

冶勒水电站坝基深覆盖层帷幕灌浆试验

①
36-40

蒋晓明 苏旭燕 樊天龙

(四川省电力工业局, 成都, 610061)

TV223.43

摘 要 冶勒水电站坝基为第四系堆积物, 深度超过 420 m, 其中第三岩组为弱胶结卵砾石与粉质壤土互层, 设计在该地层帷幕灌浆深 100 m。通过两年多的现场灌浆试验, 探索研究了浆材配比、灌浆工艺、灌浆机理、防渗效果检测等难题。本文拟对此进行简要回顾与总结。

关键词 冶勒电站 深覆盖层 帷幕灌浆 坝基, 水电站, 试验。

1 概 述

1.1 工程地质及防渗设计

南桷河是四川省大渡河中游的一条支流, 主河道长 49.5 km, 落差 1 714 m, 平均比降达 34.6‰, 梯级规划一库六级开发, 总装机 70 余万 kW。冶勒水电站为该梯级具有多年调节能力的龙头水电站, 总库容 2.98 亿 m³, 电站装机 2×120 MW, 最大引用毛水头 650 m, 多年平均发电量 5.88 亿 kW·h。电站枢纽设计为沥青混凝土心墙堆石坝, 最大坝高 125.5 m, 坝顶高程 2 654.5 m, 坝顶长 411 m。

冶勒水电站坝址及水库区地质构造为第四纪构造断陷盆地, 面积超过 30 km², 盆地中心最大堆积厚度大于 420 m, 坝址左岸为晋宁期石英闪长岩, 河床及右岸为第四系冰水河湖相沉积, 在坝轴线上分布达 2 km, 整套地层普遍具有不同程度的泥钙质弱胶结和超固结作用, 结构紧密、具有半成岩特征, 呈密度大、强度高、压缩性低和透水性弱的工程地质特性, 整个地层设计划分为五大岩组, 如图 1 所示, 从

下至上依次为第 I 岩组 Q_3^{2-2} I 至第五岩组 Q_3^{3-3} V。

冶勒水电站基本地震裂度为Ⅷ度, 坝址多年平均年径流量仅 13.2 m³/s, 为减少渗漏损失, 增强坝基抗渗稳定性, 设计以第二岩组 Q_3^1 I 作为防渗依托, 采用深防渗墙封闭第四岩组 Q_3^{2-2} N, 再在防渗墙下接 100 m 深灌浆帷幕, 局部封闭第三岩组 Q_3^{2-1} II, 组成大坝基础防渗系统。

帷幕灌浆的第三岩组 Q_3^{2-1} II 为弱胶结卵砾石与粉质壤土互层, 总厚度 46~154 m。其中卵砾石主要成份为大理岩, 闪长岩及花岗岩组成, 粒径为 2~6 cm, 呈圆或次圆状, 砂角砾充填, 泥钙质弱胶结, 具超固结压密特征, 局部有空蚀。粉质壤土呈青灰色、浅灰色、薄层状, 其间夹数层碳化植物碎屑层和粉质砂壤土、含砾粉质壤土透镜体。第三岩组颗粒组成及物性指标见表 1、表 2。

表 1 第三岩组颗粒组成(含量百分率)

岩 性	漂块石 >200 /mm	卵(碎)石 200~60 /mm	砾石 60~2 /mm	砂 2~ 0.05 /mm	粉砂 0.05~ 0.005 /mm	粘土 <0.005 /mm
卵砾石 %	0.59	12.87	62.29	16.81	6.17	1.27
粉质壤土 %				20	63	17

表 2 第三岩组组分天然状态下物性指标

岩 性	含水量 w /%	密度 ρ /g·cm ⁻³	干密度 ρ _d /g·cm ⁻³	比重 G	孔隙比 e	饱和度 S _r
卵砾石	9.94	2.42	2.20	2.77	0.26	95.0
粉质壤土	14.86	2.05	1.78	2.75	0.54	73.36

