

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.020

快硬微膨胀高强锚杆注浆材料的研制

戴银所^{1,2}, 谭跃虎¹, 杨庆恒¹, 王在晖¹, 丁建党¹, 谢江南¹

(1. 解放军理工大学 国防工程学院, 南京 210007; 2. 南京工业大学 材料化学工程国家重点实验室, 南京 210009)

摘要:为了解决传统锚固材料早期强度低、体积收缩等问题, 开发具有快硬、微膨胀、高强的锚固材料对满足锚杆支护快速施工具有重要的价值。以铝酸盐和硫酸盐生成钙矾石的反应具有快速和膨胀的特点为理论依据, 选用明矾石、石膏对注浆材料进行改性研究。结果表明: 注浆材料具有早期膨胀迅速、后期膨胀稳定的特点, 硬化时间能控制在 0.5~1.5 h 时之间, 1、3 d 强度分别达到 20、40 MPa; 微观测试发现随养护时间的增加硬化浆体中生成了大量钙矾石, 孔隙率逐渐降低。通过锚杆拉拔试验发现其 1 m 长砂浆锚固体 14 d 极限抗拔力达到 93 kN, 超过 1.5~2 m 砂浆锚固体极限抗拔力的平均水平。

关键词:锚杆; 锚固材料; 明矾石; 钙矾石; 早强; 微膨胀

中图分类号: TU525.9; TU751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)04-0128-05

Development of Rapid-hardening, Expansive, High-strength Grouting Mortar

Dai Yinsuo^{1,2}, Tan Yuehu¹, Yang Qingheng¹, Wang Zaihui¹, Ding Jiandang¹, Xie Jiangnan¹

(1. College of Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, P. R. China;

2. State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, P. R. China)

Abstract: In order to solve the problem that the cement-based anchoring material has low early-strength and its volume contracts obviously, it is necessary to develop anchoring material which has characteristics of early-strength, expansion, high strength etc. Based on the ettringite with characteristic of early strong and expansion, the properties of the grouting mortars modified with alunite and gypsum were studied. The results show that at early stage the expansion is rapid and expansion is stabilized at later stage. The setting time can be controlled in 0.5~1.5 hours, and compressive strength of 1 day and 3 days reaches 20 and 40Mpa, respectively. The micro-analysis shows that with the increase of curing-time there are plenty of expansive ettringite crystals and porosity decreases. The limit load test shows that the pullout force of 1 metre sample at 14 days is 93 KN, which is larger than the average lever of 1.5~2 meters samples.

Key words: anchorages; grouting materials; alunite; ettringite; early-strength; expansion

快速抢险抢修是战时状态保存实力、形成战斗力的重要任务,也是和平时期防灾减灾、保证人民生命及财产安全的有效方法。锚杆支护是快速抢险抢

建的重要技术手段之一。注浆体是锚固体系中的重要组成部分,起着锚固力的传递、维持以及锚筋材料的防腐等作用^[1-2]。水泥基注浆材料由于价格低廉、

收稿日期: 2012-10-08

基金项目: 南京工业大学材料化学工程国家重点实验室开放课题(KL10-07); 江苏省高校省级重点实验室开放研究课题(Wjjqfhcl200802); 军队防护工程科研项目(KYGYZXJK0904、KYFYZXJK1207)

作者简介: 戴银所(1971-),男,博士,主要从事防护工程新型建筑材料研究, (E-mail) ysdai@163.com.

灌注性好,在实际工程中被广泛使用。为了满足施工流动性的要求,锚杆注浆材料一般都采用大水灰比,这导致了凝结、硬化时间较长,能够受力、张拉的等待时间较长;同时浆体后期体积收缩较大,会引起锚固体与孔壁间出现裂隙,导致锚杆失效,因此研制具有快凝,微膨胀的注浆材料是保证快速锚杆支护质量的重要技术手段。

Benmokrane 等^[3]研究发现,砂的掺入能提高注浆体的抗压强度、抗拉强度及弹性模量,减少注浆体硬化后收缩量,明显增加与界面的黏结强度和锚固刚度;饶泉宇^[4]、李红娜^[5]等也发现砂能够显著增强岩锚的极限承载强度;而外加剂的掺入对锚筋及注浆体产生负面影响^[6]。在水泥基注浆材料中外掺石膏和高含铝矿物,如明矾石等,通过快速生成具有膨胀性能的钙矾石的方法,能够达到大幅度加快凝结硬化速度和微膨胀的目的^[7-10]。而且在外掺石膏时,水泥矿物铁铝酸四钙($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)和水化铝酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)也能生成钙矾石。笔者采用石膏、明矾石作为膨胀源材料对注浆水泥砂浆进行改性研究。

