

文章编号:1000-582X(2010)01-0099-05

## 三轴压缩下突出煤粘弹塑性蠕变模型

王维忠<sup>a, b</sup>, 尹光志<sup>a, b</sup>, 王登科<sup>a</sup>, 秦 虎<sup>a</sup>

(重庆大学 a. 资源及环境科学学院; b. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:**煤与瓦斯突出是煤矿井下最严重的灾害之一, 研究突出煤的蠕变特性是认识煤与瓦斯延迟突出机理的重要方向。采用自行研制的突出煤蠕变渗流试验装置, 对取自松藻煤矿的煤样进行了突出煤三轴蠕变试验。蠕变试验数据分析表明, 突出煤在低于其长期强度载荷条件下表现出一种衰减蠕变特性, 在高于其长期强度载荷条件下则表现出非衰减蠕变特性。通过引入能描述非牛顿流体变形特性的粘弹塑性体, 结合鲍埃丁-汤姆逊体建立了突出煤粘弹塑性蠕变模型。利用 Matlab 编程拟合出了模型的相关参数, 并根据突出煤的三维蠕变试验结果对蠕变模型进行了验证。试验结果与理论结果对比表明, 所提出的突出煤的蠕变模型能有效地反映突出煤各种蠕变阶段的变形特性, 尤其是加速蠕变阶段, 充分体现了所建立的突出煤粘弹塑性蠕变模型的正确性与合理性。

**关键词:**三轴压缩; 突出煤; 蠕变特性; 粘弹塑性蠕变模型

中图分类号: TD452

文献标志码: A

## A visco-elasto-plastic creep model of outburst prone coal under triaxial compression

WANG Wei-zhong<sup>a, b</sup>, YIN Guang-zhi<sup>a, b</sup>, WANG Deng-ke<sup>a</sup>, Qin Hu<sup>a</sup>

(a. College of Resource and Environmental Sciences; b. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Using self-made creep seepage experimental apparatus, triaxial creep tests on outburst prone coal are carried out with coal samples taken from Songzao Coal Mine. It is found that the attenuation creep property is shown in the conditions of less than its long-term strength load, while non-attenuation creep property for the greater conditions. By introducing a visco-elasto-plastic body which can describe the deformation property of non-Newtonian fluids, the visco-elasto-plastic creep model of outburst prone coal is put forward combined with a Poyting-Thomson model. The model parameters were fitted out with Matlab programmer and validation is employed. It is found that the test results were in good agreement with those by the proposed model.

**Key words:** triaxial compression; outburst prone coal; creep property; visco-elasto-plastic creep model

收稿日期: 2009-09-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2005CB221502); 国家自然科学基金重点资助项目(50534080); 重庆市自然科学基金计划重点资助项目(CSTC, 2008BAA6028)

作者简介: 王维忠(1955-), 男, 重庆大学高级工程师, 主要从事采矿工程与安全工程试验方面的研究, (E-mail) wwzhong@cqu.edu.cn。

煤与瓦斯突出实际上是个时效问题<sup>[1]</sup>。一次大的突出,往往由几次小的突出所组成,在煤层中波及的范围从几米到几十米,延续的时间从几十秒至几天。突出在某些情况下表现为整体位移,在另一些情况下又表现为猛烈突出。通过突出煤的蠕变行为,可较好地解释这一过程。因此,很多的专家学者致力于煤岩体的蠕变研究,一度成为人们研究的热点。受蠕变加载方式和加载水平的影响,煤的蠕变特性曲线呈现出了多样性、多变性和不稳定性复杂特点,所以,传统的蠕变模型并不能很好、很完全地反映煤各蠕变阶段的变形特性。不过近年来,经过大量学者的研究和改进,提出了很多有效的,并能真实反映不同蠕变阶段的蠕变模型<sup>[2-15]</sup>,这些模型在很大程度上丰富完善了岩石的流变理论,同时也为模型的应用打好了理论基础。在前人研究的基础上,引入非牛顿流体元件<sup>[3,13]</sup>,在鲍埃丁-汤姆逊体的基础上建立了一种能反映突出煤各种蠕变阶段的粘弹塑性蠕变模型。

### 1 突出煤蠕变特性分析

笔者利用取自重庆松藻矿区打通一矿 8 号层的煤样,制成型煤煤样后在自行研制的突出煤蠕变渗流装置和材料试验机上进行了突出煤的围压三轴蠕变试验。图 1 中所示为突出煤的部分实验结果,图中纵坐标为轴向应变,围压为  $\sigma_{11} = \sigma_{22} = 3.0 \text{ MPa}$ ,瓦斯压力  $p = 0.4 \text{ MPa}$ 。

