

铜头双曲拱坝监测资料分析

龙海山¹, 左坤²

(1. 四川华能宝兴河电力股份有限公司, 四川 雅安 625000; 2 中国水利水电第七工程局科研所, 四川 郫县 611730)

摘要: 铜头大坝是建在低弹模、不利地质构造基岩上的高拱坝, 为保障大坝安全, 需进行监测。对大坝的温度、应力、应变及坝肩锚索等监测资料进行分析, 探讨双曲拱坝的应力变形特点及施工和设计上应注意的问题。

关键词: 拱坝; 监测仪器; 坝体应力; 基岩应变; 回归分析

中图分类号: TV 698.1; TV 698+.1

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2000)增-0083-04

1 工程概况

铜头水电站位于雅安地区芦山县铜头场, 青衣江支流宝兴河上, 是一座以发电为主的水利工程, 由混凝土双曲拱坝、泄洪隧洞、水电站厂房及引水系统等建筑物组成, 总库容 2 250 万 m³, 装机 8 万 kW。大坝为完整的混凝土双曲三心薄拱坝, 最大坝高 75 m。坝顶高程 761.50 m, 坝底高程 686.50 m。

坝址区河谷陡峻, 呈“V”型, 两岸基本对称。坝基岩体完整性较差, 且较软弱, 其中在高程 720.00 m 以上为泥质砾岩, 岩石变模 2 600 MPa, 以下为泥钙质砾岩, 变模 3 100 MPa, 显然变模过低。

坝体上游发育有断层 L₁₃, 下游有断层 L₁₁、L₁₂ 和 L₄₇ 等构造, 同时基岩有较多的软弱夹层, 如 A₁₋₅, A₁₋₇, A₁₋₈, A₁₋₉, A₂₋₂, A₂₋₅, A₂₋₈ 等 7 条, 走向大致为 NNE, 向下游及左岸倾斜。以上这些特点, 将引起坝肩处稳定度不足, 基岩变形过大, 也不利于坝体应力状态。因此, 对基础进行了加固处理, 其方法是在断层处用混凝土置换和灌浆, 两岸坝肩锚索加固。

2 监测仪器布置

考虑本坝是建在低弹模量地基上的高拱坝, 为

监测大坝温度、应力、应变及坝肩稳定, 共设计埋设观测仪器 198 支, 在施工过程中, 720.00 m 高程以下仪器因损坏原因, 故现存仪器 121 支。现将仪器型号、数量列于表 1。

表 1 铜头大坝观测仪器统计表

仪器名称	型号	设计数量 /支	现存数量 /支
应变计组	DF-10	99	63
基岩应变计	DF-25	30	17
测缝计	CF-12	22	13
温度计	DW-1	30	18
渗压计	SZ-16	5	2
锚索测力计		12	8
合计		198	121

现有监测仪器主要布置在 720.00 m、730.00 m、740.00 m、750.00 m 等 4 个高程拱圈上, 其中温度计全部埋设在拱冠梁断面, 共 18 支, 5 支埋于上游坝面, 用于监测水库水温; 应变计和基岩应变计布置于 720.00 m、750.00 m 高程拱冠和拱端, 见图 1、图 2; 测缝计安装于 730.00 m、740.00 m 高程横缝和 720.00 m、750.00 m 高程垫座与基岩的接缝处; 另外, 在左右岸坝肩布置有锚索测力计 8 支。

