

高压下测量岩石纵波速度的反射—透射法

周文戈¹ 谢鸿森¹ 赵志丹² 刘永刚¹ 岳兰秀¹

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 介绍了一种高压下测量岩石纵波速度的新方法——反射—透射法, 并在室温高压(0.1~0.3 GPa)的条件下测量了麻粒岩和榴辉岩等样品的纵波波速, 所获得的结果在误差范围内与前人的工作相吻合, 而该方法能达到的实验压力更高。与透射法相比, 反射—透射法的优点在于它适用于地幔岩石纵波速度的测量。

关键词: 反射—透射法; 纵波速度; 高压

中图分类号: P584

文献标识码: A

文章编号: 1000-7849(2001)03-0001-05

利用地球物理探测结果来反演地球内部的物质组成和结构, 主要依据对高温高压下岩石和矿物的弹性波速度的研究^[1~4]。目前测量岩石和矿物弹性波速度的方法主要有声脉冲透射法和反射法两种^[5,6]。由于天然岩石是由多种矿物组成, 常含有微裂隙^[7], 通常高压下反射波信号难以与噪音相区别, 因此高压下常用脉冲透射法测量天然岩石的弹性波速度。然而, 脉冲透射法测量天然岩石的弹性波速度主要存在两个问题: 假设随实验压力的增大, 碳化钨压砧的走时不变; 实验能够达到的压力偏低(通常小于1.0 GPa)。已有的实验证明, 随实验压力增大, 碳化钨压砧的走时线性减小^[8]。忽略压砧走时的变化, 会造成测量的弹性波速度值略有偏高。实验所能达到的压力不够高, 将大大地限制实验数据的应用范围(地壳范围)。

笔者将介绍反射法和透射法联合测量岩石纵波速度的新方法——反射—透射法^[9]。这一新方法大大提高了时间测量精度和实验压力, 拓宽了实验数据的应用范围。

1 反射—透射法

实验采用中国科学院地球化学研究所深部物质实验室的YJ-3 000 t压力机的多顶砧波速测量装置。样品室中心的温度采用Pt₉₀Rh₁₀-Pt热电偶标定, 温度测量误差小于5℃, 压力采用铜熔融曲线及石英—柯石英相变方法标定^[10], 压力测量误差小于

1%。该压力机上原有的透射法岩石弹性波速度测量装置可以在0.2~5.0 GPa, 室温至1 500℃条件下测量岩石的弹性波速度^[11]。但实验过程中存在较大的温度和压力梯度, 这使得低压段($p < 2.0$ GPa)的弹性波速度测量值明显偏低^[12]。

采用反射—透射法大大减少了实验过程中的温度、压力梯度。其样品组装如图1。样品为直径12 mm, 高6.0~7.0 mm的圆柱体, 两端采用合适的材料作为缓冲棒。缓冲棒材料的选择要考虑: 与WC压砧声阻抗的匹配, 有利于保持温度; 有利于声信号的通过; 与叶蜡石强度相似。这样的样品组装使样品所受的温度和压力相对均匀, 实验所能达到的温度(25~1 500℃)、压力(0.1~3.0 GPa)范围较宽。

超声波发射仪采用汕头超声电子仪器厂生产的CTS-22A型超声探伤仪, 可以在一个通道里完成超声波的发射和接受, 同时并联使用Tek公司生产的TDS784A数字示波器来接收反射和透射的超声波脉冲。实验时先用透射法测定超声波脉冲在上、下两个换能器之间传播的总的走时 t , 再利用反射法, 分别测定上换能器到上缓冲棒与样品上界面的来回走时 t_1 , 以及下换能器到下缓冲棒与样品下界面的来回走时 t_2 , 于是可以得到超声波脉冲在样品中的走时 $t_s = t - t_1 - t_2$ (图1)。不需要检测样品的反射信号, 提高了信号质量。也不需要假定高压下碳化钨压砧的走时不变, 提高了计时精度。所获得的透射和反射信号如图2所示。