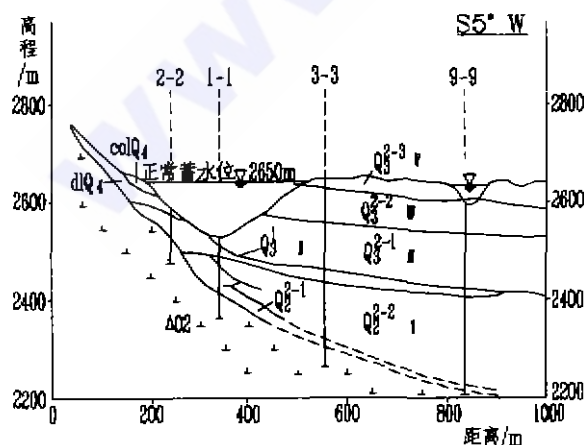


图 1 冶勒电站坝址处地层分布图

1.2 第三岩组帷幕灌浆试验

1991 年 9 月冶勒水电站通过了初步设计审查, 审查意见中指出“鉴于高达 125.5 m 的沥青混凝土心墙及深达 100 m 的混凝土防渗墙和帷幕灌浆, 国内均缺乏经验, 工程立项后应抓紧进行现场工艺试

验,以便落实设计与施工参数”。从1993年初开始,由四川省电力工业局组织,在冶勒水电站坝址进行了第三岩组帷幕灌浆现场试验。设计单位为成都勘测设计研究院,水电七局承担现场灌浆试验,水利水电科学研究院进行浆材室内配比试验。

帷幕灌浆试验场地在坝址右岸台地上进行,钻孔采用小口径金刚石钻头钻进,用“孔口封闭、孔内循环、自上而下”的灌浆工艺,最大灌浆压力4.0 MPa以上,灌浆过程采用“限流分段升压”的办法控制。试验分为下述三个阶段:

第一期第一阶段(1993年4月至7月):进行三排共14个孔的灌浆试验,最大孔深84 m,目的是了解地层的可灌性及探索施工工艺;

第一期第二阶段(1993年8月至10月):在大口径($\phi 93$ mm)钻穿第四岩组并镶铸无缝钢管(约38 m长),以封闭第四岩组,再往下在第三岩组内分四个孔进行了四种浆材(性能见表4)的灌浆试验,钻灌孔深68~88 m;

第二期试验(1994年4月至10月):结合第一期试验成果,正式对第三岩组进行了最深达104.8 m的帷幕灌浆试验,其试验孔平面布置图见图2。

1994年11月至1995年7月,对帷幕灌浆后地层的各项物理力学指标进行了现场检测及评价,包括现场注水、压水试验、开挖长2.0 m宽1.5 m深18 m的检查竖井,现场地震波、旁压仪测试、渗透变形等试验,以检查灌浆后地层的防渗能力和承载力、均一性等。

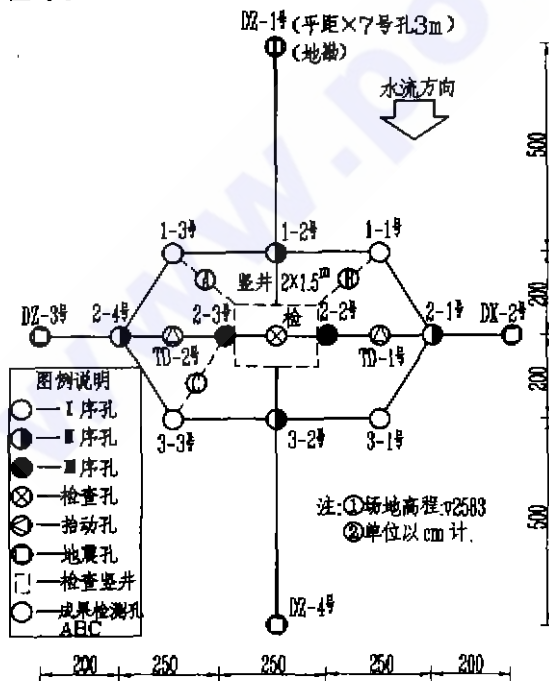


图2 二期试验孔平面布置图

2 地层的可灌性

2.1 渗透性评价

通常认为,在覆盖层上进行帷幕灌浆后其渗透系数 K 值约为 5×10^{-5} cm/s 至 5×10^{-4} cm/s 之间,对于抗渗性能较高的地层经灌浆后 K 值可达 1×10^{-4} cm/s 至 3×10^{-4} cm/s 之间,但如果覆盖层本身 K 值近于 10^{-4} cm/s,一般的帷幕灌浆处理则很难再提高其抗渗性。

