挠度曲线转化为温度-SP能量曲线,然后引入同样材料的温度-CVN冲击能量曲线,将两者进行比较、分析,最后得出两者关联性的结论。

在该阶段中,Kameda^[13]、Mao^[14]、Matsushia^[15]和Bulloch^[16]等证明了微试样冲击试验得出

的数据与CVN冲击试验能量转变温度具有关联性。其中,Kameda和Mao^[14]对0.25~0.5mm厚的奥氏体钢圆片进行小冲杆试验分析,得到的断裂冲击能量和CVN冲击能量进行了比较、拟合(图8、9),得出了线性表达式:

$$(T_{初})_{SPT} = 0.4(T_{初})_{SCT} \quad (5)$$

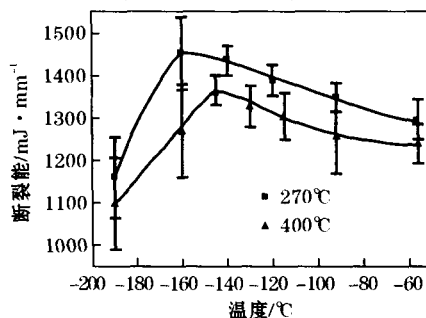


图8 小冲杆测试Cr-Mo钢的断裂能量

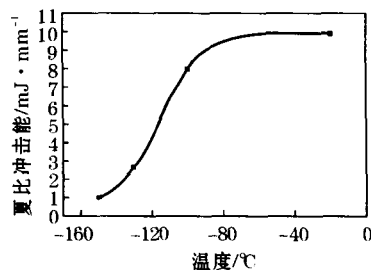


图9 Cr-Mo钢的夏比冲击能量

Matsushia^[15]根据C-0.5Mo、Cr-Mo和Cr-Mo-V钢的试验数据,并利用多元回归分析法评定了 T_{CVN} 与试样的 T_{SP} 、化学成分、晶粒尺寸、硬度和贝氏体与珠光体百分比之间的关系,最后发现 T_{SP} 和晶粒尺寸 d 显著性较高,并归纳出以下关系式:

$$T_{CVN} = 1.35T_{SP} - 0.84 \times 10^2 d^{-0.5} + 326 \quad (6)$$

Bulloch^[16]研究问题的侧重点与Matsushia一样,都是寻求 T_{SP} 和 T_{CVN} 之间的关系。Bulloch综合前人得出的一系列关于 T_{SP} 和 $T_{断}$ 的数据,提出另一种非线性关系式:

$$T_{断} = 1.92 \times 10^5 / (T_{SP})^2 \quad (7)$$

并通过比较,证明非线性关系式比线性关系式更为合理。

综上所述,关于SP试验得到的转变温度(T_{SP})与CVN冲击试验转变温度(T_{CVN})之间的关系式基本上均认为呈线性关系,即可表达为: $T_{CVN} = \alpha T_{SP} + \beta$ (α 和 β 均为常数)这样的经验式。式

中 T_{CVN} 可为 $T_{断}$ 值, 也可为 $T_{韧}$ 值。两种试验方法的关联性大体从图 10 可见。由于能量方法简单而且物理意义明确, 通过小冲杆试验分析材料的冲击性能已被公认为最适于分析小冲杆冲击性能的方法。

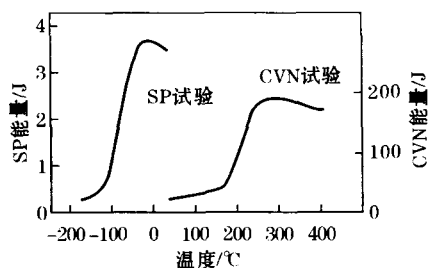


图 10 典型 SP 试验 E_f -温度曲线与 CVN 试验的能量-温度曲线比较

2.3 小冲杆试验用于材料抗断裂性能和蠕变性能的研究

对小冲杆试验技术的研究已经进入了第3阶段, 人们开始探索用小冲杆试验法确定材料的断裂韧度值和材料的蠕变性能。在研究材料的断裂韧度方面, 主要的代表有 Mao^[17,18]、Bulloch^[16] 以及 Afzal^[19] 等人。