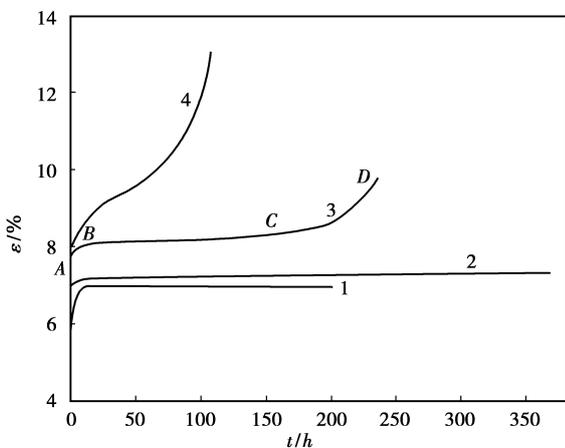


图 1 突出煤蠕变试验曲线

由图 1 可以看出,突出煤的蠕变特性在不同的工况条件下是不一样的。在小于煤长期强度应力条件下,试样表现出衰减蠕变特点,如图 1 所示。当载

荷大于煤的长期强度时,试样则表现出非衰减的蠕变特点,如图 1 中的曲线 2、3、4 所示。图 1 中曲线 3 是一种典型的蠕变曲线,其变形过程包括 3 个阶段: AB 段为减速蠕变阶段,BC 段为等速蠕变阶段,也称稳定蠕变阶段;CD 段为加速流动阶段,也称加速蠕变阶段。当载荷等于或略大于煤的长期强度,有时等速蠕变将持续很长时间,而迟迟不出现加速蠕变阶段,如图 1 中的曲线 2 所示。任何一个蠕变阶段的持续时间和它的作用依赖于煤的类型和所受载荷。载荷越大,稳定蠕变阶段的持续时间越短,加速蠕变破坏阶段出现得越快。如图 1 中曲线 4 所示。因此突出煤同其他岩石材料一样具有典型的蠕变行为特征。

### 2 三维蠕变模型的建立

#### 2.1 突出煤一维蠕变模型

传统的流变模型不能很好地反映岩石的加速蠕变阶段的变形,原因在于将岩石流变视为理想牛顿流体。事实上,岩石的流变不仅具有牛顿流体的特性,还具有非牛顿流体的特性。因此需要引入能够反映非牛顿流体特性的非线性粘滞阻尼器<sup>[3,13]</sup>,其所受应力与蠕变加速度成正比:  $\sigma = \eta \ddot{\epsilon}$ 。

为较好的描述突出煤蠕变变形的全过程,选用了鲍埃丁-汤姆逊体和一个具有非线性粘滞阻尼器的粘弹塑性体组成了突出煤粘弹塑性蠕变模型。如图 2 所示,图中的 1、2 部分组成突出煤的粘弹塑性蠕变模型。

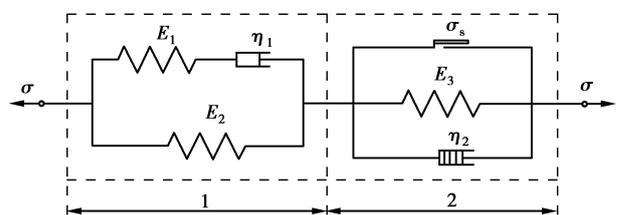


图 2 突出煤粘弹塑性复合型蠕变模型

当 1、2 部分都参与了突出煤的流变时,此时蠕变模型为 6 元件的非线性复合型粘弹塑性模型,其状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_1}{\eta_1} \sigma + \dot{\sigma} &= \frac{E_1 E_2}{\eta_1} \dot{\epsilon}_1 + (E_1 + E_2) \ddot{\epsilon}_1, \\ \sigma &= \sigma_s + E_3 \epsilon_2 + \eta_2 \ddot{\epsilon}_2, \\ \epsilon &= \epsilon_1 + \epsilon_2. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

当只有 1 部分参与突出煤的流变时,这时的模型即鲍埃丁-汤姆逊体

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_2} \left[ 1 - \frac{E_1}{E_1 + E_2} \exp\left(-\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t\right) \right], \sigma < \sigma_s. \quad (2)$$

