

# 煤岩蠕变损伤特性的实验研究\*

曹树刚 鲜学福

(重庆大学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** 对可能产生煤与瓦斯延迟突出的煤岩进行常规的物理力学性质实验、微观损伤分析和流变力学特性实验。经过对实验结果的分析,得到煤岩受力变形直至破坏的实验规律,提出了有实用价值的煤岩损伤的偏应力检测法。

**关键词** 煤岩,蠕变,损伤,实验

**分类号** TU 452

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2001)06-0817-05

## 1 实验内容和方法

实验样品取自重庆地区南桐煤田二迭纪乐平煤系  $K_6$  煤层及其顶底板岩层。煤岩实样符号说明, A 为煤层底板炭质页岩; B 为煤层顶板钙质泥岩; C 为  $K_6$  煤层; D 为煤岩复合试样。 $K_6$  煤层曾发生过煤与瓦斯延迟突出。实验内容包括煤岩常规的物理力学性质实验、全应力-应变实验、显微损伤分析与流变力学特性实验。力学强度实验试件规格为  $50 \times 50 \times 50$ ,  $50 \times 50 \times 100$ ,  $\phi 50 \times 30$  及  $\phi 50 \times 100$  (单位: mm)等4种<sup>[1-2]</sup>。复合煤岩试样高度比为煤:岩=2:1,岩石为  $K_6$  煤层底板炭质页岩。 $K_6$  煤层顶板为钙质泥岩。实验设备采用 DLY-10, WE-60 及 YE-200 型万能材料试验机、Instron-1346 型电液伺服刚性试验机及美国 AMRAY 电子扫描显微镜。

在全应力-应变实验过程中,采用轴向位移控制,使试件应变速率为  $2 \times 10^{-4} \mu\text{m/s}$ 。试件受载在临界压力之前进行变形测试,同时用电阻应变片测轴向和横向应变及 Instron 伺服机的 X-Y 函数记录仪记录试件轴向变形,然后根据试件高度换算成轴向应变。

## 2 煤岩微观破坏机理分析

煤岩受力变形是一个很复杂的物理力学过程,最终的宏观变形破坏与其内部微结构和微缺陷紧密相关。AMRAY 电子扫描显微镜对煤岩作的微观实

验表明,属于沉积岩的煤岩,由于古气候及沉积环境的差异,构成了煤系地层煤岩在微观上的差异。图 1 揭示了煤成岩后的不均质性,由不同形状、不同大小的块状颗粒叠压而成,存在一些微空洞、微裂隙。图 1(b)显示了煤在成岩时期受压力作用有一定的拖动塑性流动。炭质页岩和钙质泥岩的显微结构反映其均匀性要好些,但仍有微空洞、微裂隙。