1 原材料和实验方法

1.1 原材料

石膏矿、铝矾土矿来自安徽庐江矾山,经过破碎、粉磨后分别过 $80 \mu\text{m}$ 筛。水泥为中国水泥厂生产的 42.5 普通硅酸盐水泥。原材料的主要技术指标见表 1。

表 1 原材料化学组成

材料	SO_3	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Loss
水泥	4.9	47.4	1.7	27.2	7.5	2.3	5.5
石膏	50.4	37.4	3.7	2.1	0.5	0.2	5.0
明矾石	20.5	0.3	0.1	25.8	19.4	4.6	23.0

注浆料的砂率为 50%,砂的细度模数为 3.5,其骨料粒径具体分布见表 2。采用江苏博特新材料公司生产的萘系高效减水剂。

表 2 砂子的粒径分布

筛孔/mm	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15
筛余/g	1.28	74.7	233.2	121.3	34.5	35.3

1.2 实验方法

采用比长仪法测试材料膨胀率。采用日本电子公司生产的 JSM-5900 扫描电镜(SEM)、日本理学公司生产的 DMAX/rB 型 X 射线衍射,分别分析硬化浆体的微观形貌、晶体组成;并采用美国 QUAN-

TACHROME 公司 Poremaster GT-60 压汞仪分析硬化浆体孔的结构。

2 结果与分析

砂浆水胶比全部为 0.15。材料的流动度、凝结时间测试结果见表 3,膨胀率见图 1。

表 3 掺明矾石/石膏注浆材料的流动度和凝结时间

编号	砂浆/g	明矾石/g	石膏/g	总掺量/%	流动度/mm	初凝时间/min	终凝时间/min
1#	1 400	0	0	0	340 泌水	447	476
2#	1 400	0	117	8.4	330	251	350
3#	1 400	200	0	14.0	313	18	35
4#	1 400	100	0	7.1	322	23	43
5#	1 400	50	0	3.6	335 泌水	52	107
6#	1 400	50	12	4.5	320	13	37
7#	1 400	50	28	5.6	325	15	60
8#	1 400	50	44	6.8	312	18	71
9#	1 400	50	60	8.0	303	23	90
10#	1 400	50	76	9.0	295	27	94

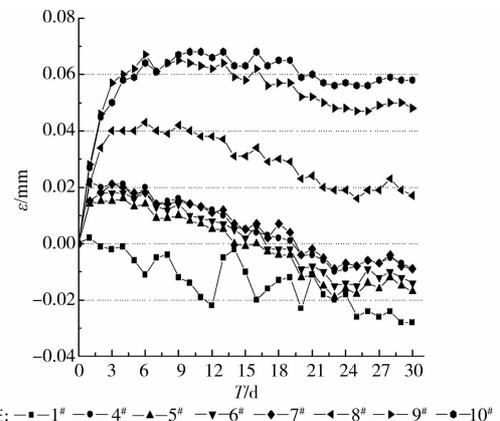


图 1 不同龄期硬化浆体膨胀率

从表 3 中 1#~5# 相比较可见,明矾石掺量对材料凝结时间影响非常大,掺量越多促凝效果越明显;在明矾石掺量固定的条件下,掺入少量的石膏就能大幅度缩短凝结时间,但此后凝结时间却随石膏掺量的增加而延长。由于石膏溶解速度很快,石膏与明矾石反应生产钙矾石的速度取决于明矾石的溶解速度,而在明矾石量固定的情况下反应所需石膏的量基本固定,因此多余的石膏就表现出缓凝效果^[11]。另外,由于水泥砂浆硬化很快,初凝时间测试误差较大,因此 20 min 以内的数据操作误差都很大。

从图 1 可见,没有掺膨胀源的砂浆一直处于收缩阶段,最大收缩大于 0.02 mm(试样长度为 160 mm,相对膨胀率约-0.01%)。4#~8# 试样在 3 d 之内虽然有一定的膨胀,但此后逐渐收缩,总膨胀率为仍为负值。而 9#、10# 试样一周以内快速膨胀,此后膨胀率基本稳定在 0.06 mm(相对膨胀率 0.04%)左右。

