

文章编号: 1000-4750(2013)07-0270-06

卧庄矿15[#]煤石灰岩顶板稳定性判别计算

蒋斌松, 冯 强, 张 强

(中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏, 徐州 221008)

摘 要: 在晋城矿区随着3[#]煤资源的逐步枯竭, 许多矿井迫切希望能够开采15[#]煤层。但15[#]煤顶板为厚、硬的石灰岩顶板, 开采可能形成顶板大面积悬露而突然断裂垮落、造成生产安全问题。该文针对卧庄煤矿15[#]煤层的赋存情况, 根据关键层理论确定老顶岩梁, 采用弹性地基梁模型解析计算其弯曲挠度; 采用Fourier积分变换方法解析计算底板岩层的底鼓量; 并计算直接顶的冒落高度。根据老顶弯曲挠度、底板底鼓量和煤层冒落高度三者之和充满采空区, 来确定相对应的开采宽度, 以判别其石灰岩顶板的稳定性。计算显示: 当控制直接顶石灰岩-1、石灰岩-2随开采及时冒落、开采宽度达到22.55m时, 老顶岩层可与冒落岩石相接触, 表明卧庄矿15[#]煤层开采是安全的。这里所采用的分析方法对于晋城矿区及相类似坚硬顶板煤层的安全开采具有参考价值。

关键词: 石灰岩顶板; 稳定性; 解析计算; 弹性地基梁; Fourier积分变换

中图分类号: TD323 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.04.0238

STABILITY CRITERION CALCULATION OF LIMESTONE ROCK ROOF OF THE 15[#] COAL IN WOZHUANG MINE

JIANG Bin-song, FENG Qiang, ZHANG Qiang

(State Key Laboratory for GeoMechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: With the exhaustion of the 3[#] coal resource in JinCheng mining area, the 15[#] coal is urgently to be mining in many mines. However the roof of 15[#] coal consists of thick and hard limestone. The excavation in it may form a large bare area and consequently cause sudden collapse, which may lead to a series of safety problems. According to the occurrence of 15[#] coal in WoZhuang mine, the paper determines the main roof by the key strata theory, and then analytically evaluates the bending deflection of the main roof by the elastic foundation beam theory. Additionally, the Fourier integral transformation method is adopted to calculate the floor heave deformation and then the caving height of immediate roof is also calculated. The corresponding mining width is determined by the criterion that the sum of the main roof bending deflection, floor heave deformation and the caving height should equal to the goaf height, and this is used to evaluate the stability of limestone roof. The results show that the main roof rock layer will contact the collapse rock mass when the immediate roofs of 1[#] and 2[#] limestone immediately collapse and the mining width is up to 22.55m. This indicates that the exploitation of 15[#] coal in Wozhuang mine is safe. The method employed in this paper has a reference significance for the excavation of JinCheng mining area and other coal layers with the similar hard roof condition.

Key words: limestone rock roof; stability; analytical calculation; elastic foundation beam; Fourier integral transformation

山西晋城矿区15[#]煤层为中薄煤层、稳定可采, 但其顶板为层状石灰岩。在15[#]煤开采中面临的突

出问题是: 石灰岩顶板强度高、厚度大、整体性好、自稳能力强, 回采后极易造成采空区顶板大面积悬

收稿日期: 2012-04-06; 修改日期: 2012-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174196)

通讯作者: 蒋斌松(1961—), 男, 江苏溧阳人, 教授, 博士, 博导, 从事岩石力学理论及应用研究(E-mail: jiangbs@cumt.edu.cn).

作者简介: 冯 强(1985—), 男, 山东威海人, 博士生, 从事岩石力学理论及应用方面的研究(E-mail: fengqiang889966@126.com);

张 强(1982—), 男, 河北定州人, 讲师, 博士, 从事岩石力学与工程应用研究(E-mail: jakezhq@126.com).