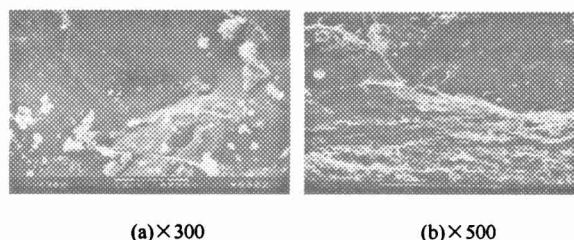


图 1 煤显微图片

Fig.1 Microscopic structures of coal

图 2 揭示了煤受载后产生一系列损伤破坏。其中,图 2(a)反映了煤的剪切裂纹;图 2(b)反映暗、亮煤交界附近结构的不均匀性造成应力局部集中,

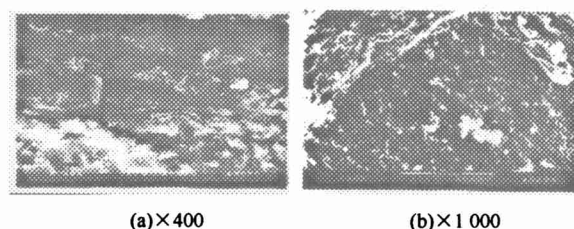


图 2 煤损伤显微图片

Fig.2 Microscopic structures of broken coal

2000年12月6日收到初稿,2001年1月10日收到修改稿。

\* 国家教委博士点科研基金资助项目(9561108)。

作者 曹树刚 简介:男,1955年生,博士,现任副教授,主要从事采矿工程及岩土工程等方面的科研和教学工作。

产生明显的微裂隙损伤，且损伤延伸有一定的方向性，近似于煤受压方向。

图3反映了炭质页岩受载以后损伤裂纹产生、发展及交汇情况。图3(a)表明页岩成岩时的不均质性，造成局部的应力集中，原生微缺陷最后发展为微观破裂；图3(b)表示岩石新的损伤仍在原生微缺陷附近开始，即沉积物胶结面开始；图3(c)，(d)表明损伤裂隙的发展、汇合。相对而言，炭质页岩沉积颗粒小、沉积方向性不明显，均匀性好一些，受载后产生的损伤裂隙有一定的方向性，近似于最大压应力方向，呈张拉断裂。钙质泥岩沉积颗粒取向性差，受载以后，裂隙延伸方向性差，主要沿不均匀结构交界面附近发展。

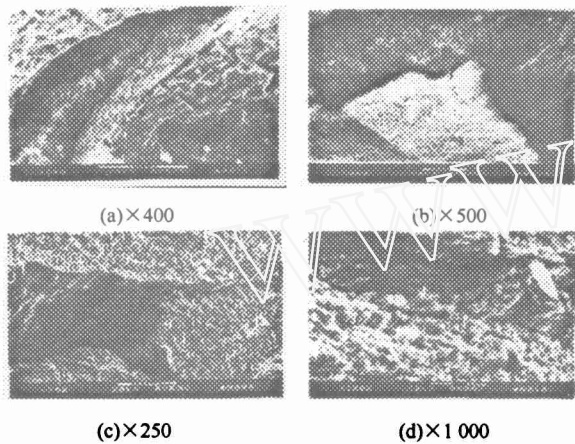


图3 炭质页岩损伤显微图片

Fig.3 Microscopic structures of carbonaceous shale

显微分析表明：受载以后煤岩破坏主要是拉裂破坏，断裂变形以颗粒间或胶结物内部微破裂为主，包括断裂、挫碎、粒化和大规模的粒间运动，少有顺层滑流的延性流变(成岩时期的固流褶皱、滑流除外)，宜采用格里菲斯强度准则等对其进行力学分析。由于煤存在大量原生和后生的微缺陷，颗粒表面积很大，使煤层中聚集了大量的表面能，造成井下该煤层区段容易发生煤与瓦斯突出。因此，煤的脆性断裂及以后的搓揉、粒化等破坏，是煤与瓦斯突出时煤的主要破坏机制。

### 3 煤岩全应力-应变实验

单轴全应力-应变实验结果表明：应力超过峰值应力 $\sigma$ 后，随着位移增加，应力下降到某一值后变化很缓慢，该值可认为是煤岩单轴实验的残余应力，用 $\sigma'$ 表示。由数据可知：不同煤岩样， $(\sigma'/\sigma)$ 值不同，A、B及C分别为52.3%、45.9%及8.8%，平均

为35.7%。强度很低的煤，应力超过峰值不久，其强度迅速降低，最后只有不到10%的残余应力。

复合煤岩样的全应力-应变曲线与单一煤岩样基本相似。其整个变形均经历了煤岩原有裂隙压密、线弹性变形、应变强化(原有裂隙开裂及产生新裂纹)及应变软化4个阶段。由于煤的强度比炭质页岩的强度小得多，抗拉强度相差近3倍，因此，复合煤岩样强度仍主要由煤的强度控制，总强度增加很少。

煤岩受载之初，应力存在一个缓慢的增加过程，说明是煤岩内部微缺陷(孔洞、裂隙)受压闭合；随荷载增加，存在一个近似线性的变化过程；以后，应力增加变缓，应变变化加快，即煤岩原有微缺陷张裂及新微缺陷产生与发展。煤岩实验的体积应变变化规律也说明了煤岩内部结构的这种变化过程。加载时，试件受压体积有少量减少，体积变化到一定程度， $\epsilon-\sigma$ 曲线变化趋势反向，即扩容；此后，煤岩内部结构随荷载继续增加，原有裂纹张裂，并由慢到快地产生新的裂纹，也即煤岩材料损伤程度逐渐加大。煤岩试件扩容时应力 $\sigma_0$ 相对于其峰值应力 $\sigma_c$ 而言，也因岩性的不同而发生变化。试件A<sub>19</sub>的 $(\sigma_0/\sigma_c)$ 值为79.1%，试件B<sub>16</sub>为100%，而煤的该值最低，试件C<sub>12</sub>和C<sub>13</sub>平均为32.6%。扩容应力随岩性的相对变化规律，也说明了煤受力变形破坏规律与别的岩性的不同，强度低，变形破坏快。

