

表3 非线性声参量 B/A 预言值与测量值的比较 ($T = 24^{\circ}\text{C}$)

比 较 量		样 品		
		猪血	牛血	羊血
$V_j = (B/A)_j - (B/A)_{ij}^*$	σ_1	0.27	0.33	0.35
	V_{max}	0.50	0.49	0.71
$V_j = (B/A)_j - (B/A)_{ij}^{\#}$	σ_2	0.52	0.10	0.26
	V_{max}	0.80	0.16	0.36

10.12, 11.12^[2]。可以看出, $(B/A)^*$ 与测量值差别的大小基本上同 $(B/A)^{\#}$ 与测量值差别的大小基本处在一个数量级上, 两预言值与测量值接近的程度在以 σ 为量度时略大于本文实验误差。它说明 $(B/A)^*$ 和 $(B/A)^{\#}$ 大致上反映了血液 B/A 与组份含量的变化趋势, 但仅就本实验精度而言, Apfel 混合定则和 Sehgal 混合定则对血液非线性声参量在精确量上亦有困难。注意到牛血 B/A 测量值最接近 $(B/A)^{\#}$, 猪血 B/A 测量值最接近 $(B/A)^*$, 这恰与声速测量值和预言值的关系相反, 说明 Apfel 混合定则和 Sehgal 混合定则对实际血液的符合程度与血液类型无关。它从另一个侧面说明了两个混合定则在用来描述血液声特性时还缺乏恰当的、与媒质本身状态相联系的物理模型。

四、结 论

本文在分析猪、羊、牛血液中水、蛋白质、脂肪含量及血液声参量的基础上, 在温度 $T = 24^{\circ}\text{C}$, 声波频率 $f = 5\text{MHz}$ 条件下, 对 Apfel 及 Sehgal 声参量混合定则的声参量预言值与实际测量值作了比较, 得到结论:

1. Apfel 和 Sehgal 混合定则均能定性地反映血液中声参量(声速、非线性声参量)与血液中水、蛋白质、脂肪含量的关系, 但在精确量上与实际尚有一定距离。

2. Apfel 混合定则对血液声参量的预言值同实际的偏差与 Sehgal 混合定则预言值同实际的偏差具有相当的量级, 尚未发现孰优孰劣。

3. Apfel 混合定则和 Sehgal 混合定则运用于血液时仅有类比性质, 它无法反映血液自身的分子构成等特征。

参 考 文 献

- [1] Yoshizumik, k., *J. Acoust. Soc. Am.*, 82(1987), 302—305.
- [2] Apfel R.E., *J. Acoust. Soc. Am.*, 74(1983), 1866—1868.
- [3] Sehgal C. M. et al, *Ultrasound in Med. and Biol.*, 12(1986), 865—874.
- [4] 全杰, 董彦武, 孙永臣, 中国生物医学工程学报, 8-3 (1989), 190—195.

低脆性岩石声发射与断裂力学的理论研究

秦四清 李造鼎 林韵梅

(东北工学院采矿系)

1990年3月27日收到

本文分析了岩石裂纹扩展变形过程中的声发射特性; 建立了声发射总数 N 与应力强度因子 K_I 之间的一般表达式。此外, 文中还用一计算实例介绍了求解式 $N = AK_I^n$ 中系数 A 和 n 的方法。

一、引 言

声发射是指材料受载发生变形或断裂时不

断发射出高频声波的一种现象。对岩石发出的声音进行观测、分析, 可以了解岩石内部裂隙从扩展直至破坏的断裂动态过程, 探讨岩石破坏机理, 开辟研究岩石力学性质的新途径。

本文仅对低脆性岩石进行研究。低脆性岩石是指在断裂前裂纹端部产生一定的塑性变形,如:粉细砂岩、大理岩等。

二、声发射与断裂力学的研究状况

系统地研究岩石声发射的历史并不太长,约在本世纪三十年代才开始进行。较早对声发射现象展开系统研究的是德国科学家 Kaiser 于 1950 年进行的。但大规模的研究和应用还是自六十年代在美国开始的。近二十年来,开展声发射研究工作的国家和地区越来越多,应用的领域越来越广,包括声发射现象的微观机理,材料的选择和评价,产品质量的控制和地壳微震活动的研究等。这里简要提及一些声发射与断裂力学的研究结果。

