

黄龙滩水电站拦河坝 接缝灌浆设计与施工

晏以懋

(长江流域规划办公室)

一、概述

黄龙滩水电站位于汉江支流堵河下游。坝址属副热带季风区，气候温和，雨量丰沛，多年平均气温 16.1°C ，冬季无冰冻现象。

坝址左岸为引水式地面厂房，装机 2×7.5 万千瓦；右岸为30吨两级垂直升船机。

拦河坝为混凝土重力式，最

大坝高107米，坝顶总长371米，共22个坝段（右岸2*~6*、左岸15*~23*为非溢流坝段；7*~13*为溢流坝段；14*为泄水孔坝段）。各主要建筑物平面布置见图1。

拦河坝混凝土总量98万 m^3 ，接缝灌浆面积共2.98万 m^2 ，207个灌浆区。工程于1969

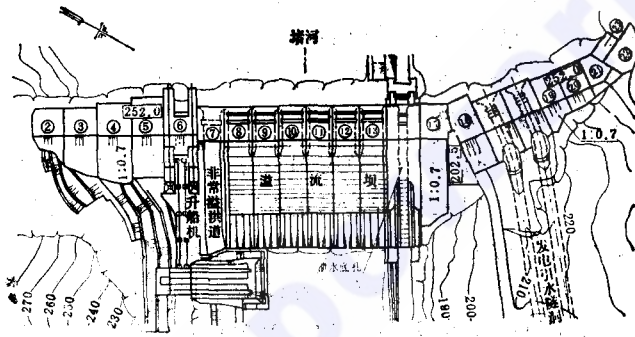


图1 黄龙滩水电站平面布置图

年4月开工，1974年5月第一台机组发电，1975年底基本建成。接缝灌浆从1970年至1976年分六个冬春季施灌。

二、接缝灌浆设计

(一) 分缝方式及灌浆分区

各坝段横缝间距一般16米，个别坝段因稳定或其它要求，增至18~20米。考虑到两岸岸坡较陡及地基岩性不均一，为了增加坝体侧向稳定及整体性，在横缝下部，相当于坝高 $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ 的范围内，设置键槽及灌浆系统，待坝体达到稳定温度后灌浆封堵。

纵缝因受坝型改变、分期施工及栈桥布置影响，除垂直纵缝外，还有斜缝，且错缝较多。在错缝部位，为了防止接缝向上延伸，均设置并缝钢筋（或加并缝廊道）。

倾向上游斜缝坡比为1:0.25，缝面设键槽并加插筋，不灌浆；倾向下游的斜缝坡比为1:0.5~1:0.7，缝面设键槽，部分坝段埋设灌浆系统，若日后缝面拉开可灌浆封堵。典型坝段分缝布置见图2。

由于分缝型式较多，浇筑形状不甚规则，分区高度一般为10~15米，最小5~6米，最大17~18米，灌浆单区面积一般为100~300米²，个别灌区大于300米²。

(二) 缝面结构及灌浆系统

缝面均由止浆片、灌浆键槽、出浆盒及排气槽组成单独的灌区。三种分缝方式的缝面结构型式及尺寸，除灌浆键槽外，其他均相同。

垂直纵缝设水平布置的三角形键槽，长短边分别垂直或接近垂直于第二主应力与第一主应力，当键槽位于上游浇筑块的背水面时，键槽的短边在上，长边在下，当键槽位于下游浇筑块的迎水面时，长短边布置反向，为防止因高差引起的压缝，出浆盒均布置在键槽的上部。斜缝及横缝分别设置水平及垂直梯形键槽。