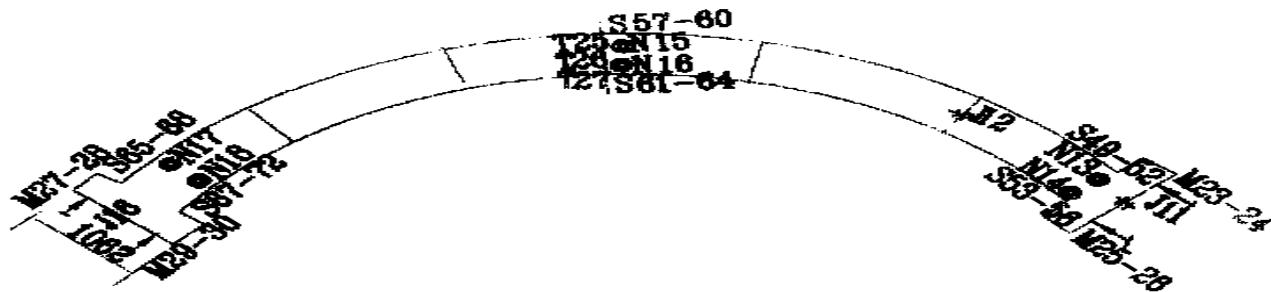


图 1 750.00 m 高程仪器布置平面图

3 观测成果分析

3.1 坝体温度分析

坝体混凝土温度是坝体热状态的表征。温度变

化会使坝体变形并产生温度应力, 因此设置拱冠梁断面为温度监测剖面, 以监测坝体温度变化情况。

3.1.1 库水温特点

水温计埋于拱冠梁不同深度上游面内 10 cm

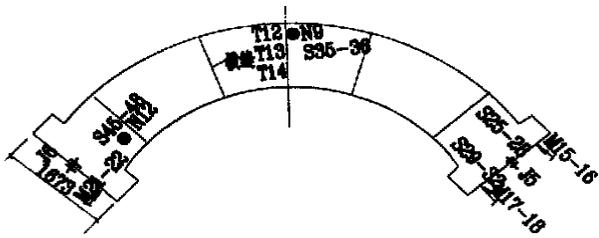


图2 720.00m 高程仪器布置平面图

处。水深 40 m 内,水温与气温同步作年周期变化,其变幅低于气温高于坝体温度,同时波动较气温平滑,水愈深波动愈小。水下 68 m 深处水温已不受气温影响,稳定在 16 。

3.1.2 坝体温度场

坝体温度场见图 3,温度特点如下。

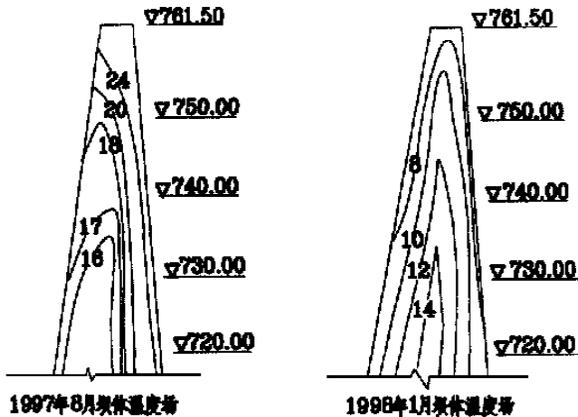


图3 拱冠梁等温线分布图

(1) 坝体温度呈年周期变化,坝面受气温影响变化幅度大于内部,而且温度波动也较大,坝体内部温度也呈周期变化,但变幅较小。

(2) 坝体混凝土温度变化滞后于气温和水温,水下愈深处及内部愈深处滞后时间愈长,每下降 20 m 约滞后 1 个月。气温在 8 月份达到峰值,720.00 m 高程坝体中心温度 10 月份达到最高,其最大值约为 17.4,4 月份降至最低,其最小值约为 12.5。

(3) 拱坝坝体较薄,混凝土散热比较快,从测值过程线分析,大坝完成混凝土浇筑后一年半,坝体温度已趋于稳定,不再有所下降趋势,但仍随气温作周期变化,这比重力坝到达稳定温度的时间要快的多。

(4) 等值线图显示,等温线外表密、内部较稀,说明温度梯度外表大,内部小。

3.2 坝体应力分析

3.2.1 坝体应力成果及回归分析

在 720.00 ~ 750.00 m 高程拱冠和拱端设有 10 组四向应变计,每组配置 1 支无应力计,见图 1、图 2。720.0 m 高程拱冠和拱端实测温度及应力过程线见图 4、图 5,其中 X 为水平方向应力,Y 为垂直方向应力。