早期的研究思路比较简单: 用小冲杆试验找出 $T_{韧}$ 与传统 $T_{断}$ 之间的关系, 再根据以往积累的 $T_{断}$ 与 K_{IC} 的经验关系预测材料的 K_{IC} 值。这种方法依据的全是经验关系, 复杂而不精确。目前直接寻求 SP 试验结果与 K_{IC} (或 J_{IC}) 的关系成为研究的主流, Mao 将材料分为延性和脆性两种, 并分别针对延性材料和脆性材料提出了小冲杆有效断裂应变 ϵ_{qf} 和断裂应力 $\sigma_{f(SP)}$ 的概念。研究并发展了测量或估算 ϵ_{qf} 和 $\sigma_{f(SP)}$ 的方法, 同时根据试验结果找出了 ϵ_{qf} 和 J_{IC} (两者之间的关系见图 11) 以及 $\sigma_{f(SP)}$ 和 K_{IC} 之间存在的经验关系:

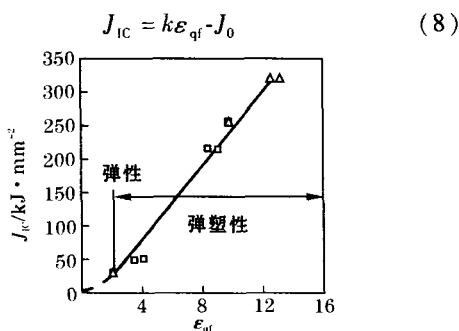


图 11 有效断裂应变与断裂韧性之间的关系

$$K_{IC} = C(\sigma_{f(SP)})^{2/3} \quad (9)$$

式中 k 、 J_0 和 C 均为试验确定之常数, 从而成功地实现了用小冲杆试验测材料断裂韧性 K_{IC} 或 J_{IC} 的构想。

Bulloch^[16] 在研究材料断裂韧度的时候引入小试片断裂形貌特征参数, 提出了 J_c 的计算式:

$$J_c = \sigma_0 E_f^* l_0^* \quad (10)$$

式中 σ_0 ——流变应力;

E_f^* ——空洞间距;

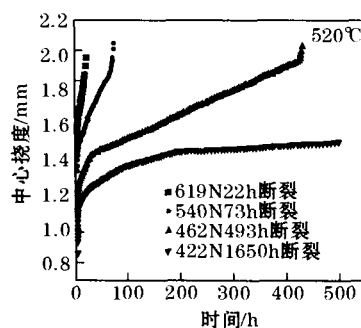
l_0^* ——临界断裂应变。

Afzal^[19] 引用能量观点来解决问题, 他认为 SP 试样断裂时存在 $W_T = W_e + W_p + W_f$ 这样的能量关系, 即总能量 (W_T) 等于弹性能量 (W_e)、塑性能量 (W_p) 与断裂能量 (W_f) 之和。弹性项 W_e 可忽略, 塑性项 W_p 可根据小冲杆载荷-挠度曲线获知。

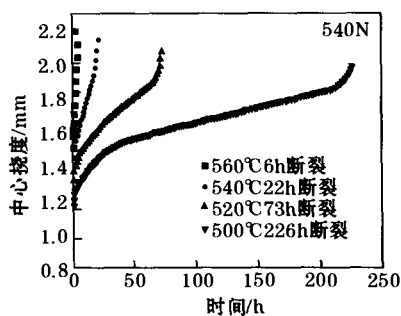
综上所述, Mao 的方法比较简单易行; Afzal 的方法概念清楚, 也较合理, 但基本上仅适用于延性材料; Bulloch 的方法考虑了微观特征参数, 同时从宏微观角度全面地反映了断裂本质, 但参数 σ_0 不易测定, 或者测量误差较大。

在评价材料蠕变性能方面, 王玉成^[20] 和杨镇^[21] 做了一些很有意义的探索。王玉成^[20] 在不同载荷和不同温度下对 1.25Cr0.5Mo 做小冲杆蠕变试验如图 12 所示, 发现中心挠度对断裂时间的曲线与传统蠕变试验曲线很相似, 具有典型的 3 个阶段: 第 1 阶段是降速阶段, 接着是带有恒速蠕变速率的第 2 阶段, 在第 3 阶段蠕变速率不断增加直至试样断裂。