综合注浆材料的流动性、凝结时间和长期膨胀率等因素,9#、10# 试样基本满足自流平、快硬、微膨胀的要求,因此对该 2 组进一步进行强度试验,结果如表 4。

表 4 明矾石/石膏改性注浆料的强度 MPa

编号	测试项	养护时间/d					28
		0.5	1	3	7	14	
9#	抗折强度	2.4	4.77	7.68	8.59	8.65	10.4
9#	抗压强度	5.2	16.9	38.2	46.5	54.3	67.3
10#	抗折强度	2.8	5.1	7.11	8.11	10.0	11.9
10#	抗压强度	6.9	19.9	40.9	50.3	62.1	67.1

在表 4 可以看到:10# 试样 1 d 的抗压强度基本能够接近 20 MPa,3 d 抗压强度基本能够达到 40 MPa。

3 机理分析

3.1 XRD 分析

从 10# 试样的 XRD 图(图 2)可以看到,随养护时间增加,石膏逐渐减少,即逐渐参与反应,氢氧化钙早期随水泥水化快速大量生成,后期与明矾石反应生成钙矾石,其量逐渐减少。氢氧化钙六方板状结晶强度不好,而生成的钙矾石对强度有利。

3.2 SEM 分析

从 10# 试样硬化浆体 3 d 时的 SEM 图(图 3(a))可以看到有明显的氢氧化钙,空隙中有钙矾石出现;而养护 90 d 以后(图 3(b)),钙矾石几乎填满了孔隙,而且水化产物非常致密,总孔隙率从 3 d 的 3.14%,降低到 90 d 的 0.70%,因而后期强度大。

3.3 MIP 分析

从 10# 试样硬化浆体时的孔径分布图(图 4)对比可以看到:养护 90 d 后,50~100 μm 的大孔数量大幅度减少,10~30 μm 的小孔数量增加,几 μm 的微孔基本消失,因而孔结构更加致密和合理。而没有掺膨胀源的试样,90 d 时总孔隙率为 3.49%,孔径分布见图 5,10~100 μm 的大孔数量较多。

