

帕斯卡®

锦屏一级水电站  
左岸 f5 断层化学灌浆室内模拟试验  
成果报告



深圳市帕斯卡系统建材有限公司  
德曼氏化学灌浆技术研究工作室



## 目 录

1、左岸 f5 断层地质情况简介.....	3
2、模拟试验采用的规程、规范、标准.....	4
3、试验项目和试验目的.....	5
3.1 试验项目.....	5
3.2 试验目的.....	5
4、取 样.....	6
4.1 取样时间、部位与高程.....	6
4.2 原始岩样照片.....	7
5、岩样性状描述及理化分析试验.....	8
5.1 f5 断层 (K0+078~K0+088) 部位夹泥层 (黄泥) .....	8
5.2 f5 断层 (K0+054~K0+064) 部位破碎带 (粗砂) .....	8
5.3 岩样理化分析测试.....	9
6、浆材简介.....	10
6.1 PSI-501 (地质缺陷加固灌浆材料) 产品介绍 .....	10
6.2 PSI-501 (地质缺陷加固灌浆材料) 产品特性 .....	10
7、模拟试验.....	12
7.1 试验方法.....	12
7.2 模拟压力灌入试验过程记录.....	13
7.3 f5 断层试验过程记录剪影.....	15
7.4 试件养护.....	16
7.5 钻取芯样.....	17
8、试验成果总结.....	20
9、结束语.....	21
10、附件.....	22
10.1 附件 1: f5 粗砂模拟化学灌浆记录表.....	22
10.2 附件 2: f5 黄泥模拟化学灌浆记录表.....	23



**试验单位：**深圳市帕斯卡系统建材有限公司

**技术指导：**陈小能、陈仁喜

**试验人员：**付念、闫召庆

**报告编写：**刘辉、王建琿



## 1、左岸 f5 断层地质情况简介

f5 断层贯穿锦屏一级水电站大坝左岸坝肩及抗力体,总体产状为  $N35\sim 45^{\circ} E, SE\angle 70\sim 80^{\circ}$  , 1800m 高程以上,断层破碎带基本处于沙板岩中,破碎带宽度较大,一般 5m~10m,主要由角砾岩、碎裂岩、糜棱岩、碳化的泥质片状岩及断层泥组成,见大量碳化现象和镜面、擦痕,普遍弱~强风化,散体结构;1800m 高程以下,断层破碎带全部处于大理岩内,1680~1800m 破碎带宽度一般 1~3m,主要为角砾岩、碎裂岩,少量糜棱岩、片状岩及不连续断层泥。1680m 高程以下破碎带宽度一般 0.3~1.0m,一般为重胶结、较紧密坚硬的角砾岩、碎裂岩,微风化~新鲜为主,上下盘与大理岩接触带普遍较紧密,局部结构松散,风化较强,地下水活动明显。

f5 断层对锦屏大坝的稳定性、基础应力传递等极为不利,而基岩的整体性、岩体变形模量和抗渗性能以及坝基及两岸岩体稳定性,是直接关系到大坝的运行安全,根据成都院设计提出采用水泥-化学复合灌浆进行处理,故在进行处理前,针对 f5 断层实际工况,先进行了室内模拟化学灌浆试验。



## 2、模拟试验采用的规程、规范、标准

本次试验针对 f5 断层岩样进行模拟灌浆试验所依据的的试验规程、规范及标准如下：

- 1、《锦屏一级水电站大坝基础处理及相关问题研究》
- 2、《2010 年 6 月 4 日大坝化学灌浆施工准备专题会纪要》
- 3、《雅砻江锦屏一级水电站化学灌浆招标设计报告》
- 4、《混凝土裂缝用环氧树脂灌浆材料》JC/T 1041—2007
- 5、水工建筑物化学灌浆施工规范 DL/T 5406-2010



### 3、试验项目和试验目的

#### 3.1 试验项目

##### 3.1.1、岩样理化分析试验

根据 f5 断层现场断层工况分别采集 f5 断层(K0+078~K0+088)部位夹泥层(黄泥),(K0+054~K0+064) 部位破碎带(粗砂), 原始岩样进行含水率、含泥量及细度模量等各项理化分析测试;

