

破碎岩体注浆加固体强度估计

许宏发¹, 耿汉生¹, 李朝甫¹, 陈伟², 王晨¹

(1. 解放军理工大学国防工程学院爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007; 2. 总参某标准化办公室, 北京 100000)

摘要: 在注浆压力和时间满足规范要求时, 注浆前岩体强度、注浆后加固体强度、浆液结石体强度是影响注浆加固效果的主要因素。在分析了已有纯水泥浆结石体强度试验的基础上, 利用非线性拟合分析, 提出了 P.O. 42.5 水泥结石体 28 d 强度与水灰比之间关系的经验公式。对已有岩体注浆前后强度试验值进行了无量纲分析, 建立了量纲为 1 的参量——强度增长率和原岩体与浆液结石强度比, 进而通过非线性拟合分析, 提出了破碎岩体注浆加固体强度增长率的经验公式。根据莫尔库仑强度理论, 推导出岩体注浆前后剪切强度参数增长率的计算公式。在现场进行了破碎岩体注浆试验, 结果表明, 强度增长率试验值与经验公式计算值基本吻合, 满足岩体工程注浆设计的需要。

关键词: 破碎岩体; 注浆加固体; 强度估计; 水泥结石体

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)11-2018-05

作者简介: 许宏发(1964-), 男, 江苏泰州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学方面的教学与研究工作。

E-mail: xdhongfa126@126.com。

Estimating strength of grouting reinforced bodies in broken rock mass

XU Hong-fa¹, GENG Han-sheng¹, LI Cao-fu¹, CHEN Wei², WANG Chen¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, College of Defence Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 2. A Standardization Office of General Staff, Beijing 100000, China)

Abstract: When the grouting pressure and time meet the specification requirements, the main factors affecting grouting-reinforcement effect are the strengths of rock mass before and after grouting and of hardened cement paste. Based on the existing test data of pure hardened cement paste compression strength, to express the relation between the 28 d-strength and the water-cement ratio for P.O. 42.5 cement, an empirical formula is proposed by means of the nonlinear fitting method. Based on the existing test data of rock mass strength before and after grouting, using the non-dimensional analysis method, two dimensionless parameters are proposed: strength growth rate and strength ratio of original rock mass to hardened grouting, and then an empirical formula to describe the compression strength growth rate of the broken rock mass reinforced before and after grouting is proposed by use of the nonlinear fitting method. The equations for the shear strength parameters growth rate before and after grouting are derived according to the Mohr-Coulomb strength theory. Filed tests on grouting into broken rock mass are conducted. The results show that the compression strength growth rates obtained from the formulae are basically consistent with those obtained from experiments, and that they meet the needs of rock grouting design.

Key words: broken rockmass; grouting-reinforced body; strength estimation; hardened cement paste

0 引言

在岩土工程中, 对于破碎的岩体, 常采用注浆加固技术改善岩体条件提高岩体强度。目前国内外对岩体注浆技术、注浆效果检测等方面的研究已取得不少成果^[1-3], 但破碎岩体注浆加固后的结石体强度估计问题仍然处于起步阶段。

目前已有一些学者通过现场和室内试验, 对注浆前后岩体的强度开展了很多研究。周维垣等^[4]曾在二滩大坝现场取得的不同胶结形式的注浆加固体上进行强度试验, 得到不同胶结形式下注浆加固体的破坏形式。

葛家良等^[5]通过岩体注浆模拟试验, 分析了注浆结石体强度特征和影响规律。刘长武等^[6]通过岩体注浆前后电镜扫描观察、孔隙分布、X 射线衍射图谱成分及宏观力学参数的分析比较, 认为水泥注浆改变了岩石的微结构、微孔隙, 从而提高了结构面的黏结力和内摩擦角。杨坪等^[7]通过注浆模拟试验得到了砂卵(砾)石层中注浆加固体强度各影响因素之间的关系式。康

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB732003)

