

裂隙蠕变的稳定性准则

杨松林, 徐卫亚, 张贵金

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 介绍了最小耗能原理及其建立材料强度准则的一般步骤, 在强度准则通常为能量蓄积程度表达式这一前提下, 从最小耗能原理出发, 利用线粘弹性断裂理论推导了裂纹蠕变的稳定性准则。为对比起见, 将线弹性断裂理论的应变能密度因子断裂判据直接推广到粘弹性状态, 得到了与最小耗能原理相同的稳定性准则表达式, 并分析了几种流变材料中裂纹蠕变的长期稳定性。

关 键 词: 裂隙蠕变; 应变能密度; 最小耗能原理; 线粘弹性

中图分类号: TU 453 **文献标识码:** A

Stability criterion for fracture creep

YANG Song-lin, XU Wei-ya, ZHANG Gui-jin

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Hehai university Nanjing 210098, China)

Abstract: The principle of minimum energy dissipation and its general procedures to establish strength criterion of materials, have been introduced. With the widely accepted viewpoints that strength criteria express the energy accumulation of material and utilizing the viscoelastic fracture theory the strength criteria for crack creep are deduced. For the sake of contrast these viscoelastic equations are also obtained directly from strength criterion of elastic fracture theory in form of strain energy density. Therefore creep stability of fracture in several kinds of viscoelastic material is analyzed.

Key words: fracture creep; strain energy density; minimum energy dissipation; linear viscoelasticity

1 引 言

材料的强度理论是进行一切工程结构设计和强度校核的依据, 具有很高的工程价值和重要的理论意义。而目前的各种损伤、屈服、断裂和破坏准则或是通过观察破坏现象提出的某种假设, 或者是拟合试验结果得到的经验公式。大量的试验研究结果表明, 材料的破坏规律与材料性能和破坏时的应力状态紧密相关。由于促使材料破坏的各种应力状态组合具有无穷性, 实际材料的性能也千差万别, 致使按上述假设或拟合方式建立的准则出现多种准则并存的局面。这些众多的准则虽然描述的都是同一类物理现象, 却具有不同的物理意义, 没有一个统一的理论框架, 对于材料强度理论如此重要的问题, 上述研究状况显然不能令人满意。

最小耗能原理指出, 任何耗能过程都将在与其相应的约束条件下以最小耗能的方式进行。也就是说, 在耗能过程中的任意时刻, 耗能率都应取当时

所有可能耗能率的最小值。材料的破坏将总是在与其相应的约束条件下, 以最容易发生破坏的方式进行。从这种观点出发, 在材料的破坏耗能应受到最小耗能原理规范的条件下, 把影响材料耗能的各种影响因素融合到强度准则之中。按此思路建立的材料强度准则, 就能同时反映材料性能和破坏时应力状态组合对材料强度的影响。对不同性能的材料和导致材料发生不同破坏形式的应力状态, 其强度准则就可能在一个统一的理论框架下, 按一种大致相同的模式导出。这样建立起来的强度准则完全摆脱了依赖假设或拟合的传统方法, 从而使材料的破坏理论在最小耗能原理这个统一的理论框架下, 以一种比较理性的方式得到解决。

按照这样一种思路, 文献[1]已经导出了塑性力学中的 Mises 屈服准则、损伤理论中用损伤应变能密度释放率表示的损伤破坏准则。文献[1]还在发生破坏耗能之前是线弹性脆性材料的前提下, 导出了正交各向异性材料的强度准则和一个新的混凝土强

收稿日期: 2002-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 50128908)、国家重点基础研究发展规划项目(973项目)(编号: 2002CB412707)和法国国家科研中心(CNRS)资助。

作者简介: 杨松林, 男, 1973年生, 博士, 现为河海大学在站博士后, 从事岩土力学方面的研究。

度准则。本文也将在最小耗能原理这一理论框架下,按照其建立强度理论的一般步骤,利用线粘弹性断裂理论建立裂隙蠕变的稳定性判别准则,分析裂隙在长期蠕变过程中的稳定性。这样建立起来的复合型裂纹蠕变稳定性准则,可以考虑所有应力分量对材料破坏的影响,避免了传统断裂理论只考虑某些应力分量所带来的片面性。

2 建立强度准则的一般步骤

根据最小耗能原理,只要已知耗能过程中耗能率的表达式及耗能过程应满足的约束条件,则相对于整个耗能过程的任意时刻均可建立取驻值条件,由这些取驻值条件则有可能求得一些适用于耗能全过程的有用结果。