##### 3.1.2、f5 断层岩样室内模拟灌注试验

充分模拟现场工况, 对岩样进行室内模拟灌浆。

##### 3.1.3、f5 断层岩样经模拟灌注后的岩样和芯样的力学强度及弹模测试;

室内模拟灌浆结束 28 天后, 钻孔取芯, 并对芯样进行力学强度及弹模测试。

#### 3.2 试验目的

(1) 通过在不同高程、部位采集的原始岩样进行含泥量、含水率、细度模数等理化分析, 以便设计和开发适用于 f5 断层帷幕灌浆的灌浆材料的基础配方和配比。

(2) 通过对 PSI-501 (9:1、8.5:1、8:1) 配比环氧灌浆材料的操作性能、力学性能检测, 确保灌浆材料不仅满足工程设计要求, 更需要为 f5 断层特殊工况及生产作业条件, 寻找到可提供可灌性好和优异力学性能兼备的理想材料。

(3) 以最大限度模拟(断层深处的砂、泥致密状态及工况); 通过室内有压模拟灌注的试验可以了解 PSI-501 浆液对 f5 断层的渗透性、可灌性、固结情况以及固结体的力学性能, 可以为今后大规模化灌生产施工的: 孔、排距、灌注压力、注浆速率、施灌工具、浆液配制的转换等工艺和参数的优化, 提供工程设计和生产施工技术支撑。



## 4、取 样

### 4.1 取样时间、部位与高程

本次试验所取岩样，是针对大坝左岸边坡 f5 断层。2011 年 7 月 14 日，在 1670~1730 高程 f5 断层（K0+078~ K0+088）部位夹泥层（黄泥），（K0+054~ K0+064）部位破碎带（粗砂）两处不同岩性的基岩进行原位取样。



