

# 冲击矿压的层裂板模型及实验研究\*

张晓春 缪协兴

(中国矿业大学数力系 徐州 221008)

杨挺青

(华中理工大学力学系 武汉 430074)

**摘要** 片帮型冲击矿压是煤壁局部失稳,与煤壁层裂板结构的形成有关。分析了煤壁层裂板结构形成及压曲失稳破坏规律,给出了裂纹扩展、贯通的应力判据以及随后形成的层裂板结构压曲失稳的条件,并据此对冲击矿压进行模拟试验研究,实验结果与理论分析基本一致。

**关键词** 冲击矿压,层裂板结构,屈曲失稳,模拟试验

**分类号** TD 324

## 1 引言

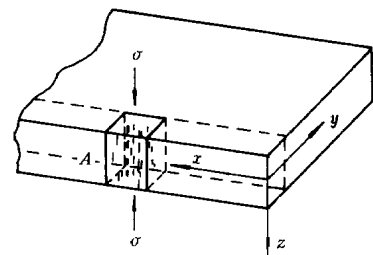
煤矿片帮型冲击矿压表现为巷道、采场煤壁突然剥离崩出,是煤矿巷道或采场煤壁局部失稳<sup>[1, 2]</sup>。对于层理丰富的煤层,较大范围的片帮型冲击是与煤壁层裂结构的形成有关的。煤层或岩层一经开掘巷道或进行回采工作,原岩应力状态遭到破坏,由原来的三向受力状态变为平面受力状态,甚至出现单向受力状态,局部出现高应力集中区,并在巷道煤壁附近煤岩体内产生大量的次生裂纹。次生裂纹扩展和贯通以及自由表面影响是层裂结构形成的主要因素,对巷道围岩的稳定性起重要作用,是形成冲击矿压的根源之一。这方面的研究一直是人们关注的焦点<sup>[3, 4]</sup>。文[5]在研究孔洞岩爆机理时,提出单裂纹失稳扩展的二维模型,给出单裂纹不稳定扩展应力判据,分析了岩爆发生前的壁面膨胀。我们将此进一步推广,结合实际分析了某矿片帮型冲击矿压发生的临界深度<sup>[6]</sup>。本文基于对煤壁附近预存裂纹扩展和贯通以及自由表面的作用的分析,研究片帮型冲击矿压的发生机理,着重讨论层裂板结构形成、压曲失稳机制,给出相应判据,并进行模拟试验研究。

## 2 煤壁层裂板结构的形成及失稳破坏

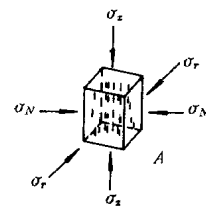
### 2.1 巷道附近煤体受力及破坏

巷道附近煤体受压状况如图1(a)所示,在煤壁

附近存在高应力集中区。由于断层切割和缺陷的影响,煤体中存在大量的次生裂纹,尽管其整体仅承受压力,但由于损伤的存在将在局部造成各向异性,在缺陷局部形成张应力集中,使得缺陷边缘沿最大压应力方向产生张性翼裂纹。大量的研究表明<sup>[7, 8]</sup>张性翼裂纹的扩展受侧压的影响较大:(1)侧向围压较高时,裂纹稳定扩展,在达到一定的裂纹长度时停止扩展,岩石呈压实状态;(2)侧向围压为零或很小时,在轴向压力作用下,裂纹将沿轴压方向扩展、联合,岩石以轴向劈裂形式破坏;(3)侧向围压适中并低于脆-塑性过渡值时,位错或剪切失效成为岩石破