收稿日期: 2013-03-25

红普等^[8]采用高压注浆、高预应力、强力锚杆与锚索对松散破碎围岩进行综合加固,地质取芯证明,注浆可充填和黏结裂纹,提高节理化岩体的完整性与强度。国外对岩体注浆结石体强度也开展了相关研究,Evdokimov 等^[9]对注浆岩体的裂隙进行了抗剪强度试验,比较了注浆前后的剪切强度参数,增强效果明显。Swedenborg 等^[10]比较了注浆和未注浆硬岩节理的力学特性。总的来说,注浆岩体结石体强度特性的研究较多,其定量估算公式的研究不多。

本文以破碎岩体(一般岩体等级 IV 和 V 级)为研究对象。综合考虑影响岩体注浆加固体强度的主要因素,对不同学者得到的各种岩体注浆试验结石体强度增长的对比研究,通过非线性拟合分析,得到了较符合实际的抗压强度增长率的经验公式。通过强度理论分析,推导出剪切强度参数增长率的计算公式,对岩体注浆设计具有指导意义。

1 破碎岩体注浆加固效果

众多学者的研究表明,破碎岩体注浆加固,能有效提高岩体强度和整体性能,抗压强度能提高 15%~200%,剪切强度参数也有较大增长^[4-15]。表 1 列出了国内学者这方面的研究成果,表中 ξ_c 为单轴抗压强度增长率, ξ_E 为变形模量增长率, ξ_{coh} 为内聚力增长率, ξ_f 为内摩擦系数增长率, ξ_{RQD} 为 RQD 增长率。由表 1 可见岩体注浆后加固体的强度有明显的增长。

表 1 岩体注浆加固效果

Table 1 Effect of grouting reinforcement in rock mass					
序号	岩体特征	浆液	检测方法	强度增长率	文献来源
1	泥岩、砂泥岩互层	普通水泥浆	物探	$\xi_c=15.2\%\sim22.5\%$	[11]
2	煤、红砂岩、灰砂岩、黄砂岩	1:1 水泥浆 浆马丽散N	单轴压缩	$\xi_c=70\%\sim200\%$	[12]
3	泥岩、粉砂岩、煤	水泥浆	单轴压缩	煤: $\xi_c=50\%$; 粉砂岩: $\xi_c=40\%$; 泥岩: $\xi_c=47\%$	[13]
4	粉砂岩、砂岩、夹泥岩、灰岩	水泥浆+水玻璃	钻孔取芯	$\xi_c=59\%$ $\xi_{RQD}=79.4\%$	[14]
5	岩石结构面	水泥砂浆	剪切试验	$\xi_{coh}=291\%$ $\xi_f=6\%$	[15]
6	砂岩、泥岩	水泥浆	剪切试验	砂岩: $\xi_{coh}=212\%$, $\xi_f=11\%$; 泥岩: $\xi_{coh}=2100\%$, $\xi_f=0\%$	[6]

2 岩体注浆加固体抗压强度分析

分析发现,岩体注浆结石体强度与注浆前岩体强度、浆液结石体(浆液为水泥浆时简称水泥石)强度、注浆压力、时间等有很大关系。当保证注浆压力和注

浆时间满足有关规范(如 DL/T5406—2010《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》)要求时,注浆前岩体强度、水泥石强度为主要因素。文献[3](见文献[3]表 2-7, 2-9, 2-11, 2-13, 2-14)、文献[16, 17]给出了普通 P.O. 42.5 纯水泥浆结石体的强度随水灰比变化的试验值,如表 2 所示。

表 2 水泥石的 28 d 强度

Table 2 28 d-strengths of hardened cement paste				
序号	水灰比	28 d抗压强度/MPa		
		文献[3]	文献[16]	文献[17]
1	0.40	50.80	—	—
		45.60		
		47.60		
2	0.50	22.00	20.40	—
3	0.60	—		
4	0.75	11.27	11.22	—
5	0.80	—	—	12.33
6	1.00	8.90	2.90	10.22
		9.20		
7	1.20	—	—	5.37
8	1.25	—	1.86	—
9	1.50	2.22	0.89	—
10	2.00	2.80	—	—