f5 断层（K0+054~K0+064）部位破碎带（粗砂）



f5 断层（K0+078~K0+088）部位夹泥层（黄泥）



## 4.2 原始岩样照片



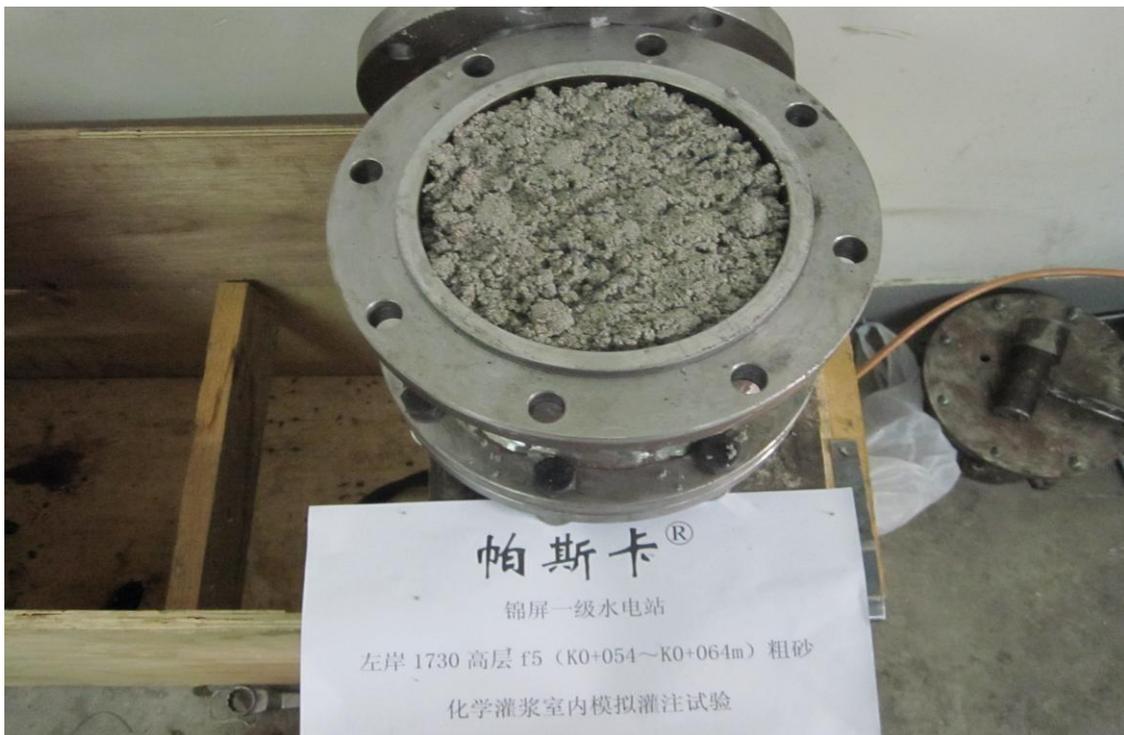


## 5、岩样性状描述及理化分析试验

### 5.1 f5 断层 (K0+078~K0+088) 部位夹泥层 (黄泥)



### 5.2 f5 断层 (K0+054~K0+064) 部位破碎带 (粗砂)





### 5.3 岩样理化分析测试

1、测试项目：含水率、含泥量、细度模数

2、测试仪器：烘箱、试验筛等

3、测试步骤：

a、取样 1100g，均分混匀，分成大致相等的两份备用。因取样时间较早，为保证符合现场工况，将试样饱水后称取 500.0g 试样，将试样置于 105℃ 的烘箱中烘干至恒量，取出后称其重量 G（净重），含水率为  $(500-G) / 500 \times 100\%$ ；

b、将烘干后的试样置于 1000ml 烧杯中，注入水，使水面高出试样面 20cm，充分搅浑均匀后，浸泡 2h。并继续搅浑试样，使尘屑、淤泥和粘土与试样颗粒分离，或溶于水中。缓缓的将浑浊液倒入试验套筛上（1.25mm 试验筛放在上面，0.080mm 试验筛放在下面），滤去粒径小于 0.080mm 的颗粒。并重复浸泡筛滤，直至烧杯内洗出的水清澈为止。再用水冲洗剩留在试验筛上的颗粒，充分洗去粒径小于 0.080mm 的细粒。再将 1.25mm、0.080mm 试验筛上的颗粒和烧杯中已洗净的试样一并移入搪瓷盘中，置于 105℃ 的烘箱中烘干至恒量，取出后称出其重量 G1，则含泥量为  $(G-G1) / 500 \times 100\%$ ；

c、将清洗、烘干后的试样置于套筛中（至上而下为 10mm、5mm、2.5mm、1.25mm、0.63mm、0.315mm、0.16mm），再将套筛置于震筛机中充分震筛。取原始岩样 1000g，分位两份，因取样时间较早，其中水分已有损失，为确保测试数据符合现场工况，将岩样饱水后再进行含水率测试。经烘烤、筛分测得岩样含水率为 20%，含泥量为 3.2%；

各级粒径含量如下表：

粒径 (mm)	含量 (%)
$q > 10$	0.8
$10 \geq q > 5$	3.2
$5 \geq q > 2.5$	17.6
$2.5 \geq q > 1.25$	16.2
$1.25 \geq q > 0.63$	21.8
$0.63 \geq q > 0.315$	13.2
$0.315 \geq q > 0.16$	3
$0.16 \geq q > 0.06$	1



## 6、浆材简介

本次室内模拟试验采用帕斯卡 PSI-501 改性环氧灌浆材料进行灌注。f5 断层现场实际工况不同于 f2 断层，故此次 PSI-501 改性环氧灌浆材料与 f2 断层所用环氧浆材做一优化和改进，更适用于 f5 断层现场实际工况。

### 6.1 PSI-501（地质缺陷加固灌浆材料）产品介绍：

PSI-501 高渗透型环氧灌浆材料是由改性环氧树脂、稀释剂、改性固化体系及添加适量的表面活性剂等原料配制而成的高渗透性的环氧灌浆材料。新型固化体系接近无害，使浆材的毒性、刺激性气味和腐蚀性大大降低，固结体无毒。