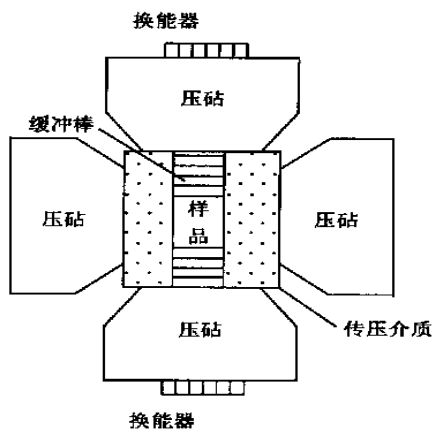


图1 实验样品的组装

Fig 1 Schematic diagram of experimental sample assembly

实际测量时,使用示波器的两个光标测出透射波和反射波脉冲的时间差 Δt_1 ($\Delta t_1 = t_2 - t_1$), 同样地, 交换上、下两个换能器的信号输出接头后可以测出 Δt_2 ($\Delta t_2 = t_2' - t_1'$), 这样就可获得超声波通过样品的时间 t_s [$t_s = (t_2 - t_1) / 2 + (t_2' - t_1') / 2 = (t_2 + t_2') - (t_1 + t_1') / 2$] (图2)。高压下样品的长度 (l) 利用公式^[13]进行校正

$$l = l_0 [1 - \beta p / (3k_0)]$$

式中: l_0 和 k_0 分别为常压下样品长度和体积模量; p 为压力。依据样品中的走时和长度, 可以计算出岩石的纵波速度 v_p ($v_p = l / t_s$)。

这一方法的误差主要来源于时间的测量和长度

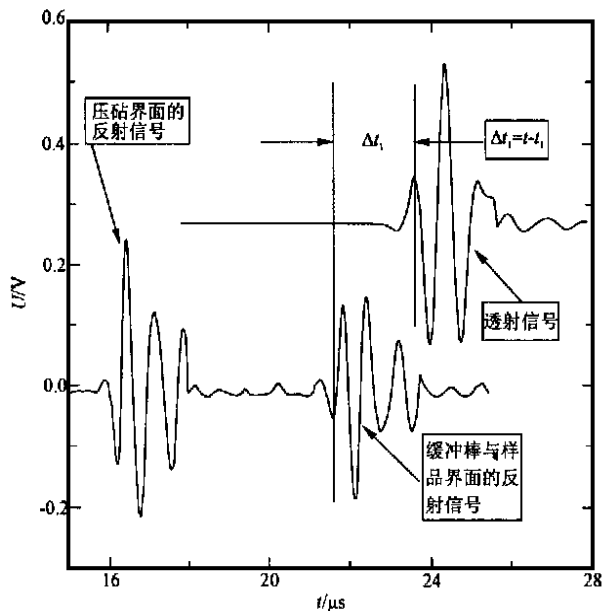


图2 0.5 GPa 榴辉岩 HL 969(X) 的超声波反射和透射信号

Fig 2 The reflection and transmission signals of ultrasonic sound wave in the eclogite sample HL 969(X) at 0.5 GPa

的确定。实验中时间的测量精度为 2 ns, 由于样品的走时一般大于 1 μs, 所以时间测量的相对误差小于 0.2%。实验样品上下面的平行程度以及高压下长度的校正是主要的误差来源。Christensen^[14]认为在 0~ 3.0 GPa 范围内, 如果不进行长度校正, 弹性波速度的测量误差不超过 1%。通过重复测量同一样品, 我们认为反射—透射法测量岩石纵波速度的相对误差小于 1.5% (图3)。