按照浆液渗入土层的型式,帷幕灌浆有渗透、劈裂、劈裂浸透渗入三种方式。对于渗透灌浆而言,如果地层颗粒较粗、天然渗透系数较大,可进行水泥渗透灌浆;而对于土体 $d_{10} < 0.5$ mm, $K < 10^{-1}$ cm/s, $S < 100$ cm⁻¹,则只能用硅胶、丙凝等化学浆液才能渗入其中,当然,如果采用超细水泥,也可达到渗透灌浆的目的。如日本在只见堆石坝基21 m深冲积覆盖层(平均渗透系数 $K = 7 \times 10^{-3}$ cm/s)中,采用湿磨水泥灌浆,水泥颗粒 $d_{50} = 3$ μ m,比表面积达12 700 cm²/g,灌浆后地层渗透系数达到 5×10^{-5} cm/s。

对于冶勒水电站坝基第三岩组,在灌浆前对地层进行了注水和压水试验,测得灌前地层渗透系数 K 值介于 1.1×10^{-5} ~ 2.1×10^{-3} cm/s 之间,其中 K 值介于 10^{-5} ~ 10^{-4} cm/s 的地层占90%以上;相应压水试验,灌前地层单位吸水量 ω 值90%以上地层介于0.014~0.758 L/min·m·m之间。

从以上渗透性指标可看出,冶勒水电站坝基第三岩组天然渗透性较差,如用常规水泥颗粒进行渗透灌浆比较困难。

2.2 可灌比评价

表3 第三岩组可灌性指标

岩性	砂粒含量 <0.1 mm /%	粒径 D_{15} /mm	可灌比 D_{15}/d_{85}	不均匀 系数	渗透系 数 /m·d ⁻¹	密实性
卵石	11	0.35	4.38	300	3~8	较密实
粉质		0.004 5	0.05	11.5	0.001~	密实
壤土					0.006	性强

注: ①灌浆材料假定为水泥粘土浆; ②水泥粘土浆的 d_{85} 约为0.08 mm

在表3中描述了冶勒水电站第三岩组的可灌性指标。根据国内外工程实践经验,一般可灌比 $M = \frac{D_{15}}{d_{85}}$ 在大于10时,可用水泥粘土浆灌注;当 $M \geq 15$ 时,才能灌注水泥浆。从表3可看出,冶勒水电站坝基第三岩组的可灌比远小于水泥粘土浆要求的可灌比,且粉质壤土中小于0.05 mm颗粒含量占80%

以上,因此,国内外不少地基处理专家在对冶勒坝基防渗咨询时,认为需采用化学灌浆才行。但冶勒坝基右岸覆盖层帷幕灌浆工程量达 10.22 万 m³,如用化学灌浆则造价高,对环境有污染,且化灌材料在耐久性、强度指标方面不如水泥浆材,考虑第三岩组地层的不均一性,本次试验中仍立足于采用水泥浆材。

通过试验发现该地层用水泥浆材进行高压劈裂灌浆是可行的,从而跳出一一般砂卵石覆盖层中颗粒渗透灌浆对上述可灌性指标的框框。灌浆后在现场开挖检查竖井中可以看到,对于炭化夹层、壤土层及砾质壤土与粉质壤土接触带来说,由于高压水泥浆液的劈裂作用,形成了条带状水泥结石,且胶结紧密、细颗粒含量高的土层内部并无多少水泥浆液渗入。这种劈裂灌浆机理将在第 4 节中详述。

表 4 四种浆材性能表

编号	浆材比表面积 /m ² ·g ⁻¹	水胶比	材 料				性 质					R /MPa	R _f /MPa	溶蚀 /mg
			水泥	粉煤灰	外加剂	减水剂	粘度	泌水	初凝	终凝	可灌性			
1	3 000(水泥粘土)	0.6	1	粘土 1				0.6	10:45	22:30	1.5	5.85	1.39	557.3
2	磨细水泥 磨细粉煤灰	0.6	1	1	膨胀剂 0.16	0.006	43	0.0	10:35	14:05	4.5	19.28	2.60	78.8
3	7 000~8 000	1	1	1	膨胀剂 0.16	0.006	25	16.3	12:00	29:00	7.0	8.76	1.21	66.4
4	铁铝酸盐水泥 ≥4 000	0.6	1	0.3	硅粉 0.05	0.006	149	0.0	3:00	4:30	0.0	15.13	2.68	68.7
5		1.0	1	0.3	同上	0.006	34.5	11.1	4:00	5:50	15.0	7.16	1.51	54.9
6		2.0	1	0.3	同上	0.006	29.5	39.0	4:30	9:00	15 中砂	4.44	0.94	52.1
7	原状水泥、 粉煤灰	0.6	1	0.3	膨润土 0.026	0.004	56.8	26.5	17:25	28:36	0.5	33.7	6.06	464.2
8	3 000	1	1	0.3	同上	0.004	25.0	44.5	20:25	29:30	0.4 中砂	15.0	3.52	534.9