露而不垮落；当开采范围达到一定距离后，极可能造成大面积暴露顶板突然断裂垮落，而工作面单体支柱支撑能力不足以抗衡其顶板垮落而引起的冲击压力，造成重大安全事故。因此，厚层石灰岩顶板的稳定控制问题直接影响到煤矿的安全生产。

尽管坚硬顶板的控制已有较成熟的方法^[1-4]，及一些研究成果^[5-7]。但这些研究成果所依据的主要是固支梁、板模型，与实际围岩(煤层)的约束存在较大偏差，其计算结果对岩层控制往往仅具有定性意义，缺乏较严格的定量分析。

这里，以卧庄矿 15[#]煤开采情况为例，提出坚硬顶板稳定性的分析方法。即，通过解析方法计算煤层开采后老顶岩层的弯曲挠度、工作面底鼓及直接顶岩层的冒落厚度，以此判别老顶岩层与直接顶岩层是否相接触来判断老顶岩层的稳定性。这对于晋城矿区 15[#]煤及类似矿井煤层的开采具有重要意义。此外，本文的分析方法及结果可以弥补文献[8]理论分析部分的不充分。

1 卧庄矿 15[#]煤层顶板赋存情况

卧庄矿 15[#]煤层顶板为复合顶板，局部有薄层泥岩伪顶、可随掘随冒，在顶板以上 13m 范围内共含 10 层石灰岩，层厚从 0.34m~1.925m；顶板石灰岩呈深灰-灰黑色、裂隙不发育、结构致密坚硬，属 4 类坚硬顶板，内含泥岩夹层；煤层底板主要为铝土质泥岩或泥岩。实测 15[#]煤层顶、底板地层赋存特征如图 1 所示^[8]。

15[#]煤埋深为 210m，岩层平均容重 $\gamma = 24\text{kN/m}^3$ ；15[#]煤厚度为 1.5m；有厚度为 0.15m 的伪顶板；石灰岩顶板共分 7 层，即石灰岩-1、石灰岩-2~石灰岩-7，其厚度分别为 1.02m、1.345m、1.66m、0.515m、0.405m、0.305m 和 1.64m；15[#]煤及顶板石灰岩、底板泥岩的弹性模量分别为 4.2GPa、46.1GPa 和 13.5GPa，泥岩的泊松比 $\mu = 0.17$ 。

2 老顶岩层弯曲挠度计算

基于各岩层厚度一般远小于开采工作面的尺寸，岩层可以处理为板，按平面分析计算时可简化为梁结构。岩梁模型主要为简支梁和固支梁。简支梁和固支梁都是端点约束，简支梁是端点无转动约束、而固支梁是端点转动约束为刚性，这是两个极端情形。实际上，岩层在底板的约束不是一个点、而是无限长的一条线或面，对端点转动的约束既不

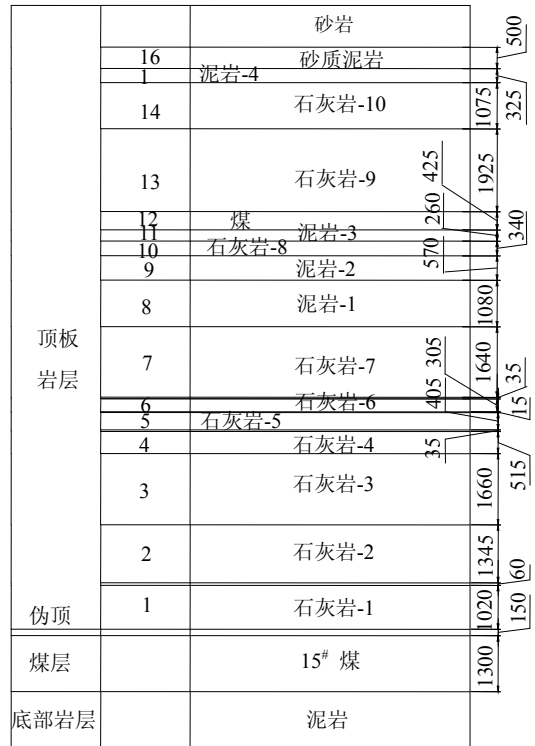


图 1 顶板石灰岩岩层赋存结构

Fig.1 The occurrence structure of limestone rock roof

是零也不是无穷大、而是与煤层及底板厚度、岩性等因素有关的量，且其影响程度应当随着离煤壁距离的增加而减小。显然，相对简支梁和固支梁较精确、合理的模型是弹性地基梁^[9]。利用弹性地基梁模型在矿山开采问题中应用也有初步成果^[10-11]。