由将  $\sigma = \sigma_0$  代入式(1), 得出模型中各部分的蠕变分量后, 利用叠加原理便可得到不同情况下的蠕变方程。

当 1、2 部分都参与突出煤的流变时, 取  $\sigma_s$  为长期强度, 则可以得到突出煤的蠕变方程为

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_2} \left[ 1 - \frac{E_1}{E_1 + E_2} \exp\left(-\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t\right) \right] + \left[ \frac{1}{E_3} - \frac{1}{2E_3} (\exp(-at) + \exp(at)) \right] (\sigma_0 - \sigma_s), \sigma_0 \geq \sigma_s, \quad (3)$$

式中,  $a = \sqrt{-\frac{E_3}{\eta_2}}$ .

式(2)可用来描述衰减蠕变过程, 式(3)可用来描述非衰减蠕变过程。

### 2.2 突出煤三维蠕变模型

突出煤在三维应力状态下, 其内部的应力张量可分解为有效球应力张量  $\sigma'_m$  和有效偏应力张量  $S'_{ij}$

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_m &= \frac{1}{3} (\sigma'_{11} + \sigma'_{22} + \sigma'_{33}) = \frac{1}{3} \sigma'_{kk}, \\ S'_{ij} &= \sigma'_{ij} - \sigma'_m \delta_{ij} = \sigma'_{ij} - \frac{1}{3} \sigma'_{kk} \delta_{ij}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中,  $\sigma'_m = \sigma_m - \varphi p$  ( $p$  为瓦斯压力,  $\varphi$  为突出煤的孔隙度),  $\sigma'_{11} = \sigma_{11} - \varphi p$ ,  $\sigma'_{22} = \sigma_{22} - \varphi p$  和  $\sigma'_{33} = \sigma_{33} - \varphi p$  分别为坐标轴 3 个方向上的主有效应力,  $\sigma'_{kk}$  为有效体积应力,  $S'_{ij} = S_{ij}$  为有效偏应力,  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 符号。

通常可以认为球应力张量  $\sigma'_m$  只改变物体的体积, 不改变其形状; 偏应力  $S_{ij}$  只引起物体的形状变化, 而不引起体积的变化。从而也可将应变张量对应地分解成球应变张量  $\epsilon_m$  和偏应变张量  $e_{ij}$ , 表达式如下

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_m &= \frac{1}{3} (\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) = \frac{1}{3} \epsilon_{kk}, \\ e_{ij} &= \epsilon_{ij} - \epsilon_m \delta_{ij} = \epsilon_{ij} - \frac{1}{3} \epsilon_{kk} \delta_{ij}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

设突出煤剪切模量为  $G$ , 体积模量为  $K$ , 则

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad (6)$$

式中,  $E$  和  $\nu$  分别表示突出煤的弹性模量和泊松比。

对于三维应力状态下的 Hooke 体, 有

$$\sigma'_m = 3K\epsilon_m, S_{ij} = 2Ge_{ij}. \quad (7)$$

三维应力状态下的粘弹塑性体, 其蠕变方程可以对比单轴应力状态下的蠕变方程, 根据叠加原理, 结合上述各式, 注意到突出煤蠕变过程中体积应变为零, 由式(2)、(3)便可得到三维应力状态下的突出煤的蠕变方程。

取  $\sigma_s^D$  为偏应力长期强度, 突出煤的三维蠕变方程为

$$\epsilon_{ij} = \frac{S_{ij}}{2G_1} \left[ 1 - \frac{G_1}{G_1 + G_2} \exp\left(-\frac{G_1 G_2}{\eta_1 (G_1 + G_2)} t\right) \right], S_{ij} < \sigma_s^D, \quad (8)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{S_{ij}}{2G_1} \left[ 1 - \frac{G_1}{G_1 + G_2} \exp\left(-\frac{G_1 G_2}{\eta_1 (G_1 + G_2)} t\right) \right] + \left[ \frac{1}{2G_3} - \frac{(\exp(-bt) + \exp(bt))}{4G_3} \right] (\sigma_0 - \sigma_s), S_{ij} > \sigma_s^D, \quad (9)$$

式中,  $b = \sqrt{-\frac{G_3}{\eta_2}}$ ,  $G_1, G_2, G_3$  分别为模型的剪切模量,  $\eta_1, \eta_2$  分别为模型的牛顿粘性系数, 突出煤的偏应力长期强度  $\sigma_s^D$  可通过常规实验确定<sup>[16]</sup>。