Ioans 等人认为^[1],外力作用下,在主裂纹尖端附近的范性区内,生成众多的显微开裂,是声发射的主源。声发射总计数 N 只取决于裂纹增长 Δa 时显微裂纹的数目,有:

$$\frac{dN}{da} \propto qK^2 \quad (1)$$

这里 q 为显微裂纹密度, K 为应力强度因子。

Dunegan 和 Harris 指出^[2],在裂纹运动之前,一个有缺陷样品产生的累积声发射应该与塑性区屈服材料的体积成比例。他们用普通断裂力学方法导出了关系:

$$N \propto K^4 \quad (2)$$

说明声发射总计数与有伤试样的应力强度因子的四次方成正比。

Dunegan 等在另一文献^[3]中还指出: $N-K$ 关系中的指数是一变量,例如对于铍试样,指数约为 8,对 7075-T₆ 铝,指数则为 5.4。

Dunegan 和 Tetelman 测定了应力强度因子和每单位面积裂纹增长声发射次数之间的关系^[4],认为存在下述关系式:

$$\frac{dN}{dA} \propto K^4 \quad (3)$$

Palmer 和 Heald 在 1972 年应用裂纹端应用声学

部塑性屈服模型得出了如下关系^[5]:

$$N = DC \left[\sec \left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_1} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

式中 D 是比例系数; C 是裂纹长度之半; σ 是施加应力; σ_1 是表征材料强度特点的某点应力。

从以上的回顾可以得知,过去的工作都是在假定声发射与裂纹尖端塑性区成比例条件下,得到某些金属材料特定的 $N-K$ 关系。还没有从声发射测试原理的角度出发,推导出 $N-K$ 关系的一般定量表达式,还没有完全针对岩石材料的 $N-K$ 关系进行研究。本文将着重论及这些问题。

三、裂纹扩展过程中的声发射特性

文献 [5] 把岩石裂纹扩展变形的全过程划分成四个阶段,即裂纹不扩展阶段,裂纹稳定扩展阶段,裂纹非稳定扩展阶段和裂纹流动扩展阶段。图 1 是测得的石英闪长岩扩展变形的全过程曲线,包括 $P-U$ (荷载-裂纹嘴张开位移) 曲线, $P-\Delta$ (荷载-施力点位移) 曲线, $P-\epsilon_1(\epsilon_2)$ (荷载-裂纹尖端应变) 曲线, $P-N$ (荷载-声发射总数) 曲线和 $\frac{dN}{dt}-U$ (声发射率-裂纹嘴张开位移) 曲线。分析这些曲线的变化规律,大致可定出 a, b, c, d 等特征点。

特征点 a 表示产生声发射的起始点,对应微破裂开始。

特征点 b (声发射率突然增大形成一级波峰,波峰后出现大波谷) 为裂纹稳定扩展开始点。 $a-b$ 段为裂纹的不扩展阶段。

特征点 c (声发射率又增大形成二级波峰) 位于极限荷载值左右。荷载不增加,裂纹变形扩展显著增加。

特征点 d (二级波峰后的小波谷) 位于岩石破坏阶段。 d 点以后为裂纹非稳定扩展和流动扩展阶段。 $b-d$ 段为裂纹的稳定扩展阶段。

a 点对应着产生声发射的应力强度因子阈值 K_{I_0} , b 点对应着临界应力强度因子 K_{I_c} 。故

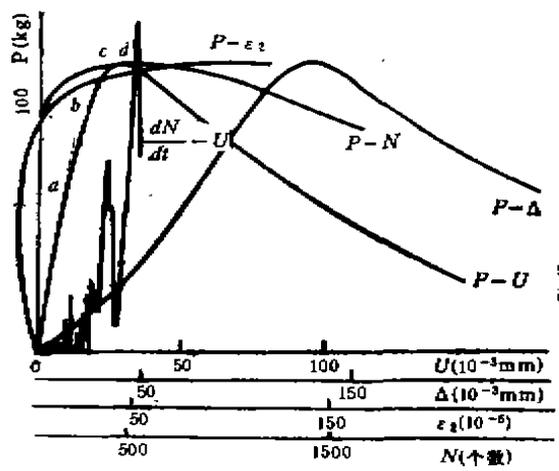


图1 石英闪长岩 P-U, P-Δ, P-ε₂, P-N, $\frac{dN}{dt}$ -U 关系曲线

特征点 a 和 b 的确定具有实际的意义。

四、N-K_I 之间的关系式

1. 声发射测试原理

声发射信息是通过直接粘贴到受载试样或结构上的传感器进行测量接收的。换能器的信号在进入次级放大器和滤波器之前，先经过预放大和滤波，然后把放大和滤波后的信号馈给一个计数器，由该计数器记录出信号触发计数器以后超过某一临界阈值 V_i 的信号次数。