根据岩层的力学特性和分布特点，按关键层理论^[12]，可判别主关键层的老顶岩层、以确定岩梁主体。假设支撑关键层的弹性基础符合 Winkler 地基假设^[13-15](其力学模型如图 2 所示)，即，基础内的铅垂反力 R 与挠度 y 的关系为：

$$R=ky \tag{1}$$

式中， k 为 Winkler 地基或垫层系数，与梁下垫层的厚度及力学性质有关， $k = E_0 / (h_0 \times 1)$ ； E_0 为地基

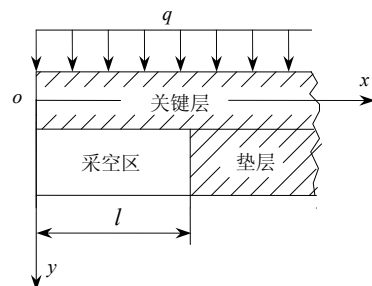


图 2 老顶岩层弯曲挠度计算模型

Fig.2 The calculation mode of camber on main rock roof

的压缩模量； h_0 为垫层的厚度；“1”表示考虑梁宽为单位1。

设岩梁(关键层)的跨度为 $2l$ ，所受荷载为 q ，梁的抗弯刚度为 EI ，根据问题的对称性，取梁的一半进行力学分析，采用坐标系如图 2 所示。则由

$$y = \begin{cases} \frac{ql^4}{24EI} \left[\left(1 - \frac{x^2}{l^2}\right)^2 + \frac{4\alpha + 6}{\alpha(\alpha + 1)} \left(1 - \frac{x^2}{l^2}\right) + \frac{4\alpha^2 + 12\alpha + 6}{\alpha^3(\alpha + 1)} \right], & 0 \leq x \leq l \\ \frac{ql^4}{12EI} e^{-\beta(x-l)} \left[\frac{2\alpha^2 + 6\alpha + 3}{\alpha^3(\alpha + 1)} \cos \beta(x-l) - \frac{2\alpha^2 - 3}{\alpha^3(\alpha + 1)} \sin \beta(x-l) \right], & l \leq x \leq \infty \end{cases} \quad (3)$$

式中， $\alpha = \beta l$ ， $\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$ 。

关键层的最大挠曲发生在 $x=0$ 处，根据式(3)，有：

$$y_{\max} = \frac{ql^4}{24EI} \left(1 + \frac{4}{\beta l} + \frac{6}{\beta^2 l^2} + \frac{6}{\beta^3 l^3} \right) \quad (4)$$

根据卧庄矿的岩层赋存，石灰岩-1 和石灰岩-2 为直接顶，而石灰岩-3 为主关键层，即老顶岩层。实际上，矿井岩层控制方法也是使石灰岩-1 和石灰岩-2 能够随着工作面的推进及时冒落、以防止老顶大面积突然垮落。据此，进行老顶岩层的最大挠曲计算：

考虑石灰岩-3~石灰岩-7 作为组合梁承受上覆岩层荷载 q ， $q = (210 - 0.15 - 1.02 - 1.345) \times 24 = 4980 \text{ kN/m}$ 。

垫层由冒落石灰岩-2、石灰岩-1、伪顶和煤层组成，而石灰岩和煤层垫层的地基系数分别为：

$$k_1 = 46.1 / (1.345 + 1.02) = 19.493 \text{ GN/m}^4,$$

$$k_2 = 4.2 / (1.5 + 0.15) = 2.545 \text{ GN/m}^4.$$

垫层总地基系数按两垫层串联方式确定，有：

$$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} = \frac{19.493 \times 2.545}{19.493 + 2.545} = 2.251 \text{ GN/m}^4.$$

老顶(岩梁)的抗弯刚度为：

$$EI = 46.1 \times (1.66^3 + 0.515^3 + 0.405^3 + 0.305^3 + 1.64^3) / 12 = 35.407 \text{ GN} \cdot \text{m}^2;$$

而
$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{2.251}{4 \times 35.407}} = 0.355 \text{ m}^{-1}.$$

将上述计算结果代入式(4)，可得老顶的最大弯曲挠度 y_{\max} 与开采宽度 $2l$ 的变化曲线，如图 3 所示。

根据式(4)、并从图 3 可以得出，当开采宽度 $2l$ 分别为 20m、30m 和 40m 时，老顶岩层的最大弯曲挠度 y_{\max} 相应为 0.160m、0.594m 和 1.593m。