(a) 巷道附近煤体受压状况及坐标



(b) 巷道附近煤岩单元受力及损伤示意图

图1 煤壁受力及损伤示意图

Fig. 1 The load and damage of coal wall

1998年4月7日收到初稿,1998年9月11日收到修改稿。

\* 国家自然科学基金重点资助项目(59734090)。

作者 张晓春 简介:男,1965年10月生,博士,1986年毕业于天津大学力学系应用力学专业,现为矿业大学在站博士后,主要从事岩石力学与深部采矿问题的研究。

坏的主要形式。

在煤矿生产中，回采巷道和采场的围压一般远小于垂直的自重压力，围岩破坏大多呈现上述的第(2)和第(3)类方式，这种破坏方式是和裂纹扩展和贯通密切相关的。

### 2.2 裂纹扩展模型及应力判据

为便于分析，从煤壁附近取一单元体，如图1(b)所示，其铅垂压应力为 $\sigma_z$ ，围压为 $\sigma_x$ 和 $\sigma_y$ ，其中 $\sigma_y$ 为支护力。在回采巷道附近，一般情况下 $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ 。无支护时，取 $\sigma_y = 0$ 。在压应力作用下，单元体内的初始裂纹萌生张性翼裂纹，其扩展受I型应力强度因子 $K_I$ 控制<sup>[7-9]</sup>，扩展特性可用滑移裂纹模型来描述。

这里将次生裂纹处理为等长度 $l$ 等间距 $b$ 周期性共线滑移裂纹群，并取其中最靠近自由表面的一组进行分析，设该组裂纹距自由面 $h$ ，如图2所示。其裂纹尖端应力强度因子可表示为

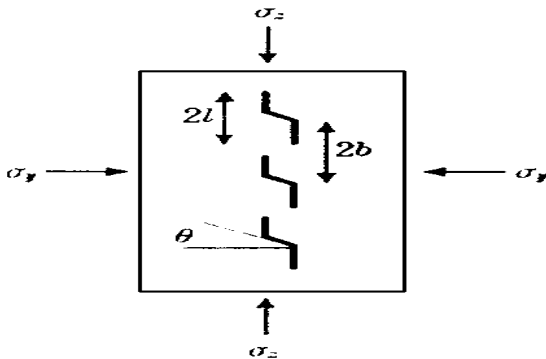


图2 滑移裂纹模型

Fig. 2 Sliding crack model

$$\left. \begin{aligned} K_I &= K_{I1} f(\alpha) g(\beta), & K_{I1} &= F/\sqrt{\pi l} \\ F &= 2\alpha_2 \xi(\theta) l_0, & \xi(\theta) &= C \sin^2 \theta \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $F$ 为翼型张裂纹产生时裂纹滑移面上的一对扩张力； $K_{I1}$ 为无限大平面内裂纹表面中部受一对集中力作用的应力强度因子； $l_0$ 为初始预存裂纹滑移面长度； $\theta$ 为预存裂纹与压应力方向的倾斜角； $C$ 为考虑摩擦和次生翼型张裂纹弯曲的级次单位因子； $f(\alpha)$ 为裂纹位置及尺寸影响系数， $f(\alpha) = 1 + \frac{3l^2}{2h^2}$ ； $g(\beta)$ 为修正因子，对于单个裂纹有 $g(\beta) = 1$ ，对于周期性裂纹可取为<sup>[10]</sup>

$$g(\beta) = \sqrt{\frac{2b}{\pi l} \tan\left(\frac{\pi l}{2b}\right)}$$

若裂纹扩展，则必须满足

$$K_I < K_{Ik} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可得出裂纹扩展的临界压应力为

$$\sigma_z^r = \frac{\pi K_{Ik} / l_0}{2 \xi(\theta) \left(1 + \frac{3l^2}{2h^2}\right) \sqrt{\frac{2b}{\pi l} \tan\left(\frac{\pi l}{2b}\right)}} \quad (3)$$

式(3)表明临界应力 $\sigma_z^r$ 随裂纹长度的增加而减小，并与材料的断裂韧性 $K_{Ik}$ 、初始裂纹长度 $l_0$ 、裂纹距自由面的距离 $h$ 、裂纹间距 $b$ 有关，反映了近表面共线周期裂纹向自由空间压曲的特性。这与文[11]的研究结果相一致。当 $\sigma_z$ 大于临界压应力 $\sigma_z^r$ 时，裂纹发生扩展。而这种扩展是非稳定的，共线周期裂纹将贯通联合，顺壁面形成分离层，同时产生新的自由表面。这一过程可重复发生，使煤壁附近煤体成为层裂结构(如图3所示)，并在压应力作用下向自由空间压曲。另一方面，由滑移裂纹模型看，新生的自由表面并不完全自由，在滑移面上存在一定的正应力和剪应力，它对内部煤壁仍有一定的限制作用<sup>[12]</sup>。因此，煤壁附近层裂结构区的范围一般小于应力集中区范围。从整体来看，沿巷道走向各分离层将联合形成层裂板结构，层裂板结构的压曲失稳可导致冲击矿压。