换能器信号由有阻尼的正弦波组成，其频率大致相当于换能器的自振频率。Harris 等人^[4]曾表明，与衰减正弦波相关的“脉冲”数 η 是

$$\eta = \frac{f}{\alpha} \ln \left(\frac{V_0}{V_i} \right) \quad (5)$$

式中 f——线性频率；α——衰减系数；V₀——从换能器输出的初始电压；V_i——阈值电压。

从换能器输出的初始电压 V₀ 与在一个给定的形变过程中释放的能量的平方根成正比，即

$$V_0 = \phi \sqrt{E_s} \quad (6)$$

同理， $V_i = \phi \sqrt{E_{s_0}}$ (7)

式中 φ——比例因子。E_{s0}——初始声发射时

释放的能量。

产生声发射脉冲的松弛过程 (E_s) 是形变量的函数，在用无裂纹材料进行的拉伸试验中，这个变量就是应力或应变，而在用有裂纹试样进行的断裂力学试验中，这个变量是应力强度因子。把这个变量表示为 x，这样

$$\eta = \eta(x) \quad (8)$$

在形变或断裂期间产生的事件数 φ 很少是常数，但也是形变状态的函数，因此

$$\phi = \phi(x) \quad (9)$$

设 N(x) 是材料达到其形变状态 x 之后产生的脉冲的总数，N(x) 既是每个事件的脉冲数目的函数，也是产生的事件数目的函数。即有

$$N(x) = \int \eta(x) d\phi = \int \eta(x) \left(\frac{d\phi}{dx} \right) dx \quad (10)$$

实验表明^[4]，岩石中声波衰减系数 α，在较宽频带内 (0.1—1.0MHz) 是频率的比例函数，即

$$\alpha = A_1 f \quad (11)$$

式中 A₁——常数。

把式(5)–(8)和式(11)代入(10)式，得到声发射总计数的表达式为

$$N(x) = \frac{1}{2A_1} \int \ln \left(\frac{E_s}{E_{s_0}} \right) \cdot \left(\frac{d\phi}{dx} \right) dx \quad (12)$$

2. 计算释放的声发射能量

对于低脆性岩石，声发射与塑性变形密切相关。如果塑性变形仅在裂纹顶端附近发生，则声发射是由裂纹尖端塑性区释放的塑性变形能量产生的。

当裂纹端部塑性区的尺寸相当小时，塑性区的存在不致显著影响其外围弹性区应力和位移。这样，仍可搬用线弹性力学方法来研究这种小范围屈服的断裂问题。

如图 2，已知裂纹端部的应力分量为

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{Bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

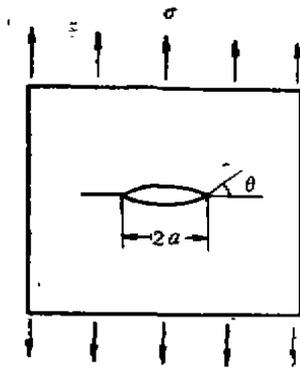


图2 受拉中心切口裂纹

式中 K_1 ——应力强度因子； r ——矢径； θ ——幅角。最大和最小主应力可以由各应力分量计算得到，即

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{bmatrix} 1 + \sin \frac{\theta}{2} \\ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

应用 Von Mises 屈服条件，可以得到平面应力状态下的塑性区半径为^[8]

$$r_p = \frac{K_1^2}{2\pi\sigma_s^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left(1 + 3\sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (15)$$

式中 σ_s ——屈服应力。（按 Treasca 屈服条件

推导则有 $r_p = \frac{K_1^2}{2\pi\sigma_s^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$ ）