PSI-501 高渗透型环氧灌浆材料具亲水性兼憎水性，其比重、粘度略大于水，内聚力强，能与水形成稳定界面的特点。与一般环氧浆材比，表面张力小，粘度低，接触角小，具有特优的湿润和浸润能力，且可操作时间长，可灌性好，固结体强度高。能以浆排水，摒弃了国内同类浆材需丙酮或国外需用甲苯、异丙醇等有机溶剂作先导浆排水或形成浆、水阻隔层的措施，能更好的保证灌浆效果。同时克服了同类浆材早期发热量大，粘度增长过快，初凝时间过长，强度增长过慢等问题。

PSI-501 高渗透型环氧灌浆材料浆材在干、湿环境，或含饱和水及有压流动水的情况下与被灌体粘接强度超过同类产品且抗渗和耐老化性能优良；特别是在有压力水条件下对微细裂隙的防渗加固，在同类产品中处于领先地位。能广泛适用于断层破碎带及泥化夹层加固补强、基础防渗补强、混凝土及岩石裂隙。



## 6.2 PSI-501（地质缺陷加固灌浆材料）产品特性：

具粘度低、高渗透性、高浸润性；与介质的亲和力性能好，力学性能优良；亲水性兼具憎水性，水下灌注性好；在干、湿、含饱和水及有压流动水的工况环境中均可进行施工；可灌时间长，根据施工要求自由进行调控灌注时间而不会影响性能；环保，操作毒性大大降低；固结体无毒。

### 产品性能指标：

	测试项目			性能指标
1	浆液密度 (g/cm <sup>3</sup> )		配浆毕	> 1
2	初始粘度 (mPa·s)		20°C± 1	≤ 20
3	可操作时间 (h)		20°C± 1	≥ 20
4	聚合物抗压强度 (MPa)		28d	≥ 60
5	聚合物抗拉强度 (MPa)		28d	≥ 15
6	“结抗拉强度 (MPa)	干粘	28d	≥ 4.0
		湿粘	28d	≥ 3.0
7	拉伸剪切强度 (MPa)		28d	≥ 5.0
8	抗渗压力 (MPa)		28d	≥ 1.2
9	渗透压比 (%)		28d	≥ 300

**备注：**PSI-501 浆液配比 9:1、8.5: 1 和 8:1 均能满足以上性能指标；表中指标数据均为范围，实际检测数据以每批次抽样检测结果为准。



## 7、模拟试验

### 7.1 试验方法

本次室内模拟试验采用模拟压力灌入法及模拟灌入试验步骤如下：

①、取原始岩样；

②、制作灌浆筒，规格  $\varnothing 160\text{mm} \times 145\text{mm}$  的圆筒。将原岩样放入筒内，用铁棒捣密岩样后，封闭灌浆圆筒；

③、模拟灌浆。在浆材配制试验时，根据以往 f2 断层模拟灌浆等试验的经验，针对“黄泥”我们优选 PSI-501（配比为 8.5:1）环氧浆材为主灌浆进行室内模拟灌注试验。选择浆液共分三种，即先导浆，主灌浆、和封孔浆，先用 PSI-501（配比为 9:1）为先导浆进行灌注，先导浆粘度小、渗透性能好，有超长的初凝时间，其作用主要是填充空容、以浆赶水，快速浸入岩样内，有效浸润岩样的裂隙及渗透通道，在灌注过程中应间隔性打开回浆口进行排水、排气、排浆水混合物等操作工艺，当封闭器水份排完后，继续灌注至 48 小时（应根据岩样性状而定，可适当延长灌浆时间）后开始使用主灌浆 PSI-501（配比为 8.5:1）进行灌注，主灌浆具有较好的操作性和浸润性能，在灌注过程中应间隔性打开回浆口进行排气等操作工艺，如果屏浆保压结束时则不再操作此工艺，如现场施工能有效的保持孔内浆液的流动性，可以减少浆材置换的工作，节省材料、降低成本；当主灌浆灌注达到 48 小时后，则采用 PSI-501（配比为 8:1）封孔浆，进行封孔待凝。封孔浆固结快，强度高，有效提高施工速度；针对“粗砂”我们采用了以 PSI-501（配比为 8.5:1）环氧浆材为主灌浆进行室内模拟灌注试验。选择浆液共分三种，即先导浆，主灌浆、和封孔浆，先用 PSI-501（配比为 9:1）为先导浆进行灌注，灌注至 48 小时（从开灌算起），则开始使用主灌浆 PSI-501（配比为 8.5:1）进行灌注，灌注达到 24 小时后，则采用 PSI-501（配比为 8:1）封孔浆，进行封孔待凝。