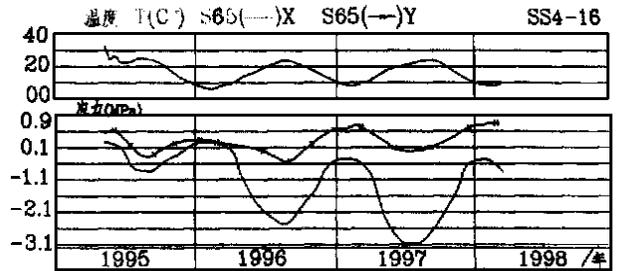


图4 拱冠应变计组 SS4-16 实测温度及应力过程线图

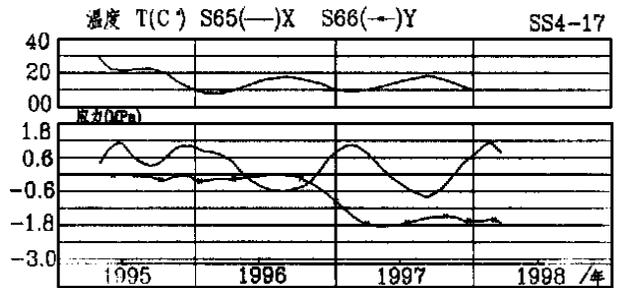


图5 拱端应变计组 SS4-17 实测温度及应力过程线图

拱坝观测量的影响因素可归纳为水深、温度及时效等 3 类,建立应力统计模型如下:

$$\sigma = B_0 + \sigma_H(t) + \sigma_T(t) + \sigma_\theta(t) + \epsilon$$

式中 σ 、 $\sigma_H(t)$ 、 $\sigma_T(t)$ 、 $\sigma_\theta(t)$ 分别为应力、水压、温度和时效分量, B_0 、 ϵ 为常数和残差。

$$\sigma_H(t) = \sum_{j=1}^3 a_j \cdot H^j$$

$$\sigma_T(t) = C_M T_M + C_1 T_{(0-1)} + C_2 T_{(2-5)} + C_3 T_{(5-10)} + C_4 T_{(10-20)} + C_5 T_{(20-30)} + C_6 T_{(30-45)}$$

$$\sigma_\theta(t) = d_1 \theta + d_2 \sqrt{\theta \ln(1 + \theta)}$$

式中 H 、 T 、 θ 分别为水头、温度、观测日开始的历时, a 、 c 、 d 为回归系数。

按上式对应力进行逐步回归分析,结果列于表 2。各应力测点回归计算的复相关系数 R 在 0.90~0.99 之间,表明拟合效果较佳。

表2 坝体应力回归成果表

应力测点	SS4-13	SS4-15	SS4-16	SS4-17
C_M	0.035041			0.015465
C_1	-0.019011	0.014968		
C_2			-0.060464	
C_3	-0.036058		-0.050206	-0.040058
C_4	-0.021193	0.032364		
C_5	-0.030993	-0.025137	-0.019364	-0.042628
C_6	-0.013956			0.016778
a_1	-0.019206			
a_2				
a_3		-0.00023	-0.000028	-0.000006
d_1		-0.007851		
d_2	-0.057508		-0.023880	0.036429
B_0	1.50490	0.51962	1.21210	1.4321
R	0.982087	0.901174	0.992117	0.961115

3.2.2 应力成果分析

(1) 应力过程线显示,坝体应力主要随气温作年

周期变化。高温期坝体应力基本上呈受压状态。8月份气温最高,拱端及拱冠下游侧均处于压应力的峰值,约为 -3.1 MPa 。8月份之后温度下降,坝轴线收缩,坝体向下游位移,拱冠上游面逐渐受压,下游面逐渐向受拉方向发展。拱端由于受两岸坝肩岩体的约束作用,温降使得上游面产生 1.2 MPa 的拉应力。应力的这种变化规律表明,本坝拱的温度作用比较明显。

(2)本坝结构基本对称,坝体温升 120°C 时,拱端左岸上游面增加 1.3 MPa 压应力,下游面增加 1.3 MPa ,右岸上游面增加 1.1 MPa ,下游面增加 1.4 MPa ,左右岸应力变化也呈对称形式。

(3)应力的回归成果表明,应力的温度分量最大,时效和水压分量次之。温度分量随气温年周期变化,拱冠上游面年变幅 0.55 MPa ,下游面年变幅 2.3 MPa 。水压分量在 $-0.1\sim -0.5\text{ MPa}$ 之间较稳定。时效分量均有持续受压之势,SS₄₋₁₃在1996~1997年变化 -0.59 MPa ,说明拱坝虽经过两年多的运行,坝体应力仍处于调整阶段。