杨镇^[21] 在研究小冲杆试样的变形进入薄膜拉伸状态后, 发现球部的薄膜应变与中心点位移



a. 载荷变量



b. 温度变量

图 12 试样变形与时间关系曲线

δ 之间存在函数关系, 函数的纯理论解存在困难, 便利用集合关系和蠕变第 II 阶段假设材料体积不变的原理, 在接触角 θ_0 为 $0 \sim 90^\circ$ 的范围内, 以 1° 为步长, 假设 90 个 θ_0 值, 计算出各 θ_0 值下的位移值 δ 与表征最大应变 $\bar{\epsilon}_{\max}$, 这 90 组数据经二次多项式拟合, 得到下式:

$$\bar{\epsilon}_{\max} = 0.2111\delta^2 + 0.3299\delta \quad (R^2 = 1.00) \quad (11)$$

式(11)表明了 $\bar{\epsilon}_{\max}$ 与中心位移 δ 存在几何关系。

综上所述, 虽然小冲杆蠕变试验和常规单轴向拉伸的蠕变试验两者获得的蠕变曲线十分相似, 但前者是多向应力应变状态, 而后者是单向应力应变状态。另外, 用小冲杆试验的结果来模拟甚至一定程度下代替常规蠕变试验依然十分困难。

2.4 小冲杆试验有限元模拟分析

近年来, 人们对小冲杆试验过程进行了有限元模拟分析, 发现有限元分析小冲杆试样非线性变形过程和小冲杆试验得出的变形曲线很相似。Peng^[22] 采用了 ABAQUS 对含 9% Cr 的奥氏体钢 (T92/P92) 做有限元模拟分析, 发现有限元模拟生成的中心挠度-时间曲线 (图 13) 与试验得出的曲线很相似, 都具有第二阶段蠕变特性。韩浩^[23]

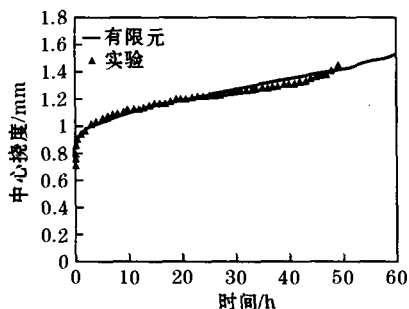
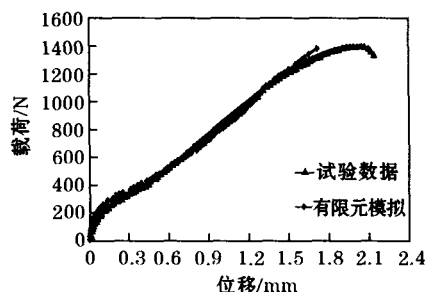


图 13 中心挠度与时间关系曲线

对 16CrMo 钢进行有限元分析, 发现载荷-位移曲线与实验测得的应变-应力曲线有很好的 consistency (图 14), 从而说明了有限元分析小冲杆试样方法具有可信性。

图 14 有限元模拟和试验得出的
载荷-位移曲线对比

3 结束语

到目前为止, 小冲杆试验与传统标准试验在拉伸性能和冲击性能方面的关联性研究已经日趋成熟; 对断裂性能和蠕变性能方面的研究正处于成长阶段。同时, 人们正在进一步开发小冲杆试验技术的潜能, 以便将它应用到更多种类的金属材料甚至非金属材料上, 应用到焊缝或热影响区等难于取样分析的敏感部位, 最终广泛应用于工程实践中。

参 考 文 献

- 1 张崧, 彭光俊. 在役金属材料剩余寿命预测技术. 实用测试技术, 2002, 7(4): 5~6
- 2 陈国理, 陈柏暖, 许忠斌. 锅炉及压力容器的剩余寿命评估及延寿分析. 石油化工设备技术, 1995, 16(4): 1~5
- 3 李晓延, 史耀武. 工业装备维护管理的寿命评估技术. 北京工业大学学报, 1998, 24(4): 115~119
- 4 戴树和. 化工装置材料损伤和寿命预测技术的研究. 中国工程科学, 1999, 1(3): 63~67
- 5 艾芒, 杨镇. 小冲孔试验法的起源、发展和应用. 机械强度, 2000, 22(4): 279~282
- 6 杨镇, 王志文. 小冲杆试验法及其在评定材料韧性方面的应用. 华东理工大学学报, 2002, 28(1): 83~87
- 7 Baik J M, Kameda J, Buck O. Small Punch Test Evaluation of Intergranular Embrittlement of an Alloy Steel. Scripta Metallurgica et Materialia, 1983, 17(3): 1443~1447
- 8 Huang F H, Hamilton M L, Wire G L. Bend Testing for Miniature Disks. Nuclear Technology, 1982, 57(10):

