

# 基于灌浆前、后波速变化的岩体固结灌浆效果分析

张文举<sup>1,2</sup>, 卢文波<sup>1,2</sup>, 陈明<sup>1,2</sup>, 严鹏<sup>1,2</sup>, 周创兵<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 基于 20 多个大型水利水电工程固结灌浆检测资料, 分别对断层破碎带、风化及开挖影响区等不同条件岩体固结灌浆前、后波速的变化进行分析, 建立固结灌浆后岩体波速提高率与灌浆前岩体波速之间的关系。同时, 对波速变化与变形参数之间的关系进行探讨, 并与瀑布沟水电站进水塔基础固结灌浆试验结果进行比较。结果表明: 待灌浆岩体自身的可灌性是固结效果的决定性因素; 不同工程条件岩体具有相对应的波速提高率范围, 置信水平为 95%条件下, 断层破碎带、风化岩体和开挖影响区岩体波速提高率范围分别为 14%~38%, 10%~25%和 6%~16%; 波速提高率与灌浆前岩体波速之间的关系可以用来对岩体固结灌浆效果进行预测。

**关键词:** 水利工程; 坝基; 固结灌浆; 波速提高率; 可灌性

**中图分类号:** TV 33

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2012)03 - 0469 - 10

## ANALYSIS OF CONSOLIDATION GROUTING EFFECT OF ROCK MASS BASED ON COMPARISON OF WAVE VELOCITY BEFORE AND AFTER GROUTING

ZHANG Wenju<sup>1,2</sup>, LU Wenbo<sup>1,2</sup>, CHEN Ming<sup>1,2</sup>, YAN Peng<sup>1,2</sup>, ZHOU Chuangbing<sup>1,2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China*; 2. *Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China*)

**Abstract:** Based on the detection data of more than twenty large-scale hydropower projects, the wave velocity changes before and after consolidation grouting of rock masses under different conditions of fault fracture zone, weathered zone, and excavation effecting zone are analyzed; and the relationship between the increasing rate of wave velocity after grouting and the wave velocity before grouting is established. Moreover, the relationship between change of wave velocity and deformation parameters of rock mass is discussed. And the comparison between detection data and test results of consolidation grouting for foundation of intake tower in Pubugou hydropower station is carried out. The results show that: (1) The groutability of rock mass is the decisive factor of consolidation grouting effect. (2) Different rock masses have their corresponding fixed ranges of increasing rate of wave velocity. Under confidence interval of 95%, the ranges of increasing rate of wave velocity of fault fracture zone, weathered zone and excavation effecting zone are 14% - 38%, 10% - 25% and 6% - 16%, respectively. (3) The relationship between increasing rate of wave velocity and wave velocity before grouting can be used to predict the effect of consolidation grouting.

**收稿日期:** 2011 - 09 - 25; **修回日期:** 2011 - 12 - 02

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB013501); 国家自然科学基金资助项目(50725931, 51079111)

**作者简介:** 张文举(1984 -), 男, 2009 年毕业于华北水利水电学院水利水电工程专业, 现为博士研究生, 主要从事水工岩石力学及水利水电工程施工技术方面的研究工作。E-mail: zwj@whu.edu.cn。通讯作者: 卢文波(1968 -), 男, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石动力学方面的教学与研究。E-mail: wblu@whu.edu.cn

**Key words:** hydraulic engineering; dam foundation; consolidation grouting; increasing rate of wave velocity; groutability

## 1 引言

随我国水利水电工程建设的发展,坝基岩体的工程地质条件越来越复杂,即使工程地质条件较好的坝基岩体,也不能避免出现断层破碎带及软弱夹层等局部地质缺陷。另外,由于岩体坝基常采用爆破开挖,对坝基岩体产生损伤是不可避免的。固结灌浆是处理不良工程地质条件和开挖引起工程岩体损伤的有效手段。固结灌浆在我国水利水电工程中被广泛应用,因此,对岩体固结灌浆效果的分析与评价具有重要理论意义和应用价值。

对固结灌浆效果的研究,国内外学者做了大量的研究工作。K. Kohkichi 等<sup>[1]</sup>基于固结灌浆现场试验研究,分析灌浆前岩体性状对灌浆的影响,并用流变模型分析固结灌浆的效果。J. S. Lee 等<sup>[2]</sup>结合数值方法和灌浆试验,对节理、裂隙岩体灌浆效果进行了分析。A. Fransson 等<sup>[3]</sup>基于浆液对岩体裂隙的填充效果,提出了1个反映裂隙体积变化的参数来描述高压灌浆的效果。曾纪全等<sup>[4]</sup>结合波速及变形模量的提高,对溪洛渡水电站软弱岩带固结灌浆效果进行分析。周维垣等<sup>[5]</sup>对二滩拱坝坝基弱风化岩体灌浆加固效果进行了研究,并用断裂-损伤力学方法对岩体力学变化机制做了理论分析。

为进一步分析固结灌浆后岩体波速及变形参数的变化规律及其影响因素,为岩体固结灌浆工程提供参考依据,本文基于固结灌浆前、后岩体波速的变化,分析不同工况下岩体固结灌浆后岩体波速的提高与灌浆前岩体波速之间的关系,并对波速的提高与岩体变形(弹性)模量之间的变化关系进行了探讨;最后将分析结果与瀑布沟水电站进水塔基础固结灌浆试验前、后声波检测数据进行对照,以验证建立的关系式的可靠性。

## 2 检测方法 with 评价指标

### 2.1 灌浆效果检测方法

灌浆效果是以透水率、变形(弹性)模量及声测波速的大小及其提高的程度来判断的。固结灌浆工程中,常采用的物探技术有声波检测、钻孔模量测试、压水试验及钻孔电视等。其中,声波检测具有直观、检测速度快、检测成果及时等优点。尽管现

场岩体特性复杂,不同部位岩体性质差异较大,甚至同一部位岩体性质也不相同;且声波检测的跨孔(或单孔)以及钻孔位置的不同,检测结果也有一定差异,但波速大小及其提高的程度总体上能反映固结灌浆的效果。因此,目前工程实践中,固结灌浆效果的检测以声测波速为主,辅以压水试验、岩体变形模量检测等。