图3 煤壁层裂试验照片

Fig. 3 The photograph of layer-cracked

### 2.3 层裂结构的稳定性分析

在层裂板结构形成后，煤壁的稳定性可由板的稳定性来分析。根据徐州矿区某矿数次冲击矿压现场资料来看，发生的位置大多在采场前方压力峰值区内，破坏范围沿巷道长度达几十米，甚至上百米。针对大范围冲击情况，取其中单位长度(沿 $x$ 方向)的一段分析，可简化为上下两端夹支承载，厚度为 $h$ ，长为 $L$ (裂纹贯穿后总长)的层裂板结构，这样其力学模型可由图4表示。

若不考虑板间的相互影响，在弹性状态下，其临界应力为

$$\sigma_z^r = \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{\pi^2 h^2}{3L^2} \quad (4)$$

式中： $L$ 最大为煤壁高度。若考虑板间的相互影响，即考虑由于开裂面的粗糙，在两板间产生剪切应力而形成的弯曲矩<sup>[10]</sup>，其临界应力可写为

$$\sigma_z^r = \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{\pi^2 h^2}{3L^2} + \sum_{i=1}^n \frac{G_i}{\lambda_i} h \quad (5)$$

式中： $n$ 为两板间相互接触面的个数， $\lambda_i$ 为第 $i$ 个接触面上有效长度。

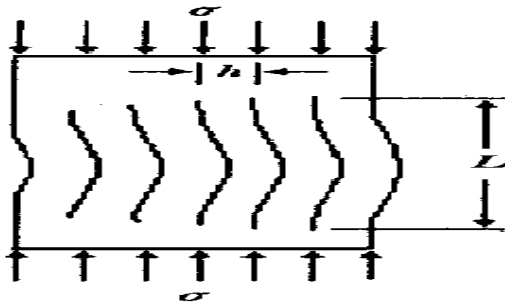


图 4 板屈曲示意图

Fig 4 Layer-cracked plate buckling

### 3 模拟试验

基于前面煤壁层裂板形成及压曲失稳分析, 采用发生过多次冲击矿压的徐州矿区某矿井的大煤块与相似材料混合制成的模型进行模拟试验。其中煤的全应力-应变曲线及声发射特性如图 5 所示, 相似材料为混凝土砂浆, 两种材料的相关参数见表 1, 表中  $E/E^*$  为材料全应力-应变曲线峰前和峰后模量比。试验测试巷道壁面相对移近位移与载荷的关系, 记录壁面剥落冲击情况。

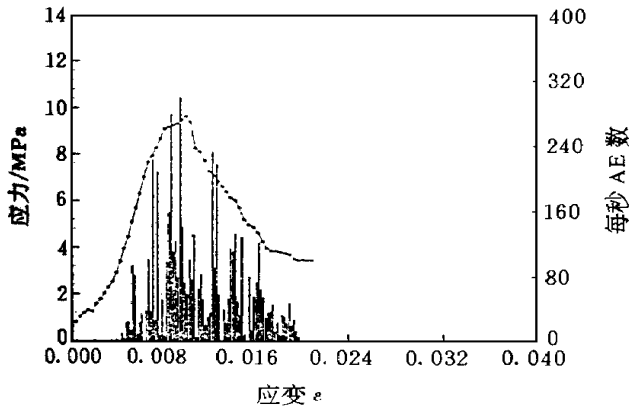


图 5 煤的全应力-应变曲线及声发射特性图

Fig 5 Complete stress-strain curve and A/E counts rate

#### 3.1 实验模型、装置及测试

模型由煤块与混凝土浇筑而成, 尺寸与煤样布置见图 6 所示。自制的模拟试验装置如图 7 所示, 四周为正方形钢套, 底部钢板与钢套固定, 上部是活动钢板。钢套内部空间为  $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ , 钢套的一对平行钢板开有  $\phi=50\text{mm}$  的视窗孔, 用于模拟巷道内壁位移的测试和观察。钢套四周附加由钢筋组成的可紧固件, 并在钢筋中部贴有电阻应变片(图 7 中 1 和 2 所示), 用以测量模型所受侧压状况。巷道内壁位移与载荷关系曲线由  $x-y$  记录仪直接绘出。