④、试件养护 30 天后，钻孔取芯。



## 7.2 模拟压力灌入试验过程记录

### I、灌前准备

取原始岩样,岩泥与碎岩块放入规格  $\varnothing 160\text{mm} \times 145\text{mm}$  的钢筒内,将岩样捣实装满后封闭灌浆钢筒。链接好灌浆管路后进行压水检测其密封性能,为充分模拟现场的施工状况,在灌浆前对岩样进行压水饱湿,让岩样达到自然饱水致密的状态后再进行模拟灌注试验。

### II、“黄泥”化学灌浆过程记录

2011年07月16日15:50开始灌浆,灌浆材料选用先导浆(PSI-501 配比 A: B=9:1)进行充填管、桶容,待上面两个排气管返出纯浆后关闭其阀门,此时注入量为:603g,其中管占180g,共排浆150g,压力提升至设定压力5MPa。2011年07月18日15:50时注入量为1012g,共排浆340g,纯灌入浆量492g,压力为5MPa。

2011年07月18日16:00置换主灌浆(PSI-501 配比 A:B=8.5:1)。2011年07月18日16:40时注入量为800g,共排浆800g,压力升至设定压力5MPa。2011年07月20日15:50时注入量为1060g,共排浆900g,纯灌入浆量160g,压力为5MPa。

2011年07月20日16:00置换封孔浆(PSI-501 配比 A:B=8:1),2011年07月20日16:50时注入量为900g,共排浆900g,压力升至设定压力5MPa。2011年07月22日23:00桶内浆液粘度过大,调换新浆。2011年07月24日15:50灌浆结束,注入量为1080g,共排浆960g,纯灌入浆量120g,压力为5MPa。

整个灌浆过程共注入量为3152g,共排浆量为2200g,管占量为180g,纯灌入浆量772g。(详见附件1:灌浆记录表)



### III、粗砂化学灌浆过程记录

2011年07月16日16:15开始灌浆，灌浆材料选用先导浆（PSI-501 配比 A: B=9:1）进行充填管、桶容，待上面两个排气管返出纯浆后关闭其阀门，此时注入量为956g，其中管占340g，共排浆200g，压力提升至设定压力5MPa。2011年07月16日21:10时泵坏停灌，2011年07月17日09:10时换泵继续灌注。2011年07月19日08:00时注入量为2035g，共排浆710g，纯灌入浆量为1325g，压力为5MPa。

2011年07月19日08:10置换主灌浆（配比 A:B=8.5:1）。2011年07月19日09:30时注入量为1500g，共排浆1500g，压力升至设定压力5MPa。2011年07月20日08:00时注入量为1640g，共排浆1540g，纯灌入浆量100g，压力为5MPa。

2011年07月20日08:10置换封孔浆 PSI-501(配比 A:B=8:1)浆材，2011年07月20日09:00注入量为1400g，共排浆1400g，压力升至设定压力5MPa。2011年07月22日08:00桶内浆液粘度过大，调换新浆。2011年07月24日08:00灌浆结束，注入量为1620g，共排浆1420g，纯灌入浆量200g，压力5MPa。