对表 2 试验数据进行非线性拟合分析,拟合曲线见图 1,得到经验公式为(适用与水灰比 0.4~2)

$$q_c = 7.5m^{-2} \quad (R^2 = 0.9734) \quad , \quad (1)$$

式中, q_c 为水泥石 28 d 强度 (MPa); m 为水灰比。

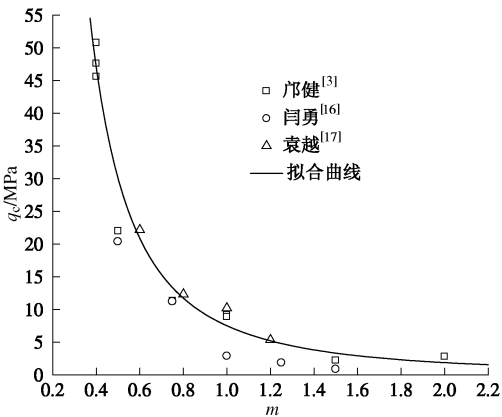


图 1 水泥石 28 d 强度与水灰比之间的关系

Fig. 1 Relation among 28 d-strength of hardened cement paste and water cement ratio

表 3 列出了不同学者获得的注浆前后岩体强度的试验结果^[4-6, 12-13, 15, 18-19]。表中 S_{cb} 和 S_{ca} 分别为注浆前后岩体单轴抗压强度。

对表 3 试验数据进行无量纲处理,建立 2 个无量纲变量,岩体单轴抗压强度增长率 ξ_c 和原岩体与浆液结石强度比 η , 即

$$\xi_c = \frac{S_{ca}}{S_{cb}} - 1 \quad , \quad (2)$$

$$\eta = \frac{S_{cb}}{q_c} \quad . \quad (3)$$

分析发现, 注浆前后岩体单轴抗压强度增长率 ξ_c 和原岩体与水泥石强度比 η 之间存在很好的相关性, 如图 2 所示。

表 3 注浆前后岩体抗压强度

Table 3 Uniaxial compression strengths of rock mass before and after grouting

序号	岩体类型	S_{cb} /MPa	S_{ca} /MPa	ξ_c	注浆液		$\eta = \frac{S_{cb}}{q_c}$	资料来源
					m	q_c /MPa		
1	石膏砂胶结体	0.65	1.6	1.462	1.0	7.32	0.089	[5]
2	石膏砂胶结体	0.65	2.14	2.292	0.75	12.37	0.053	[5]
3	石膏砂胶结体	0.44	0.8	0.818	1.2	5.03	0.087	[5]
4	石膏砂胶结体	0.44	1.2	1.727	1.0	7.32	0.060	[5]
5	石膏砂胶结体	0.44	1.6	2.636	0.75	12.37	0.036	[5]
6	石膏砂胶结体	0.26	0.8	2.077	1.2	5.03	0.052	[5]
7	石膏砂胶结体	0.26	0.84	2.231	1.0	7.32	0.036	[5]
8	石膏砂胶结体	0.65	1.0	0.538	1.2	5.03	0.129	[5]
9	石膏砂胶结体	0.44	1.5	2.409	1.2	5.03	0.087	[5]
10	石膏砂胶结体	0.26	1.1	3.231	1.0	7.32	0.036	[5]
11	石膏砂胶结体	0.44	1.1	1.500	1.0	7.32	0.060	[5]
12	石膏砂胶结体	0.44	1.4	2.182	1.0	7.32	0.060	[5]
13	石膏砂胶结体	0.26	0.76	1.923	1.0	7.32	0.036	[5]
14	煤	2.57	3.76	0.463	1.0	7.32	0.351	[12]
15	红砂岩	3.54	4.28	0.209	1.0	7.32	0.484	[12]
16	灰砂岩	0.09	2.11	26.37 0	1.0	7.32	0.011	[12]
17	泥岩	3.77	7.69	1.040	1.0 [#]	7.32	0.515	[13]
18	煤层	3.42	4.73	0.383	1.0 [#]	7.32	0.467	[13]
19	粉砂岩	6.12	10.83	0.770	1.0 [#]	7.32	0.836	[13]
20	岩石结构面	0.41*	1.67*	3.073	砂浆 M7.5	7.5	0.055	[15]
21	砂岩	0.71*	2.31*	2.250	1.0 [#]	7.32	0.097	[6]
22	泥岩	0.06*	1.21*	19.17	1.0 [#]	7.32	0.008	[6]
23	弱风化正长岩	6.43*	7.77*	0.208	1.0 [#]	7.32	0.878	[4]
24	弱风化玄武岩	28.80 *	32.00 *	0.111	1.0 [#]	7.32	3.934	[4]
25	泥岩	10	21.3	1.130	1.0 [#]	7.32	1.366	[18]
26	泥岩	14.7	22.5	0.531	1.0 [#]	7.32	2.008	[18]
27	砂岩	34.3	55.3	0.612	1.0 [#]	7.32	4.686	[19]
28	灰砂岩	0.10	1.22	11.20	1.0	7.32	0.014	[19]