表 1 材料力学参数

Table 1 Material parameters

材料	$\sigma_c / \text{MPa}$	$E/E^*$	$E / \text{MPa}$	$K_E$
煤	9.75	1.10	1052	1.43
混凝土	10.52	1.22	815	

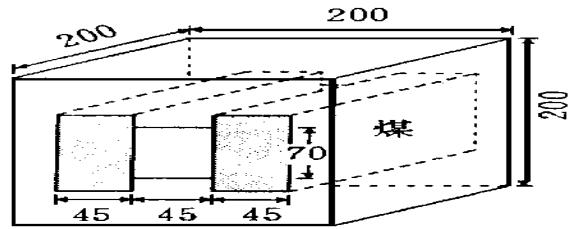


图 6 模型组成及尺寸

Fig 6 Test model

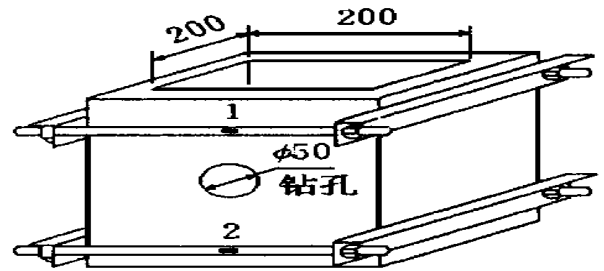


图 7 试验装置示意图

Fig 7 Load-applying unit

#### 3.2 巷道模拟测试及现象描述

模拟试验共作 3 组, 得到的典型煤壁相对移近-载荷曲线如图 8 所示。在载荷达到  $\sigma=5\text{MPa}$  后, 曲线呈波浪状, 位移增加量较小, 试块有声响。在  $\sigma=7.5\text{MPa}$  时, 曲线发生第一次跳跃, 但壁面无突出, 壁面有明显竖向裂纹出现。随着载荷的增加开裂声更频繁, 并有小煤屑崩出。在  $\sigma=13.5\text{MPa}$  时, 试块中发出较大声响, 曲线发生跳跃, 并有瞬间卸载现象, 巷道一侧有少量片状突出物, 另一侧出现较大裂隙, 此次位移跳跃可视为一次冲击。随着载荷的进一步增加, 微小剥离不断发生, 曲线呈小台阶状, 突出物明显增加。在  $\sigma=16.5\text{MPa}$  左右, 试块中再次发出较大声响, 顺壁面剥离出长达  $120\text{mm}$ , 高  $55\text{mm}$ , 平均厚度  $5\text{mm}$  的薄片及大量煤屑, 此时位移计失效, 巷道被片状煤块所充填。

### 4 分析与讨论

对试验后的试块解剖发现, 煤壁剥离层迹明显, 壁面呈中部凹陷状。突出的碎煤几乎都是片块状。从侧面看, 残存煤壁有多条平行的竖向大裂缝, 层

厚为 7~ 20mm, 见图 3 所示。这就充分表明煤壁在压力作用下, 小裂纹扩展贯通, 顺煤壁将形成层裂板结构的事实。模拟试验得到曲线基本呈锯齿形(除跳跃点外)下降, 很不光滑。这不仅反映了煤质材料的不均匀性和小缺陷的扩展贯通影响壁面位移, 也说明了两裂纹贯通时位移场的奇异性, 即出现小的跳跃。其次, 较大裂纹贯通造成的位移突变也可在载荷位移曲线上得到反映, 如图 8 中曲线的第一个位移跳跃点(a 点), 煤壁仍保持完整, 但由视孔观察可见局部壁面凸起, 可视为分离层的形成。