## 4 煤岩蠕变力学实验规律研究

### 4.1 煤岩蠕变实验

图4为煤层顶板钙质泥岩单轴蠕变实验结果，实验延续22h，施加最后一级荷载( $\sigma=142.67$  MPa)后出现不稳定蠕变，不久试件破坏。图5复合煤岩单轴蠕变实验曲线较好地反映了一般蠕变实验3阶

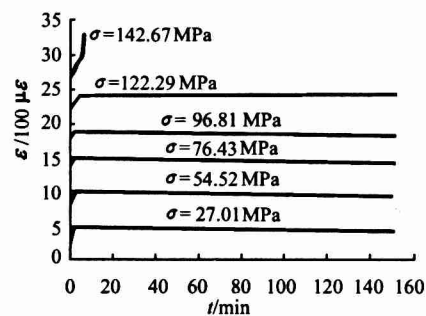


图4 钙质泥岩单轴蠕变实验曲线

Fig.4 Curves of uniaxial creep testing of calcic argillaceous rock

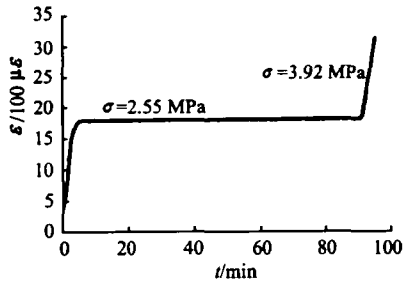


图 5 复合煤岩单轴蠕变实验曲线(A<sub>7</sub>)

Fig.5 Curves of uniaxial creep testing of compounded coal and rock (A<sub>7</sub>)

段情况, 由于试件原始缺陷及爆破等引起的损伤影响, 稳定蠕变后, 仅在应力  $\sigma = 3.92$  MPa 便转化为加速蠕变阶段。

为模拟矿山含瓦斯煤岩在应力作用下变形随时间发展并最终达到破坏这一流变过程, 以此探讨含瓦斯煤岩的煤与瓦斯延迟突出的力学机理, 在三轴蠕变实验时由试件端部充入  $CH_4$  纯度为 99.9% 的天然气。采用分级加载法, 以荷载控制方式先加轴压至初值, 紧接着加围压到要求值, 最后在试件端部充入天然气, 使煤吸附充分。天然气稳定以后, 再逐级加轴压, 见图 6。试件 D<sub>5</sub> 围压为 2.0 MPa, 轴向充气压力为 0.5 MPa, 破坏应力为 9.43 MPa, 仍出现 3 阶段蠕变。

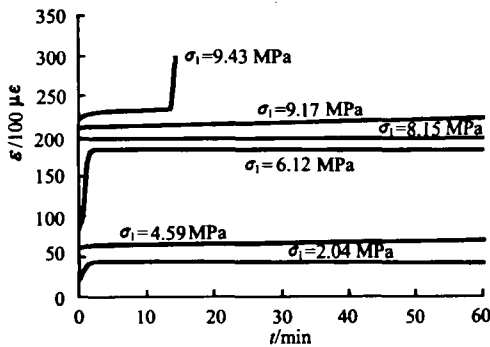


图 6 复合煤岩三轴加气蠕变实验曲线(D<sub>5</sub>)

Fig.6 Curves of triaxial creep testing with the gas of compounded coal and rock (D<sub>5</sub>)

实验结果表明: 不管是单轴蠕变实验还是三轴蠕变实验, 或三轴充气实验与三轴不充气实验, 煤岩蠕变曲线除电压波动影响外, 都出现加载之初衰减蠕变阶段、稳定蠕变阶段及加速蠕变阶段, 且煤岩破坏过程比较迅速, 延续时间短, 明显地表现出脆性蠕变形式。

#### 4.2 煤岩蠕变实验影响因素分析

煤岩的蠕变特性受荷载类型、荷载大小、围压、含水率(湿度)、温度及煤岩微观结构等诸因素的影

响。下面仅对本次实验影响较大的几个因素作一分析。

(1) 荷载大小。蠕变实验曲线表明, 低应力时, 煤岩变形很快趋于稳定。随加载等级增加, 煤岩变形速率缓慢增加, 但其破坏方式迅速(加速蠕变)。因此, 荷载大小对实验结果有较大影响。