注:①表中 R、R_f 分别为 28d 抗压、抗折强度;②(Cao)溶出量为养护 28d、观测 90d 的测值;③粘度采用马氏漏斗测试。

②水泥粉煤灰浆液(水泥:粉煤灰 1:0.3)具有流变性、稳定性、耐久性均较好且成本低,后期结石强度高优点,比较适应于冶勒第三岩组灌浆。

③磨细浆材浆液扩散范围大,单价高,单位注入量远大于原状浆材,可在中间排孔选择使用。

④水泥粘土浆因结石强度低,耐久性差,不适宜于冶勒灌浆用。

⑤浆液中掺高效减水剂、分散剂等外加剂,可改善浆液的稳定性、流变性,有利于灌浆。

3.2 浆材性能浅析

目前国内在砂卵石覆盖层中灌浆使用的浆材主要有水泥,粘土及化学材料等。一般说来,水泥粘土浆液稳定性及可灌性好,但耐久性差,在渗透水作用下帷幕易失效;纯水泥浆结石强度高,应用最多,不足之处是颗粒较粗,稳定性较差,浓浆灌注时容易发生“铸钻杆”现象,很难灌入 0.3 mm 以下的孔隙;

3 浆材配比

3.1 室内浆材配比与现场灌浆结果

基于第 2 节可灌性评价,在冶勒水电站第三岩组帷幕灌浆试验中,为增加浆材的可灌性,最初主要考虑用磨细水泥并结合高压灌浆(灌浆压力大于 4 MPa)。室内浆材配比试验共进行了 25 组,综合考虑各种浆材的可灌性、稳定性、结石强度、耐久性等指标,优选出了 4 种浆材,其性能指标见表 4

针对上述四种浆材,在现场进行了灌浆试验(第一期第二阶段),得出如下结论:

①冶勒第三岩组采用原状浆材(未磨细)能灌,不存在不吸浆的问题。

化灌材料可灌性好,可灌入 0.15 mm 以下的细缝隙,但成本高,污染环境,耐久性稍差。

冶勒水电站第三岩组地层帷幕灌浆试验单位注入量平均达 700 kg/m 以上,其中磨细浆材注入量约为原状浆材的 2.7 倍,尤其是在粉质壤土及软弱夹层中注入量更大,这说明磨细浆材可灌性好,在高压下浆液扩散范围大,耗灰量大,造价高,且初凝时间短、粘度大、灌浆时容易“铸钻杆”,施工不便。

浆材中掺用一定量粉煤灰,国内曾在红枫堆石坝体内灌浆中首次采用,共耗用粉煤灰 7 420 t。灌浆施工表明:掺用粉煤灰,可改善浆液性能,提高结石后期强度及抗溶蚀能力。在本次冶勒水电站灌浆试验中也验证了这一点。但当浆材干料中掺粉煤灰:水泥为 1:1,水灰比为 0.6 时,浆液初凝时间 25.5 h,终凝时间 32.0 h,早期强度低,稳定性差,对吃浆大的地层,需延长待凝时间,不适合于冶勒灌浆。当

水泥：粉煤灰为 1：0.3 时，如 3.1 中所述，适合灌浆。同时室内浆材配比试验表明，随粉煤灰掺量增加，结石溶蚀减少，浆液初凝终凝时间延长，结石强度也随之降低。因此，在浆材中掺粉煤灰的比例要恰当，一般认为，粉煤灰掺量最多以取代水泥重量的 1/3 为宜。

其次，在浆液中掺 0.2% 左右的膨润土及减水剂（如 H₁ 型高效减水剂）等，制成稳定性浆液，粘度系数不大，可增加可灌性。

综上所述，经本次试验论证，在冶勒地层灌浆，推荐使用原状水泥：粉煤灰为 1：0.3 并加膨润土及其他外加剂，水灰比在 1.0~0.6 之间，制成稳定性浆液，灌浆压力最大为 4~4.5 MPa（全压力）。至于磨细浆材可在多排帷幕的中间排选择使用。