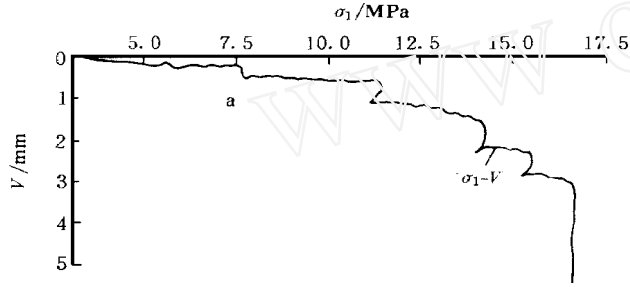


图 8 煤壁相对移近-载荷曲线

Fig 8 The displacement-load curve of coal wall

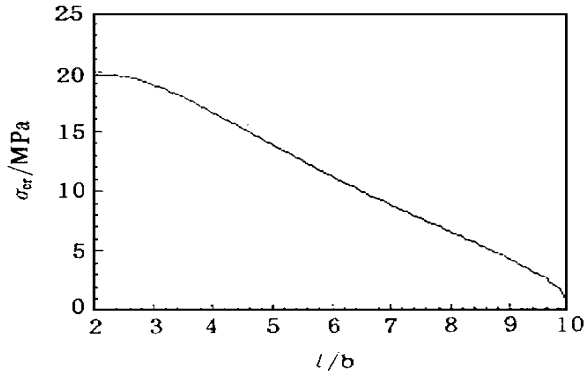


图 9  $\alpha_{cr}$ - $l/b$  关系曲线

Fig 9  $\alpha_{cr}$ - $l/b$  curve

对剥离和崩出的煤块进行仔细的观测发现, 剥离面粗糙不平, 即有顺壁的光面, 也有倾斜的台阶面, 且交替分布。经测量, 台阶面的长度在 1~ 3 mm, 台阶间距在 5~ 14mm, 倾角在 20°~ 70°; 顺壁光面长度为 5~ 14mm, 且颜色较黯淡部分约占三分之一, 据此估测次生裂纹长度在 4~ 6 mm, 碎片厚度在 3~ 7 mm。若取煤的断裂韧性  $K_{Ic} = 1 \text{ MPa}\sqrt{m}$ , 以台阶面长度为初始裂纹长度, 取  $l_0 = 2\text{mm}$ , 倾角  $\theta = 45^\circ$ ; 裂纹间距  $b = 10\text{mm}$ ,  $h = 5\text{mm}$ , 并取  $C = 1.13$ , 由式(3)可估算不同长度裂纹 ( $l/b$ ) 开裂的临界压应力见图 9 所示。由曲线可以看出长裂纹将在低应力下迅速扩展, 短裂纹的扩展则需要较高的应力作用。

根据试验所得到的煤的力学参数, 并按尺寸高 55mm, 平均厚度 5mm, 长 120mm 的剥离煤块(见

3 2 节), 由式(4)可对层裂板稳定的临界载荷进行估算, 即

$$\alpha_{cr} = \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{\pi^2 h^2}{3L^2} = \frac{1.052}{1 - 0.23^2} \frac{\pi^2 \times 5^2}{3 \times 55^2} = 30.2 \text{ (MPa)} \quad (6)$$

考虑煤壁附近的应力集中, 根据试验模型通过有限元计算, 直墙边应力集中系数为 2.5, 对应试验冲击载荷  $\sigma = 16.5 \text{ MPa}$ , 此时煤壁的层裂板结构的临界载荷为  $16.5 \times 2.5 = 41.25 \text{ MPa}$ 。这里应力集中系数是按弹性体计算的结果, 没有考虑层裂结构形成对应力集中的影响, 因此, 估算值与试验值之间存在一定的误差。

## 5 结 语

通过上述的分析, 本文认为:

(1) 煤壁附近高应力集中区内, 裂纹扩展贯通可形成层裂板结构。根据滑移裂纹扩展的特点, 建立的周期性滑移裂纹模型能反映裂纹贯通的方式和过程, 如果已知煤岩力学参数, 可对裂纹贯通的临界应力进行估算。