### 2.2 评价指标

根据现行规范<sup>[6-7]</sup>,固结灌浆工程质量的检测可采用钻孔压水试验方法,但宜采用测量岩体声测波速和岩体弹性模量方法。

岩体声测波速与动弹性模量具有内在的联系,在均匀、各向同性的无限大岩体中,纵波波速和动弹性模量关系为

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1)$$

式中:  $V_p$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $E_d$  分别为岩体的纵波波速、密度、泊松比和动弹性模量。

目前,固结灌浆效果的评价主要基于岩体物探试验参数的绝对值指标及相关参数的相对提高率指标。绝对值指标主要指灌浆后岩体波速、模量及透水率的大小;相对提高率指标主要指岩体声测波速及变形(弹性)模量的提高率。声测波速和变形(弹性)模量提高率分别为

$$\eta_v = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$\eta_E = \frac{E_1 - E_0}{E_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $\eta_v$ ,  $\eta_E$  分别为岩体波速和变形(弹性)模量提高率;  $V_0$ ,  $V_1$  分别为灌浆前、后岩体声测波速;  $E_0$ ,  $E_1$  分别为灌浆前、后变形(弹性)模量。

## 3 岩体固结灌浆效果实测资料

### 3.1 断层破碎带

断层是工程中常遇到的不良地质问题之一,规模不一。含断层带岩体一般较破碎,常充填软泥和风化碎屑。为保证断层破碎带等复杂地基的固结灌浆效果,有时采用化学灌浆或水泥-化学复合灌浆来处理。

我国采用固结灌浆技术对断层破碎带处理的工程规模大,实例多,如三峡工程  $F_{1096}$ ,  $F_{215}$  断层、

小浪底工程 F<sub>1</sub> 断层、锦屏 I 级水电站 f<sub>5</sub> 断层破碎带、天生桥二级 II 号引水洞断层破碎带、龙滩水电站 f<sub>60</sub> 断层、筱溪水电站 F<sub>28</sub> 断层等<sup>[8-17]</sup>，统计结果见表 1。

### 3.2 风化岩体

坝基岩体往往会遇到不同程度的风化问题，为充分发挥风化带基岩潜力，采用灌浆技术处理坝基岩体，使其满足设计要求，同时也可提高建基面开挖高程，缩短工期，节省投资。因此，大型水利水

电工程中，不可避免地会采用微(弱)风化岩体作为坝基。风化岩体固结灌浆处理的典型工程有三峡工程、二滩水电站、锦屏 I 级水电站、紧水滩水电站坝基、盘溪坝基等<sup>[8, 18-21]</sup>，统计结果见表 2。

### 3.3 开挖影响区

建基面开挖时，爆破荷载引起岩体损伤；爆破开挖后，岩体赋存环境的改变及岩体变形进一步导致岩体的物理力学特性发生变化，形成开挖影响区。影响区内岩体的物理力学性质弱化，声波速度降

表 1 断层破碎带固结灌浆前、后波速统计结果<sup>[8-17]</sup>

Table 1 Statistic results of wave velocities of fault fracture zones before and after consolidation grouting<sup>[8-17]</sup>

工程名称	灌浆部位	岩体特性	灌浆材料	$V_0/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$V_1/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$\eta_V/\%$
三峡工程 F <sub>1096</sub> 断层	北壁	角砾岩、碎裂花岗岩	水泥-化学复合	4 563	5 581	22.7
	南壁		水泥-化学复合	3 360	4 916	46.3
三峡工程 F <sub>215</sub> 断层	主断层带	断层、辉绿岩脉	水泥-化学复合	4 584	5 246	15.0
小浪底工程 F <sub>1</sub> 断层	10 <sup>#</sup> 检测孔	层状砂页岩	水泥-化学复合	-	-	16.7
锦屏 I 级水电站 f <sub>5</sub> 断层破碎带	左岸基础断层	主要为角砾岩、碎裂岩	水泥	2 664	4 789	79.0
	断层影响带			4 662	5 301	13.7
天生桥二级 II 号引水洞断层破碎带	引水洞	主要为过灰岩和白云质灰岩	水泥	3 800	4 200	10.0
龙滩水电站 f <sub>60</sub> 断层	右岸坝基	灰绿泥夹碎石	水泥-化学复合	-	-	17.2
筱溪水电站 F <sub>28</sub> 断层	厂房	主要为黑色炭泥质、炭质板状页岩	化学灌浆	-	-	29.5
龙羊峡水电站坝基断层	F <sub>71</sub> 断层	花岗闪长岩	水泥	3 500	4 360	25.0
	F <sub>73</sub> 断层			2 560	3 100	21.0
铜街子水电站坝基断层	断层	过灰岩和白云质灰岩	水泥	2 550	3 884	55.0
盘溪坝基断层及断层影响带	断层带	砂岩	水泥	3 316	3 600	8.6
	断层影响带			3 795	4 187	10.3

表 2 风化岩体固结灌浆前、后波速统计结果<sup>[8, 18-21]</sup>

Table 2 Statistic results of wave velocities of weathered rock masses before and after consolidation grouting<sup>[8, 18-21]</sup>

工程名称	灌浆部位	岩体特性	灌浆材料	$V_0/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$V_1/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$\eta_V/\%$
三峡工程美 III 线 5 号平洞弱风化岩体	B 区	弱(微)风化云斜长花岗岩	环氧树脂	4 460	4 940	10.8
	C 区		化学浆液	-	5 272	8.0
锦屏 I 级水电站风化岩体	左岸抗力体	煌斑岩脉，弱(强)风化	水泥	3 262	4 322	32.0
	3 <sup>#</sup> 坝段	微风化花岗斑岩为主，局部弱风化	水泥	3 900	5 200	33.3
	4 <sup>#</sup> 坝段	微风化花岗斑岩，岩体较完整	水泥	3 590	4 530	26.2
	5 <sup>#</sup> 坝段	新鲜~微风化花岗斑岩	水泥	4 000	5 100	27.5
	16 <sup>#</sup> 坝段	微风化花岗斑岩为主，局部弱风化	水泥	5 700	6 400	12.3
	17 <sup>#</sup> 坝段	微风化花岗斑岩，岩体较完整	水泥	4 800	5 900	22.9
紧水滩水电站坝基	18 <sup>#</sup> 坝段	微风化花岗斑岩，岩体较完整	水泥	4 800	5 600	16.7
	坝基	弱风化带下部，砂岩	水泥	3 335	3 559	6.7
	坝基	微风化带，砂岩	水泥	4 001	4 422	10.5
二滩拱坝坝基	坝基	弱风化正长岩	水泥-化学复合	-	-	16.0