4 灌浆机理初探

由于冶勒水电站坝基第三岩组为强固结、弱胶结的砂卵石与粉质壤土互层，其间夹炭化夹层及粉细沙透镜体，地层均一性较差，通过灌浆试验揭示，在比类地层中的水泥灌浆为非渗透灌浆而是一种劈裂灌浆，其力学机理为“劈裂的浆刃效应，充填的扩张效应、挤密的回弹效应”。

4.1 劈裂的浆刃效应

稳定性的浆液具有粘塑性，呈宾汉体，在高压作用下，首先对第三岩组的原生裂隙面、软弱夹层产生“劈裂启缝”和“楔入”作用，即在灌浆孔周边软弱夹层及节理裂隙处形成启缝的应力集中，使裂缝尖端塑化失稳而张开，为浆液渗入打开入口，在入口尺寸大于水泥粒径时，浆液即渗入其中；如入口尺寸小于水泥粒径，则在灌浆压力下产生“压滤现象”，即浆液脱水，水份首先进入入口中，由于水近似于牛顿体，其压力传递远大于既有粘滞力又有内聚力的宾汉体，脱水传递的巨大压力进一步使入口细微裂隙张开，产生劈裂启缝作用，随后大颗粒的稳定性水泥浆液也随之进入。如图 3 所示。这个过程可称为劈裂的浆刃效应，这可从灌浆后开挖的检查竖井壁上得以验证，水泥结石大多呈条带状，嵌入岩层中的软弱夹层及节理裂隙中。检查竖井四壁展示图见图 4。

4.2 充填的扩张效应

在浆液劈裂启缝以后，浆液充填的过程中进一步使裂隙张开延伸，直至灌浆压力提供的动能耗散殆尽。由于稳定浆液呈宾汉体，在填充扩张裂隙的过程中，即使采用较高压力也不致使地层抬动。如是水来传递此压力，则可能会使地表抬动。当然，灌浆压

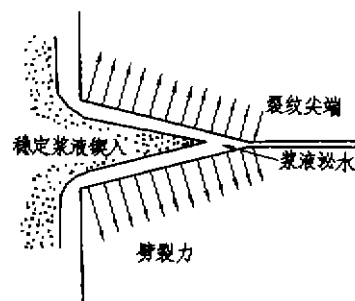


图 3 浆液劈裂启缝渗入作用



图 4 检查竖井四壁展示图

力过大，浆液扩散远，耗灰量过多，也不必要。在冶勒地层灌浆，一般采用 4 MPa，个别高达 9 MPa 也未使地表抬动。

4.3 挤密的回弹效应

在浆液渗入裂隙或软弱层面的扩散过程中，推动浆液的压力除了克服浆液内部摩阻力及与缝壁的摩阻力外，也将使具有弹塑性的缝壁产生压缩，形成压缩变形。在灌浆完成灌浆压力消失时，被压缩的缝壁将回弹，回弹压力反作用在浆体上，或回弹压缩先前被灌注的软弱层。压密的软弱层产生反压缩，浆体在双向挤压过程中脱水固结，使结石强度更高，与缝壁粘连更好，胶结更牢。可见受压的缝壁岩体回弹变形产生的回弹压力，既压密了被灌的软弱带，也压密了待凝的浆体。尽管地层是弹塑性的，回弹后存在剩余变形，但回弹的挤密作用无疑是存在的，这一作用可称为灌浆挤密的回弹效应。如图 5 所示。

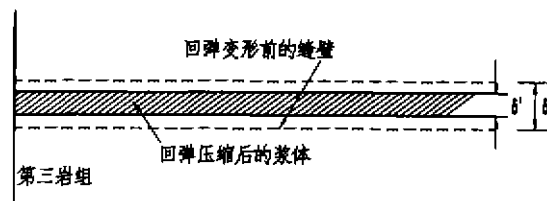


图 5 灌浆结束后缝壁的回弹压缩

5 灌浆试验成果分析

(1)通过帷幕灌浆后进行的现场压水、注水试验,测得灌后地层渗透系数 K 值介于 2.6×10^{-6} cm/s 至 2.6×10^{-4} cm/s 之间,其中粉质壤土夹炭化层在灌后 K 值介于 $1.26 \times 10^{-5} \sim 4.43 \times 10^{-5}$ cm/s 之间,卵砾石层的 K 值介于 $2.6 \times 10^{-6} \sim 2.6 \times 10^{-4}$ cm/s 之间;单位吸水量灌后介于 $0.013 \sim 0.045$ L/min $\cdot$ m $\cdot$ m 之间。可见,通过劈裂灌浆,炭化夹层等软弱夹层抗渗能力比卵砾石层提高得多,这是由于卵砾石层具有弱胶结,浆液不易灌入。