相应地, 式(8)可用来描述三维条件下的衰减蠕变过程, 式(9)可用来描述三维条件下的非衰减蠕变过程。

### 3 蠕变模型参数确定及试验验证

现在通过具体的围压三轴压缩实验来验证突出煤蠕变模型的合理性。

在围压三轴应力条件下, 有  $\sigma'_{22} = \sigma'_{33}$ , 将  $S_{11} = \frac{2}{3} (\sigma'_{11} - \sigma'_{22}) = \frac{2}{3} (\sigma_{11} - \sigma_{22})$  代入式(8)、(9), 此时突出煤的三维蠕变方程为

$$\epsilon_{11} = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{3G_1} \left[ 1 - \frac{G_1}{G_1 + G_2} \exp\left(-\frac{G_1 G_2}{\eta_1 (G_1 + G_2)} t\right) \right], S_{11} < \sigma_s^D, \quad (10)$$

$$\epsilon_{11} = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{3G_1} \left[ 1 - \frac{G_1}{G_1 + G_2} \exp\left(-\frac{G_1 G_2}{\eta_1 (G_1 + G_2)} t\right) \right] + \frac{\frac{2}{3} (\sigma_{11} - \sigma_{22}) - \sigma_s^D}{2G_3} -$$

$$\frac{(\exp(-bt) + \exp(bt))}{4G_3} \left[ \frac{2}{3} (\sigma_{11} - \sigma_{22}) - \sigma_s^D \right],$$

$$S_{11} > \sigma_s^D. \quad (11)$$

利用 Matlab 编程, 采用最小二乘法拟合出了突出煤三维蠕变模型中的参数, 如表 1 所示。

表1 突出煤蠕变模型参数拟合结果

试样编号	$S_{11}/\text{MPa}$	$G_1/\text{MPa}$	$G_2/\text{MPa}$	$G_3/\text{MPa}$	$\eta_1/\text{MPa}$	$\eta_2/\text{MPa}$
1#	2.801 2	0.256 8	1.515 4	—	5.302 5	—
2#	6.067 6	0.381 4	4.921 0	-1 238.450 3	20.834 7	$10.856 7 \times 10^5$