对于平面应力状态，等效应力为

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \frac{\sqrt{2}}{2} \\ &\times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \\ &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sqrt{1 + 3\sin^2 \frac{\theta}{2}} \quad (16) \end{aligned}$$

根据塑性形变理论^[9]，应力偏量分量与塑性应变偏量分量成比例，即

$$\frac{\varepsilon_1^p}{s_1} = \frac{\varepsilon_2^p}{s_2} = \frac{\varepsilon_3^p}{s_3} = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_e^p}{\sigma_e} \quad (17)$$

式中 $\varepsilon_1^p, \varepsilon_2^p$ 和 ε_3^p ——塑性应变偏量分量； s_1, s_2 和 s_3 ——应力偏量分量； ε_e^p ——塑性等效应变； σ_e ——等效应力。

设塑性区中应力和应变的关系为

$$\varepsilon_i^p = A_2 \sigma_i^m \quad (18)$$

应用声学

式中 A_2 ——与材料性质有关的常数； m_2 ——硬化指数的倒数。

在初步形成塑性区以后，塑性区内的弹性应力降低为塑性条件下的应力，由于应力松弛，将会有能量释放，产生声发射。塑性形变能 $E = E_i + E_e$ ^[2]，其中 E_i 约为 10% E ，贮存在材料内部； E_e 为释放的声发射能量，占 E 的绝大部分。由于 E_i 较小，可以认为 $E \approx E_e$ 。在应力未松弛前，应力可按(14)式计算仍为弹性应力，而应力应变关系为非线性的，可以应用(18)式，因而释放的声发射能量为

$$\begin{aligned} E_e \approx E &= 4B \int_0^\pi d\theta \int_0^{r_p} r dr \int_0^{K_1} \sigma_1 d\varepsilon_1^p \\ &+ \sigma_2 d\varepsilon_2^p + \sigma_3 d\varepsilon_3^p = A_3 K_1^4 \quad (19) \end{aligned}$$

式中 B ——岩石板厚； A_3 ——常数

$$\left(A_3 = \frac{123B}{64\pi} \frac{A_2 m_2 \sigma_s^{m_2+3}}{(m_2+1)(3-m_2)} \right)$$

值得注意的是，(19)式必须满足 $m_2 < 3$ 。若 $m_2 = 3$ ，有奇异性出现；若 $m_2 > 3$ ，能量为负值。由此，我们得出一个可能的推论： $m_2 = 3$ 是划分小范围屈服材料和大范围屈服材料的一个分界值。此推论是否成立，有待更进一步的分析及实验验证。

同理，初始声发射时，释放的声发射能量亦可表达为

$$E_{e_0} \approx A_3 K_{t_0}^4 \quad (20)$$

式中 K_{t_0} ——相应起始声发射的应力强度因子。

3. $N - K_1$ 之间的函数关系式

塑性区的体积可以由下面的积分计算得到，即 $V_p = 4B \int_0^\pi d\theta \int_0^{r_p} r dr = A_4 K_1^4$ (21)

式中 A_4 ——常数 $\left(A_4 = \frac{123B}{256\pi\sigma_s^4} \right)$ 。同理，起始声发射时，有

$$V_{p_0} = A_4 K_{t_0}^4 \quad (22)$$

我们认为，声发射是由裂纹尖端塑性区中的声发射源产生的。因此，产生的声发射事件数为

$$\phi(K_1) = A_5 \left(\frac{V_p}{V_{p_0}} \right)^m = A_5 \left(\frac{K_1}{K_{t_0}} \right)^{4m} \quad (23)$$

式中 A_5 ——比例系数； m ——与裂纹尺度有关

的常数。

把已知表达式代入(12)式并积分得到

$$N(K_1) = \frac{8A_2m}{A_1} \int_{K_{10}}^{K_1} \ln\left(\frac{K_1}{K_{10}}\right) \cdot \left(\frac{K_1}{K_{10}}\right)^{4m-1} d\left(\frac{K_1}{K_{10}}\right) = A_6 \left[\left(\frac{K_1}{K_{10}}\right)^{4m} \cdot \left(\frac{\ln K_1 - \ln K_{10}}{4m} - \frac{1}{16m^2}\right) + \frac{1}{16m^2} \right] \quad (24)$$