注: *按公式 $S_{cb} = 2ccos \varphi / (1 - \sin \varphi)$ 计算; [#]为估计值。

通过非线性拟合分析, 得到注浆前后抗压强度增长率的经验公式:

$$\xi_c = \frac{3.2543}{[2.45 + \lg_{10} \eta]^2} \quad (R^2=0.90165) \quad (4)$$

3 岩体注浆加固体抗剪强度参数分析

根据莫尔 - 库仑原理, 原岩体的抗压强度、抗拉

强度和抗剪强度参数之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} c_b &= \frac{1}{2} \sqrt{S_{cb} S_{tb}}, \\ f_b &= \tan \varphi = \frac{S_{cb} - S_{tb}}{2 \sqrt{S_{cb} S_{tb}}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 S_{tb} 为注浆前岩体抗拉强度; c_b 为注浆前岩体的内聚力; f_b 为注浆前岩体内摩擦系数; φ 为注浆前岩体的内摩擦角。

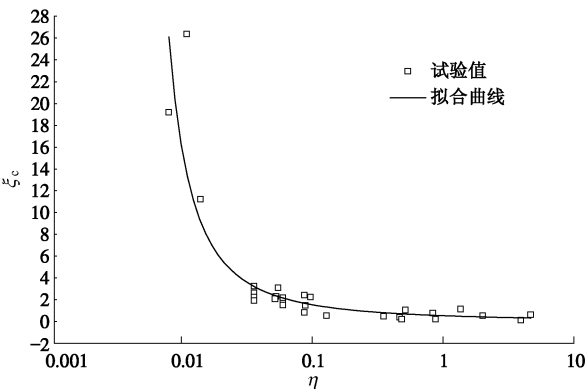


图 2 强度增长率与原岩 - 浆液结石强度比的关系

Fig. 2 Correlation of strength growth rate with strength ratio of original rockmass to hardened grouting

对式 (5) 进行微分计算, 得到剪切强度参数的增量:

$$\left. \begin{aligned} \Delta c &= \frac{S_{tb} \Delta S_c + S_{cb} \Delta S_t}{4 \sqrt{S_{cb} S_{tb}}}, \\ \Delta f &= \frac{S_{cb} + S_{tb}}{4 \sqrt{S_{cb} S_{tb}}} \left(\frac{1}{S_{cb}} \Delta S_c - \frac{1}{S_{tb}} \Delta S_t \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 ΔS_c 为注浆后岩体抗压强度增量; ΔS_t 为注浆后岩体抗拉强度增量; Δc 为注浆后岩体内聚力增量; Δf 为注浆后岩体内摩擦系数增量。

$$\left. \begin{aligned} \xi_{coh} &= \frac{\Delta c}{c_b} = \frac{S_{tb} \Delta S_c + S_{cb} \Delta S_t}{2 S_{cb} S_{tb}}, \\ \xi_f &= \frac{\Delta f}{f_b} = \frac{(S_{cb} + S_{tb})(S_{tb} \Delta S_c - S_{cb} \Delta S_t)}{2 (S_{cb} - S_{tb}) S_{cb} S_{tb}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