根据非平衡态热力学理论,任一微系统的耗能率可用耗散函数表示为

$$\dot{\phi} = TP = T \sum_{k=1}^n J_k X_k \quad (1)$$

式中 T 为微系统的绝对温度; P 为微系统中产生熵的速率; J_k 为第 k 种不可逆过程的热力学流; X_k 为第 k 种不可逆过程的热力学力。在一般情况下, J_k 可视为所有 X_k 的函数。当 P 取为单位体积中产生熵的速率时,系统 V 总耗能率为

$$\dot{\phi} = \iiint_V \dot{\phi} dV = \iiint_V T \sum_{k=1}^n J_k X_k dV \quad (2)$$

设系统 V 在耗能过程中受到条件约束

$$\left. \begin{aligned} f_1(X_1, \dots, X_n) &= 0 \\ &\vdots \\ f_m(X_1, \dots, X_n) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

根据最小耗能原理,式(2)应在满足式(3)的条件下取驻值,于是有:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \left[T \sum_{k=1}^n J_k X_k + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i \right]}{\partial X_1} &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial \left[T \sum_{k=1}^n J_k X_k + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i \right]}{\partial X_n} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

如果 J_k 与所有 X_k 之间的关系表达式已知,而式(3)中除某个具体表达式 f_i 待定之外,其余均为已知,则由式(4)可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f_i}{\partial X_1} &= F_1(X_1, \dots, X_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m) \\ &\vdots \\ \frac{\partial f_i}{\partial X_n} &= F_n(X_1, \dots, X_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $F_i(X_1, \dots, X_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m)$ 均为已知函数,将式(5)代入下式,并积分,则可确定 f_i 的表达式。

$$df_i = \frac{\partial f_i}{\partial X_1} dX_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial X_n} dX_n \quad (6)$$

3 裂隙蠕变的稳定性准则

在推导过程中,引入以下两个分析前提:①裂隙周围材料为线粘弹性体;②蠕变过程中,裂隙周围材料的 Poisson 比保持不变。

根据线粘弹性断裂理论^[2],裂隙尖端应力场的 Laplace 变换式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^* &= \frac{K_I^*}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2} \theta \right) \\ &\quad - \frac{K_{II}^*}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2} \theta \right) \\ \sigma_y^* &= \frac{K_I^*}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2} \theta \right) \\ &\quad + \frac{K_{II}^*}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2} \theta \\ \sigma_z^* &= \frac{2\mu}{\sqrt{2\pi r}} \left(K_I^* \cos \frac{\theta}{2} - K_{II}^* \sin \frac{\theta}{2} \right) \\ &\quad + \frac{K_{III}^*}{\sqrt{\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2} \theta \right) \\ \tau_{xy}^* &= \frac{K_I^*}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2} \theta \\ \tau_{xz}^* &= -\frac{K_{III}^*}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \\ \tau_{yz}^* &= \frac{K_{III}^*}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 K_I^* K_{II}^* K_{III}^* 为三种类型裂隙的应力强度因子 Laplace 变换表达式; (r, θ) 为裂隙尖端附近任一点的极坐标。

粘弹性裂隙尖端应变场 Laplace 变换式为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x^* &= \frac{1}{\tilde{E}^*} [\sigma_x^* - \mu(\sigma_y^* + \sigma_z^*)] \\ \varepsilon_y^* &= \frac{1}{\tilde{E}^*} [\sigma_y^* - \mu(\sigma_x^* + \sigma_z^*)] \\ \varepsilon_z^* &= \frac{1}{\tilde{E}^*} [\sigma_z^* - \mu(\sigma_x^* + \sigma_y^*)] \\ \gamma_{xy}^* &= \frac{2(1+\mu)}{\tilde{E}^*} \tau_{xy}^* \\ \gamma_{yz}^* &= \frac{2(1+\mu)}{\tilde{E}^*} \tau_{yz}^* \\ \gamma_{xz}^* &= \frac{2(1+\mu)}{\tilde{E}^*} \tau_{xz}^* \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 μ 为材料 Poisson 比; $\tilde{E}^*$ 为材料粘弹性模量的 Laplace 变换。

在荷载恒定的情况下三种应力强度因子的

Laplace 逆变换为

$$\left. \begin{aligned} K_I(t) &= L^{-1}(K_I^*) = L^{-1}\left(K_I \frac{1}{p}\right) = K_I \theta(t) \\ K_{II}(t) &= L^{-1}(K_{II}^*) = L^{-1}\left(K_{II} \frac{1}{p}\right) = K_{II} \theta(t) \\ K_{III}(t) &= L^{-1}(K_{III}^*) = L^{-1}\left(K_{III} \frac{1}{p}\right) = K_{III} \theta(t) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 $\theta(t)$ 为 Heaviside 单位阶跃函数, t 为时间。

