

火箭、飞行器材料和薄壁压力容器 的渗漏判据*

王 兴 发

(北京工业学院, 1985年5月22日收到)

摘 要

本文对火箭, 飞行器材料和薄壁压力容器建立了三个计算临界裂缝和临界荷载的渗漏判据, 实验结果表明这种方法是成功的。

一、符 号

p	内压力	kg/mm^2	σ_H	裂缝端部塑性区内的周向应力	kg/mm^2
σ_b	强度极限	kg/mm^2	n	应变硬化率	
t	壁厚	mm	$2c$	裂缝的长度	mm
r	内半径	mm	a	裂缝的深度	mm
t_0	裂缝端部的壁厚	mm	L	试件的长度	mm
r_0	裂缝端部的内半径	mm	K, C, B, A	常量	
σ_s	屈服极限	kg/mm^2			

二、序 言

在火箭, 飞行器材料和有表面缺陷的薄壁压力容器中, 缓慢的裂缝扩展是一种典型的现象。当表面缺陷穿破壁厚时, 破裂前的渗漏使容器失去正常的承载能力。因为材料的整个破坏过程是非线性和依赖于加载历史, 因此我们不能用线弹性断裂力学的方法。至今还没有有效的判据对这个过程进行定量分析, 因不能有效分析在工程中造成的大量经济损失使得寻求它们的渗漏判据有一定的经济意义。对工程设计者来说, 建立计算这类问题的临界裂缝和临界荷载的判据是很有用的。

本文用塑性理论对火箭, 飞行器材料和薄壁压力容器建立的渗漏判据对目前通用的线弹性断裂力学来说是一些新的内容和设想, 尚属探讨性的。

一九六二年, Irwin^[2]对受均匀拉伸板的椭圆表面裂缝提出了裂缝端部的应力强度因子

* 钱伟长推荐。

表达式

$$K_I = 1.10\sigma\sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (2.1)$$

此后很多学者的研究都是对这个公式的修正, 以提高它的精度和应用范围。目前, 对裂缝端部有小范围屈服时通常采用Shan-Kobayashi^[3]建立的公式

$$K_{Ie} = M_K \sigma\sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (2.2)$$

对较厚的板, 以上公式是适用的。但是对薄板, 很多实验工作者指出裂缝端部的塑性区往往穿过表面, 断裂前已有微坑出现, 显然上述公式(2.2)不再适用。

一九七一年, Qrange^[4]根据他们所做的实验建议按长度相同的穿透性裂缝进行断裂控制。Erdogen^[5]从整个裂缝被塑性区包围的假设出发得到与表面裂缝等价的穿透性裂缝而无穷远处的应力用流变应力来代替。Irwin等学者^[6-8]曾提出一个简单的破裂前渗漏准则, 其基于这样的假设: 当表面缺陷穿破壁厚时, 它近似于半圆形, 也就是说它成了总长为两倍厚度的穿透裂缝。这个准则是:

$$K_{Ic} \geq \sigma_{ys} \sqrt{\pi(B+r_p^*)} \quad (2.3)$$

这些研究遇到塑性区内不可避免的卸载及裂缝端后剩余应力的处理, 使理论分析和实验结果不能一致。表面裂缝化为穿透裂缝的问题目前尚未解决。

在弹塑性断裂力学中, 目前还采用COD判据, J 积分。 J 积分要求的条件是比例加载, 不能有卸载, 而裂缝扩展时总会在塑性区出现卸载, 因此, J 积分不能研究裂缝扩展后的问题。COD判据的计算公式尚存在问题, 在大范围屈服时, COD公式目前只能近似适用于无限大穿透裂缝板。

最近, 在弹塑性断裂力学中用一些简便的工程计算方法, 从断裂观点评定结构件的完整性^[17-22], 文献[1]用Penalty方法给出了完全塑性断裂问题的解。

这些研究工作往往都限于板, 对薄壁容器中经常遇到的表面缺陷问题, 目前还没有有效的计算公式

三、模型和方法

根据文献[9]~[15]的实验观察结果, 作者建议对火箭、飞行器材料和薄壁压力容器破裂前的渗漏建立以下计算模型:

火箭, 飞行器材料和薄壁压力容器的裂缝端部是二向应力状态; 裂缝沿裂缝端部的塑性区扩展穿破壁厚; 在整个塑性区内应力重新分布; 因塑性失稳使材料和容器发生破裂前的渗漏形成韧性断裂模型。

由于它们的破坏过程是高度非线性的, 显然线弹性断裂力学的方法不再适用。作者建议对这种计算模型用塑性理论进行极限分析, 建立计算它们的临界裂缝和临界荷载的渗漏判据。