低, 如小湾拱坝坝肩置换洞开挖松动圈与未扰动区围岩声波相比<sup>[22]</sup>, 开挖松动圈围岩波波速降低率约为 20%; 万家寨水利枢纽<sup>[23]</sup>坝基清理前、后, 岩体声测试验表明, 卸荷深度一般为 1.0 m, 最深达 2.1 m, 波波速下降率为 5.4%~33.0%, 平均值为 10%左右; 构皮滩坝基岩体卸荷声测试验<sup>[24]</sup>结果表明, 建基面卸荷深度为 6 m, 卸荷带岩体平均波波速降低 7%。固结灌浆处理可提高基岩的力学性能及稳定性, 弥补开挖引起的岩体损伤。构皮滩岸坡坝段无盖重灌浆试验及小湾、万家寨、金川坝址区、

百色水利枢纽坝基<sup>[8, 25-27]</sup>开挖影响区灌浆效果统计结果见表 3。

固结灌浆后, 岩体物理力学性能的改善程度常用变形(弹性)模量作为评判指标。目前常采用钻孔弹模法测试岩体固结灌浆效果。由式(1)可知, 均匀、各向同性的岩体波速与弹性模量具有一定程度正相关关系, 因此, 固结灌浆后波速的提高与变形(弹性)模量也有一定的联系。龙羊峡、构皮滩、锦屏 I 级、向家坝、溪洛渡等工程<sup>[4, 8, 28-29]</sup>固结灌浆后波速及变形模量变化对比见表 4。

表 3 开挖影响区岩体固结灌浆前、后波速统计结果<sup>[8, 25-27]</sup>

Table 3 Statistic results of wave velocities of rock masses in excavation disturbed zones before and after consolidation grouting<sup>[8, 25-27]</sup>

工程名称	灌浆部位	岩性	灌浆材料	$V_0/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$V_1/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$\eta_v/\%$
构皮滩水电站岸坡段	2#坝段(爆破卸荷, 岩体较破碎)	茅口组灰岩	水泥	4 597	4 882	7.86
	开挖松动圈		水泥	<4 800	4 620~5 130	10.51
小湾水电站坝肩	爆破影响区	主要为黑云花岗片麻岩和闪斜长片麻岩	水泥	350~4 500	4 700~5 270	8.27
	未扰动区		水泥	>4 500	5 000~5 450	4.50
万家寨水电站	卸荷岩体及泥灰岩集中带	中厚层灰岩、薄层泥灰岩、竹叶状灰岩	水泥	3 590	4 720	16.90
金川水电站坝址区	两岸卸荷岩体	薄~厚状变质砂岩、夹板岩和千枚岩	水泥	3 400~4 200	4 330~4 500	16.00
百色水利枢纽坝	4#~7#坝段, 建基面下 0.0~2.0 m 范围	辉绿岩, 波速松弛层, 岩体破碎	水泥	-	-	2.10~15.50

表 4 固结灌浆后波速、变形模量提高率对比<sup>[4, 8, 28-29]</sup>

Table 4 Comparisons of increasing rates of wave velocity and deformation modulus after consolidation grouting<sup>[4, 8, 28-29]</sup>

工程名称	灌浆部位	岩性	$\eta_v/\%$	变形模量/GPa		$\eta_E/\%$	
				灌浆前	灌浆后		
龙羊峡水电站	右岸坝肩	花岗闪长岩(F18 断层)	16.00	5.50	14.50	164.00	
	右岸坝肩	花岗闪长岩(F120 断层)	38.00	2.50	8.30	232.00	
构皮滩岸坡坝段	19#坝段	茅口组灰岩(较完整岩体)	4.50	16.42	20.60	25.77	
	2#坝段	茅口组灰岩(卸荷、较破碎)	7.86	2.96	3.70	27.83	
锦屏 I 级高拱坝	左岸基础	砂(板)岩(III 级)	5.60	10.18	12.46	22.40	
		砂(板)岩(III2 级)	5.90	4.51	5.12	13.50	
向家坝大坝基础	一试验区	砂(板)岩(IV2 级)	31.10	2.90	4.34	49.70	
		强风化砂岩(III2~IV 级)	6.40	1.70	2.26	32.90	
三峡工程美 III 线 5 号平洞	二试验区	强风化砂岩(III2~IV 级)	9.60	1.70	2.91	71.20	
	B 区	弱风化云斜长花岗岩下部	10.80	1.15	1.93	68.00	
溪洛渡水电站坝基	右岸一试验区	C 区	弱风化云斜长花岗岩下部	8.00	26.00	47.40	80.00
		玄武岩(II 级)	1.68	13.66	14.83	8.57	
		玄武岩(III 级)	3.79	9.87	11.87	20.26	
		玄武岩(III2 级)	8.11	5.20	7.66	47.31	
		玄武岩(IV 级)	33.10	1.39	5.74	312.90	

### 4 基于波速提高率的灌浆效果分析

影响岩体固结灌浆效果因素很多，其中岩体的可灌性是决定性因素。因此，建立固结灌浆效果与灌浆前岩体参数(反映其可灌性)的数学统计关系式，可以用来对固结灌浆效果预测。

#### 4.1 波速提高率与灌浆前岩体波速关系经验公式拟合

根据表 1~3，建立波速提高率与灌浆前岩体波速关系如下：

(1) 对断层破碎带岩体，有

$$\eta_V = 6.449e^{-0.0008783V_0} \quad (N=11, R=0.87) \quad (4)$$

(2) 对风化岩体，有

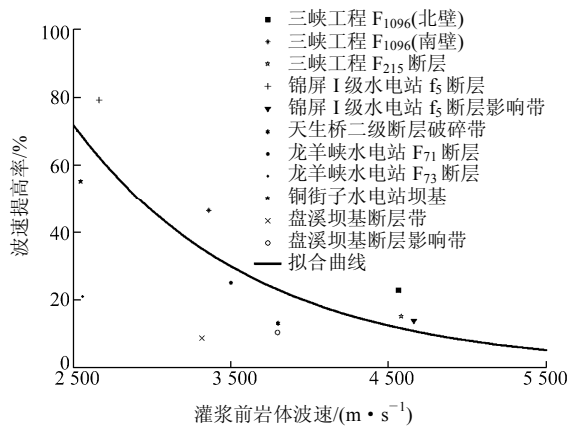
$$\eta_V = 1.556e^{-0.0004853V_0} \quad (N=11, R=0.71) \quad (5)$$