(2)通过现场地震波测试,第三岩组地震波速由灌前的 $1500 \sim 3500$ m/s 提高至灌后的 $2107 \sim 3702$ m/s,消除了 2000 m/s 以下的低波速区,改善了地层的均一性。同时,现场旁压仪试验表明,粉质壤土承载力由灌前的 $1 \sim 1.1$ MPa 提高到灌后的 $1.38 \sim 1.66$ MPa。另外,粉质壤土夹炭化层的干密度由灌浆前的 1.65 g/cm³ 提高到灌后的 1.7 g/cm³。可见通过灌浆,地层的均一性和承载力均得到了较大的提高。

6 结 语

冶勒水电站坝基第三岩组现场帷幕灌浆试验历

Curtain Crouting Test on Thick Overburden in Dam Foundation at the Yele Hydropower Station

Jiang Xiaoming Su Xuyang Fan Tianlong

(Sichuan Electric Power Industry Bureau, Chengdu, 610061)

Abstract Dam foundation at the Yele hydropower station consists of accumulation in Quaternary system with depth over 420 m, in which the third rock group is interbed of weakly cobble and gravel and silty soil. Curtain grouting up to 100 m are carried out in the formation. By in site grouting test over two years, grout mix, grouting techniques and mechanism, watertight effect test are studied. The review and summery are presented.

Key Words the Yele hydropower station, thick overburden, curtain grouting

时两年多,探索总结了该地层灌浆的各项技术经济参数,其成果已于 1996 年 6 月通过了由电力部组织的专家会议鉴定。鉴定意见认为试验取得了成功,解决了该电站深覆盖层防渗帷幕设计和施工的重大技术难题,可供国内类似工程参考、借鉴。从整体看,该项试验具有国际先进水平。

参 考 文 献

- 1 四川省电力工业局等. 冶勒水电站坝基深厚覆盖层帷幕灌浆试验研究. 1996 年 2 月
- 2 Pierre LONDE, Recent developments in the design and construction of dams and reservoirs on deep alluvium, Rarstis and other unfavourable formations. 1970 年国际大坝会议文献 G $\cdot$ R $\cdot$ - Q37, P143
- 3 现代灌浆技术译文集. 水利电力出版社, 1991 年 8 月第一版
- 4 孙判. 大坝岩石基础灌浆施工. 水利电力出版社, 1987 年 12 月第一版

作者简介

蒋晓明 男 四川省电力工业局 科长 工程师 硕士
苏旭燕 男 四川省电力工业局 工程师 硕士
樊天龙 男 四川省电力工业局 副总工程师 四川省水力发电工程学会 副理事长兼秘书长 教授级高工

(收稿日期: 1997-05-22)

本刊 1998 年第 3 期要目预告

(中国水利水电第十工程局专辑)

中国水利水电第十工程发展的回顾及改革的思考	马世锦	反井钻机在水电工程施工中的应用	苏晓明
引大入秦工程中的隧洞掘进机	薛继洪	红叶水电站厂房基础沉井方案选择及施工	曹 勇
老挝南累克水电站施工概况	杜学泽	天荒坪 2 号机组分瓣座环/蜗壳的现场焊接及变形控制	朱洪清
水下岩塞爆破	丁鹰灼	同步发电机转子失磁后果分析及判断现象	刘 义
碾压混凝土在花滩水电站大坝中的应用	刘 强	花滩电站碾压混凝土坝砂石骨料制备探讨	彭 勇
引大入秦总干渠盘道岭隧洞喷射钢纤维混凝土施工	张 健	羊湖电站引水隧洞衬砌段监测仪器现场安装调试	喻广平
花滩水电站大坝基础处理工程施工	邓树密	黄丹水电站施工浅析	陈 茂
太平驿水电站地下厂房的快速施工	杜亚玲	黄丹水电站人工砂石粉限值探讨及使用总结	谭克忠