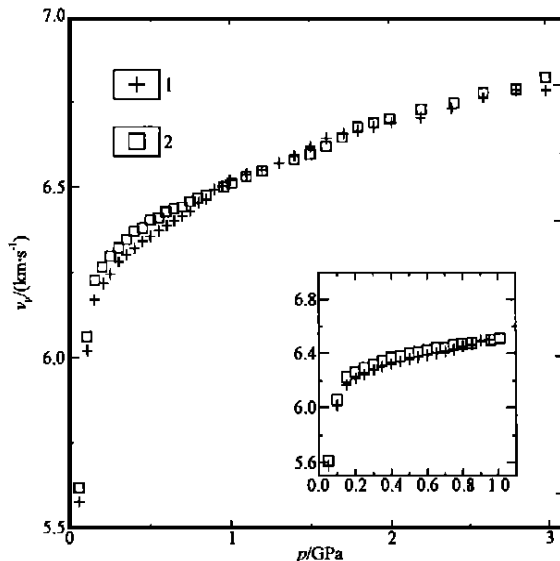


图3 高压下重复测量样品 ZJ01-3 纵波速度的实验结果

Fig 3 P-wave velocities for sample ZJ01-3 at high pressure

measured twice

小插图为 0.1~ 1.0 GPa 时的纵波速度

2 与其它方法的对比

2.1 与静水压实验结果的比较

图4将Christensen在活塞—圆筒实验装置上使用透射法(静水压), 与我们在 YJ-3 000 t 压力机上使用反射—透射法(准静水压), 测量的大别山花凉亭含角闪石榴辉岩 3 个方向的纵波速度^[15]进行了对比。静水压实验的方法参见文献[16]。从图4可以看出, 反射—透射法所得的结果与静水压方法所得的结果在允许的误差范围内一致。这证明使用固体传压介质的反射—透射法完全适用于高压下测量岩石的纵波速度。

2.2 与透射法实验结果的对比

采用反射—透射法和 Kem 等^[17]使用的透射法(准静水压)测量同一样品的实验结果见图5。准静水压实验的透射法参见文献[18]。这两种方法的测量结果吻合得很好, 其差值在测量误差范围内, 但透射法所能达到的压力较低 ($p < 0.75$ GPa)。

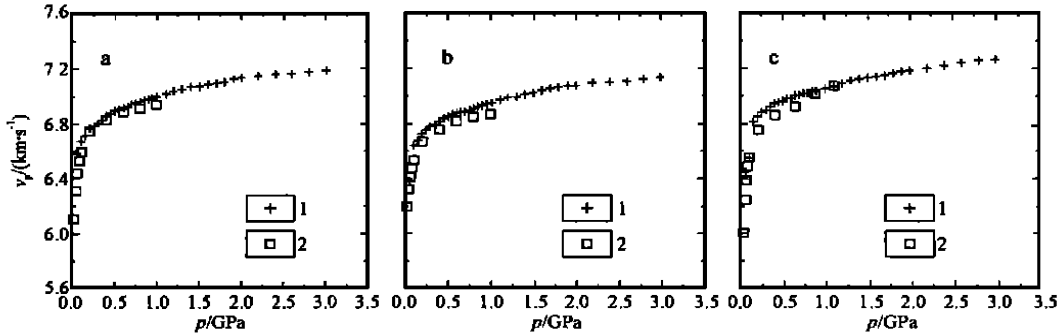


图 4 榴辉岩 HL 969 纵波速度与压力的关系

Fig. 4 P-wave velocities in eclogite (HL 969) as a function of pressure

1 为反射—透射法所测数据; 2 为 Christensen 所测数据^[15]。a 平行面理平行线理方向的样品; b 平行面理垂直线理方向的样品; c 垂直面理方向的样品