平衡原理可得岩梁的挠曲线微分方程为：

$$\begin{cases} EIy^{(4)} = q, & 0 \leq x \leq l \\ EIy^{(4)} = q - ky, & l \leq x \leq \infty \end{cases} \quad (2)$$

解微分方程式(2)，并利用对称和连续条件，可得：

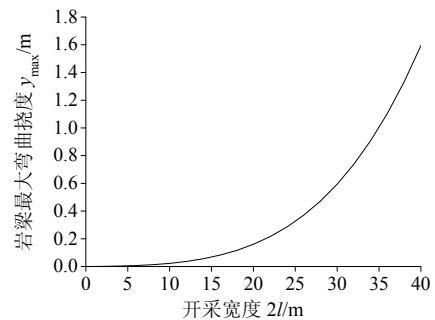


图 3 老顶岩层最大弯曲挠度随开采宽度的变化
Fig.3 The maximum bending deflection change of main roof strata with mining width

3 开采引起的工作面底鼓计算

基于煤层在开采前岩层在地应力作用下处于平衡和变形稳定状态，而煤层开采相当于地应力释放，相应地岩层出现应力重分布以及产生变形(位移)。岩层的垂向地应力分量通常取自重力，故开挖释放荷载：

$$p = \gamma H = 210 \times 24 = 5.04 \text{ MPa}$$

在计算老顶岩层的弯曲下沉时是采用弹性地基梁模型，已考虑了煤层的弹性变形，因此在考虑底板岩层的变形时可忽略煤层的变形，即煤层按刚性考虑。这样，开采引起的底板岩层变形的计算模型及采用坐标系如图 4 所示。

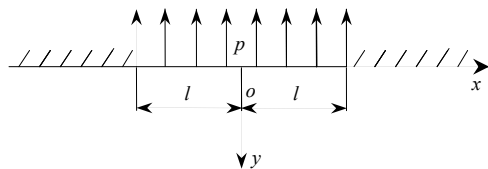


图 4 工作面底鼓计算模型
Fig.4 The calculation mode of bottom squeeze in working face

在法向力 p 的作用下，底板岩层中应力和位移的确定可归结为求解一双调和方程^[16]，即：

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}\right) = 0 \quad (5)$$

其 oxy 直角坐标系下的应力分量与应力函数 ϕ 的关系为:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \\ \sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \\ \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (6)$$

而相应位移分量通过几何及物理方程确定, 即:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{2G}[(1-\mu)\sigma_x - \mu\sigma_y] \\ \varepsilon_y = \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{1}{2G}[(1-\mu)\sigma_y - \mu\sigma_x] \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\tau_{xy}}{G} \end{cases} \quad (7)$$

式中, G 为剪切模量, $G = E / 2(1 + \mu)$ 。

煤层底板和煤层之间的接触常采用完全接触和滑动接触两种方式, 这里采用滑动接触。这样, 问题的边界条件为:

$$\begin{cases} y = 0, & \tau_{xy} = 0 \\ y = 0, & |x| \leq l, \quad \sigma_y = -p \\ y = 0, & |x| > l, \quad w = 0 \end{cases} \quad (8)$$

由于问题关于 y 轴对称, 其求解可采用 Fourier 积分变换方法^[17]。即, 函数 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 的 Fourier 余弦和正弦积分变换分别为:

$$\begin{cases} \bar{f}_1(\zeta) = \int_0^\infty f_1(x) \cos \zeta x dx \\ \bar{f}_2(\zeta) = \int_0^\infty f_2(x) \sin \zeta x dx \end{cases} \quad (9)$$

而其 Fourier 余弦和正弦的逆变换分别为:

$$\begin{cases} f_1(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \bar{f}_1(\zeta) \cos \zeta x d\zeta \\ f_2(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \bar{f}_2(\zeta) \sin \zeta x d\zeta \end{cases} \quad (10)$$

根据定义式(9), 分别对式(5)~式(7)进行 Fourier 余弦或正弦变换, 并求解相应的常微分方程, 可得底板应力分量和位移分量的 Fourier 变换式:

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_x = [\zeta^2 A + \zeta B(\zeta y - 2)]e^{-\zeta y} \\ \bar{\sigma}_y = -\zeta^2(A + By)e^{-\zeta y} \\ \bar{\tau}_{xy} = -[\zeta^2 A + \zeta B(\zeta y - 1)]e^{-\zeta y} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \bar{u} = \frac{1}{2G} \{\zeta A + B[\zeta y - 2(1-\mu)]\} e^{-\zeta y} \\ \bar{w} = \frac{1}{2G} [\zeta A + B(1-2\mu + \zeta y)] e^{-\zeta y} \end{cases} \quad (12)$$