(3) 对开挖影响区岩体，有

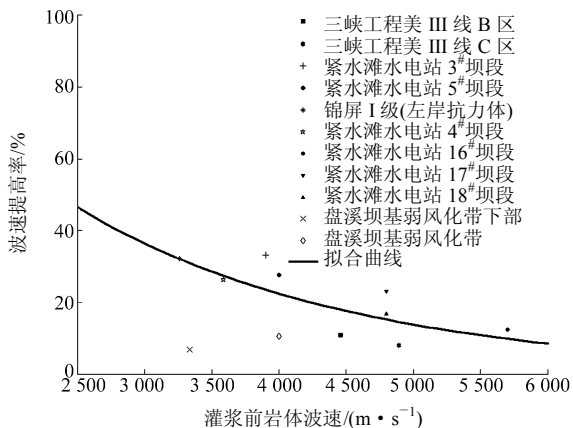
$$\eta_V = 2.987e^{-0.0007851V_0} \quad (N=6, R=0.98) \quad (6)$$

式中： $N$ 为工程实例个数， $R$ 为拟合相关系数。式(4)~(6)适用波速范围分别为 2 500~5 000，3 000~6 000 和 3 500~5 500 m/s。

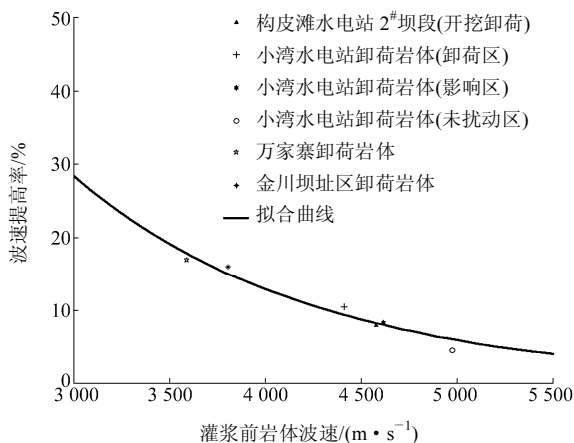
断层破碎带、风化岩体和开挖影响区岩体波速提高率与灌浆前岩体波速的拟合曲线如图 1 所示。



(a) 断层破碎带



(b) 风化岩体



(c) 开挖影响区岩体

图 1 不同条件岩体的  $V_0$ - $\eta_V$  关系

Fig.1 Relationships of  $V_0$ - $\eta_V$  of different rock masses

从图 1 可以看出，波速提高率随灌浆前岩体波速增大而递减的趋势基本一致。

对固结灌浆后波速提高的预测和分析实际是求置信度为  $(1-\alpha)$  的波速提高率的置信区间，计算式为

$$P(\eta_V < \eta_V < \bar{\eta}_V) = 1 - \alpha \quad (7)$$

式中： $\bar{\eta}_V$ ， $\underline{\eta}_V$  分别为波速提高率上、下限； $\alpha$  为显著性水平。

根据表 1~3 中所列工程实例的波速提高率与灌浆前岩体波速，对其进行拟合，结果如图 2 所示，拟合得到的  $\eta_V$  与  $V_0$  的关系式为

$$\eta_V = 5.76e^{-0.00084V_0} \quad (N=28, R=0.89) \quad (8)$$

置信水平  $(1-\alpha)$  为 80% 的上、下限曲线关系式分别如下：

$$\bar{\eta}_V = 9.55e^{-0.000713V_0} \quad (N=28, \text{上限}) \quad (9)$$

$$\underline{\eta}_V = 2.71e^{-0.00105V_0} \quad (N=28, \text{下限}) \quad (10)$$

根据不同条件岩体固结灌浆后波速提高率统计，置信水平取为 95% 的波速提高率为：断层破碎带岩体 14%~38%，风化岩体 10%~25%，开挖影响区岩体 6%~16%。

岩体自身构造及其工程特性是固结灌浆效果的决定性因素<sup>[30-32]</sup>。岩体声测波速反映岩体性质，宏观上讲，岩体密度越大，节理、裂隙等缺陷越少，波速越高，反之亦然。灌浆前岩体分布有节理、裂隙，裂隙内可能存在空气、水或变质软弱体，声波在其中传播时，波速值相对较小，另外，声波传播过程中也易发生折射和反射，引起声波传播路径改

