

表 1 反弹作用力

	M0.5	M1	M4
总反弹力 (kN)	801	1492	4739
最大正压力 (kN)	1097	2194	8776
等效负压系数 *	0.73	0.68	0.54

* 等效负压系数 = 总反弹力 / 最大正压力

3 结 论

抗爆门是一种特殊结构, 为了真实反映其受力破坏过程并评价其安全标准, 应该充分考虑动力效应、弹塑性变形以及门与门框、门轴与轴承之间接触的影响。利用动力有限元程序 LS-DYNA 并正确设定接触模型, 可以真实模拟抗爆门的破坏过程, 评价其安全性能。

通过本例分析, 可知该系列抗爆门是可靠的, 能够承受其设计荷载下的各种爆炸, 并且, M0.5, M1.0 系列安全储备较大, 可考虑适当降低门扇厚度, 提高其经济性。

参 考 文 献

- 1 LS-DYNA Structural User's Manual. Livermore Software Technology Corp, 1999
- 2 陈肇元等. 钢筋混凝土结构在冲击荷载作用下的性能. 北京: 清华大学出版社, 1986
- 3 李翼祺. 爆炸力学. 北京: 科学出版社, 1992
- 4 王国强主编. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践. 西安: 西北工业大学出版社, 2000

5 王国周, 瞿履谦主编. 钢结构——原理与设计. 北京: 清华大学出版社, 1993

SAFETY ASSESSMENT OF BLAST-RESISTANT DOORS USING DYNAMIC FINITE ELEMENT METHOD AND CONTACT ANALYSIS

LU Xinzheng JIANG Jianjing

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University,
Beijing 100084, China)

Abstract Blast-resistant doors are special structures. In order to simulate the damage process and assess the safety of the doors, the dynamic effect, elastic-plastic deformation and contact between the door leaf and the door-frame, the hinges and the bearings should be considered. A certain series of blast-resistant doors are analyzed in this paper with the finite element software of LS-DYNA. With the numerical method, 24 different load curves are analyzed to cover different kinds of loads that the doors may be subjected to.

Key words blast-resistant door, dynamic finite element, contact analysis

纤维复合材料复合型断裂正应力强度因子比准则

刘希国 张双寅

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

03 A

摘要 对纤维增强复合材料的裂纹起裂及开裂方向准则进行了研究, 提出了复合型断裂的正应力强度因子比准则 (Normal Stress Intensity Factor Ratio Criterion). 此准则是一种综合考虑了正应力强度因子和剪应力强度因子对裂纹起裂的推动作用的准则, 并且不需要预先确定材料的特征尺度, 使用较方便, 且预测结果是很好的。

关键词 复合材料, 复合型断裂, 正应力强度因子比准则

关于纤维增强复合材料的断裂准则, 前人已进行了大量卓有成效的工作, 建立了许多准则, 例如点应力准则, 平均应力准则, 应力强度因子及其修正准则, 能量释放率准则, 应变能密度准则等^[1]. 但是在运用这些准则时遇到的困难是需要首先确定裂尖区的损伤参数 (如损伤特征尺度 r_0).

关于纤维增强复合材料起裂方向的预测准则, 前人也建立了数个准则, 如最大比正应力准则^[2], 应变能密度准

则^[2], 比应变能密度准则^[2]和张量多项式准则^[3]等, 文献 [2,4] 的实验结果表明比应变能密度准则对于纤维复合材料复合型开裂方向的预测比较好, 但这 4 种准则的一个共同点是事先须确定应力点到裂尖的距离 r_0 . 而这些准则的 r_0 选取对预测结果有很大影响。

本文提出另一种预测裂纹起裂及开裂方向准则, 即正应力强度因子比准则, 它既能预测断裂强度, 又能预测起裂方向; 而且不需要选择参数 r_0 .

1 比正应力准则

比正应力准则认为裂纹扩展方向是由周向正应力和周向强度之比决定的^[3]. 此比值为

$$R(r_0, \theta) = \frac{\sigma_{\theta\theta}}{I_{\theta\theta}} \quad (1)$$

周向应力为

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (2)$$

计算应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 的点离裂纹尖端距离为 r_0 。

周向强度为

$$T_{\theta\theta} = X \sin^2 \beta + Y \cos^2 \beta \quad (3)$$

其中, β 为材料第一主方向与矢径之间的夹角, θ 是矢径与 x 轴之间夹角 (见图 1)。比正应力准则认为裂纹扩展方向是 $R(r_0, \theta)$ 取最大的方向, r_0 是裂尖损伤区半径。