式中, A 、 B 为 Fourier 积分常数。

利用边界条件式(8), 确定出积分常数 A 、 B , 代回式(12), 并利用 Fourier 逆变换式(10), 可得工作面底板位移的解析表达式:

$$w(x, 0) = \frac{1-\mu}{G} pl \int_0^\infty \frac{1}{\zeta} J_1(\zeta l) \cos \zeta x d\zeta \quad (13)$$

式中, $J_1(\cdot)$ 为第一类 1 阶 Bessel 函数。

由式(13), 利用 Bessel 函数的性质^[18], 煤层开采后工作面底鼓的最大值为:

$$w_{\max} = w(0, 0) = \frac{2(1-\mu^2)}{E} pl \quad (14)$$

根据底板岩层资料, 当半开采宽度 $l=10\text{m}$ 、 15m 和 20m 时, 由式(14)可得最大底鼓 $w_{\max}=0.0073\text{m}$ 、 0.011m 和 0.015m 。

显然, 底鼓量相对弯曲挠度很小, 可忽略。但为了体现方法的完整性, 还是考虑底鼓量这一项。

4 直接顶岩层冒落高度计算

15#煤上有 0.15m 的伪顶, 随采随落; 直接顶由厚 1.02m 和 1.345m 石灰岩组成。

根据资料, 对于硬砂岩, 碎胀系数 $K_p = 1.5 \sim 1.8$ 。考虑到坚硬石灰岩冒落后较规则, 其碎胀系数相对较小, 故取冒落直接顶岩层的平均碎胀系数 $K_p = 1.5$ 。这样, 冒落直接顶的碎胀高度:

$$H_m = (1.5 - 1) \times (0.15 + 1.02 + 1.345) = 1.258\text{m}$$

5 老顶岩层稳定性判别

由老顶岩层的弯曲挠度 y_{\max} 、底鼓量 w_{\max} 、直接顶冒落高度 H_m 以及煤层厚度 M , 可计算煤层开采后留下的空隙 Δ , 即:

$$\Delta = M - (y_{\max} + w_{\max} + H_m) \quad (15)$$

根据 2 节~4 节的分析计算, 有:

在控制直接顶石灰岩-1 和石灰岩-2 随开采及时冒落情形下, 当开采宽度 $2l$ 分别为 20m 、 30m 和 40m 时, y_{\max} 为 0.160m 、 0.594m 和 1.593m ; w_{\max} 为 0.0073m 、 0.011m 和 0.015m ; H_m 为 1.258m ; 而 M 为 1.5m 。

显然, $2l = 20\text{m}$ 时, 老顶与底板接近相接触(反算结果是: 当 $2l = 22.55\text{m}$ 时, $\Delta = 0$)。而石灰岩-3

岩层破断的极限垮距为 $30\text{m}^{[8]}$ 。这表明, 此时可确保老顶岩层稳定, $15^{\#}$ 煤层的开采是安全的。此外, 若直接顶仅为石灰岩-1 时, 开采宽度 $2l$ 需达到 36.10m , 可使 $\Delta = 0$ 。

卧庄矿 $15^{\#}$ 煤在开采前通过对老顶岩层稳定性研究, 包括实验室模拟及理论分析计算, 在确保石灰岩顶板能够稳定的情况下进行开采。在开采过程中, 必要时是通过钻孔爆破方法控制直接顶冒落, 存在石灰岩-1 冒落、石灰岩-1 和石灰岩-2 一起冒落两种情况。

现场监测显示: 计算结果与实际岩层的移动情况相吻合。

6 结 论

针对山西晋城矿区 $15^{\#}$ 煤层为层状坚硬石灰岩顶板情形, 根据老顶挠曲、工作面底鼓和直接顶冒落是否充满采空区来判别老顶岩层的稳定状态, 提出并建立了坚硬石灰岩顶板的稳定性判别计算方法。即, 根据关键层理论, 采用弹性地基梁模型确定了老顶岩层的弯曲挠度计算式(3)及岩梁的最大弯曲挠度式(4); 采用 Fourier 积分变换方法, 建立了开采后底板岩层底鼓的解析计算式(14)。对于卧庄矿 $15^{\#}$ 煤开采, 当直接顶为石灰岩-1 和石灰岩-2 或直接顶仅为石灰岩-1 时, 通过控制直接随着工作面推进及时冒落, 当开采宽度分别达到 22.55m 和 36.1m 时, 直接顶冒落岩石即可充满采空区, 显示卧庄煤矿 $15^{\#}$ 煤开采后老顶岩层是稳定的。