式中 A_6 ——常数 ($A_6 = \frac{8A_2m}{A_1}$)。上式即为 N - K_1 之间关系的一般表达式,与前人给出的公式有所不同。它反映了实测到的声发射总数,不仅决定于有伤试样的应力强度因子 K_1 ,还与初始阈值有关的 K_{10} 和裂纹尺度因子 m 有关。

4. 分析讨论

假设 m 的取值范围为 $\frac{3}{4} \leq m \leq \frac{7}{4}$ (后面将证明此假设正确)。为便于讨论,令

$$f(m, K_1) = \frac{\ln K_1 - \ln K_{10}}{4m} - \frac{1}{16m^2} \quad (25)$$

表 1 $f(m, K_1)$ 与 m, K_1 之间的关系

K_1/K_{10}	1	2	3	4	5	6	7	8
$m = \frac{3}{4}$	-0.1111	0.1199	0.2551	0.3510	0.4254	0.4862	0.5375	0.5820
$m = \frac{3}{2}$	-0.0278	0.0877	0.1553	0.2032	0.2404	0.2708	0.2965	0.3188
$m = \frac{7}{4}$	-0.0204	0.0786	0.1365	0.1776	0.2095	0.2356	0.2576	0.2767

当 $\frac{K_1}{K_{10}} \geq 3$ 时, (24)式后一项 $\left(\frac{1}{16m^2}\right)$ 与前一项相比很小,可以舍去。将(29)式代入(24)式得到

$$N(K_1) \approx A_6 A' \left(\frac{K_1}{K_{10}}\right)^{4m+1} \quad \left(3 \leq \frac{K_1}{K_{10}} \leq 6\right) \quad (30)$$

$$\text{即 } N(K_1) \approx AK_1^n \quad \left(3 \leq \frac{K_1}{K_{10}} \leq 6\right) \quad (31)$$

式中 A ——常数 ($A = A_6 A' K_{10}^{-(4m+1)}$); n ——指数 ($n = 4m + 1$)。对不同的岩石,系数 A 和 n 有不同的数值。即使同一种岩石,也与裂纹

把 $f(m, K_1)$ 与 m, K_1 之间的对应关系列成表,如表 1 所示。从表 1 可以看出 $f(m, K_1)$ 在一定范围内可近似地表为

$$f\left(\frac{3}{4}, K_1\right) \approx 0.0847 \frac{K_1}{K_{10}} \quad \left(3 \leq \frac{K_1}{K_{10}} \leq 6\right) \quad (26)$$

$$f\left(\frac{3}{2}, K_1\right) \approx 0.0489 \frac{K_1}{K_{10}} \quad \left(3 \leq \frac{K_1}{K_{10}} \leq 6\right) \quad (27)$$

$$f\left(\frac{7}{4}, K_1\right) \approx 0.0428 \frac{K_1}{K_{10}} \quad \left(3 \leq \frac{K_1}{K_{10}} \leq 6\right) \quad (28)$$

以上关系可推广到取值 $\frac{3}{4} \leq m \leq \frac{7}{4}$ 范围内任意值的情况。

把以上关系式表示为一般的形式,即

$$f(m, K_1) \approx A' \frac{K_1}{K_{10}} \quad \left(3 \leq \frac{K_1}{K_{10}} \leq 6\right) \quad (29)$$

长度、加载方式有关。

(31)式的成立是有条件的:对于低脆性岩石,一般认为满足 $3 \leq \frac{K_1}{K_{10}} \leq 6$ 时, (31)式可以应用。在此范围以外取值,将引起较大误差,且误差将大于 10%。

Nakamura^[10] 已观测到 n 的实验值在 4 和 8 之间。对应 m 的取值在 $\frac{3}{4}$ 和 $\frac{7}{4}$ 之间,故前面的假设是合适的。

5. 实例分析

对(31)式两边取对数得

$$\ln N = \ln A + n \ln K_1 \quad (32)$$

把试验数据取对数后绘在坐标纸上, 所得直线的斜率即为 n , 截距为 $\ln A$.

刘东通过大理岩中心切口裂纹应力强度因子试验(内部资料), 取得的 $N-K_I$ 对应关系试验数据见表 2.