定义注浆岩体、抗拉强度增长率 (ξ_t), 并假定抗拉强度与抗压强度之比为 α , 则

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_c &= S_{cb} \xi_c, \\ \Delta S_t &= S_{tb} \xi_t, \\ S_{tb} &= \alpha S_{cb} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (7) 得

$$\left. \begin{aligned} \xi_{coh} &= 0.5(\xi_c + \xi_t), \\ \xi_f &= \frac{(1 + \alpha)}{2(1 - \alpha)} (\xi_c - \xi_t) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

一般对于破碎岩体 (IV, V 级), 抗拉强度与抗压强度的比值较小 (小于 0.05), 抗拉强度增长率比单

轴抗压强度增长率略小, 一般为抗压强度增长率的 0.8~1.0 倍。若抗拉强度增长率是单轴抗压强度增长的 0.9 倍, 则岩体剪切强度参数增量为

$$\left. \begin{aligned} \xi_{\text{coh}} &= 0.95\xi_c, \\ \xi_f &\approx 0.05\xi_c. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

从式 (10) 可用看出, 岩体注浆后, 内聚力的增长率较大, 而摩擦系数的增长量率较小。文献[6, 15] 的试验结果 (见表 3) 证明了这一结论的正确性。

4 现场试验和验证

4.1 现场试验

在某隧道开挖现场选取了 6 个试验点, 3 个点位于口部 V 级围岩中 (K_1, K_2, K_3), 3 个点位于工程内部 IV 级围岩中 (N_1, N_2, N_3)。

口部围岩为强风化和中风化混合砂岩, 节理裂隙极为发育, 岩体破碎, 为强风化和中风化混合, 岩体基本质量指标[BQ]=205.7, 岩体分类等级为 V 级。

工程内部围岩, 岩性以中—微风化砂岩为主, 岩质较坚硬, 结构面发育, 岩体整体较破碎, 呈镶嵌碎裂结构, 岩体基本质量指标[BQ]=344.1, 岩体分类等级为 IV 级。

注浆试验采用压力注浆, 钻孔深度 1 m, 孔径 12 cm, 注浆压力 0.5 MPa, 注浆时间控制在 5 min 左右, 水灰比: K_1 和 N_1 孔为 0.7, K_2 和 N_2 孔为 1.0, K_3 和 N_3 孔为水灰比 1.3。

4.2 岩体注浆加固强度增长率试验与理论比较

为了了解注浆岩体的强度增长情况, 试验结束后, 养护 28 d。然后挖出注浆孔周围的注浆加固体, 进行点荷载强度试验, 每孔做 5 个试块, 再计算平均值(I_s)。用 24 I_s 估计加固体抗压强度 (S_{ca})。根据岩体基本质量指标, 利用文献[20]提出的方法估计原岩体的抗剪强度参数, 再根据莫尔库仑强度准则, 计算原岩体的单轴抗压强度 $S_c = 2ccos \varphi / (1 - \sin \varphi)$ 。加固体强度增长率的试验值和公式 (4) 计算值的比较见表 4。

表 4 岩体加固体强度增长率试验与经验公式比较

Table 4 Comprison between test strength growth ratios and those by empirical formula