- 234 ~ 242
- 9 Ainsworth R A, Hales R, Budden P J et al. An Assessment Procedure for The High Temperature Response of Structures. UK, Nuclear Electric Ltd, 1996. 1
 - 10 Kim S H, Hong S H. Prediction of Creep-Rupture Time and Strain of Steam Pipe Accounting for Material Damage and Grain Boundary Sliding. Fitness-for-Service and Decisions for Petroleum and Chemical Equipment, ASME 1995, PVP-v315: 213 ~ 220.
 - 11 Mao X, Takahashi H. Development of a Further-Minialized Specimen of 3mm Diameter for TEM Disk Small Punch Test. Journal of Nuclear Materials, 1987, 150 (25): 42 ~ 45
 - 12 韩浩. 小冲杆试验测定金属材料常温性能的研究: [硕士论文]. 上海: 华东理工大学, 2003
 - 13 Kameda J, Buck O, Mater J. Hardening and Intergranular Embrittlement in Neutron-Irradiated Ferritic Alloys. Materials Science and Engineering, 1986, 83(29): 143 ~ 149
 - 14 Kameda J, Mao X. Small Punch and TEM-Disc Testing Technique and Their Application to Characterization of Radiation Damage. Journal of Materials Science, 1992, 98 (27): 983 ~ 989
 - 15 Matsushita T, Saucedo M L, Joo Y H. DBTT Estimation of Ferritic Low Alloy Steel in Service Plant by Means of Small Punch Test. Seoul, Korean Society of Mechanical Engineers 1990. 259 ~ 264
 - 16 Bulloch J H. The Small Punch Toughness Tests: Some Detailed Fractographic Information. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1995, 63(7): 177 ~ 194
 - 17 Mao X, Shoji T, Takahashi H. Characterization of Fracture Behavior in Small Punch Test by Combined Recrystallization-Etch Method and Rigid Plastic Analysis. Journal of Testing and Evaluation, 1987, 15(1): 30 ~ 37
 - 18 Mao X, Saito M, Takahashi H et al. Small Punch Test to Predict Ductile Fracture Toughness J_{IC} and Brittle Fracture Toughness K_{IC} . Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, 25(4): 2481 ~ 2485
 - 19 Afzal K M, Nazeer M M, Athar N. Computer Modeling of Elastic-Plastic Fracture Mechanics of Ball Indentation in Ductile Aluminium Sheet, Italy, Padova, 1995: 491 ~ 494
 - 20 王玉成. 小冲杆试验方法评价 1.25Cr0.5Mo 珠光体钢的蠕变性能: [硕士论文]. 上海: 华东理工大学, 2003
 - 21 杨镇. 小冲杆微试样技术用于测定材料高温蠕变性能的研究: [博士论文]. 上海: 华东理工大学, 2001
 - 22 Peng C Z, Toshiyuki H, Shin K et al. Numerical Analysis for Small Punch Creep Tests by Finite-Element Method. Journal of Testing and Evaluation, 2004, 113(6): 298 ~ 305
 - 23 韩浩, 关凯书, 李建卫等. 小冲杆试验参数的有限元分析. 机械强度, 2004, 26(4): 455 ~ 459

(收稿日期: 2006-04-06, 修回日期: 2006-07-17)

Application and Progress of the Small Punch Test Method for Material Performance Evaluation

LI Pu, GUAN Kaishu

(East China University of Science and Technology, Shanghai, 200237, China)

Abstract A review was performed of the history of small punch test and research progress in evaluating material performance (fundamental mechanical performance, ductile to brittle transition temperature, fracture and creep properties of materials), and the existing problems in research and future trend were pointed out.

Keywords Small Punch Test, Material Performance, Ductile to Brittle Transition Temperature, Fracture Toughness

2007 年《广东化工》征订启事

《广东化工》为月刊,创刊于 1974 年,是广东省内唯一的综合性化工期刊,是全面反映广东省化学工业发展的窗口,在广东省及全国化工刊物界享有很高声誉,适合在化工行业的企业、高等院校、研究院所从事管理、科研、工程设计与施工、教学、生产及一切与化工事业相关的人士阅读。

本刊是美国《化学文摘》重点收录期刊、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊、中国学术期刊光盘版收录期刊,今年还评为第六届全国石油和化工行业优秀期刊二等奖。

(下转第 279 页)