理论结果与试验结果的比较如图3和4所示。

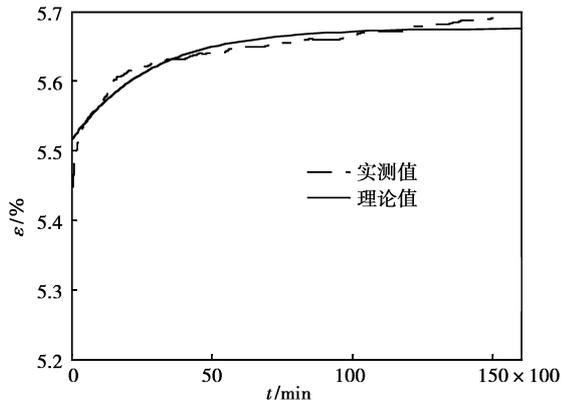


图3 1#煤样的理论与实验结果比较

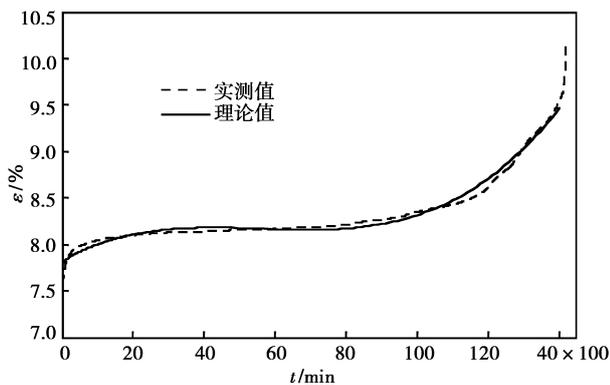


图4 2#煤样的理论与实验结果比较

从图3、4中可以看出,不论是衰减蠕变还是非衰减蠕变,理论结果与试验结果非常吻合,这表明式(8)和(9)能真实有效地反映突出煤的三维蠕变变形特性。

## 4 结 论

1) 突出煤的三轴蠕变特性与之所受的载荷水平有关,在较低应力水平下表现出衰减蠕变特性,在较高应力水平下表现出非衰减蠕变特性。

2) 引入非牛顿流体元件组成了能反映非衰减蠕变的粘弹塑性体,并结合鲍埃丁-汤姆逊体,建立了突出煤的复合型三维蠕变模型。通过试验验证,

证明了该复合模型能很有效地描述突出煤三维条件下各种蠕变阶段的变形特性,特别是加速蠕变阶段。

3) 瓦斯压力对煤岩的蠕变特性及其变形机制的影响有着不可忽视的作用,笔者对这方面的研究还不够,尚需日后深入研究。

## 参考文献:

- [1] 何学秋. 含瓦斯煤岩流变动力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.
- [2] 徐平, 杨挺青. 岩石流变试验与本构模型辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增): 1739-1744.  
XU PING, YZNG TING-QING. Current research on the rheological test and model identification of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Suppl): 364-369.
- [3] 邓荣贵, 周德培, 张倬元, 等. 一种新的岩石流变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 780-784.  
DENG RONG-GUI, ZHOU DE-PEI, ZHANG ZUO-YUAN, et al. A new rheological model for rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 780-784.
- [4] 秦跃平, 王林, 孙文标, 等. 岩石损伤流变理论模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增2): 2291-2295.  
QIN YUE-PING, WANG LIN, SUN WANG-BIAO, et al. Study on rheological theory model of rock damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Suppl2): 2291-2295.
- [5] 杨春和, 陈锋, 曾义金. 岩盐蠕变损伤关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1602-1604.  
YANG CHUN-HE, CHEN FENG, ZENG YI-JIN. Investigation on creep damage constitutive theory of salt rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1602-1604.
- [6] 韦立德, 徐卫亚, 朱珍德, 等. 岩石黏弹塑性模型的研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 583-586.  
WEI LI-DE, XU WEI-YA, ZHU ZHEN-DE, et al. Study on constitutive model of viscoelastoplastic rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 583-586.
- [7] 陈沅江, 潘长良, 曹平, 等. 软岩流变的一种新力学模型[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 209-214.

- CHEN YUAN-JIANG, PAN CHANG-LIANG, CAO PING, et al. A new mechanical for rock rheology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 209-214.
- [8] 张向东, 李永靖, 张树光, 等. 软岩蠕变理论及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1635-1639.
- ZHANG XIANG-DONG, LI YONG-JING, ZHANG SHU-GUANG, et al. Creep theory of soft rock and its engineering application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1635-1639.
- [9] 王来贵, 何峰, 刘向峰, 等. 岩石试件非线性蠕变模型及其稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1640-1642.
- WANG LAI-GUI, HE FWNG, LIN XIANG-FENG, et al. Non-linear creep model and stability analysis of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1640-1642.
- [10] 韦立德, 杨春和, 徐卫亚. 基于细观力学的岩盐蠕变损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4253-4258.
- WEI LI-DE, YANG CHUN-HE, XU LI-YA. Study on creep damage constitutive model of salt rock based on mesomechanics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4253-4258.
- [11] 徐卫亚, 杨圣奇, 褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 433-447.
- XU WEI-YA, YANG SHENG-QI, CHU WEI-JIANG. Nonlinear viscoelasto-plastic rheological model (Hohai model) of rock and its engineering application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 433-447.
- [12] 范庆忠, 高延法. 软岩蠕变特性及非线性模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 391-396.
- FAN AING-ZHONG, GAO YAN-FA. Study on creep properties and nonlinear creep model of soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 391-396.
- [13] 杨彩虹, 毛君, 李剑光. 改进的蠕变模型及其稳定性[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2008, 38(1): 92-97.
- YANG CAI-HONG, MAO JUN, LI JIAN-GUANG. Modified creep model and its stability [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(1): 92-97.
- [14] 赵延林, 曹平, 文有道, 等. 岩石弹黏塑性流变试验和非线性流变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 477-486.
- ZHAO YAN-LIN, CAO PING, WEN YOU-DAO, et al. Elastovisco-plastic rheological experiment and nonlinear rheological model of rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 477-486.
- [15] 尹光志, 王登科, 张东明, 等. 含瓦斯煤岩三维蠕变特性及蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增): 2631-2636.
- YIN GUANG-ZHI, WANG DENG-KE, ZHANG DONG-MING, et al. Research on triaxial creep properties and creep model of coal containing gas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Suppl): 2631-2636.
- [16] 崔希海, 付志亮. 岩石流变特性及长期强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 1021-1024.
- CUI XI-HAI, FU ZHI-LIANG. Experimental study on rheology properties and long-term strength of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 1021-1024.

(编辑 赵 静)