四、公 式

根据本文的计算模型, 现用塑性理论进行极限分析, 建立火箭, 飞行器材料和薄壁压力

容器的渗漏判据。为了能预测材料和容器破裂前的渗漏，这些判据为工程设计者提供了计算临界裂缝和临界荷载的计算公式(判据的详细推导略)。

计算压力圆筒容器的临界荷载的判据

$$p_{cr} \leq A_c \frac{\sigma_b t_0}{r_0} \quad (4.1)$$

计算压力圆筒容器的临界裂缝的判据

$$a_{cr} \leq t - \frac{pr_0}{\sigma_b A_c} \quad (4.2)$$

计算压力球壳容器的临界荷载的判据

$$p_{cr} \leq 2A_s \frac{\sigma_b t_0}{r_0} \quad (4.3)$$

若用塑性本构关系 $\bar{\sigma} = K(B + \bar{\epsilon})^n$ ，判据(4.1)~(4.3)中的系数分别是

$$A_c = \sqrt{\frac{2}{3^n + 1}} \exp(\sqrt{3} - 1)B \quad (4.4a)$$

$$A_s = \left(\frac{2}{3}\right)^n \exp\left(\frac{B}{2}\right) \quad (4.4b)$$

若用塑性本构关系 $\bar{\sigma} = C\bar{\epsilon}^n$ ，判据(4.1)~(4.3)中的系数分别是：

$$A_c = \frac{2}{\sqrt{3^n + 1}} \quad (4.5a)$$

$$A_s = \left(\frac{2}{3}\right)^n \quad (4.5b)$$

上述两种塑性本构关系是工程中常用的。此外还可用其它塑性本构关系，用本文的方法得到类似的结果。

五、实 验^[16]

现用实验检验本文的模型、方法和判据。以下摘引实验^[16]的主要结果。

(一)、试件是Zr-4合金薄壁管 表1是试件在室温时的机械性质和尺寸。表2是试件的裂缝尺寸

表 1 试件的机械性质和尺寸

σ_s	σ_b	B	n	r	t	L
53.9	67.6	0.4	0.1	5	0.7	250

表 2 裂缝的尺寸

裂缝的长度 2c	裂缝的深度a _i
8	0.20, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60
10	同上
15	同上

(二)、实验结论

1. 所有试件都是塑性失稳破坏的，它们的周向应力 σ_H 保持常量。
2. 如果 $2c=8\sim 15\text{mm}$ ， $a < 0.20\text{mm}$ ，裂缝的存在对内压力 p_{cr} 没有影响。
3. 如果 $2c=8\sim 15\text{mm}$ ， $0.20\text{mm} \leq a \leq 0.55\text{mm}$ ，临界内压力 p_{cr} 随裂缝深度的增加而下降而几乎与裂缝的长度无关。

(三) 实验和用本文判据所得计算结果的比较

图1和图2分别表示在室温时不同裂缝长度的 $p_{cr}-a$ 曲线和 σ_H-a 曲线, 图中的曲线表示不同裂缝长度的实验结果. 符号(o)表示用本文判据所得的计算结果.

实验结果表明试件的裂缝端部是二向应力状态, 所有试件都是塑性失稳破坏的, 是韧性断裂, 破裂前渗漏. 实验结果表明本文的计算模型, 方法和判据是成功的.

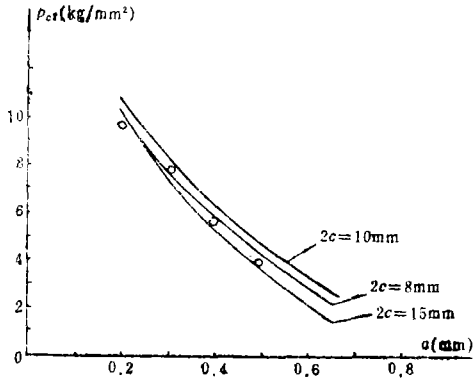


图 1 $p_{cr}-a$ 曲线

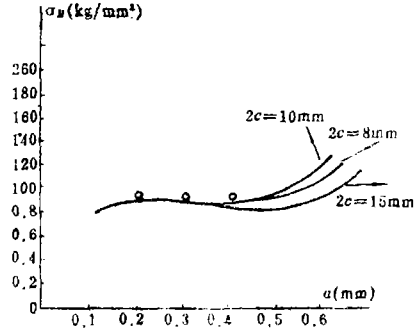


图 2 σ_H-a 曲线

六、应 用

(1) 现用本文的判据(4.1)和计算公式(4.4a)确定 Zr-4 合金管的临界压力. 具体见表3.

表 3 临界内压力 p_{cr} 的解析解

裂缝深度 a_i	0.20	0.30	0.40	0.50
临界内压力 p_{cr}	9.53	7.48	5.51	3.60

表 4 $\times\times$ 薄壁筒的机械性质和尺寸

σ_b	n	t	r
110	0.2	0.9	18

用本文判据所得解析解与实验结果之间的误差在10%以内(具体见图1)。

(2) 用金属合金材料组成的受内压的有表面裂缝的薄壁筒, 表4是该筒的机械性质和尺寸.