(4)1998年初,对本坝进行了三维有限元计算。计算结果是最大压应力在下游面,其值为 -2.1 MPa ,上游面在高程 747 m 一带,出现 0.77 MPa 拉应力,下游面普遍存在第二主拉应力。上述应力产生的部位与实测结果吻合,但计算值小于实测值。实测最大压应力值为 -3.87 MPa ,最大拉应力值 1.2 MPa ,其原因可能是有限元计算时,取温度荷载、边界条件较简化以及基础加固处理后,岩体力学参数取值不够准确之故。

3.3 坝缝开合度分析

大坝共设4条横缝,5个封拱灌区,在 $748.00\sim 761.50\text{ m}$ 高程灌区灌浆温度为 15.0°C ,在 $721.00\sim 733.00\text{ m}$ 高程处,灌浆温度为 15.8°C 。在坝肩垫座与基岩接缝处埋设若干支测缝计,见图1、图2。另在横缝 730.00 m 、 740.00 m 高程布置有测缝计 $J_7\sim J_{10}$ 、 $J_{17}\sim J_{20}$ 。坝体开合度回归成果列于表3,以下对开合度进行分析。

(1)测缝计埋设初期受混凝土水化热温升和混凝土干缩影响,横缝开合度变化较大,在 730.00 m 高程处横缝张开为 $1.3\sim 1.7\text{ mm}$, 740.00 m 高程处横缝张开为 $2.2\sim 2.8\text{ mm}$ 。因坝肩采用掺 MgO 混凝土,垫座与基岩接缝初期收缩 0.3 mm ,坝体封拱灌浆后开合度基本稳定。

(2)从开合度回归分析的结果看,是水压和温度分量所占比重较大,二者处于同一量级,但在运行期间的变化值都不大,时效分量很小。

表3 坝缝开合度回归成果表

开合度测点	J_5	J_{11}	J_{16}	J_{18}	J_{19}	J_{20}
C_M		0.006891	0.001847	-0.002281		0.007960
C_1						-0.004204
C_2		-0.006216		0.000928		
C_3		0.003219				0.005836
C_4		0.003113		0.001285		
C_5						-0.007138
C_6		-0.007958	-0.002215	0.002414	0.003178	
a_1	-0.002644	0.017407	-0.001089		-0.003284	0.020688
a_2	-0.000284	0.001291				-0.001739
a_3	-0.000007	0.000023		0.000001	0.000002	0.000032
d_1	0.039409	0.052253	0.019778		0.005159	
d_2	-0.050793	-0.067673	-0.025973	0.003708		
B_0	-0.139200	0.11135	-0.31729	2.6659	2.7829	2.1813
R	0.820783	0.930876	0.88753	0.899302	0.903154	0.871704

(3)由于坝体封拱灌浆温度偏高,为 $15.0\sim 15.8^\circ\text{C}$,低温期坝体温度低于灌浆温度 $3\sim 7^\circ\text{C}$,加之坝体下游面存在主拉应力,因此,坝体下游出现不同程度开裂现象。由于测缝计布置于拱圈中间部位,正好是上、下游应力反向变化的过渡区,其测值稳定,所以未能反映出横缝的这种变化情况。

3.4 基岩应变分析

基岩应变计埋设于基岩钻孔内,深度 3 m 处,布置见图1、图2。

(1)基岩应变值经统计分析发现,水压分量和温度分量处于同一量级,时效分量较少,且已呈收敛趋势,温度分量在温升时受压,温降时受拉,年变幅约为 60×10^{-6} 。

(2)仪器埋设初期,基岩持续发生拉应变,半年时间产生最大拉应变 300×10^{-6} ,之后逐渐向受压发展,运行期左右岸基岩对称变化其变化量值很少,约在 $20\sim 90\times 10^{-6}$ 之间,说明基础加固处理后,岩体的刚度增加。

3.5 左右岸坝肩锚索预应力分析

铜头大坝左右岸坝肩按 2200 kN 进行锚索加固,左岸96根,右岸117根,于1995年11月完成施工。在左右岸各布置了7支锚索测力计,其中右岸有典型测力计1-7,测值及拟合值过程线见图6。