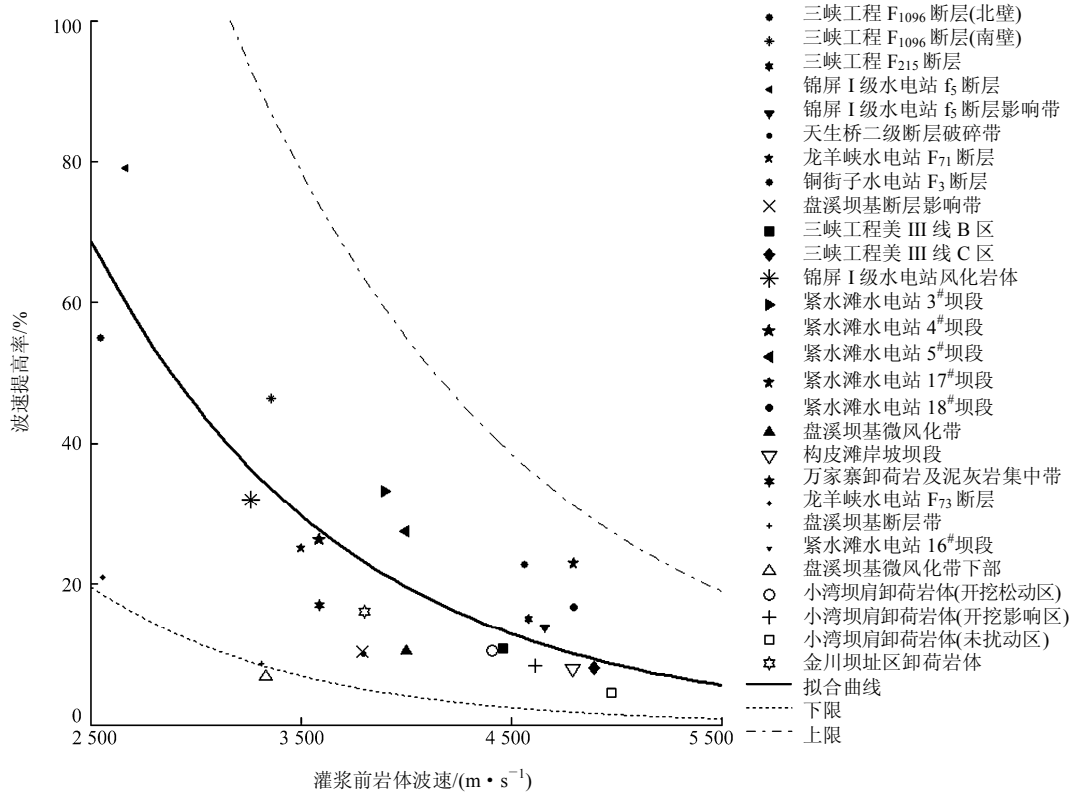


图2 波速提高率与灌浆前岩体波速关系

Fig.2 Relationships between increasing rate of wave velocity and wave velocity before grouting

变；灌浆后，节理、裂隙被结石体充填后，密度增大，声测波速值提高。一般来说，灌浆前岩体孔隙率越大，裂隙越密集，岩体密度相对较小，灌浆前岩体波速较小，固结灌浆后节理、裂隙得到充填，波速改变相对较大。正如图1所反映的： $V_0$ 值低的岩体 $\eta_v$ 值较高， $V_0$ 值高的岩体 $\eta_v$ 值较低。

#### 4.2 波速提高率与变形模量提高率关系

变形(弹性)模量是反映岩体力学参数的重要指标，但其现场测量耗时、费力、难度大，选点数量及部位对结果影响较大；相对而言，声波检测更加快速、便捷。因此，建立 $\eta_E-\eta_v$ 关系对固结灌浆效果分析具有重要应用价值。

在均质、各向同性假设条件下，由式(1)~(3)可以推导 $\eta_E-\eta_v$ 具有二次函数关系。根据表4统计资料拟合的 $\eta_E-\eta_v$ 关系如图3所示，其表达式为

$$\eta_E = -0.0636\eta_v^2 + 8.7113\eta_v - 13.923 \quad (N=15, R=0.81) \quad (11)$$

### 5 瀑布沟水电站工程实例讨论

#### 5.1 瀑布沟水电站进水塔基础固结灌浆工程实例

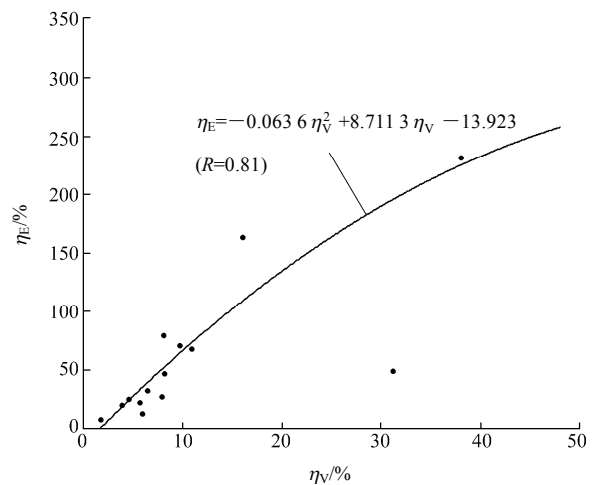


图3  $\eta_E-\eta_v$ 关系

Fig.3 Relationship between  $\eta_E$  and  $\eta_v$

瀑布沟水电站位于大渡河中游四川省境内，是一座以发电为主，兼有防洪、拦沙等综合作用的大型水电站枢纽工程，装机6台，总容量3300MW。电站枢纽由拦河大坝、引水发电建筑物、泄洪洞、放空洞、引水工程部分组成。

水电站进水口基础固结灌浆试验<sup>[33]</sup>分为3个试验区：(1) I区为暗绿色玄武岩，以弱风化为主。受边坡卸荷、地质构造面及风化影响，裂隙面大部分

微张、锈蚀及充填泥碎屑。(2) II 区的岩性大部分为弱风化带上部花岗岩，弱卸荷。(3) III 区为 3<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>引水洞塔基外侧的断层破碎带，属 IV~V 级岩体。

各试验区分别设 3 个灌前检查孔，并在其邻近设 3 个灌后孔，分别进行了声波和变形(弹性)模量检测。固结灌浆试验波速统计如表 5 所示。为了分析灌浆前不同波速区岩体灌浆效果，分别将 3 个试验区灌浆前不同波速区段测点与其灌浆后对应点进行对比(见表 6 和图 4)，变形(弹性)模量统计如表 7 所示。

由表 5~7 及图 4 可知：

(1) I 区岩体以弱风化为主，固结灌浆后平均波速提高了 14.7%；II 区岩体以弱风化、弱卸荷为主，灌浆后波速提高了 14.7%；III 区处于断层破碎带，可灌性较好，灌浆后平均波速提高了 32.7%。由此可见，固结灌浆效果取决于岩体性状(可灌性)。

(2) 从图 3 可知，不同试验区岩体固结灌浆前

波速分布频率差异较大，固结灌浆后不同区段波速分布相似，说明岩体整体性和均匀性得到明显提高。

(3) 实测岩体声波速度和钻孔变形(弹性)模量间具有一定的对应关系，但变形(弹性)模量改变值总体偏低。

### 5.2 拟合公式计算值与实测值对比分析

固结灌浆后实测波速提高率与计算值(式(8))对比见表 8，由表 8 可以看出，各试验区波速提高率实测值与拟合公式计算值相差不大，两者吻合较好。因此，本文所得的岩体固结灌浆波速提高率的拟合公式(式(8))可以用来对一般工程固结灌浆效果进行预测分析。