(2) 煤壁附近裂纹的贯通形成板裂结构后, 其稳定性取决于板裂结构的稳定性。该结构中多层板屈曲失稳可形成冲击矿压, 由此可得到冲击发生的临界应力。

## 参 考 文 献

- 1 章梦涛 冲击矿压失稳理论与数值模拟计算 岩石力学与工程学报, 1987, 6(3): 197~ 204
- 2 Vardoulakis I Rock bursting as a surface instability phenomenon. Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., 1984, 21(3): 137~ 144
- 3 彭 祝, 王元汉 Griffith 理论与岩爆的判据准则 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增): 491~ 495
- 4 刘小明, 李焯芬 脆性岩石损伤力学分析与岩爆损伤能量指数 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 140~ 147
- 5 Dyskin A V, Gemanovich L N. Model of rockburst caused by cracks growing near free surface. In: Young ed. Rockburst and Seismicity in Mines. Rotterdam: A. A. Balkema, 1993, 169~ 174
- 6 张晓春, 缪协兴, 翟明华等 三河尖煤矿冲击矿压发生机制分析 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 508~ 513
- 7 Gemanovich L N, Dyskin A V, Tsyruulnikov N M, et al. A model of the deformation and fracture of brittle materials with cracks under uniaxial compression. Mechanics of Solids, 1993, 28(1): 116~ 128
- 8 Myer L R, Kemeny J M. Extensile cracking in porous rock under different compressive stress. Appl Mech. Rev., 1992, 45(8): 263~ 280
- 9 Baud P, Reuschle T, Charlez P. Technical note: an improved

- wing crack model for the deformation and failure of rock in compression. *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1996, 33: 539~ 542
- 10 尹双增 断裂·损伤理论及应用 北京: 清华大学出版社, 1992
- 11 Papamichos E, Vardoulakis I The coupling effect of surface instabilities and surface parallel Griffith cracks in rock. In: Maury Foumaintraux ed. *Rock at Great Depth*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989, 481~ 487
- 12 Bazant Z P, Lin Feng-bao, Lippmann H. Fracture energy release and size effect in borehole breakout. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1993, 17: 1~ 11

## THE LAYER-CRACK-PLATE MODEL AND TESTING STUDY OF THE ROCKBURST IN MINES

Zhang Xiaochun<sup>1</sup> Miao Xiexing<sup>1</sup> Yang Tingqing<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008 China)

(<sup>2</sup> Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074 China)

**Abstract** The rockburst in mines is local instability during excavation, which is related to layer-crack-plate construction. The formation and buckling of layer-crack-plate construction are analyzed. The stress criterion of crack growth and the construction buckling instability condition are given. The results of experiment based on this idea coincide basically with theory analysis.

**Key words** rockburst, layer-crack-plate construction, buckling instability, simulation experiment

## 第九届国际岩石力学大会简讯

国际岩石力学学会每四年召开一次学术大会, 1999年8月24~28日在法国巴黎召开了第九届国际岩石力学大会。会议期间就岩石力学在安全与环境控制中的应用、热-液-化学现象的耦合力学效应、节理岩体与数值模拟、岩石动力学、核废料处理、地球物理学、原岩应力测量、岩爆预测及现场监测、岩石测试技术及其应用等领域以大会报告或墙报形式进行了学术交流, 其论文收录在Balkema出版社的论文集(分上下两卷)上。有关这次大会的会议报告的内容和报告人请见《岩石力学与工程学报》今年第3期的介绍。

会议期间还举行了Mölar奖和Rocha奖报告, 以及页岩、废气物储存、核实验的岩石力学问题、岩石力学测试的作用等专题研讨会。

我国有中国岩石力学与工程学会理事长王思敬院士等10多名代表参加了这次会议; 清华大学周维垣教授作了关于三峡工程及其数值模拟的大会报告。会议期间还召开了国际岩石力学学会理事会, 对四年的工作进行了总结和领导班子的改组, 新一任的主席是法国的Mare Panet教授, 亚洲的副主席是韩国的李正仁教授。国际岩石力学学会还决定于2001年8月在我国召开一次由国际岩石力学学会发起的学术讨论会; 第十届国际岩石力学大会将于2003年在南非召开。关于本次大会的最新学术成果, 将分4个专题组织专人另文介绍。

(冯夏庭供稿)