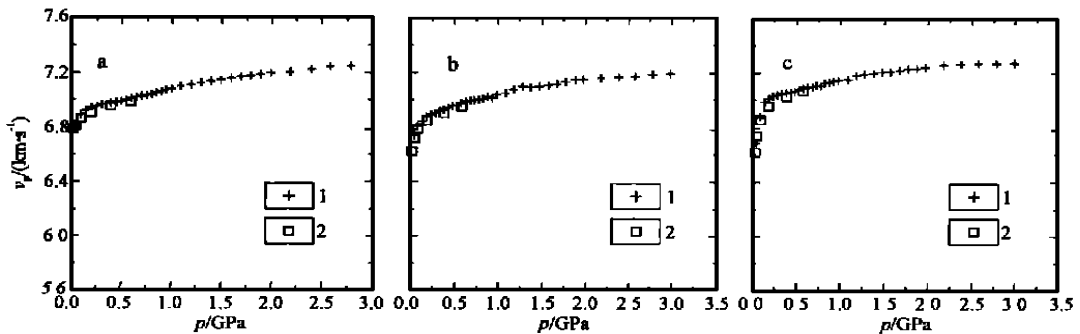


图 5 麻粒岩 JN 3 纵波速度与压力的关系

Fig. 5 P-wave velocities in granulite (JN 3) as a function of pressure

1 为反射—透射法所测数据; 2 为 Kern 所测数据^[17]。a 平行面理平行线理方向的样品; b 平行面理垂直线理方向的样品; c 垂直面理方向的样品

3 讨论与结论

前面的实验结果对比说明, 高压下反射—透射法所得的岩石纵波速度值不仅完全能够与静水压实验所得的测量值对比, 而且也可以与 Kern 的透射法测量值严格对比。这说明反射—透射法完全适用于岩石纵波速度的测量。

从前面的实验对比中, 我们还可以看出, 无论是静水压透射法, 还是 Kern 的透射法, 所能达到的实验压力均比较低(分别为 1.0 和 0.6 GPa), 仅仅相当于中下地壳的压力范围。要想了解下地壳以下岩石的弹性波速度, 必须将实验数据外推至更高的压力范围。

大多数学者认为, 当 $p > 0.2$ GPa 时, 岩石中大部分的微裂隙已经闭合, 随压力增高, 岩石弹性波速度呈线性增大。因此可以利用 $p > 0.2$ GPa 时的弹性波速度与压力的线性关系, 来推测更高压力条件下的弹性波速度^[19, 20]。然而从目前所测的数据看,

这样的外推会带来比较大的偏差。在图 6 中, 同时表示了 Kern 和我们所测量样品 FP19(Z) 的纵波速度。如果用我们的压力小于 1.0 GPa 的数据进行线性拟合, 则可得如下线性关系式

$$v_p = 0.2189p + 6.251,$$

其中: v_p 为纵波速度 ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$), p 为实验压力

(GPa), 所得的纵波速度压力系数 $\frac{\partial v_p}{\partial p_T}$ 为

$0.2189 \text{ GPa} \cdot (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$ 。用这个方程计算 2.0 GPa 和 3.0 GPa 时的纵波速度, 发现计算值比测量值分别大 $0.102 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.248 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 1), 已经超出了 1.5% 的误差限。用 Kern 的 0.2~0.6 GPa 压力范围的数据进行拟合, 所得的纵波速度压力系数为 $0.450 \text{ GPa} \cdot (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$, 以此外推 2.0 GPa 和 3.0 GPa 时的纵波速度, 外推值与测量值偏差更大。而用压力大于 1.0 GPa 的数据进行线性拟合, 可得 $v_p = 0.0917p + 6.394$, 压力系数为 $0.0917 \text{ GPa} \cdot (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$, 小于低压段数据压力系数, 却与已有压力大于 1.0 GPa 的实验结果一致 [压力系数为 0.09

$\sim 0.15 \text{ GPa} (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})^{[5,6,21-24]}$ 。因此将低压条件的实验结果外推至高压下时, 应持谨慎态度。

表 1 外推的纵波速度与测量值的对比

Table 1 Comparison the extrapolation P-wave velocities with those of measurement

p/GPa	2.0		3.0	
	测量值	外推值	测量值	外推值
$v_p (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	6.587	6.689	6.660	6.908
$\Delta v_p (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	0.102		0.248	