整个灌浆过程共注入量为5295g，共排浆量为3670g，管占量为340g，纯灌入浆量1285g。（详见附件2：灌浆记录表）



### 7.3 f5 断层试验过程记录剪影





#### 7.4 试件养护

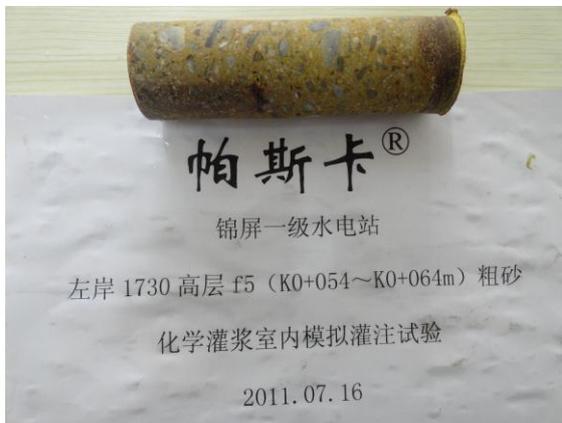




## 7.5 钻取芯样

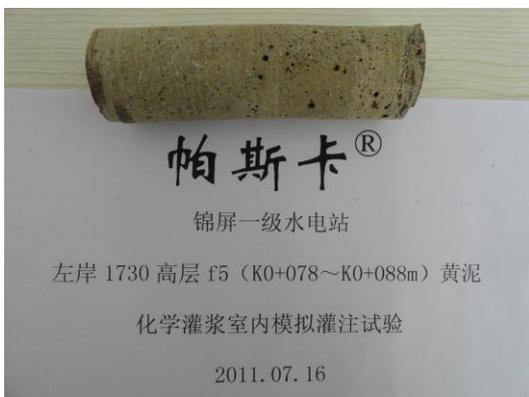
### 7.5.1 粗砂钻取芯样过程







### 7.5.2 黄泥钻取芯样过程





## 8、试验成果总结

8.1、f5 断层泥夹层的断层泥含水量较大、经饱水还原后呈膏态或流塑状，其颗粒粒径细、膏态及流塑状态断层泥的致密性极强、渗透性很小、遇水软化、溶于水、其强度极低。在地下渗透水的挤压下容易渗透溢出。常规水泥浆液在岩层裂隙受压致密状态下很难灌入。而 PSI-501 环氧灌浆材料在经历长时间、高压（5-6MPa）结合先导浆（稀浆）的劈裂、扰动方式下灌注，能置换出其中的大部分水份。也能有效改善其性状，并胶结成具有强度、且不被水解的固结物；

f5 断层“粗砂”含水量较大，其灌注难点在于置换出其中的水分。经过 PSI-501 环氧灌浆材料灌注后，成功置换出其中的水分，并将其固结成具有一定强度的、致密的固结体。在改善其强度的同时，提高其抗渗能力。

8.2、芯样顺利钻取，浆材能浸润和包裹粗砂、黄泥，并将其固结，说明采用 PSI-501 环氧灌浆材料对 f5 断层进行处理是可行的。从试验中我们得出：长时间、高压、慢灌，应是锦屏 f5 断层化灌工程的关键工艺。

8.3、模拟试验的同时,进行了灌浆设备的优选。试验选用的“德曼氏”化学灌浆泵能有效隔离化学浆材，使用和维护及清洗十分方便。泵的灌浆压力和灌浆流量可以进行无极调整，实现动态和静态连续调节并可以连续长时间的作业，满足灌浆工艺及施工要求。



## 9、结束语

根据灌后取芯外观来看，粗砂和黄泥都已固结成整体、且固结体较坚硬，说明环氧灌浆材料已浸入粗砂和黄泥的颗粒间隙内将颗粒固结成整体并达到一定的强度。但是不难看出芯样的表面有不少蜂窝的存在，这是由于粗砂和黄泥的含水率太高，环氧灌浆材料在浸入颗粒空隙内时形成包裹现象，尽管灌注时多次间断性排水排气，也很难将水分排放干净。因此在施工时建议采用高压、慢灌、多次间断性排水排气、延长灌注时间的方法。

因此，采用 PSI-5 系化学浆液，长时间、高压、慢灌并选用“德曼氏”化学灌浆泵是能够使 f5 断层粗砂和黄泥固结成抗力体，使基岩的整体性、岩体变形模量和抗渗特性以及坝基及两岸岩体稳定性等指标得到保证和提高。