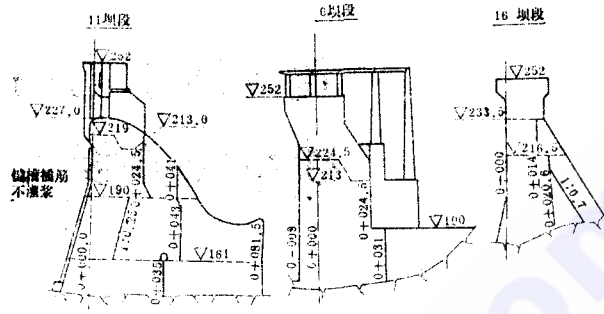


图2 典型坝段分缝剖面图

灌浆系统由进、回浆管、支管及排气管组成，采用双回路立式，两套管网，当一套失效时，可启用另一套，可靠性较高，但消耗管材较多。

纵横缝键槽及灌浆系统布置见图3、图4。

(三) 灌浆温度

采用坝体运行期平均稳定温度作为灌浆温度。由于受条件限制，稳定温度通过确定坝体边界温度（气温、水温、地温）绘制等温度线的近似方法求得。

1. 水库水温 参考国内外若干已建工程资料*，结合黄龙滩水电站的具体情况，确定水库水温沿深度变化值为：①正常蓄水位247.0米的水温按高出年平均气温2℃，即18.1℃；②247.0米以下70米深度内，非溢流坝段水温从18.1℃呈直线变化至9℃，溢流坝段堰顶（227.0米）以上的闸墩、胸墙及闸门受气温影响较大，247.0~227.0米库水温变化为18.1℃~16.1℃，堰顶以下库水温变化为16℃~9℃；③大于70米深度的库水温保持9℃不变。

2. 坝面温度 坝体上下游水上部分的坝面温度与坝址所处纬度、坝轴线方向等有关。本电站按有关公式计算，高于年平均气温2℃，则坝面温度为18.1℃。

3. 下游水温 下游水面温度仍按18.1℃计，水面以下温度按0.13℃/米的水温变率递减。

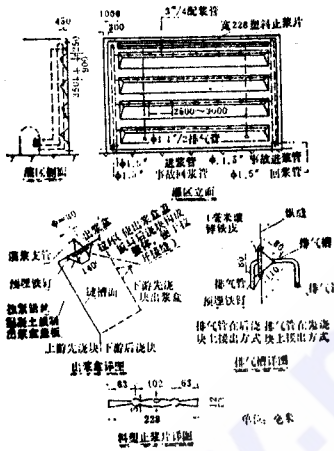


图3 垂直纵缝键槽及灌浆系统布置图

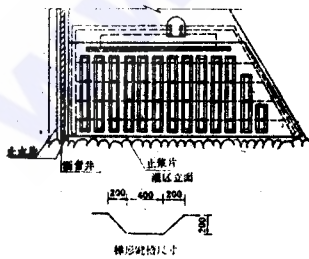


图4 横缝键槽及灌浆系统布置图

*a. 一般气温或寒冷地区的水库表面年平均水温比年平均气温高3~4℃；年平均气温较高的地区(20℃以上)，建坝前的河水年平均温度比年平均气温约低2~5℃。b. 水库年平均水温受气温影响深度约为60~70米，超过此深度的水温几乎保持在6~10℃不变。c. 水库水温沿水深递减的规律，其变率上部大、下部小。

4. 地温 地基温度从上游至下游假定呈线性变化, 由坝踵相应的库水位递增至坝趾的 18.1℃ 或相应深度的水温。

5. 绘制等温线及计算分区平均稳定温度 坝体边界温度确定后, 按坝体内部温度与表面温度之差呈均等分布, 计算坝内各点温度, 联接上游坝面与地基的等温点, 即可近似绘出稳定温度的等温线。根据灌浆分区, 逐个计算等温线平均值即为分区灌浆温度。根据典型坝段等温线及分区灌浆温度图, 最低灌浆温度为 10℃, 最高为 16℃。

典型坝段等温线及分区灌浆温度见图 5。

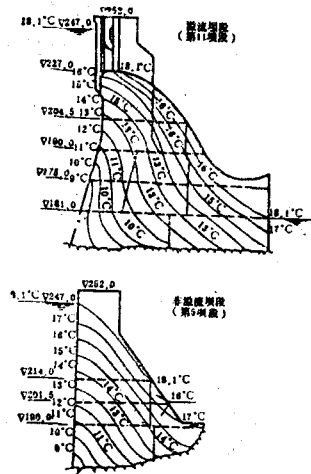


图 5 典型坝段等温线及分区灌浆温度

(四) 后期冷却

为使坝块在接缝灌浆前达到稳定温度, 一般均需进行水管通水冷却。坝址区冬季河水温度较低, 经计算, 可以满足冷却至最低稳定温度的要求。黄龙滩地区冬季多年月平均水温见表 1。

表 1 黄龙滩地区冬季多年月平均水温表

月 份	12	1	2	3
水温(℃)	7.5	7.5	6.8	10.8

冷却水管的水平及垂直间距施工初期为 1.5×3 米, 后改为 2×2 米。

混凝土通水前初温一般约 30℃, 经计算, 从 11 月开始连续通水, 一般 3~4 个月可以冷却至灌浆温度。个别部位 3 月底方达灌浆温度。

冷却通水的主要技术要求:

1. 根据温控要求, 灌浆缝两侧坝块在灌浆层底部以下 3~5 米, 至灌浆层顶部以上约 8~10 米范围内均应冷却至稳定温度;
2. 冷却通水前, 应通过埋设仪器或闷管量测一次坝块的温度;
3. 通水流量控制在 1 米³/时左右, 后期可适当加大, 通水降温速度不超过 1℃/天, 混凝土与冷却水的温差不超过 20℃;
4. 冷却通水过程中, 每半月量测一次温度, 以掌握冷却进度。

闷管是量测坝体温度简便的近似方法, 其作法是将河水通入冷却水管, 满管后关闭进出口, 当水与混凝土的热交换基本平衡

表 2 最少闷温天数与水管间距关系表

水管间距(米)	2×2	2×3	3×3
最少闷温天数	2.0	2.5	4.0

后, 打开进出口, 用压缩空气将管内积水缓缓吹出, 并用温度计连续读数, 直至积水

水流完为止, 甄别后读数的平均值即是坝体该部位的平均温度。最少闷温天数与水管间距关系见表 2。

(五) 灌浆顺序

为保证灌浆质量与坝体安全, 参考有关规定, 本工程灌浆顺序如下:

1. 同一坝段接缝一般从基础层依次向上灌注, 上层灌浆应待下层结束后 14 天进行;

2. 同一坝段、同一高程的纵缝或相邻坝块同高程横缝，一般应同时灌浆，如不能同时灌浆，则纵缝应从下游向上游，横缝从河床向两岸依次进行；

3. 同一高程相邻纵横缝，应先灌纵缝，后灌横缝，间歇期为7天。

(六) 灌浆压力

灌浆压力是影响灌浆质量的重要因素之一，应在不危及坝体安全的情况下，尽可能加大，确定灌浆压力的步骤大致为：假定层顶灌浆压力，再核算接缝两侧坝块的抗滑稳定及正应力，如果核算的稳定安全系数及应力值在允许范围内，即选定该层顶压力为设计灌浆压力。一般基础块才核算抗滑稳定，要求 $K_s \geq 1.0 \sim 1.1$ ，正应力以不出现拉应力为原则，对于非基础块，混凝土标号 ≥ 150 时，允许出现不大于 $0.2 \sim 0.29$ MPa 的拉应力。

灌浆压力计算公式：

$$P_0 = p + \gamma H + \xi \gamma H$$

式中 P_0 ——灌浆层底压力；

p ——灌浆层顶压力；

γ ——水泥浆体终级容重；

H ——灌区高度；

ξ ——灌浆时终级浆液在缝面的沿途损失系数，与浆液浓度、接缝张开度、键槽形状及布置形式等因素有关，一般水平键槽约为 $0.5 \sim 0.8$ ，垂直键槽约为 $0.3 \sim 0.6$ 。

按以上公式核算坝体安全后，本工程各底层灌区的灌浆压力一般采用 $0.25 \sim 0.29$ MPa，中上层灌区采用 $0.15 \sim 0.20$ MPa。

三、接缝灌浆施工

(一) 灌浆前的通水检查及事故处理

通水检查主要是了解灌浆管道及缝面的通畅情况，查明事故部位，以确定处理措施。通水检查分为单开式及封闭式通水两部分，单开式通水是从每一管口进水，在排气管达到设计压力的75%以上时，依次开启每一管口，测单开出水量，等于或大于50升/分为合格。通畅标准是：至少有一组对侧进回浆管互通，并与排气管互通。封闭式通水检查是从一个通畅的进浆管口进水，其他管口关闭，待排气管达到设计压力75%以上时，测各项漏水量。

并观察外漏部位，灌区封闭标准是稳定漏水量小于10升/分（不是集中渗漏）。经过通水检查，对各种事故情况相应采取以下处理措施：

1. 当接缝灌浆管道或缝面不通时，充水浸泡缝面，再以风水轮换冲洗，或人工掏挖疏通，当这些措施均无效时，补风钻孔代替原灌浆系统。单孔控制灌浆面积为 $3 \sim 4$ 米²，钻孔内均下套管，孔外接进回浆干管，每个风钻孔相当于一个出浆盒，又起进回浆管的作用；

2. 外漏严重的灌区，可凿槽嵌缝；如无条件嵌缝，就采取低压间歇沉淀灌浆的措

施:

3. 上下相邻两层灌区如有微串, 则采用下层灌浆, 上层通循环水的措施, 如串层严重, 则上下层同时灌浆, 每个灌区各配一台灌浆机。

(二) 灌浆施工方法

1. 灌浆工艺流程 接缝灌浆时, 为了使水泥浆从下向上、从一侧向另一侧均匀扩散, 将缝内水气推向排气管及回浆管。当进回浆管位于灌区底层或上层时, 管道联接及水泥浆体循环流程见图 6、图 7。

2. 浆体稠度及变浆、结束标准

浆液稠度一般采用 3:1、1:1、0.6:1 (水灰重量比) 三级, 当接缝张开度小于 0.5 毫米时, 可以增加 4:1 一级, 如张开度大于 2 毫米, 且管道通畅时, 可仅采用 3:1、0.6:1 两级。

进浆开始灌注 3:1 浆液, 此时其余各管全部敞开, 按出浆次序先后关闭各管口, 并留对侧回浆管回浆。当排气管满管出浆 3~5 分钟, 灌入量与缝容大致相等时, 即可改灌 1:1 浆液。

在灌注 1:1 中间级浆液过程中, 间歇开启排气管口, 以排除残留的水气及稀浆, 其它管口也间歇放浆, 以防堵塞, 当排气管口的放浆等于或大于 1:1 浆液比重时, 则可变为最终级 0.6:1 浆液灌注。

灌注 0.6:1 浆液时, 当排气管口达到设计灌浆压力, 放浆达到 0.6:1 浆液比重, 吸浆率 30 分钟为零或连续 60 分钟 ≤ 0.4 升/分钟时, 可屏浆结束。如灌区封闭条件差无法屏浆时, 再顺灌 30 分钟结束, 若无法达到上述结束条件时, 则从排气管口倒灌 0.6:1 浆液, 在设计灌浆压力下吸浆率为零时, 续灌 30 分钟结束。

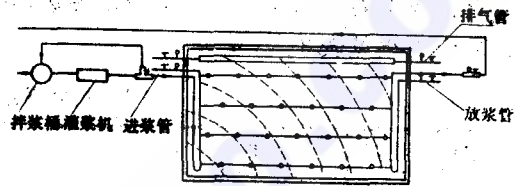


图 6 进回浆管口在灌区底层时管道联接及水泥浆体循环流程

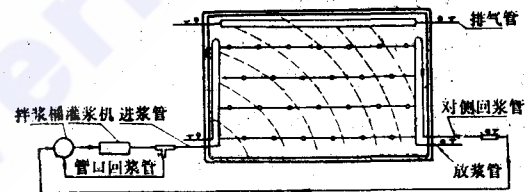


图 7 进回浆管口在灌区顶层时管道联接及水泥浆体循环流程

四、质量鉴定

本工程以分析资料鉴定灌浆质量为主, 并选择一些有代表性的接缝, 钻孔取样, 进一步验证资料鉴定的准确性。

(一) 分析灌浆资料鉴定质量

1. 鉴定标准 参考有关工程资料, 由设计与施工单位共同协商拟定的质量鉴定标准如下:

(1) 实测坝体平均温度达到设计温度, 允许有 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的变幅;

(2) 排气管放浆比重等于或大于 1.71 (相当于 0.6:1), 认为质量良好, 等于或大于 1.5 (相当于 1:1) 认为质量合格, 小于 1.5 认为质量较差;

- (3) 灌浆压力达到设计压力或不小于 75 % 的设计压力;
 - (4) 在设计压力或设计压力在 75 % 时, 接缝单区最终吸浆率小于 0.4 升/分;
 - (5) 至少有一组对侧管路互通, 并与排气管互通, 单开出水量大于 50 升/分;
 - (6) 单位缝容耗灰量大于 1 公斤/升、等于或大于 0.8 公斤/升、小于 0.8 公斤/升时, 分属质量良好、合格及较差;
 - (7) 接缝压水检查的单位吸水率不大于 0.005 升/分·米·米;
- 在单区分析鉴定中, 以前 5 条作为控制条件, 其余作为参考条件。

2. 质量鉴定成果 根据质量鉴定标准, 对已灌 207 个灌区的灌浆资料作单区分析, 鉴定成果见表 3。

表 3 接缝灌浆质量分类成果

总灌区数	总灌浆面积 (米 ²)	良 好				尚 可				较 差			
		区数	%	面积	%	区数	%	面积	%	区数	%	面积	%
207	2978	83	40	13878	46.6	106	51.3	13761	46.2	18	8.7	2142	7.2