本文所采用的坚硬顶板的稳定性判别计算方法可用在山西晋城矿区及类似矿井煤层的开采。

参考文献:

- [1] 宋振骐. 实用矿山压力及控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988: 66—70.
Song Zhenqi. Practical mining pressure and control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1988: 66—70. (in Chinese)
- [2] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 65—84.
Qian Minggao, Shi Pingwu. Mine pressure and strata control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003: 65—84. (in Chinese)
- [3] 靳钟铭, 徐林生. 煤矿坚硬顶板控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994: 106—124.
Jin Zhongming, Xu Linsheng. Hard roof control in coal mine [M]. Beijing: Coal Industry University Press, 1994: 106—124. (in Chinese)
- [4] 宋永津. 控制煤层坚硬难冒顶板技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002: 40—58.
Song Yongjin. Control technology of hard and difficult to cave roof in coal seam [M]. Beijing: Coal Industry Press, 2002: 40—58. (in Chinese)
- [5] 梁运培, 孙东玲. 岩层移动的组合梁理论及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 654—657.
Liang Yunpei, Sun Dongling. Study on the composed rock beam theory of strata movement and its application [J]. Chinese Journal Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 654—657. (in Chinese)
- [6] 王金安, 尚新春, 刘红, 等. 采空区坚硬顶板破断机理与灾变塌陷研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 850—855.
Wang Jin'an, Shang Xinchun, Liu Hong, et al. Study on fracture mechanism and catastrophic collapse of strong roof strata above the mined area [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8): 850—855. (in Chinese)
- [7] 王开, 康天合, 李海涛, 等. 坚硬顶板控制放顶方式及合理悬顶长度的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2320—2327.
Wang Kai, Kang Tianhe, Li Haitao, et al. Study of control caving methods and reasonable hanging roof length on hard roof [J]. Chinese Journal Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2320—2327. (in Chinese)
- [8] 韩立军, 蒋斌松, 韩贵雷, 等. 晋城矿区厚层脆韧性石灰岩顶板变形与控制特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1841—1846.
Han Lijun, Jiang Binsong, Han Guilei, et al. Study of deformation and controlling characteristics of limestone roof with thick layer and brittle-ductile state in Jincheng mining area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1841—1846. (in Chinese)
- [9] 龙驭球. 弹性地基梁的计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983: 6—26.
Long Yuqiu. Computation of elastic foundation beam [M]. Beijing: Advanced Education Press, 1983: 6—26. (in Chinese)
- [10] 侯哲生, 李晓. 金川二矿水平矿层几何非稳定性分析的突变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 2868—2871.
Hou Zhesheng, Li Xiao. Catastrophe model for analysis of geometrical instability of horizontal ore layer of mine zone No.2 in Jinchuan nickel mine [J]. Chinese Journal Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Suppl 1): 2868—2871. (in Chinese)
- [11] 朱建明, 侯跃华, 吴剑平. 露天-井工联合开采下关键层模型的应用[J]. 金属矿山, 2010, 411(9): 30—33.
Zhu Jianming, Hou Yuehua, Wu Jianping. Application of key strata model to the combination of opencast-underground mining [J]. Metal Mine, 2010, 411(9): 30—33. (in Chinese)
- [12] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 10—18.
Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin, et al. Key strata theory in ground control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003: 10—18. (in Chinese)