深圳市帕斯卡系统建材有限公司

2011 年 10 月 20 日



## 10、附件

### 10.1 附件 1: f5 黄泥模拟化学灌浆记录表

实验室模拟化学灌浆记录表									
试验单位: 深圳市帕斯卡系统建材有限公司									
试验名称: 锦屏一级水电站左岸1730高程f5黄泥化学灌浆室内模拟灌注试验									
取样部位: K0+078~K0+088									
取样日期: 2011.07.14									
材料名称: PSI-501 (9:1.8.5:1.8:1) 灌浆开始时间: 2011年07月16日									
日期	时间			加浆量 (g)	桶内浆量 (g)	注入量 (g)	排浆量 (g)	灌浆压力 (MPa)	备注
	时 h	分 min	计 min						
2011.07.16	15	50		1500	1500				开始灌浆 PSI-501 (9:1)
	16	30			897	603	150		排水, 管占: 180g
	21	10			690	207	100	5	排水
	21	20		800	1490				由粗砂转入800g
2011.07.17	11	00			1467	23		5	
	21	30			1374	93	50	5	排水
2011.07.18	11	00			1301	73	40	5	排水
	15	50			1288	13		5	弃浆 1288g
	16	00		1900	1900				置换 PSI-501 (8.5:1) 灌注
	16	40			1100	800	800		
	23	45			1000	100	60	5	排气
2011.07.19	13	45			860	40		5	
2011.07.20	00	45			880	80	40	5	排气
	15	50			840	40		5	弃浆 840g
	16	00		1800	1800				置换 PSI-501 (8:1) 灌注
	16	50			900	900	900		
	23	00			820	80	40	5	排气
2011.07.21	08	00			770	50	20	5	排气
	15	30			750	20		5	
2011.07.22	08	20			730	20		5	
	23	00			730	0		5	弃浆 730g
	23	00		1150	450				
2011.07.23	08	00			440	10		5	
	23	00			440	0		5	
2011.07.24	08	00			440	0		5	
	15	50			440	0		5	结束灌浆
注入量: 3152 (g) 排浆量: 2200 (g) 管占量: 180 (g) 灌入浆量: 772 (g)									
记录人: 闫召秋 配浆人: 付正海 设备操作人: 郭奎木 负责人: 陈良									



10.2 附件 2: f5 粗砂模拟化学灌浆记录表

试验室模拟化学灌浆记录表

试验单位: 深圳市帕斯卡系统建材有限公司									
试验名称: 锦屏一级水电站左岸1730高层f5粗砂化学灌浆室内模拟灌注试验									
取样部位: K0+054 ~ K0+064 m									
取样日期: 2011.07.14									
材料名称: PSI-501 (9:1, 8.5:1, 8:1)      灌浆开始时间: 2011年07月16日									
日期	时间			加浆量 (g)	桶内浆量 (g)	注入量 (g)	排浆量 (g)	灌浆压力 (MPa)	备注
	时 h	分 min	计 min						
2011.07.16	16	15		1000	1000				开始灌浆 PSI-501 (9:1)
	17	30			44	956	200		排水, 管占: 340g
	17	30		1000	1044				
2011.07.17	21	10			800	244	100	5	泵坏停灌, 灌浆800g轻拌黄泥
	09	10		1000	1000				
	16	15			400	600	200	5	排水
2011.07.18	23	00			310	90	50	5	排水
	08	00			210	100	60	5	排水
	08	00		500	710				
2011.07.19	23	00			680	30		5	
	08	00			665	15		5	弃浆665g
	08	10		1900	1900				置换PSI-501 (8.5:1) 灌注
2011.07.20	09	30			400	1500	1500		
	14	00			360	40		5	
	23	00			280	80	40	5	排气
2011.07.21	08	00			260	20		5	弃浆260g
	08	10		1800	1800				置换PSI-501 (8:1) 灌注
	09	00			400	1400	1400	5	
2011.07.22	14	00			300	100	20	5	排气
	20	00			260	40		5	
	08	00			230	30		5	
2011.07.23	23	00			220	10		5	
	08	00			200	20		5	弃浆200g
	08	10		450	450				
2011.07.24	23	00			430	20		5	
	14	00			430	0		5	
2011.07.24	08	00			430	0		5	结束灌浆, 弃浆330g

注入量: 5295 (g) 排浆量: 3670 (g) 管占量: 340 (g) 灌入浆量: 1285 (g)

记录人: 闫召斌    配浆人: 付运涛    设备操作人: 郭金永    负责人: 付总