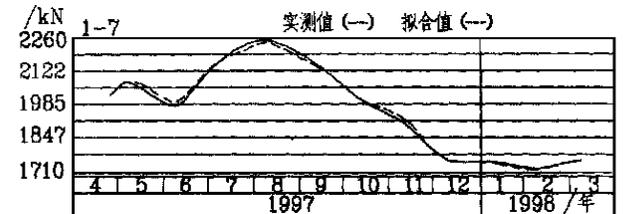


图6 锚索测力计实测值与拟合值过程线图

3.5.1 回归分析

锚索测力计实测资料序列较短,与锚固吨位比

较没有明显的时效作用,而观测显示测力计测值与仪器本身的温度存在显著的线性相关,因此只以温度为因子建立统计模型如下:

$$F(t) = CT(t) + B$$

式中 $F(t)$ 、 $T(t)$ 为锚固力值、仪器温度值, C 、 B 为回归系数。

回归计算成果见表 4, 锚固力拟合值过程线图 6。由表 4 可以看出, 拟合效果良好。

表 4 预应力锚索锚固力回归成果表

锚索测点值	1-1	1-7	3-1	5-4	8-0	2604	2612
C	27.9691	26.5800	27.5987	29.2895	22.2946	2.2476	3.2452
B	1786	1579	1576	1652	1855	1669	1868
R	0.9481	0.9970	0.9984	0.9980	0.9937	0.8452	0.9304
S	160.23	195.08	214.39	222.15	157.17	20.28	26.82

注: R 、 S 为复相关系数及标准差

3.5.2 预应力锚索成果分析

锚固力与温度呈线性关系, 并随温度做周期性变化, 温升时锚固力增大, 最高升至 1 900~ 2 200 kN, 温降时锚固力减少, 冬季降至 1 700~ 1 900 kN, 没有明显的预应力松弛现象, 时效作用不大, 这是否说明坝肩岩体已趋于稳定, 预应力损失停止还有待进一步观测。

4 结论和建议

(1) 观测资料表明, 本坝结构对称, 坝体应力、应

变、位移均呈对称变化。运行期大坝主要受温度影响, 温升时坝体向上游位移, 大坝上游面受拉, 下游面受压, 温降时坝体向下游位移, 坝体上游面受压, 下游面受拉, 低温期 2 月份坝体应力最为不利。

(2) 统计分析成果显示, 大坝虽经 2 年多运行, 应力的时效分量仍在持续发展之中, 说明拱坝的应力调整期较长, 即混凝土徐变、基岩蠕变等仍在继续。

(3) 由于灌浆温度偏高, 坝体下游面存在主拉应力, 致使下游面横缝开裂, 因此施工时选择合理的封拱灌浆温度, 对大坝的正常运行是非常重要的。而测缝计布置于横缝的中间部位, 无法反映横缝上下游侧的变化情况, 显然是不合理的, 其它工程监测设计时应考虑在横缝、上、下游侧分别布置测缝计。

(4) 从基岩应变、坝体位移等资料分析, 量值均很小, 即地基加固处理提高了大坝的安全度及地基刚度, 减少了大坝变形。锚索、混凝土置换等措施是成功的, 这同时也说明在地基软弱、多不利构造的情况下建拱坝, 只要进行合理的基础处理是可行的。

作者简介:

尤海山(1970年-),男,四川中江人,四川华能宝兴河电力股份有限公司水工水文室主任,工程师,现从事大坝原型监测工作;

左坤(1968年-),男,河北人,中国水利水电第七工程局科研所监测室主任,工程师,现从事大坝原型监测工作。

四川工业学院喜迎 40 年华诞

彩旗飘飘, 鼓号声阵阵, 5 月 12 日, 四川工业学院迎来了建校 40 周年这个大喜的日子。新、老校友、佳宾们欢聚一堂, 共同为四川工业学院日新月异的发展表示祝贺。省、市、县及学校、企业等有关领导和外宾出席了庆祝大会。庆祝大会由四川工业学院党委书记秦昌明主持, 他首先向应邀到会的领导和佳宾表示欢迎, 并向与会者介绍了出席庆典的省市领导席义方、徐世群、钮小明、苟建丽、黄忠堂以及外国贵宾和其他领导、佳宾等, 宣读了贺电和贺辞。四川工业学院院长罗中先教授以“迈向新世纪建设新川工”为题发表了热情洋溢的讲话, 介绍了四川工业学院建校 40 周年所经历的风风雨雨, 感谢社会各界给予学校的大力支持, 向与会佳宾介绍了四川工业学院的发展目标。40 年来, 川工已为国家输送了 23000 多名工程技术和管理人员, 现在已发展成为有教授、副教授近 300 人, 全日制在校生达 9000 余人, 含工、理、管、经、文五大门类 23 个专业, 拥有 6 个省级重点学科和实验室, 8 个硕士授权点, 承担有国家自然科学基金项