粘弹性裂隙尖端应力场的 Laplace 逆变换为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x(t) &= \sigma_x \theta(t); \sigma_y(t) = \sigma_y \theta(t); \sigma_z(t) = \sigma_z \theta(t) \\ \tau_{xy}(t) &= \tau_{xy} \theta(t); \tau_{yz}(t) = \tau_{yz} \theta(t); \tau_{xz}(t) = \tau_{xz} \theta(t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ 分别为给定载荷下裂隙尖端的弹性应力分量。

粘弹性裂隙尖端应变场的 Laplace 逆变换为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x(t) &= L^{-1}\left(\frac{E}{p\tilde{E}^*}\right)\varepsilon_x; \varepsilon_y(t) = L^{-1}\left(\frac{E}{p\tilde{E}^*}\right)\varepsilon_y; \\ \varepsilon_z(t) &= L^{-1}\left(\frac{E}{p\tilde{E}^*}\right)\varepsilon_z; \gamma_{xy}(t) = L^{-1}\left(\frac{E}{p\tilde{E}^*}\right)\gamma_{xy}; \\ \gamma_{yz}(t) &= L^{-1}\left(\frac{E}{p\tilde{E}^*}\right)\gamma_{yz}; \gamma_{xz}(t) = L^{-1}\left(\frac{E}{p\tilde{E}^*}\right)\gamma_{xz} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ 分别为给定载荷下弹性模量为 E 时裂隙尖端的弹性应变场。

则粘弹性裂隙尖端附近的应变率为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_x(t) &= f(t)\varepsilon_x; \dot{\varepsilon}_y(t) = f(t)\varepsilon_y; \\ \dot{\varepsilon}_z(t) &= f(t)\varepsilon_z; \dot{\gamma}_{xy}(t) = f(t)\gamma_{xy}; \\ \dot{\gamma}_{yz}(t) &= f(t)\gamma_{yz}; \dot{\gamma}_{xz}(t) = f(t)\gamma_{xz} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$f(t) = L^{-1}\left(\frac{E}{\tilde{E}^*}\right) \quad (13)$$

对于粘弹性体, 当只存在不可逆流变应变这一种耗能机制时, 设应力张量主轴与不可逆流变应变率张量主轴重合, 则单位质量的耗散性材料的耗能率表达式为

$$\varphi(r, \theta, t) = \sigma : \dot{\varepsilon} = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} = f(t) \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (14)$$

$$\text{其中 } \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\mu(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + 2(1+\mu)(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]$$

将弹性裂隙尖端应力与应力强度因子的关系代入上式得到耗能率表达式为

$$\varphi(r, \theta, t) = \frac{1}{r} (a_{11} K_I^2 + 2a_{12} K_I K_{II} + a_{22} K_{II}^2 + a_{33} K_{III}^2) \quad (15)$$

$$\text{其中: } a_{11} = \frac{1}{16\pi G} (3 - 4\mu - \cos \theta)(1 + \cos \theta)$$

$$a_{12} = \frac{1}{8\pi G} \sin \theta [\cos \theta - (1 - 2\mu)]$$

$$a_{22} = \frac{1}{16\pi G} [4(1-\mu)(1-\cos \theta) + (1+\cos \theta)(3\cos \theta - 1)]$$

$$a_{33} = \frac{1}{4\pi G}$$

对于线粘弹性材料, 约束条件即蠕变稳定性准则的待定形式可取为 $F(\sigma_{ij}) = 0$ 。

根据最小耗能原理, 在引入 Lagrange 乘子 λ 之后, 则有

$$\partial[\varphi(t) + \lambda F(\sigma_{ij})] / \partial \sigma_{ij} = 0 \quad (16)$$

将式 (14) 代入式 (16) 得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \sigma_x} &= -\frac{f(t)}{\lambda E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \frac{\partial F}{\partial \sigma_y} &= -\frac{f(t)}{\lambda E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} &= -\frac{f(t)}{\lambda E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}} &= -\frac{f(t)}{\lambda E} 2(1+\mu)\tau_{xy} \\ \frac{\partial F}{\partial \tau_{yz}} &= -\frac{f(t)}{\lambda E} 2(1+\mu)\tau_{yz} \\ \frac{\partial F}{\partial \tau_{xz}} &= -\frac{f(t)}{\lambda E} 2(1+\mu)\tau_{xz} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