根据 10# 试样配制材料的流动性、凝结时间、强

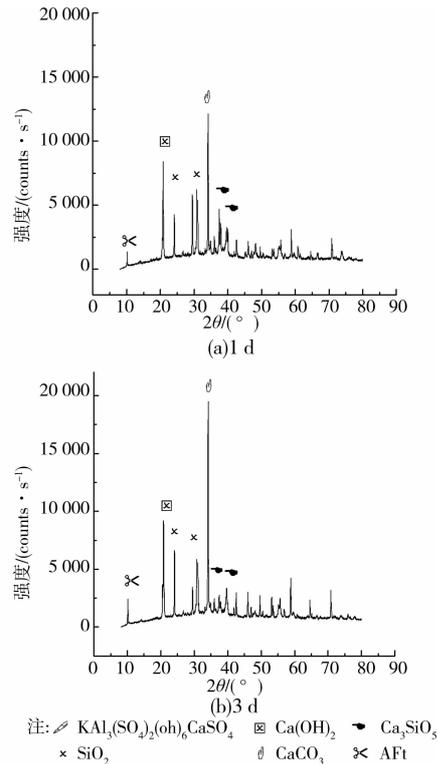


图 2 10# 试样不同龄期硬化浆体的 XRD

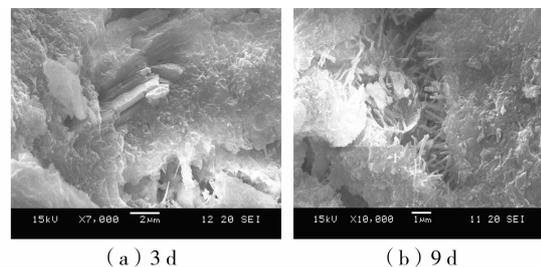


图 3 10# 试样硬化浆体时的 SEM

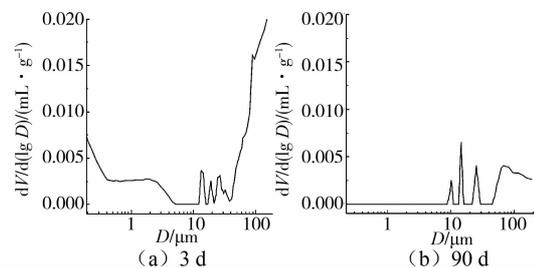


图 4 10# 试样硬化浆体时的孔径分布

度、膨胀率等性能指标的测试结果,发现该研制的注浆材料具有快凝、早强、微膨胀的优点,能够满足抢修抢建、加固等快速施工需求;通过微观测试结果发现硬化浆体中出现大量钙矾石,孔结构逐渐致密,因而验证了这些技术指标的合理性和科学性。但这些材料在用于锚杆注浆中的具体力学性能尚不明确,而锚杆的抗拔试验是对锚固材料综合性能的反映,

因此必须进行锚杆的抗拔力试验。

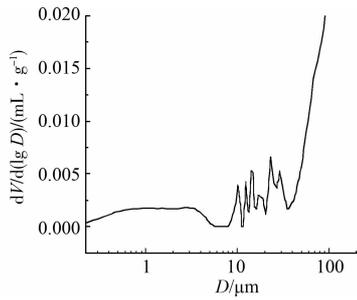


图5 1# 试样 90 d 硬化浆体时的孔径分布

4 锚杆抗拔试验

4.1 试验方法

金属管为冷拔无缝钢管,规格为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,长度 1 m,居中放置 $\Phi 15 \text{ mm}$ 螺纹钢,用 10# 试样进行注浆,此后放在 $10 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 的室内环境中静置 14 d 后进行拉拔试验。实验采用长沙亚星数控技术有限公司生产的 WYGJ 微机控制电液伺服钢绞线拉伸试验机,最大荷载 600 kN,试验装置见图 6。按照《岩土锚杆(索)技术规程》(CECS 22:2005)及相关规范要求^[12],加载时采用逐级加载的方式,每级加载拉力约为锚杆极限承载力的 10%,每级停留时间为 5 min。用拉伸试验机上钳口夹住钢筋一端,试验机下钳口夹紧钢管体底部,靠近密封托的上边缘,希望钢管外表面和底托都能承受荷载。为了增加钢管表面的剪切方向荷载,在钢管下部受力的位置用切割机进行表面切割,形成许多约 1 mm 深的纹理,以增加与模具下钳口的摩擦力,如图 7 所示。