目、863/CMS 项目和国家“八五”重点攻关项目, 这些学科的发展, 为四川省技术创新体系的建立、产业结构的调整, 对传统产业的高新技术改造和经济可持续发展都发挥着重要作用。

四川省副省长徐世群代表省委、省政府向川工 40 周年校庆表示祝贺, 希望他们在科教兴川中大展宏图, 为我省实现跨越式发展作出贡献。成都市委副书记黄忠堂感谢川工为成都经济发展作出的贡献, 表示市委、市府将大力支持成都企业与学校“联姻”, 为其牵线搭桥, 为学校建立园区基地提供有利条件。

重庆大学副校长、奥地利驻华使馆文化参赞兼一等秘书以及四川工业学院校友代表等先后在庆祝大会上讲话, 祝贺学校 40 周年华诞, 庆祝大会在一片喜庆的气氛中成功举行, 学院各系及研究生方队、彩旗队列队通过主席台接受检阅, 展示了新川工的风貌。

四川工业学院举行“奥地利与中国西部水电大开发学术报告会”

2000 年 5 月 11 日, 四川工业学院在建校 40 周年前夕, 举行了一场“奥地利与中国西部水电大开发学术报告会”, 出席报告会的有来自奥地利政府代表团和四川工业学院的领导和师生们约 300 余人。报告会由四川工业学院科技处处长张礼达处长主持, 他首先介绍了到会的佳宾, 然后由四川工业学院院长罗中先教授讲话, 罗院长代表学院对奥地利政府代表团的到来表示热烈欢迎, 并期望双方今后加强在各个学科之间的合作, 加深双方的友谊。奥地利驻华使馆文化参赞、一等秘书孟德福(christoph Claus Megenburg)在致辞中代表奥地利政府和因事不能到会的 Bottenhauser 大使向四川工业学院 40 华诞表示祝贺, 并向与会者介绍了奥地利国情, 希望增进奥地利政府及学校与四川工业学院的友谊和交流。他还代表奥地利政府向学院赠送了礼物, 以吉祥的松鹤祝学院兴旺发达, 并与奥地利安德里兹公司的代表一起向学院捐款伍万元人民币, 与学院领导合影留念。接着, 由四川工业学院校友、现奥地利安德里兹集团公司驻北京代表处主任白朝平博士向学院校庆表示祝贺, 真情表露了对母校的一片深情, 以现身说法向在座的同学们表示了殷切的希望和美好的祝愿。

报告会由奥地利安德里兹集团公司驻华青富来安德里兹有限公司(ANDRITZ-KENFLO)总经理司马策(Schmoelzer)先生主讲, 以照片形式向与

会者介绍了奥地利灯泡式机组及水电发展情况, 以及其产品在中国的应用(如马回和安居等电站), 希望加强与中国西部水电开发的合作。他在演讲中提及环保, 推崇水力发电, 希望同学们为水电开发出力, 做出成绩。较为详细地介绍了奥地利在世界上居领先地位的抽水蓄能混流式水轮机组, 他不时向在座的同学们提问, 以风趣的语言、博学的知识与中国的同行们进行交流, 使与会者对奥地利的水电发展情况有了进一步的了解。他的演讲不时赢得阵阵掌声。演讲结束后, 他为同学解答问题并签名留念。报告会进行的非常成功。报告结束后, 奥地利驻华使馆文化参赞孟德福先生提供了一部介绍奥地利风情的风光片, 由白朝平主任翻译向与会者介绍了奥地利优美的自然环境, 使大家耳目一新。

最后, 张礼达处长代表学院向佳宾们再次表示感谢并宣布报告会圆满成功。

报告会结束后, 罗中先院长陪同奥地利客人参观了日新月异的川工校园, 并到校庆接待站、摄影展览以及演讲比赛现场进行了走访, 奥地利客人高兴地与同学和老师们合影留念并进行了交谈, 为川工所取得的成就向罗院长表示祝贺, 希望加强双方的合作, 共同为西部水电大开发做出成就。罗院长设宴款待了客人们。

本刊记者 李燕辉