因为 $dF = \frac{\partial F}{\partial \sigma_x} d\sigma_x + \dots + \frac{\partial F}{\partial \tau_{xz}} d\tau_{xz}$, 在将式

(17) 代入后积分, 便得到粘弹性裂隙蠕变稳定性准则的率性表达式:

$$F(\sigma_{ij}) = f(t) [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\mu(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + 2(1+\mu)(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)] \quad (18)$$

而标准的稳定性准则必须是能量蓄积程度表达式, 为此, 将率性表达式 (18) 进行时间积分便得到粘弹性裂隙蠕变稳定性准则表达式

$$\tilde{F}(\sigma_{ij}) = \int f(t) dt [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\mu(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + 2(1+\mu)(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)] \quad (19)$$

粘弹性裂隙的蠕变稳定判别式最后化为

$$\frac{\tilde{f}(t)}{r} (a_{11} K_I^2 + 2a_{12} K_I K_{II} + a_{22} K_{II}^2 + a_{33} K_{III}^2) = c \quad (20)$$

式中 K_I, K_{II}, K_{III} 均为裂隙尖端应力强度因子。

上式就是粘弹性裂隙蠕变稳定性准则的一般形式。

根据最小耗能原理, 在满足稳定性准则的条件下, 只有使破坏耗能率取最小值的方向 $\theta_{\min}$ 才是裂

隙扩展路径经过的点, 由下式便能确定 $\theta_{\min}$:

$$\partial\varphi(r, \theta, t)/\partial\theta = 0; \quad \partial^2\varphi(r, \theta, t)/\partial\theta^2 > 0 \quad (21)$$

满足式 (21) 意味着粘弹性裂隙将总是沿着消耗能量最小, 即抗裂阻力最小的方向扩展。

如果将起裂时裂隙尖端在 $\theta_{\min}$ 方向的耗能率视为材料常数, 式 (20) 便可以写为应变能密度因子的形式:

$$\tilde{f}(t)S = \tilde{f}(t)(a_{11}K_I^2 + 2a_{12}K_I K_{II} + a_{22}K_{II}^2 + a_{33}K_{III}^2) = S_c \quad (22)$$

式中 S 为弹性应变能密度因子; S_c 为应变能密度因子临界面。

当已知复合型粘弹性裂隙的应力强度因子时, 由式 (21) 确定断裂方向 $\theta_{\min}$ 之后, 将此 $\theta_{\min}$ 和应力强度因子代入式 (22) 就可以对粘弹性裂隙蠕变的稳定性进行分析。

在式 (22) 中, 根据 Laplace 积分变换性质和粘弹性理论有

$$\tilde{f}(t) = \int f(t)dt = L^{-1}\left(\frac{E}{p\tilde{E}^*}\right) = L^{-1}(ED^*(p)) = ED(t) \quad (23)$$

式中 $D(t)$ 为材料平面应力蠕变柔量。

4 裂隙蠕变稳定性准则的另一推导

下面利用线粘弹性断裂理论, 将线弹性断裂力学中的应变能密度因子断裂准则直接推广到线粘弹性状态, 从而也同样得到粘弹性裂隙蠕变的稳定性准则。

弹性状态下, 裂隙尖端的应力场为^[3]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta \right) - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2}\theta \right) \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2}\theta \\ \sigma_z &= \frac{2\mu}{\sqrt{2\pi r}} \left(K_I \cos \frac{\theta}{2} - K_{II} \sin \frac{\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2}\theta + \frac{K_{II}}{\sqrt{\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta \right) \\ \tau_{xz} &= -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \quad \tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

粘弹性裂隙尖端的应变能密度为

$$\frac{dU}{dV} = \frac{1}{2} \sigma_{ij}(t) \varepsilon_{ij}(t) \quad (25)$$

式中 U 为裂隙尖端应变能; V 为体积。

在载荷保持恒定的情况下, 粘弹性裂隙尖端的应力场与弹性状态相同, 由式 (24) 确定, 而粘弹性裂隙尖端的应变场由式 (11) 确定。如此, 线粘弹性裂隙尖端的应变能密度为

$$\frac{dU}{dV} = L^{-1} \left(\frac{E}{p\tilde{E}^*} \right) \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (26)$$

将弹性应力应变关系和式 (24) 代入式 (26), 并假设粘弹性裂隙起裂时应变密度为常数, 便得到

$$L^{-1} \left(\frac{E}{p\tilde{E}^*} \right) (a_{11}K_I^2 + 2a_{12}K_I K_{II} + a_{22}K_{II}^2 + a_{33}K_{III}^2) = L^{-1} \left(\frac{E}{p\tilde{E}^*} \right) S = C \quad (27)$$