注: 外推值用方程 $v_p = 0.2189p + 6.251$ 计算

$\Delta v_p = \text{外推值} - \text{测量值}$

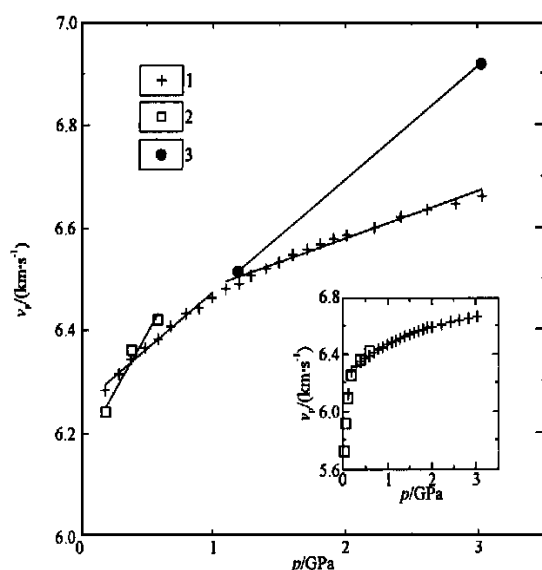


图 6 麻粒岩 FP19(Z) 的纵波速度与压力的关系

Fig. 6 P-wave velocities in granulite [FP19(Z)]

as a function of pressure

小插图为反射—透射法数据与 Kern 的数据对比: 1. 反射—透射法所测数据; 2. Kern 所测数据^[17]; 3. 方程 $v_p = 0.2189p + 6.251$ 计算值, 图中直线为拟合直线

综上所述, 反射—透射法不仅适用于地壳岩石的纵波速度测量, 而且也适用于地幔岩石纵波速度测量。

参考文献:

- [1] Christensen N I, Mooney W D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 9761- 9788
- [2] Mueller H J. Modeling the lower crust by simulation of the in situ condition and example for the Saxonian Erzgebirge [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1995, 92 (1): 3-15.
- [3] Gao S, Lou T, Zhang B, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China [J]. *Gochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(11): 1959- 1975
- [4] Kem H, Gao S, Jin Z, et al. Petrophysical studies on rocks from the Dabie ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt, Central China: implications for the composition and delamination of the lower crust [J]. *Tectonophysics*, 1999, 301: 191- 215
- [5] Fujisawa H. Elastic wave velocities of forsterite and its β spinel form and chemical boundary hypothesis for the 410 km discontinuity [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(B5): 9591- 9608.
- [6] Li B, Gwamemesia G D, Liebermann R C. Sound velocities of Olivine and beta polymorphs of Mg_2SiO_4 at earth's transition zone pressures [J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, 23(17): 2259- 2262
- [7] Greenfield R J, Graham E K. Application of a simple relation for describing wave velocity as a function of pressure in rocks containing microcracks [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101 (B3): 5643- 5652
- [8] 周文戈, 谢鸿森, 刘永刚, 等. 高压下碳化钨压砧走时的测量 [J]. *高压物理学报*, 2000, 14(3): 171- 175
- [9] Liu Yonggang, Xie Hongsen, Guo Jie, et al. A new method for experimental determination of compressional velocities in rocks and minerals at high-pressure [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2000, 17(12): 924- 926
- [10] Xu J, Zhang Y, Hou W, et al. Measurements of ultrasonic wave velocities at high temperature and high pressure for window glass, phrophyllite, and kinnberlite up to 1400 °C and 5.5 GPa [J]. *High Temperature- High Pressure*, 1994, 26: 375- 384.
- [11] 谢鸿森, 张月明, 徐惠刚, 等. 高温高压下测量岩石矿物波速的新方法及其意义 [J]. *中国科学(B辑)*, 1993, 23(8): 861- 864.
- [12] 谢鸿森, 周文戈, 赵志丹, 等. 高温高压条件下岩石弹性波速测量 [J]. *地学前缘*, 1998, 5(4): 329- 337
- [13] Cook R K. Variation of elastic constants and static strains with hydrostatic pressure: a method for calculation from ultrasonic measurements [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1957, 29(4): 445- 449.
- [14] Christensen N I. Compressional wave velocities in possible mantle rocks to pressures of 30 kbar [J]. *J. Geophys. Res.*, 1974, 79(24): 407- 412
- [15] Zhao Zhidan, Christensen N I, Zhou Wenge, et al. Elastic wave velocity in rocks from Dabiehan and its constraints for lithospheric composition and crust-mantle recycling [J]. *Progress in Natural Science*, 2001, 11(2): 115- 122
- [16] Birch F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kbar (part 1) [J]. *J. Geophys. Res.*, 1960, 65: 1083- 1102
- [17] Kem H, Gao S, Liu Q. Seismic properties and densities of middle and lower crustal rocks exposed along the North China geoscience transect [J]. *Earth Plan Sci Lett.*, 1996, 139: 439- 455
- [18] Kem H. P- and S-wave velocities in crustal and mantle rocks under the simultaneous action of high confining pressure and high temperature and the effect of the rock microstructure [A]. In: Schreyer W. *High-Pressure Research in Geoscience* [C]. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagbuchhandlung, 1982: 15- 45
- [19] Rudnick R L, Jackson I. Measured and calculated elastic wave speeds in partially equilibrated mafic granulite xenoliths: impli-