(2) 围压。三轴实验时,  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 =$  恒量。本次实验结果表明, 随应力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  逐渐增大, 煤岩应变速率增大, 至破坏时达到最大。根据 Thompson 等人(1964)对钾盐及盐岩的实验研究<sup>[3,4]</sup>, 当三轴压缩的应力差同单轴压缩的应力值相等时, 两者的稳定蠕变应变速率相等。

(3) 煤岩结构。煤的颗粒大, 原始微缺陷多, 节理、层理等宏观缺陷很多, 非均质性很差; 岩石颗粒细小, 尤其是炭质页岩, 成岩时分选性好, 原生微缺陷比煤少得多, 且易加工成型(泥岩易遇水崩解)。煤岩结构的这种差异, 结果是煤强度低, 蠕变变形量大, 岩石则相反。如本文单轴实验结果表明, 相同试件时, 钙质泥岩蠕变破坏时应力为 142.67 MPa, 而复合煤岩为 3.92 MPa 及 3.57 MPa, 但蠕变变形规律相反, 不计初次加载时的变形, 钙质泥岩蠕变变形为 2 600  $\mu\text{m}$ , 而复合煤岩试件 A<sub>7</sub> 的蠕变变形达 17 900  $\mu\text{m}$ 。

### 5 煤岩损伤因子的偏应力检测法

大量的矿山和其他工程实践表明<sup>[5-7]</sup>: 煤岩结构破坏主要是拉断破坏和剪切破坏; 常温下, 煤岩的拉断、剪切破坏过程中起主导作用的是偏应力张量  $S_{ij}$ , 而

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_m = \sigma_{ii}$ ,  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 记号。因此, 本文提出损伤因子的偏应力检测法, 对于煤岩材料, 假定在三轴应力条件下对材料损伤影响最大的是最大偏应力  $S_{11}$ , 因而可通过蠕变实验检测煤岩材料损伤因子的变化规律。

采用 Lemaître “应变等效性假说”<sup>[8]</sup>, 损伤只通过有效应力而影响(修正)应变的行为, 或认为将结构应力  $\sigma$  换成有效应力  $\tilde{\sigma}$ , 所获得的无损材料的应变与有损材料的应变等效。在一维线弹性条件下, 有损材料的应变为

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\tilde{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{E(1-\omega)} = \frac{\sigma}{\tilde{E}} \quad (2)$$

式中:  $E$  为无损材料的弹性模量;  $\tilde{E} = E(1-\omega)$ , 为有损材料的弹性模量。则损伤因子  $\omega$  的演化方程为

$$\omega = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \tag{3}$$

在三维应力状态下，定义损伤张量为

$$\omega = I - A_{\omega} : A^{-1} \tag{4}$$

式中： $I$ 为单位张量， $A$ 为无损状态下材料的弹性常数张量， $A_{\omega}$ 为损伤状态下材料的弹性常数张量。与 $\omega$ 相应的有效应力张量为

$$\tilde{\sigma} = (I - \omega)^{-1} : \sigma \tag{5}$$

三轴蠕变实验时，有 $\sigma_{11}, \sigma_{22} = \sigma_{33}, \sigma_{ij} = 0 (i \neq j)$ 。根据实验曲线在不同荷载条件下的 $\varepsilon-t$ 关系，可得到 $S_{11}-\varepsilon_{11}$ 关系，见图7。图中 $\varepsilon_c, S_c$ 分别为材料完全破坏时的临界主应变及临界主应力。类似于式(2)，存在如下的关系：

$$S_{11} = \tilde{E}_0(\varepsilon_{11})\varepsilon_{11} \tag{6}$$

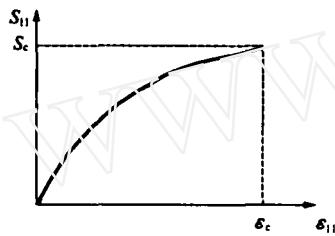


图7 偏应力-应变关系

Fig.7 Relation ship of deviator stress - deviator strain

式中： $\tilde{E}_0(\varepsilon_{11})$ 为有效模量，为 $\varepsilon_{11}$ 的函数。设 $E_0$ 为 $S_{11}-\varepsilon_{11}$ 曲线中线性段模量，即得到类似于式(3)的损伤因子 $D$ 的定义如下：