根据线弹性断裂理论的应变能密度因子断裂准则, 裂隙起裂方向由下式确定:

$$\frac{\partial S}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} > 0 \quad (28)$$

对比式 (22) 和式 (27) 可知两者在形式上完全相同。式 (22) 是根据最小耗能原理求出的, 而式 (27) 是利用线粘弹性断裂理论直接推广得来的, 由此证明了最小耗能原理的正确性。

5 裂隙蠕变稳定性分析

对于 Maxwell 体, 平面应力蠕变柔量为

$$D(t) = D_0(1 + P_1 t) \quad (29)$$

式中 D_0 , P_1 为相应模型参数。

对于 Kelvin 体, 则

$$D(t) = C[1 - \exp(-\lambda t)] \quad (30)$$

式中 C , λ 为相应模型参数。

对于标准线性体, 有

$$D(t) = \{1 + EC[1 - \exp(-\lambda t)]\} \quad (31)$$

式中 E , C , λ 为相应模型参数。

对于 Burgers 体, 存在

$$D(t) = D_0 \{1 + a_0 t + a_1 [1 - \exp(-\lambda t)]\} \quad (32)$$

式中 D_0 , a_0 , a_1 , λ 为相应模型参数。

由式 (22) 分析可知, 对于 Kelvin 体和标准线性体这类表现出固体性质的材料, 只要应变能密度因子满足 $\tilde{f}(\infty)S < S_c$, 就能保证裂隙蠕变的长期稳定性。而对于 Maxwell 体和 Burgers 体这类具有流

体性质的材料, 无论应变能密度因子 S 有多小, 只要时间足够长, 裂隙在蠕变过程中都会失去稳定性。

6 结 语

任何材料的破坏过程都要消耗能量, 因此, 都应受到最小耗能原理的规范。任何耗能过程都将在相应的约束条件下以最小耗能的方式进行, 而这种约束条件便是表示材料能量蓄积程度的强度准则。正是基于材料破坏的这种物理内涵, 本文从最小耗能原理出发, 利用线粘弹性断裂理论推导出了以应变能密度因子表示的粘弹性裂隙蠕变稳定性准则。而另一方面, 将线弹性断裂力学的应变能密度因子断裂判据直接推广到粘弹性状态, 得到了与最小耗能原理相同的稳定性准则表达式, 从而证明了最小耗能原理的正确性。

基于应变能密度理论的混合型裂隙断裂准则已有很多的实验研究, 这些包括各向异性体中的裂隙, 多层组合材料的破坏以及裂隙体的振动等问题。基于应变能密度因子的断裂判据能够考虑所有应力分量对材料破坏的影响, 避免了最大拉应力判据等类似准则只考虑某些应力分量所带来的片面性。应变能密度理论认为, 不管载荷性质如何, 材料只具有

以应变能密度因子的临界值 S_c 表征的一种强度, 而传统断裂理论对同一材料区分为压缩和拉伸强度是这类理论的缺点。

线弹性断裂力学的应变能密度因子断裂判据已经得到很多的实验验证, 而粘弹性状态下的应变能密度因子断裂判据有待于实验的进一步证实。

参 考 文 献

- [1] 周筑宝. 最小耗能原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 张淳源. 粘弹性断裂力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1994.
- [3] 李颢, 陈树坚, 郭碧坚. 断裂力学与复合材料力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1989.
- [4] Barry Kean Atkinson. Fracture mechanics of rock [M]. London: Harcourt Brace Jovanovich Publishers, 1987.
- [5] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂-数值实验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [6] 黄克智, 肖纪美. 材料的损伤断裂机理与宏微观力学理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

上接第 422 页

算法对深层搅拌桩进行优化设计作了有意义的尝试, 该方法既继承了传统进化算法全局寻优的搜索方式, 又提高了搜索效率, 并通过实例证明了其优化效果。需要说明的是, 该方法选取的目标函数仅考虑了深层搅拌桩的水泥用量, 因而与实际的工程造价有一定差别。

参 考 文 献

- [1] 徐杨青. 深基坑工程优化设计理论与动态变形控制研究[博士学位论文 D]. 武汉: 武汉理工大学, 2001.
- [2] 潘正君, 康立山, 陈毓屏. 演化算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [3] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [4] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [5] 肖专文, 龚晓南, 谭昌明. 基坑土钉支护优化设计的遗传算法[J]. 土木工程学报, 1999, 32 (3): 45-49.
- [6] 《地基处理手册》(第二版)编写委员会. 地基处理手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.