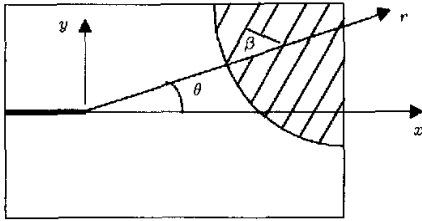


图 1 材料主方向与极坐标示意图

应该指出, $T_{\theta\theta}$ 不含剪切强度, 换言之它忽略了剪切强度对裂纹扩张方向的影响。为了克服此准则的这一缺点, 本文提出如下修正的比正应力准则: 其表达式与比正应力准则相似, $R(r_0, \theta)$ 和 $\sigma_{\theta\theta}$ 完全相同, $T_{\theta\theta}$ 的式子改为

$$T_{\theta\theta} = X \sin^2 \beta + Y \cos^2 \beta + S \sin 2\beta \quad (4)$$

X, Y, S 分别为第一和第二主方向的拉伸强度与主剪切强度。

2 比正应力强度因子准则

根据各向异性弹性断裂力学可知, 裂尖附近应力场的渐近解为

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} R_{Ix} & R_{IIx} \\ R_{Iy} & R_{IIy} \\ R_{Ixy} & R_{IIxy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_I \\ K_{II} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} [R] \begin{Bmatrix} K_I \\ K_{II} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

其中 K_I 和 K_{II} 为 I 型和 II 型应力强度因子

$$\left. \begin{aligned} R_{Ix} &= \text{Re} \left[\frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 - \mu_2} (\mu_2 F_2 - \mu_1 F_1) \right] \\ R_{IIx} &= \text{Re} \left[\frac{1}{\mu_1 - \mu_2} (\mu_2^2 F_2 - \mu_1^2 F_1) \right] \\ R_{Iy} &= \text{Re} \left[\frac{1}{\mu_1 - \mu_2} (\mu_2 F_2 - \mu_1 F_1) \right] \\ R_{IIy} &= \text{Re} \left[\frac{1}{\mu_1 - \mu_2} (F_2 - F_1) \right] \\ R_{Ixy} &= \text{Re} \left[\frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_1 - \mu_2} (F_2 - F_1) \right] \\ R_{IIxy} &= \text{Re} \left[\frac{1}{\mu_1 - \mu_2} (\mu_1 F_1 - \mu_2 F_2) \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 Re 表示对括号内的结果取实部, F_1 和 F_2 由下面两式求得

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= (\cos \theta + \mu_1 \sin \theta)^{-1/2} \\ F_2 &= (\cos \theta + \mu_2 \sin \theta)^{-1/2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 θ 为极坐标中的幅角, μ_1 和 μ_2 是下面特征方程的根

$$\begin{aligned} S_{11} \mu^4 - 2S_{16} \mu^3 + (2S_{12} + S_{66}) \mu^2 - \\ 2S_{26} \mu + S_{22} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $S_{11} = \frac{1}{E_1}$, $S_{12} = S_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}$, $S_{22} = \frac{1}{E_2}$, $S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$ 。 $E_1, E_2, G_{12}, \nu_{21}, \nu_{12}$ 为材料常数。其根由两对共轭复根 $\mu_1, \bar{\mu}_1$ 和 $\mu_2, \bar{\mu}_2$ 组成。

与此类似, 材料主方向的强度 X, Y, S 可表示为临界应力强度因子的表示式

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ S \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} R_{Ix} & R_{IIx} \\ R_{Iy} & R_{IIy} \\ R_{Ixy} & R_{IIxy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_{Ic} \\ K_{IIc} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} [R] \begin{Bmatrix} K_{Ic} \\ K_{IIc} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

将式 (5) 与 (9) 分别代入式 (2) 与 (4) 得

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{\theta\theta} &= \frac{(K_I R_{Ix} + K_{II} R_{IIx}) + (K_I R_{Iy} + K_{II} R_{IIy})}{2\sqrt{2\pi r}} + \\ &\frac{K_{Ix}(R_{Ix} - R_{Iy}) + K_{II}(R_{IIx} - R_{IIy})}{2\sqrt{2\pi r}} \cos 2\theta + \\ &\frac{1}{\sqrt{2\pi r}} [(R_{Ixy} + R_{IIxy})] \sin 2\theta \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \bar{T}_{\theta\theta} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} (K_{Ic} R_{Ix} + K_{IIc} R_{IIx}) \sin^2 \beta + \\ &\frac{1}{\sqrt{2\pi r}} (K_{Ic} R_{Iy} + K_{IIc} R_{IIy}) \cos^2 \beta + \\ &\frac{1}{\sqrt{2\pi r}} (K_{Ic} R_{Ixy} + K_{IIc} R_{IIxy}) \sin 2\beta \end{aligned} \quad (11)$$

于是, 可以定义正应力强度因子比为

$$\bar{R}(\theta) = \frac{\bar{\sigma}_{\theta\theta}}{\bar{T}_{\theta\theta}} \quad (12)$$

正应力强度因子比准则认为:

- (a) $\bar{R}(\theta) \geq 1$ 时发生断裂;
- (b) 断裂角度 $\theta = \theta_c$, 并且 $\frac{\partial \bar{R}(\theta_c)}{\partial \theta} \leq 0$;

当裂尖周围有多于一个极大值时, 使 $\bar{R}(\theta)$ 取最大值的 θ 是开裂角 θ_c 。

3 结论

(1) 本文根据前人的比正应力准则提出修正的比正应力准则, 此准则计及材料主方向剪切强度对断裂的影响, 对理论结果有改进; 在此基础上又提出比正应力强度因子比准则。

(2) 由式(10)和(11)可知比正应力强度因子比 \bar{K}_{00} 表达式(12)不包含 r , 所以该准则避免了使用前必须预先人为决定裂尖损伤区特征尺度 r_0 的困难, 使用比较方便。

参考文献

- 1 Zhang SY. Damage, failure, and fracture of resin-based fibrous composites: mechanisms, theories, and criteria. In: Nicholas P Chermisnoff, Ed. Handbook of Ceramics and Composites. Vol.2. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hongkong, 1991. 51~104
- 2 张双寅, 蔡良武. 随机短纤维复合材料复合型开裂方向的预测. 力学学报, 1989, 21(4): 442~449
- 3 Gregory MA, Heracovich CT. Predicting crack growth direction in unidirectional composites. *J Comp Mater*, 1986, 20(1): 67~85
- 4 Zhang SY, Tsai LW, Liu JQ. Strain energy density ratio criterion for fracture of composite materials. *Eng Fracture*

Mechanics, 1990, 37(4): 881~889

NORMAL STRESS INTENSITY FACTOR RATIO CRITERION FOR MIXED MODE FRACTURE OF FIBER COMPOSITES

LIU Xiguo ZHANG Shuangyin

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The normal stress intensity factor ratio criterion for predicting cracking initiation and cracking direction of the mixed mode fracture of fiber composites is proposed. In the criterion the effects of both normal stress intensity factor and shear stress intensity factor are taken into consideration. In using the criterion it is not necessary to determine the characteristic dimension r_0 of the material in the vicinity of crack tip, so it is quite convenient and can yield good results.

Key words composite material, mixed-mode fracture, normal stress intensity factor criterion

斜面结构冰荷载的动荷效应

李锋 岳前进

(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023)

0312 A

摘要 利用改进的刚性梁模型研究了斜面结构冰荷载的动荷效应, 推导了冰力的动荷系数。算例得到了与模型试验值和数值解相近的结果。依据分析对试验观察到的规律给出了理论上的证明和定性的解释。给出了准静态冰力条件的判别式。

关键词 斜面结构, 冰荷载, 动荷效应, 分析模型

具有倾斜表面的抗冰结构承受动冰力作用。试验显示, 动冰力可能随冰速的增加而显著增大^[1,2]。Shkhinek 提出了一个简化模型, 建立了以冰速表达的动冰力微分方程, 得到了一系列数值解^[3], 论证了动荷分析的工程意义。本文改进了 Shkhinek 的模型, 以更为简单的方法进行冰力动荷效应分析。

1 改进的等效刚性梁模型

动冰力的一个简单分析模型如图 1 所示^[3]。宽为 b 厚为 h 长为 l 的漂浮冰梁后端简支, 前端可滑动。冰视为各向同性弹性材料。设梁在小挠度下压弯断裂时其弯曲变形可忽略不计, 以此有限长刚性梁等效地代替大冰排的半无限长梁

性基础梁(以下简称弹基梁)模型, 后者的解已被作为二维静冰力弹性分析的基础并由试验所验证^[4]。极限挠度较大的情况不会成为控制荷载^[5]。Shkhinek 模型按照极限挠度和弯矩建立等效条件, 等效梁长为 1.58λ , λ 为梁的特征长度, 实际分析中取梁长为 $\lambda \sim 2\lambda$ 。从动冰力幅值与周期分析的目的出发, 本文对其等效条件进行了改进。

图 1 所示的梁最大弯矩位置为 $l_b = 0.423l$, 令其与弹基梁的最大弯矩位置相同, 可得等效梁长 l_e 为

$$l_e = 2.63 \left(\frac{EI}{\rho_w g} \right)^{0.25} = 2.63\lambda \quad (1)$$

其中 EI 为冰梁的等效弯曲刚度; $\rho_w g$ 为水的容重。

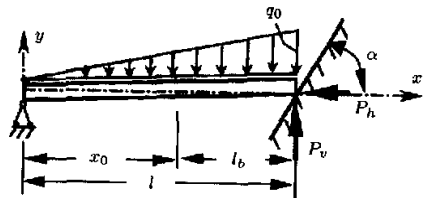


图 1 漂浮的刚性梁模型