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}_0(\varepsilon_{11})}{E_0} \tag{7}$$

式(7)即为三轴蠕变损伤演化方程。 $\tilde{E}_0(\varepsilon_{11})$ 形式经实验数据的曲线拟合确定以后，损伤因子 $D$ 的变化规律也随之确定。蠕变分析时，因 $\varepsilon_{11}$ 为时间 $t$ 的函数，故损伤因子 $D$ 也是时间的函数。例如，由复合煤岩试件 $D_2$ 的实验数据可得 $t = 0.5 \text{ min}$ 时：

$$E_0(\varepsilon_{11}) = (1.7682 \ln \varepsilon_{11} + 0.3209) / \varepsilon_{11} \tag{8}$$

将式(8)代入式(7)，即得试件 $D_2$ 在时间 $t = 0.5 \text{ min}$ 时损伤因子 $D$ 随应变 $\varepsilon_{11}$ 变化的关系。因确定 $D$ 值随材料的最大偏应力变化而变化，该方法可称之为偏应力检测法。可以认为， $D$ 与 $\omega$ 在对煤岩的损伤分析中起相同的作用。

一般来讲，煤岩材料受力变形直至破坏的力学过程，需跨越多个阈值。理论上讲，煤岩材料的损伤变量变化范围为 $[0, 1]$ 。但大量工程实践表明，由于煤岩在原始状态下就有缺陷，材料损伤变量在

达到1之前，就失去了承载能力。

确定煤岩材料的损伤阈值，应决定于工程性质及材料可能的破坏形式。

## 6 结 论

通过对可能产生煤与瓦斯延迟突出的煤岩进行微观损伤分析、全应力-应变关系实验及流变特性实验，得到如下几点认识。

(1) 煤岩结构的非均质性及大量原生微空洞、微裂隙存在，是其固有的力学特性，因此，引起煤岩的强度降低和应力局部化，是其破坏的根本原因；卸载以后，煤岩破坏主要是拉裂破坏，少有顺层滑流的延性流变。因此，可以认为煤的脆性断裂及以后的搓揉、粒化等破坏是煤与瓦斯突出时煤的主要破坏机制。

(2) 实验设备刚度及加载变形速率的差异，对煤岩强度实验结果影响很大。煤岩常规强度实验与Instron实验机全应力-应变实验结果表明，对 $\sigma_c$ 影响的平均差异达55.7%。这种差异可能是导致一些依据煤岩的常规实验结果的岩石工程控制失败的主要原因之一。

(3) 应力超过峰值应力以后，不同岩性的残余应力 $\sigma'_c$ 差异很大。A、B样的 $\sigma'_c$ 分别为峰值应力 $\sigma_c$ 的52.3%和45.9%，C样仅为8.8%，即煤产生初始破坏以后，强度迅速降低，基本上没有再抵抗外载的能力。

(4) 除具不同的矿物颗粒以外，煤岩的损伤差异也引起了不同的力学实验结果。煤岩试件扩容应力 $\sigma_0$ 与 $\sigma_c$ 之比，A、B试样分别为79.1%和100%，C试样平均为32.6%，即岩性差的煤，在较小应力状态就产生损伤破坏，原有微裂纹张开和新微裂纹的产生使试件体积增加。

(5) 不论是单轴蠕变实验还是三轴蠕变实验，实验时煤岩都出现衰减蠕变阶段、稳定蠕变阶段及加速蠕变阶段，且加速蠕变破坏过程比较迅速，延续时间短，明显地表现出脆性蠕变形式；复合煤岩强度主要受煤的强度控制，围压增加，强度随之增加，充气与否对复合煤岩强度影响不明显。

(6) 煤岩的蠕变实验结果受众多因素影响。如低应力时，煤岩变形很快趋于稳定，随加载等级增加，变形速率增加很缓，以后是结构的迅速破坏；煤岩的岩性及其微观结构的差异性表现在煤岩的巨大的力学性质的差异，钙质泥岩的蠕变破坏应力为复合煤岩的38倍左右，但破坏时的蠕变应变值仅