(二) 钻孔取样

根据分析成果, 选择一些有代表性的、易于取样的纵横灌区, 用 100 型、300 型钻机 (口径 110~150 毫米) 骑缝取样, 其中属于质量良好的灌区, 大部分胶结良好, 结石占缝面的 100 %; 合格的灌区, 缝面脱开, 结石占缝面的 30~70 %; 较差的灌区, 缝面脱开, 上面无结石, 只有很薄一层水泥浆, 与资料鉴定结果基本相符。

五、几个问题

(一) 关于分缝型式

1. 从灌浆资料分析及钻孔取样看, 错缝的张开度受到限制, 灌浆效果往往较差; 而贯通缝只要温度及自缩龄期达到设计要求, 张开度一般均在 1 毫米以上, 灌浆效果较好。因此, 设置错缝宜慎重对待, 如设置错缝又需灌浆, 则应待下层接缝灌浆后, 或至少待下层接缝达到稳定温度及自缩龄期后, 再在上层另起新缝, 否则, 应在结构上采取某些补救措施。

向下游倾斜的斜缝设置了灌浆系统, 经通水检查, 进回浆管与排气管均不互通, 证实缝面未张开或张开甚小。这类接缝, 不宜灌浆, 设置键槽并加插筋等结构措施, 其整体性将更有保证。

(二) 提高某些特殊部位灌浆压力的结构措施

对于较小的个别坝块且顶层无压重的灌区, 如纵缝靠近坝面的顶层, 即使采用较小的灌浆压力 (0.1 MPa) 也无法使坝块的稳定与应力控制在允许范围内。为了解决这一问题, 本工程采用了在灌区顶层加设跨缝钢筋的结构措施, 保证了按正常压力灌浆。不过跨缝钢筋后浇块一侧的混凝土是连续浇筑的, 这就使接缝张开度在混凝土降温及自缩过程中受到钢筋的约束, 如作以下改进, 则效果可能更好。

1. 在先浇块上, 灌区顶层水平止浆片设在距缝顶 3 米左右处, 止浆片以上布置跨

缝钢筋；

2. 后浇块上升至止浆片与跨缝钢筋之间停浇；

3. 待灌区两侧混凝土达到规定的灌浆温度及自缩龄期后，按填塘温控要求将三角槽用与坝体标号相同的混凝土回填；

4. 当回填混凝土达到 28 天龄期后，可按经计算选定的灌浆压力灌浆。

跨缝钢筋数量，只要求出钢筋由于灌浆压力所引起的轴向拉力，即可按常规计算方法算出。计算钢筋轴向拉力的方法及步骤如下：

(1) 设灌区底层为核算坝块正应力的计算平面，并令这一平面靠近接缝一侧的正应力为零，则正应力计算公式：

$$\sigma = \frac{G}{A} \mp \frac{M}{W}$$

可变形为

$$M = \frac{GW}{A}$$

式中 G ——坝块自重；

A ——计算平面的面积；

M ——各种荷载对计算平面形心的总力矩；

W ——计算平面的断面系数。

(2) 设跨缝钢筋产生的轴向拉力 P_x 为与灌浆压力方向相反的平衡力，则求出各种荷载（包括 P_x ）对计算平面形心的总力矩算式后，解方程 $M = GW/A$ 可求得 P_x ，从

而计算出所需跨缝钢筋的数量。

当坝坡 1:0.7，灌区高度 $H=10$ 米，灌浆压力采用 0.15MPa 时，采用两排长度为 2 米（不包括弯钩），间距 0.25 米， $\phi 32$ 钢筋即可。跨缝钢筋布置及计算荷载分布见图 8.9。

(三) 减少灌区事故应采取的措施

灌区事故不仅造成人力、资金的浪费，影响施工进度，且会给工程带来无法补救的损失。本工程灌区事故大致可分为管道不通，缝面不畅及灌区浆液外漏三种情况，这是带有普遍性的问题，建议从设计施工方面采取下列改善措施：