利用式(11)计算的变形模量值与实际值相差较大。这是由于试验区灌浆后岩体变形模量和弹性模量检测点间距为 5 m，测点数量较少，没有获得低变形(弹性)模量孔段的数据。对单孔而言，实测值沿孔深的分布具有一定离散性。

表 5 瀑布沟水电站进水塔基础固结灌浆试验波速统计

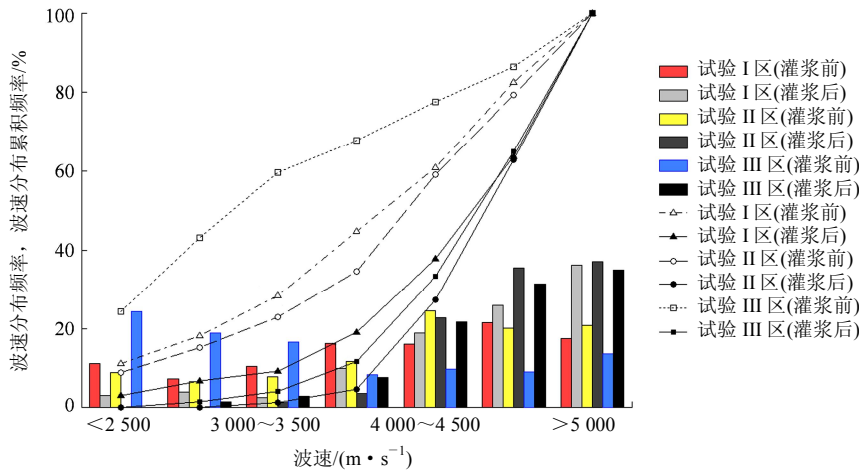
Table 5 Statistics of wave velocity in consolidation grouting experiment for intake tower foundation in Pubugou hydropower station

部位	岩体性质及主要工程问题	测点个数		波速最小值/(m·s <sup>-1</sup> )		波速最大值/(m·s <sup>-1</sup> )		波速平均值/(m·s <sup>-1</sup> )		ηv/%
		灌浆前	灌浆后	灌浆前	灌浆后	灌浆前	灌浆后	灌浆前	灌浆后	
I 区	花岗岩，局部为玄武岩、弱风化	453	453	1 721	2 010	5 840	6 672	4 027	4 620	14.7
II 区	花岗岩，弱风化带上部、弱卸荷	453	453	1 954	3 334	6 897	6 064	4 179	4 795	14.7
III 区	花岗岩，断层破碎带	448	473	1 316	2 773	6 559	6 226	3 547	4 708	32.7

表 6 瀑布沟进水塔基础固结灌浆试验波速分布统计表

Table 6 Statistics of wave velocity in consolidation grouting experiment for intake tower foundation in Pubugou hydropower station

I 区				II 区				III 区			
测点个数	灌浆前平均波速/(m·s <sup>-1</sup> )	灌浆后平均波速/(m·s <sup>-1</sup> )	波速提高率/%	测点个数	灌浆前平均波速/(m·s <sup>-1</sup> )	灌浆后平均波速/(m·s <sup>-1</sup> )	波速提高率/%	测点个数	灌浆前平均波速/(m·s <sup>-1</sup> )	灌浆后平均波速/(m·s <sup>-1</sup> )	波速提高率/%
50	2 198.7	4 362.1	98.4	40	2 189.4	5 023.6	129.4	102	2 176.5	4 704.4	116.1
30	2 710.7	4 089.4	50.9	29	2 764.4	4 961.6	79.5	84	2 754.4	4 799.5	74.2
47	3 289.0	4 384.8	33.3	35	3 222.0	4 798.6	48.9	72	3 233.9	4 517.5	39.7
74	3 755.5	4 558.4	21.4	53	3 772.6	4 786.8	26.9	36	3 735.1	4 591.2	22.9
73	4 223.6	4 564.7	8.1	111	4 259.2	4 742.7	11.4	43	4 257.9	4 582.9	7.6
98	4 775.1	4 784.3	0.2	91	4 743.1	4 751.0	0.2	40	4 746.3	4 762.4	0.3



注：柱状图指波速分布频率；曲线指波速分布累积频率

图 4 灌浆前、后波速频率分布

Fig.4 Distribution of wave velocity frequency before and after grouting

表 7 瀑布沟进水塔基础固结灌浆试验变形(弹性)模量统计表

Table 7 Statistics of deformation(elastic) modulus in consolidation grouting experiment for intake tower foundation in Pubugou hydropower station

部位	状态	不同变形模量取值范围内测点个数						变形模量 平均值/ GPa	$\eta_E$ / %	
		<1 GPa	1~2 GPa	2~3 GPa	3~4 GPa	4~5 GPa	5~6 GPa			>6 GPa
I 区	灌浆前	0	7	2	3	4	3	2	3.81	14.4
	灌浆后	0	1	2	3	11	1	3	4.36	
II 区	灌浆前	3	1	2	4	1	4	6	4.30	4.2
	灌浆后	0	0	3	5	7	3	3	4.48	
III 区	灌浆前	2	6	8	5	1	1	0	2.67	50.2
	灌浆后	0	1	6	5	4	2	3	4.01	

部位	状态	不同弹性模量取值范围内测点个数						弹性模量 平均值/ GPa	$\eta_E$ / %	
		<1 GPa	1~2 GPa	2~3 GPa	3~4 GPa	4~5 GPa	5~6 GPa			>6 GPa
I 区	灌浆前	0	5	3	0	3	1	9	6.27	36.7
	灌浆后	0	0	2	1	0	3	15	8.57	
II 区	灌浆前	1	1	1	1	3	1	13	7.87	18.7
	灌浆后	0	0	0	1	0	2	18	9.34	
III 区	灌浆前	1	1	4	5	4	2	6	4.88	102.7
	灌浆后	0	0	0	0	0	4	17	9.89	

注：1~2 GPa 等指变形(弹性)模量取值范围。

表 8 瀑布沟进水塔基础实测值与计算值对比

Table 8 Comparison between calculating values and measured values of intake tower foundation in Pubugou hydropower station