- cations for the properties of an undepleted lower continental crust[J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100(B2): 10 211- 10 218.
- [20] Kern H, Schenk V. A model of velocity structure beneath Calabria, southern Italy, based on laboratory data[J]. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 1988, 87: 325- 337.
- [21] Flesch L M, Li B, Liebermann R C. Sound velocities of polycrystalline $MgSiO_3$ - orthopyroxene to 10 GPa at room temperature[J]. *American Mineralogist*, 1998, 83: 444- 450.
- [22] Gwanmesia G D, Rigden S, Jackson I, et al. Pressure dependence of elastic wave velocity for β - Mg_2SiO_3 and the composition of the Earth's mantle[J]. *Science*, 1990, 300: 794- 797.
- [23] Li B, Jackson I, Gasparik T, et al. Elasticity wave velocity measurement in multi-anvil apparatus to 10 GPa using ultrasonic interferometry[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1996, 98: 79- 91.
- [24] Rigden S M, Gwanmesia G D, Liebermann R C. Elastic wave velocities of a pyrope-majorite garnet to 3 GPa[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1994, 86: 35- 44.

REFLECTION - TRANSMISSION METHOD: OF MEASURING P-WAVE VELOCITIES IN ROCKS AT HIGH PRESSURE

Zhou Wenge¹ Xie Hongsen¹ Zhao Zhidan² Liu Yonggang¹ Yue Lianxiu¹

(1. Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang Guizhou 550002, China;

2 Faculty of Earth Sciences and Earth Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A new method called reflection-transmission combined method is introduced in this paper for measuring the P-wave velocities of rocks at high pressure. At room temperature and pressure up to 3 GPa, granulite from North China Plate and eclogite from Dabieshan were used as samples for testing this new method. The results of this work agree with previous measurements very well in error range, which confirms this method is applicable to P-wave velocities measurement. The experimental pressure of the new technique is higher than that of traditional transmission method, which guarantees its use in measuring P-wave velocities in mantle rocks.

Key words: reflection-transmission method; high pressure; P-wave velocity

《地质科技情报》荣获第四届湖北省优秀期刊奖

为了贯彻新闻出版总署建设“中国期刊方阵”的精神,配合和推动“湖北期刊方阵”的建设,总结成绩,表彰先进,促进全省期刊质量的进一步提高,由中共湖北省委宣传部、湖北省新闻出版局、湖北省科技厅联合举办了“湖北十大名刊”、“湖北双十佳期刊”暨第四届湖北省优秀期刊评选活动。

《地质科技情报》继 1992 年、1995 年、1999 年被评为湖北省优秀期刊以来,今年又荣获第四届湖北省优秀期刊奖。

这次评选主要以新闻出版总署颁布的《社科期刊质量标准及评估办法》和依据湖北省期刊协会自然科学期刊委员会专家制定的《科技期刊质量要求》为依据,经过专家评审组的认真评审,并经评选活动领导小组审定。

《地质科技情报》将在这次评优的基础上认真总结办刊经验,始终坚持正确的舆论导向,努力提高期刊质量,争创全国优秀期刊和名牌期刊。

《地质科技情报》编辑部报道

(2001-09-02)