1. 灌浆接缝应设计成垂直贯通式的，尽量避免错缝及钢筋跨缝，从结构上保证接缝有足够的张开度；

2. 相邻浇筑块高差应限制在允许范围内，尽量缩短先后浇块的间歇时间，以防止产生“压缝”；

3. 工程施工期，应由专人负责灌浆管道的安装、埋设及保护，作好详细记录，直至接缝灌浆施工结束；

4. 混凝土浇筑前，应对已安装好的灌浆管道进行一次通水检查，发现问题及时处

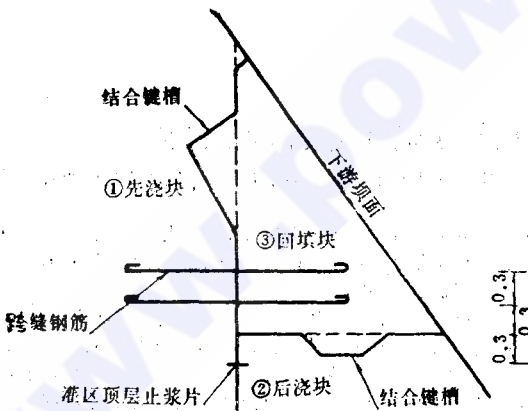


图 8 跨缝钢筋布置

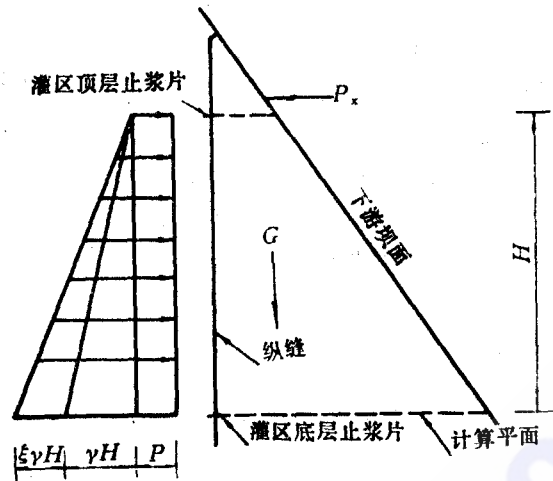


图9 计算荷载分布

理，施工中的灌浆管口，用木塞塞紧防止杂物掉入，而在接管前必须先将木塞拔出再焊接管道：

5. 灌浆管道应根据灌区所处的位置，集中就近引入坝内廊道或易于保护的部位，管口用钢筋焊死，并用油漆在管口注明管道所属灌区、管道类别、管口排列方式及应事先规定的标记。

简 讯

开发中型水电站技术经济讨论会在长沙召开

为了缓解我国电力紧缺的局面，促进中型水电站的开发，中国水力发电工程学会于9月18日至21日在长沙召开了“开发中型水电站技术经济讨论会”。

这次会议是在去年南宁“二大”会上确定召开的。中国水力发电工程学会副理事长张铁铮、罗西北、副理事长兼秘书长梁益华同志主持了会议。学会顾问季诚龙等出席了会议。参加会议的共67个单位，代表105人。我会陈家远、聂振伟、李明鑫、张登仕、邓良华等同志出席了会议，并提供大会交流文件七篇。

会议着重讨论了中国水力发电工程学会草拟的“积极推进集资办电，抓紧兴建一批中型水电站”的建议，通过讨论，一致认为：目前我国电力发展缓慢，严重影响了国民经济的发展，必须迅速修建一批投资省、收效快的中型水电站。同时认为：当前对电力建设的一些政策问题阻碍了中型水电站的发展。罗西北同志在报告中指出：“中型水电站建设停滞的原因是思想上的片面，形成的政策上的失误。过去强调了大型为骨干，而未落实大、中、小并举的建设方针。其次是独家办电的思想，体制管理上的问题等。现在要振兴经济，必须兴建一批中型水电站，水电部设想在2000年以前兴建1000万千瓦的中型水电站……”，会议对贷款利率、税率、偿还年限、电价政策等都进行了深入的讨论。通过讨论，决定起草“改革放权，扶持地方，加强开发中型水电站”文件上报国家。

会上，各省还交流了经验，提出了问题，并对今后工作提出了意见。梁益华秘书长在总结报告中对今后工作提出了下述意见：

1. 建议各省学会对本省中型水电资源进行调查，摸清本地区国民经济发展形势，加强横向联系，统一规划，择优选点，落实资金，工作中要有科学态度，坚持基建程序；
2. 及时总结中型水电站的经验；
3. 希望今后对中型水电站的优越性及其在不同地区和不同系统中的作用、中型水电站建设和中型水电站经营管理的体制改革和优化模式、中型水电站的合理政策问题、中型水电站的合理开发问题、电网中水火电比例问题等等问题进行研究。

四川中型水电资源丰富，目前仅开发5%，潜力巨大，为了振兴四川经济，一定要齐心协力，为建设一批优越的中型水电站而不遗余力。

(张登仕)