这种材料组成的薄壁筒的塑性本构关系是

$$\bar{\sigma} = k \cdot \bar{\epsilon}^{1/6}$$

1. 该薄壁筒承受的内压力 $p=2.7\text{kg/mm}^2$, 现用公式(4.2)和(4.5a)计算它的临界裂缝深度;

$$a_{cr} = 0.46\text{mm}$$

2. 取该薄壁筒的内表面有深度 $a=0.40$ 的裂缝时, 我们用判据(4.1)和系数计算公式(4.2a)计算它的临界荷载.

$$p_{cr} = 3.09\text{kg/mm}^2$$

对这个薄壁筒的水压实验结果^[15]是在内压 $p=2.7\text{kg/mm}^2$ 水压实验下, 裂缝深度 $a=0.50\text{mm}$ 时, 薄壁筒塑性失稳破坏. 本文的解析解和实验结果较一致, 误差是7%。

以上两个应用实例表明本文所建立的判据和方法是成功的。

七、讨 论

本文理论计算的误差主要是材料常规性能, 数据 σ_b 和 n 等的精度以及材料本构关系的精度, 计算临界裂缝和临界荷载的判据(4.1)~(4.3)的适用范围受塑性本构关系适用范围的约束。用本文的判据和方法能对火箭, 飞行器材料和薄壁压力容器预测破裂前的渗漏, 分析一些工程断裂问题, 例如本文的两个应用实例有一定的经济意义, 在弹塑性断裂力学方面本文提供了有用的解析解。

作者对上海工业大学, 冶金部钢铁研究总院, 有色金属研究总院等单位对本文的支持, 提供的实验资料和数据表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Sih, C. F. et al, Fully plastic crack problems, part 1: Solutions by a penalty method, *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics* 51, 1 (1984)48—56.
- [2] Irwin, G. R., Crack-extension for partthrough crack in a plate, *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. JAM*, 29 (1962), 651—654.
- [3] Sham, R. C. and A. S. Kobayashi, Crack approaching the surface of a plate in bending, *ASTM. STP513* (1972).
- [4] Orang, T. W., Fracture of thin section containing through and partthrough crack, *ASTM. STP496*, (1971), 61—81.
- [5] Erdogan, F., Ductile fracture theories for pressurized pipes and containers, *Inter. J. Pres. Ves. Pip*, 4 (1976), 253—284.
- [6] ASTM Committee, The slow growth and rapid propagation of Cracks, *Materials Res. and Standards*, 1 (1961), 389—394.
- [7] Irwin, G. R., *Fracture of Pressure Vessels, Materials for Missile and Spacecraft*, McGraw-Hill (1963), 204—229.
- [8] Irwin, G. R. and J. E. Srawley, Progress in the development of crack toughness fracture tests, *Material Prufung*, 4 (1962), 1—11.
- [9] Dixon, J. R., Stress and strain distributions around cracks in sheet materials having various work hardening characteristics, *Int. J. Fract. Meth.*, 1 (1965), 224—243.
- [10] Ruedl, E., Void formation at the interface between particles and matrix in deformed Al-Al₂O₃ foils, *J. Mat. Scien.*, 4 (1969), 814—815.
- [11] Broek, D., On the formation of fatigue striations, *Int. J. Fract. Mech.*, 8 (1972), 75—86.
- [12] Underwood, J. H., Measurement of microscopic plastic strain distributions in the region of a crack tip, *Exp. Mech.*, (1969), 296—304.
- [13] Hahn, G. T. and A. R. Rosenfield, Plastic zones generated by cracks growing under load, *Inter. Jou. Fract. Mech.*, 4 (1968).
- [14] Hahn, G. T. and A. R. Rosenfield, Local yielding and extension of a crack under plane stress, *Acta. Met.*, 13 (1965), 293—306.
- [15] 艾庆发等, 带有表面裂纹燃烧室的断裂分析, *应用力学*, 1(1980), 152.

- [16] 谢静宜等, 具有表面裂纹的Zr-4金属合金管的爆破实验和分析, 第三届全国断裂力学讨论会论文集 (1981).
- [17] Anon., EPRI ductile fracture research reviews document Norris, D. M., et al., ed., NP-80-10-LD Special study project WS 80-912, *Workshop Report*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif., (1980).
- [18] Kumar, V. et al., An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis EPRI Topical Report NP-1931, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif., July (1981).
- [19] Sih, C. F., et al, An engineering approach for examining crack growth and stability in flawed structures, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, 9 (1981), 159—196.
- [20] Goldman, N. L., et al, Fully plastic crack problems, the center cracked strip under plane strain, *International Journal of Solids and Structures*, 11 (1975), 575—591.
- [21] Shih, C. F., et al., Fully plastic solutions and large scale yielding estimates for plane stress crack problems *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, 98 (1976) 289—295.
- [22] Weedleman, A., et al, Finite element method for plane strain deformations of incompressible solids, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 15 (1978), 223—240.
- [23] Hutchinson, J. W., et al., Fully plastic crack problems in bending and tension, *Fracture Mechanics*,³ Perrone, N. et al., eds., Uni. Press of Virginia, Charlottesville (1978), 515—528.

The Leakage Criteria of Thin-Wall Pressure Vessels, Materials of Missile and Spacecraft

Wang Xing-fa

(Beijing Institute of Technology, Beijing)

Abstract

This paper presents the development of three leakage criterions to predict fracture in thin-wall pressure vessels, materials of missile and spacecraft. Experimental results show that the criterions are successful.