部位	灌浆前岩体波速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	波速提高率/%	
		计算值	实测值
I 区	4 027	19	14.7
II 区	4 179	17	14.7
III 区	3 547	29	32.7

## 6 结 论

通过对不同条件岩体固结灌浆后波速变化及其与岩体力学参数关系研究，并与瀑布沟水电站进水塔基础 3 个试验区固结灌浆试验比较，得出以下主要结论：

(1) 岩体本身的可灌性是固结灌浆效果的决定性因素，声测波速反映岩体性状及构造，岩体固结



效果可以用波速提高率来判断。

(2) 基于固结灌浆统计资料, 建立 $\eta_V-V_p$ 之间的关系, 与瀑布沟进水塔基础固结灌浆试验进行比较, 吻合较好。

(3) 对 $\eta_E-\eta_V$ 关系进行初步探讨, 但变形(弹性)模量测点相对较少, 有待于进一步补充和完善。由于工程岩体的复杂性, 每个工程有自己的独特性, 变形(弹性)模量值为局部测点结果, 因此在实际应用中要考虑检测部位及测点数量的影响。

### 参考文献(References):

- [1] KOKICHI K, TETSUO I, YOSHITADA M, et al. In situ experimental studies on improvement of rock masses by grouting treatment[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1997, 34(3): 594.
- [2] LEE J S, BANG C S, MOK Y J, et al. Numerical and experimental analysis of penetration grouting in jointed rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(7): 1 027 - 1 037.
- [3] FRANSSON A, TSANG C F, RUTQVIST J, et al. A new parameter to assess hydro-mechanical effects in single-hole hydraulic testing and grouting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(7): 1 011 - 1 021.
- [4] 曾纪全, 来结合, 全海. 溪洛渡水电站软弱岩带固结灌浆试验效果检测[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增): 61 - 69.(ZENG Jiquan, LAI Jiehe, QUAN Hai. Effect inspection of grouting test for weak batholith in Xiluodu hydroelectric power station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp.): 61 - 69.(in Chinese))
- [5] 周维垣, 杨若琼, 剡公瑞. 二滩拱坝坝基弱风化岩体灌浆加固效果研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(2): 138 - 150.(ZHOU Weiyuan, YANG Ruoqiong, YAN Gongrui. Study on the efficacy of grouting reinforcement of slightly weathered rock masses at the Ertan arch dam abutments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(2): 138 - 150.(in Chinese))
- [6] 中华人民共和国行业标准编写组. SL62—94 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1994.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL62—94 Technical specification for cement grouting construction of hydraulic structures[S]. Beijing: China Water Power Press, 1994.(in Chinese))
- [7] 中华人民共和国行业标准编写组. DL/T5148—2001 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DL/T5148—2001 Technical specification for cement grouting construction of hydraulic structures[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.(in Chinese))
- [8] 哈秋龄, 谭日陞. 三峡工程基础处理灌浆的研究[C]// 熊厚金主编. 国际岩土锚固与灌浆新进展. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996: 101 - 112.(HA Qiuling, TAN Risheng. Foundation grouting treatment research of Three Gorges Project[C]// XIONG Houjin ed. New Advancement in Rock and Soil Anchoring and Grouting. Beijing: China Architecture and Building Press, 1996: 101 - 112.(in Chinese))
- [9] 卢文波, 舒大强. 长江三峡水利枢纽永久船闸南五竖井 F<sub>1096</sub> 断层处理水泥 - 化学复合灌浆钻孔静弹模、声波检测报告[R]. 武汉: 武汉大学, 2006.(LU Wenbo, SHU Daqiang. The elastic modulus and wave test report of cement-chemical compound-grouting at fault F<sub>1096</sub> under permanent shiplock of fifth shaft of the Three Gorges Project at the Yangtze River[R]. Wuhan: Wuhan University, 2006.(in Chinese))
- [10] 文海家, 姜命强, 陈云. 三峡永久船闸 F<sub>1096</sub> 断层复合灌浆处理及效果检验[J]. 水力发电学报, 2006, 25(5): 102 - 106.(WEN Haijia, JIANG Mingqiang, CHEN Yun. Compound-grouting and effect-verification at fault F<sub>1096</sub> under permanent ship lock of Three Gorges Project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(5): 102 - 106.(in Chinese))
- [11] 孙金库, 冉懋鸽. 不良地质洞段高压固结灌浆处理[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3 196 - 3 202.(SUN Jinku, RAN Maoge. High pressure consolidation grouting for tunnel sections with unfavorable geology condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3 196 - 3 202.(in Chinese))
- [12] 吴火兵, 颜婉鸿. 锦屏一级水电站 f5 断层水泥固结灌浆试验[J]. 人民长江, 2008, 39(19): 70 - 72.(WU Huobing, YAN Wanhong. Cement consolidation grouting test at fault f5 of Jinping I hydropower station[J]. Yangtze River, 2008, 39(19): 70 - 72.(in Chinese))
- [13] 漆巨彬, 刘涛. 水泥 - 化学复合灌浆技术在龙滩水电站右岸坝基 F60 断层加固处理的工程实录[C]// 蒋硕志, 汪在芹主编. 第 12 次全国化学灌浆学术交流会论文集. 武汉: 长江出版社, 2008: 286 - 292.(QI Jubin, LIU Tao. Cement-chemical compound grouting engineering record of fault F60 reinforcement treatment in the right-bank dam foundation of Longtan hydropower station[C]// JIANG Shuozhong, WANG Zaiqin ed. Proceedings of the 12th National Symposium on Chemical Grouting. Wuhan: Changjiang Press, 2008: 286 - 292.(in Chinese))
- [14] 李丙寅. 黄河李家峡电站左岸 F<sub>26</sub> 断层化学灌浆试验分析[J]. 西北水电, 2006, (3): 75 - 77.(LI Bingyin. Analysis of chemical grouting tests of fault F<sub>26</sub> for left bank of Lijiaxia hydropower station in Yellow River[J]. Northwest Water Power, 2006, (3): 75 - 77.(in Chinese))
- [15] 潘志新, 张海军, 郭孟起, 等. 小浪底大坝 F1 断层的水泥和化学复合灌浆[J]. 人民黄河, 2003, 25(9): 42 - 43.(PAN Zhixin, ZHANG Haijun, GUO Mengqi, et al. Cement and chemical compound grouting of fault F1 in Xiaolangdi dam project[J]. Yellow River, 2003, 25(9):