表 2 大理岩 $N-K_I$ 关系试验数据

序号	0	1	2	3	4	5	6
$N(\text{次})$	0	20	120	150	180	210	332
$K_I(\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3/2})$	0.93	2.01	2.82	2.96	3.07	3.19	3.50

把以上数据取对数后描绘成直线, 为保证精确度, 取 $K_I \geq 2.82 \text{kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ 以后的值(此时满足 $K_I > 3K_{I_0}$), 这样就可确定 A 和 n (见图 3).

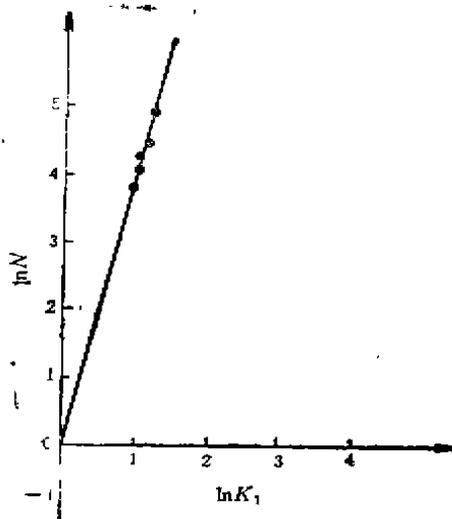


图 3 大理岩 $\ln N - \ln K_I$ 关系

从图 3 可以量得 $n = \text{tg} 78^\circ = 4.7$, $A =$

$e^{-0.08} = 0.92$, 故大理岩声发射总数 N 与应力强度因子 K_I 的关系式为

$$N = 0.92 K_I^{4.7} \quad (33)$$

五、结 论

① 本文分析了岩石裂纹扩展变形过程中的声发射特性, 指出特征点 a 和 b 的确定具有重要的意义.

② 本文导出了声发射总数与应力强度因子之间的一般表达式. 通过对该式的分析表明: 当满足 $3 \leq \frac{K_I}{K_{I_0}} \leq 6$ 时, 应用 $N = AK_I^n$ 将不会引起较大误差.

③ 从公式的推导过程可知: 前人的工作有不合理之处, 其公式的推导过于简化.

参 考 文 献

- [1] Eoans A.G., Linzer M., Ruesell L. R., *Mater. Sci. Eng.*, 15-2(1974), 253
- [2] 朱祖铭, 袁振民, 无损检测, 2-6(1979), 30—40
- [3] Dunegan H.L., Tatro C.A., Harris D. O. *Eng. Frac. Mech.*, 1(1968), 105—122
- [4] Pollock A. A., *Acoustic Emission and Fracture Mechanics*, Academic Press, New York, 1974, 310—320
- [5] 夏熙伦, 黎继珍, 罗忠庆, 岩石力学, 5(1984), 20
- [6] Harris D.O., Tetelman A. S., Darwish F., *Acoustic Emission Testing*, ASTM, Philadelphia, STP 505, 1972
- [7] 李造鼎, 刘志敏, 赵毅军, 煤炭学报, 1(1987), 25.
- [8] 胡传忻, 断裂力学及其工程应用, 北京工业大学出版社, 1989, 59.
- [9] 徐秉业, 弹性与塑性力学——例题和习题, 机械工业出版社, 1981, 530.
- [10] Tiffany C.F., Masters J. N., *Fracture Toughness Testing*, ASTM, Philadelphia, STP 381, 1965, 249.

新疆举办《美国声塔专业音响技术讲座》会

新疆广播电视厅文艺用品商行与深圳文化企业发展公司于 90 年 11 月 10 日至 14 日在乌鲁木齐市南门口体育馆联合举办了《美国声塔专业音响技术讲座》会. 会上展览了美国 AES 会员—声塔公司(SOUNDTECH CO.) 的电声产品以及国产与进口的各类管弦乐器、电子乐器及电声乐队演出效果器等. 声塔公司的美籍华裔张海明博士讲解 PA 了系统、舞厅音响、宾馆

背景音响等, 并用声塔器材进行了演示. 香港郑佳林先生介绍了电子合成器和 MIDI 系统之功能及操作方法, 结合 CASIOVZ-1 及电子打鼓机 KORG-PSS-60 进行演示. 五天共接待参观及听课两千多人. 此次活动良好地推动了丝绸之路的音响活动.

(陈永春)