孔 编 号	加固体强度 /MPa		原岩体强度估计				强度增长率 ξ_c /%		
	I_s	S_{ca}	BQ	$c_b^{\#}$ /MPa	$\varphi_b^{\#}$ / (°)	S_{cb}^* /MPa	试验 值	式(4)	误差
K1	0.095	2.28	205.7	0.12	20.75	0.35	5.51	4.42	-19.78
K2	0.056	1.35	205.7	0.12	20.75	0.35	2.85	2.53	-11.23
K3	0.035	0.84	205.7	0.12	20.75	0.35	1.40	1.73	23.57
N1	0.198	4.75	344.1	0.65	35.04	2.51	0.89	1.11	24.72
N2	0.195	4.68	344.1	0.65	35.04	2.51	0.86	0.83	-3.49
N3	0.165	3.96	344.1	0.65	35.04	2.51	0.58	0.66	13.79

注: *按公式 $S_{cb} = 2ccos \varphi / (1 - \sin \varphi)$ 计算; $^{\#}$ 按文献[20]确定。

由表 4 可以看出, 式 (4) 提出的注浆岩体强度增长率计算公式, 基本反映了岩体强度增长的规律, 误差在 3%~25%, 基本满足了实际工程岩体注浆强度估计的需要。

5 结 论

(1) 根据已有的纯水泥浆液结石体 28 d 抗压强度试验值, 通过非线性回归分析, 获得了 P.O. 42.5 水泥石 28 d 强度的经验公式。

(2) 根据已有的岩体注浆前后抗压强度的试验值, 通过无量纲分析, 建立了原岩体与浆液结石强度比 η , 进而通过非线性拟合分析, 提出了注浆加固体强度增长率的经验公式。

(3) 根据莫尔库仑强度理论, 推导出岩体注浆前后剪切强度参数增长率的计算公式。

(4) 现场注浆试验结果表明, 岩体注浆强度增长率经验公式与试验结果基本吻合, 满足岩体工程注浆设计的需要。

参考文献:

[1] BRANTBERGER M, STILLE H, ERIKSSON M. Controlling grout spreading in tunnel grouting Analyses and developments of the gin-method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(4): 343 - 352.

[2] GIOVANNI Lombardi. Grouting of rock masses[C]// 3rd International Conference on Grouting and Grout Treatment. Minusio, 2002.

[3] 邝健政, 咎月稳, 王 杰, 等. 岩土注浆理论与工程实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. (KUANG Jian-zheng, ZAN Yue-wen, WANG Jie, et al. Theory of grouting for rock and soil and its engineering practice[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))

[4] 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 Wei-yuan, YANG Ruo-qiong, YAN Gong-rui. 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))

[5] 葛家良, 陆士良. 注浆模拟试验及其应用的研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 31 - 36. (GE Jia-liang, LU Shi-liang. Study on grouting simulation experiment and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(3): 31 - 36. (in Chinese))