- 42 - 43.(in Chinese))
- [16] 邹品福. 铜街子水电站坝基高压固结灌浆[J]. 四川水力发电, 1992, (5): 17 - 22.(ZOU Pinfu. High pressure consolidation grouting for dam foundation of Tongjiezi hydropower station[J]. Sichuan Water Power, 1992, (5): 17 - 22.(in Chinese))
- [17] 中国水力发电工程编写组. 中国水力发电工程(施工卷)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 199 - 200.(China Hydropower Engineering Compilation Group. Hydropower engineering of China(Construction Volume)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000: 199 - 200.(in Chinese))
- [18] 王 胜, 祝华平, 黄润秋, 等. 锦屏一级水电站煌斑岩脉化学复合灌浆试验研究[J]. 探矿工程, 2009, 36(11): 60 - 64.(WANG Sheng, ZHU Huaping, HUANG Runqiu, et al. Analysis of chemical compound grouting tests of Jinping I hydropower station lamprophyre dike[J]. Exploration Engineering, 2009, 36(11): 60 - 64.(in Chinese))
- [19] 孙 钊. 大坝基岩灌浆[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2004: 102 - 120.(SUN Zhao. Grouting in dam's rock foundation[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004: 102 - 120.(in Chinese))
- [20] 马国彦, 常振华. 岩体灌浆排水锚固理论与实践[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2003: 387 - 400.(MA Guoyan, CHANG Zhenhua. Theory and practice of grouting drainage and anchorage of rock mass[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003: 387 - 400.(in Chinese))
- [21] 李小波, 吴 莉, 祝华平. 锦屏一级水电站左岸深部裂缝岩体灌浆试验研究[J]. 水电站设计, 2009, (1): 54 - 56.(LI Xiaobo, WU Li, ZHOU Huaping. Experimental study on rock grouting for deep crack in left bank of Jinping I hydropower station[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2009, (1): 54 - 56.(in Chinese))
- [22] 黄海峰. 高压固结灌浆在坝肩地质缺陷处理中的应用[J]. 水力发电, 2009, 35(9): 73 - 74.(HUANG Haifeng. Application of high pressure consolidation grouting in the geological defect treatment of dam abutment[J]. Water Power, 2009, 35(9): 73 - 74.(in Chinese))
- [23] 杜长青, 高义军, 陈书文. 万家寨水利枢纽利用岩的开挖卸荷及对策[J]. 山西水利科技, 2001, (3): 82 - 84.(DU Changqing, GAO Yijun, CHEN Shuwen. Excavation unloading of rock depended by Wanjiashai dam and its countermeasures[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2001, (3): 82 - 84.(in Chinese))
- [24] 李维树, 周火明, 陈 华, 等. 构皮滩水电站高拱坝建基面卸荷岩体变形参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1 333 - 1 338.(LI Weishu, ZHOU Huoming, CHEN Hua, et al. Study of unloading rock mass deformation parameters for high arch dam foundation base of Goupitan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1 333 - 1 338.(in Chinese))
- [25] 李维树, 姚春雷, 邹德兵. 构皮滩水电站岸坡坝段无盖重灌浆试验研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(1): 54 - 56.(LI Weishu, YAO Chunlei, ZHOU Debin. Experimental study on non-cover-weight grouting at bank slope monolith of Goupitan hydropower station[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(1): 54 - 56.(in Chinese))
- [26] 钱 宁. 大渡河金川水电站两岸卸荷岩体固结灌浆浆液试验工艺研究[J]. 西北水电, 2008, (6): 55 - 57.(QIAN Ning. Study of test technology for consolidation grouting of stress-released rock on both banks of Jinchuan hydropower station[J]. Northwest Water Power, 2008, (6): 55 - 57.(in Chinese))
- [27] 罗继勇. 百色水利枢纽主要工程地质问题及施工处理[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 563 - 568.(LUO Jiyong. Engineering geological problems and preventive measures at multipurpose hydropower project in Baise[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 563 - 568.(in Chinese))
- [28] 沙 椿, 黄泽孝. 溪洛渡水电站坝基固结灌浆试验检测[J]. 水电站设计, 2003, 19(3): 65 - 69.(SHA Chun, HUANG Zexiao. Inspection of Xiluodu hydropower station dam foundation consolidation grouting test[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2003, 19(3): 65 - 69.(in Chinese))
- [29] 周 钟, 陈秋华, 陈 岗, 等. 锦屏一级高拱坝复杂地基加固处理设计[C]// 中国大坝技术发展水平与工程实例. 北京: 中国水利电力出版社, 2007: 248 - 255.(ZHOU Zhong, CHEN Qiuhua, CHEN Gang, et al. High arch dam complex foundations reinforcement dam design at Jinping I hydropower station[C]// Large-scale dam construction development and cases in China. Beijing: China Water Power Press, 2007: 248 - 255.(in Chinese))
- [30] 袁继国, 田峰巍. 水溶性聚氨酯在节理岩体中的可灌性研究[J]. 水利学报, 1998, (增 1): 88 - 101.(YUAN Jiguo, TIAN Fengwei. The study on the groutability of polyamine resin for jointed rock mass[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, (Supp. 1): 563 - 568.(in Chinese))
- [31] 杨米加, 陈明雄, 贺永年. 注浆理论的研究现状及发展方向[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 839 - 841.(YANG Mijia, CHEN Mingxiong, HE Yongnian. Current research state of grouting technology and its development direction in future[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 839 - 841.(in Chinese))
- [32] HASSLER L, HAKANSSON U, STILLE H. Computer-simulated flow of grouts in jointed rock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1992, 7(4): 441 - 446.
- [33] 卢文波, 舒大强, 严 鹏, 等. 瀑布沟水电站进水塔基础灌浆试验成果报告[R]. 武汉: 武汉大学, 2006.(LU Wenbo, SHU Daqiang, YAN Peng, et al. Test report of Pubugou intake tower foundation grouting[R]. Wuhan: Wuhan University, 2006.(in Chinese))