- [13] 杨学祥. 均布荷载下一端固定的文克尔地基梁的基底压力特性及其工程意义[J]. 工程力学, 2006, 23(11): 76—79.
Yang Xuexiang. The feature of foundation pressure on winkler foundation-beam with one fixed end and its application [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(11): 76—79. (in Chinese)
- [14] 刘金海, 冯涛, 万文. 煤矿离层注浆减沉效果评价的弹性薄板法[J]. 工程力学, 2009, 26(11): 252—256.
Liu Jinhai, Feng Tao, Wan Wen. Elastic-thin-plate bending method for evaluating reducing-subsidence effectiveness by injecting grout into separated strata in coal mine [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(11): 252—256. (in Chinese)
- [15] Arici Marcello, Granata Michele Fabio. Generalized curved beam on elastic foundation solved by transfer matrix method [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2011, 40(2): 279—295.
- [16] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 28—31.
Xu Zhilun. A concise course in elasticity [M]. 3rd ed. Beijing: Advanced Education Press, 2002: 28—31. (in Chinese)
- [17] Sneddon I N. 富利叶变换[M]. 何衍璇, 译. 北京: 科学出版社, 1985: 20—21.
Sneddon I N. Fourier transform [M]. Translated by He Yanxuan. Beijing: Science Press, 1985: 20—21. (in Chinese)
- [18] 图马, 沃尔什. 工程数学手册[M]. 欧阳芳瑞, 张玉平, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 308.
Tuma J, Walsh Ronald A. Engineering mathematics handbook [M]. Translated by Ouyang Fangrui, Zhang Yuping. Beijing: Science Press, 2002: 308. (in Chinese)

(上接第 261 页)

参考文献:

- [1] 尚柏林, 宋笔锋, 杨建军. 飞机结构健康监测传感器新技术[J]. 无损检测, 2008, 30(5): 289—291.
Shang Bolin, Song Bifeng, Yang Jianjun. New sensor technologies in aircraft structural health monitoring [J]. Non-destructive Testing, 2008, 30(5): 289—291. (in Chinese)
- [2] 殷毅. 船舶无损检测开启新纪元[J]. 中国船检, 2010, 8(6): 46—48.
Yin Yi. Ship's NDT opens a new aera [J]. China Ship Survey, 2010, 8(6): 46—48. (in Chinese)
- [3] 许崇武, 胡学文. 接地网防蚀金属材料性能试验研究[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 77—79.
Xu Chongwu, Hu Xuwen. Investigation of anti-corrosive metallic material for earthing grid [J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 77—79. (in Chinese)
- [4] 高荣刚. 汽轮机叶片叶身的无损检测[J]. 新疆电力技术, 2009(1): 45—46.
Gao Ronggang. Non-destructive of blade of steam turbine [J]. Xinjiang Electric Power Technology, 2009(1): 45—46. (in Chinese)
- [5] Tuzzeo D, Scalea F L. Noncontact aircoupled guided wave ultrasonics for detection of thinning defects in aluminum plates [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2001, 13(2): 61—77.
- [6] Terrien N, Royer D, Lepoutre F, Deom A. Optimization of hidden corrosion detection in aircraft structures using Lamb waves: Numerical predictions and experimental results [C]// AIP Conference Proceedings, Portland, American Institute of Physics, 2007, 894(1): 1282—1289.
- [7] Hirotsugu Ogi, Masahiko Hirao, Toshihiro Ohtani. Line focusing electromagnetic acoustic transducers for the detection of slit defects [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1999, 46(2): 341—346.
- [8] Dutton B, Boonsang S, Dewhurst R J. Modelling of magnetic fields to enhance the performance of an in-plane EMAT for laser-generated ultrasound [J]. Ultrasonics, 2006, 44(1): 657—665.
- [9] Su Zhongqing, Ye Lin, Lu Ye. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295(3/4/5): 753—780.
- [10] Zhu W, Rose J L, Barshinger J N. Ultrasonic guided wave NDT for hidden corrosion detection [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1998, 10(4): 205—225.
- [11] Alleyne D, Cawley P. The interaction of Lamb waves with defects [J]. IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1992, 39(3): 381—397.
- [12] Bingham J, Hinders M. Lamb wave characterization of corrosion-thinning in aircraft stringers: Experiment and three-dimensional simulation [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 126(1): 103—113.
- [13] 焦敬品, 刘文华, 张永强, 何存富, 吴斌. 基于磁致伸缩效应的 SH 波电磁超声换能器设计[J]. 仪器仪表学报(增刊 II), 2010, 31(4): 284—289.
Jiao Jingpin, Liu Wenhua, Zhang Yongqiang, He Cunfu, Wu Bin. Electromagnetic acoustic transducer design based on magnetostrictive effect for SH waves detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument (Suppl II), 2010, 31(4): 284—289. (in Chinese)