[6] 刘长武, 陆士良. 水泥注浆加固对工程岩体的作用与影响

- [J]. 中国矿业大学学报, 2000, **29**(5): 454 - 458. (LIU Chang-wu, LU Shi-liang. Reinforcement effect of cement grouting on engineering rock mass[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, **29**(5): 454 - 458. (in Chinese))
- [7] 杨 坪, 唐益群, 彭振斌, 等. 砂卵(砾)石层中注浆模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(12): 2134 - 2138. (YANG Ping, TANG Yi-qun, PENG Zhen-bin, et al. Study on grouting simulation experiment in sandy gravels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(12): 2134 - 2138. (in Chinese))
- [8] 康红普, 林 健, 杨景贺, 等. 松软破碎硐室群围岩应力分布及综合加固技术[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(5): 808 - 814. (KANG Hong-pu, LIN Jian, YANG Jing-he, et al. Stress distribution and synthetic reinforcing technology for chamber group with soft and fractured surrounding rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(5): 808 - 814. (in Chinese))
- [9] EVDOKIMOV P D, ADAMOVICH A N, FRADKIN L P, et al. Shear strengths of fissures in ledge rock before and after grouting[J]. Hydrotechnical Construction, 1970, **4**(3): 229 - 233.
- [10] SWEDENBORG S, DAHLSTRÖM L O. Rock mechanics effects of cement grouting in hard rock masses[C]// Proceedings of the 2003 Specialty Conference on Grouting at the Third International Conference on Grouting and Ground Treatment, New Orleans, Grouting and Ground Treatment, ASCE, 2003, GSP120: 1089 - 1102.
- [11] 张志沛, 刘 旭, 徐汉民, 等. 煤矿采空区注浆工程质量检测的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(5): 604 - 606. (ZHANG Zhi-pei, LIU Xu, XU Han-min, et al. Experimental studies on grouting quality examination of gob of coalmine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(5): 604 - 606. (in Chinese))
- [12] 王汉鹏, 高延法, 李术才. 岩石峰后注浆加固前后力学特性单轴试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, **3**(1): 27 - 31. (WANG Han-peng, GAO Yan-fa, LI Shu-cai. Uniaxial experiment study on mechanical properties of reinforced broken rocks pre- and- post grouting[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, **3**(1): 27 - 31. (in Chinese))
- [13] 张 农, 侯朝炯, 陈庆敏. 岩石破坏后的注浆固结体的力学性能[J]. 岩土力学, 1998, **19**(3): 50 - 52. (ZHANG Nong, HOU Chao-jiong, CHEN Qing-min. Mechanical properties of broken rock after grouting reinforcement[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, **19**(3): 50 - 52. (in Chinese))
- [14] 刘长武, 陆士良. 锚注加固对岩体完整性与准岩体强度的影响[J]. 中国矿业大学学报, 1999, **28**(3): 221 - 224. (LIU Chang-wu, LU Shi-liang. Effect of bolting-grouting reinforcement on integrity and Quasi-Strength of rock mass[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, **28**(3): 221 - 224. (in Chinese))
- [15] 卢敦华, 王星华, 何忠明, 等. 提高节理面 c 和 ϕ 对岩坡开挖变形的影响[J]. 灾害学, 2007, **22**(4): 51 - 56. (LU Dun-hua, WANG Xing-hua, HE Zhong-ming, et al. Deformation effect of excavated rock slope with increased c and ϕ in joint plane[J]. Journal of Catastrophology, 2007, **22**(4): 51 - 56. (in Chinese))
- [16] 闫 勇, 郑秀华. 水泥-水玻璃浆液性能试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, **31**(1): 71 - 72, 81. (YAN Yong, ZHENG Xiu-Hua. Experimental research on performance of grout of cement and sodium silicate[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, **31**(1): 71 - 72, 81. (in Chinese))
- [17] 袁 越, 王晓雷, 庞杰文. 松散软岩巷道锚注支护注浆材料配比试验研究[J]. 中国矿业, 2012, **21**(4): 100 - 104. (YUAN Yue, WANG Xiao-lei, PANG Jie-wen. Experimental study on mix proportion of grouting materials for bolt grouting support of loose and soft rock roadway[J]. China Mining Magazine, 2012, **21**(4): 100 - 104. (in Chinese))
- [18] 杨米加, 张 农. 破裂岩体注浆加固后本构模型的研究[J]. 金属矿山, 1998(5): 11 - 14. (YANG M J, ZHANG N. Study on the intrinsic model of broken rockmass after grouting reinforcement[J]. Metal Mine, 1998(5): 11 - 14. (in Chinese))
- [19] 牛学良, 付志亮. 深井巷道岩石注浆加固试验与巷道稳定性控制[J]. 金属矿山, 2007(11): 18 - 21. (NIU Xue-liang, FU Zhi-liang. Test of grouting reinforcement of deep roadway and control of its stability[J]. Metal Mine, 2007(11): 18 - 21. (in Chinese))
- [20] 许宏发, 周建民, 吴华杰. 国标岩体质量分级简化方法[J]. 岩土力学, 2005, **26**(增刊): 83 - 85. (XU Hong-fa, ZHOU Jian-min, WU Hua-jie. Simplified method for national standard for engineering classification of rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(S0): 83 - 85. (in Chinese))