为后者的 14.5 %。

本文提出的偏应力检测法有利于通过实验研究分析煤岩受力损伤过程。由此得出的蠕变损伤演化方程,在煤岩蠕变实验基础上,可作为煤岩断裂损伤的判据。

### 参 考 文 献

- 1 国际岩石力学学会. 岩石力学实验建议方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1982
- 2 煤炭工业部. 岩石力学实验规程[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 1980
- 3 谢和平. 岩石、混凝土损伤力学[M]. 北京: 中国矿业大学出版社,

1990

- 4 吴立新, 王金庄, 孟顺利. 煤岩损伤扩展规律的即时压缩 SEM 研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 9~15
- 5 范广勤. 岩土工程流变力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993
- 6 周翠云, 王良之, 龙湘桂等. 岩石闭合裂缝的压剪断裂形态[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 259~261
- 7 肖洪天, 周维垣, 杨若琼. 岩石裂纹流变扩展的微观机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 623~626
- 8 Lemaitre J. A Course on Damage Mechanics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992

## TESTING STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF CREEP AND DAMAGE OF COAL AND OTHER ROCKS

Cao Shugang, Xian Xuefu

(College of Resource and Environment, Chongqing University, Chongqing 400044 China)

**Abstract** The physic-mechanical characteristics of coal and other rocks are discussed based on the results of the mechanical testing, the microscopic structure analysis and the creeping tests. The respondent law of the deformation, damage and rupture of coal and other rocks under the loading is obtained. Finally, the method of checking deviator stress to consider the damage of coal and other rocks is proposed.

**Key words** coal and rock, creep, damage, testing

## 地质灾害可防治

重庆武隆“5.1”滑坡性地质灾害造成的惨重损失,再次让人们领教了自然灾害的破坏力。一些多年从事地质灾害研究的专家认为,尽管不能避免,但现代科学技术完全有能力防治地质灾害。

据国土资源部一份资料介绍,我国地质灾害主要包括崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地面沉降、地裂缝等,具有分布广泛、活动频繁、危害严重的特点。特别是崩塌、滑坡和泥石流,分布范围占国土面积的 44.8%。不久前在三峡库区考察地质灾害的专家们认为,从现代科学技术的发展和我国防治地质灾害的实践来看,地质灾害完全可以预防和治理。

环境地质学博士、重庆市国土房管局副局长柳源告诉记者,防治地质灾害,主要有三种方法:一是预防,主要是指在工程建设时充分考虑地质环境条件,不要把建筑建在“危险地带”,同时也避免不正当的工程活动本身诱发崩塌、滑坡;二是避让,主要是对灾害隐患进行监测,在发生前进行临时或永久性的转移;三是治理,就是用工程技术手段防止灾害的发生。

教授级高级工程师、国土资源部地球环境司司长李烈荣认为,地质灾害的防治,首要的是取决于对地质状况系统深刻的认识、先进的勘察监测能力的建立和治理技术的成熟。据介绍,1988 年以来,我国已在全国范围内开展了地质灾害现状调查,先后完成了长江、黄河等 11 条大江大河和成昆铁路、宝成铁路、川藏公路等交通干线的环境地质普查;完成了 25 个省、市、自治区 1:50 万以地质灾害为重点的环境调查,初步掌握了全国地质灾害的分布规律,取得了系统的资料。

20 世纪 80 年代以来,一些先进技术被用于地质调查研究,如全球卫星定位监测系统 GPS、航空遥感技术等。利用所取得的研究成果,地质部门成功预报了 1986 年的新滩滑坡、1998 年的麻柳嘴滑坡。我国目前已初步建立了全国地质环境监测网,对一些危害较大的滑坡、危岩、地面沉降、地面塌陷、地裂缝等开展了专门的监测预报。

我国目前已经拥有一支高水平的地质灾害治理工程队伍。已成功实施了万县豆芽棚滑坡、巴东黄腊石滑坡、秭归链子崖危岩体等 200 多处危害较大的地质灾害勘察治理,取得了丰富的经验。据专家介绍,地质灾害治理的工程技术近年来也有较大的发展,为治理工作提供了可靠的技术支持。

大多数地质灾害与人类不规范的行为有关。专家认为,今后要进一步健全法制并加强执法,建立投入保障机制,提高对地质灾害的监测能力、治理能力。

(摘自 2001.5.8《科学日报》头版)