图6 拉拔力测试全图

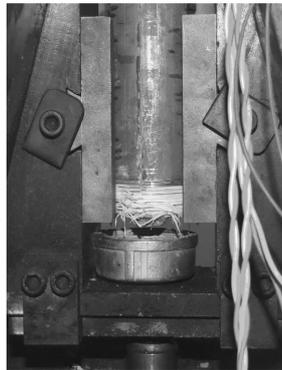


图7 钢管-夹具局部图

4.2 结果与分析

拉拔力-位移曲线见图 8。曲线上不光滑的谷是由于每级加载停留时拉力倒缩引起的。

当拉力大于 90 kN 时,砂浆随同钢筋被从钢管中逐渐拔出,锚杆破坏,实验结束,其最大荷载达到

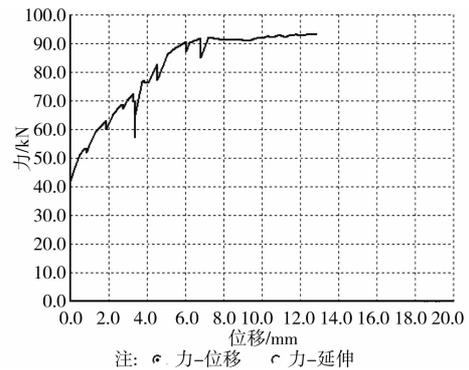


图8 材料拉拔力-位移曲线

93 kN。中国现有 2 m 长的砂浆锚杆的平均极限拉拔力为 60 kN,而《设防工程抗动载锚喷支护技术规范》(GJBz 20431-97)中要求的 II 类以上围岩不小于 80 kN^[12],张世雄等^[13]的 1.5 m 锚杆大量拉拔力试验,其平均拉拔力也只有 77.8 kN。笔者采用明矾石、石膏改性的砂浆作为注浆材料的锚杆,其 1 m 长锚固体极限抗拔力就已经远超过 1.5~2 m 砂浆锚固体极限抗拔力的中国平均水平。这是由于经过膨胀材料改性的注浆材料膨胀性能更好,可以使锚固材料与钢管之间的压力更大,所以粘结力与摩阻力都会更大,从而有更大的抗拔力。将钢管剖开后可以发现硬化注浆体是完好的,如图 9 所示,此时锚杆失效的原因是锚固体与钢管间的粘结力与摩阻力的总和小于外界施加的拉力。特别需要说明的是:该硬化锚固体材料在钢管内无法得到水的养护,而且养护时间只有 14 d,否则其硬化浆体强度和膨胀率会进一步提高^[14],极限拉拔力也会增大。



图9 锚杆注浆体破坏情况

5 结论

1)通过明矾石、石膏改性,水泥砂浆注浆材料能够快速生成大量钙矾石,孔结构逐渐致密;早期迅速膨胀,后期膨胀稳定;硬化时间控制在 0.5~1.5 h 之间;1 d 和 3 d 强度分别达到 20、40 MPa,满足快速施工要求。

2)用此类注浆材料进行锚杆注浆,其 1 m 长砂浆锚固体 14 d 极限抗拔力超过 1.5~2 m 砂浆锚固

体极限抗拔力的中国平均水平;此时锚固体与管壁间的粘结力与摩阻力小于拉拔力整体被拔出,而注浆体没有破坏,砂浆与钢筋之间界面也没有破坏。

参考文献:

- [1] 陈文,刘永球,仇学明. 锦屏水电站左岸帷幕灌浆试验与分析[J]. 水利水电技术,2008,39(9):22-25.
Chen W, Liu Y Q, Qiu X M. Experiment and analysis of curtain grouting on left bank of Jinping hydropower station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008,39(9): 22-25.
- [2] 朱训国. 地下工程中注浆岩石锚杆锚固机理研究[D]. 辽宁大连:大连理工大,2006.
- [3] Benmokrane B, Chennouf A, Mitri H S. Laboratory evaluation of cement-based grouts and grouted rock anchors [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995,32(7):633-642.
- [4] 饶泉宇,唐树名,张永兴,等. 注浆体配合比改善岩锚抗拔特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(2):390-396.
Rao X Y, Tang S M, Zhang Y X, et al. Experimental study on mixture ratios of grouting material for improvement of pull-out behaviors of rock cables [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(2):390-396.
- [5] 李红娜. 锚杆注浆浆液参数优化研究[J]. 隧道建设,2011,31(Sup2):390-396.
Li H N. Parameter optimization on bolt grouting grout [J]. Tunnel Construction,2011,31(Sup2):390-396.
- [6] Coulter S, Martin C D. Single fluid jet-grout strength and deformation properties [J]. Tunneling and Underground Space Technology,2006,21(6):690-695.
- [7] Nocun-Wczelik W, Konik Z, Stok A. Blended systems with calcium aluminate and calcium sulphate expansive additives [J]. Construction and Building Materials, 2011,25(2): 939-943.
- [8] 牛福生,张锦瑞,倪文明. 矾石-石膏复合膨胀剂[J]. 河北理工学院学报,2005,27(1):97-100.
Niu F S, Zhang J R, Ni W M. Research on expansive admixture made from alunite-gypsum composite [J]. Journal of Hebei Institute of Technology,2005,27(1): 97-100.
- [9] 吴君虎. 明矾石混凝土膨胀剂在灌注桩基础中的应用[J]. 膨胀剂与膨胀混凝土,2011(1):18-20.
Wu J H. The application of alunite expansive agents in the grouting of equipment foundation [J]. Expansive Agents & Expansive Concrete,2011(1):18-20.
- [10] Katsioti M, Giannikos D, Tsakiridis P E, et al. Properties and hydration of blended cements with mineral alunite [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2):1011-1021.
- [11] Quennoz A, Scrivener K L. Hydration of C3A-gypsum systems[J]. Cement and Concrete Research,2012,42: 1032-1041.
- [12] GJBz20431-97 设防工程抗动载锚喷支护技术规范[S].
- [13] 张世雄,章启忠. 摩擦锚杆与砂浆锚杆锚固力的对比试验研究[J]. 铜业工程,2003(2):17-20.
Zhang S X, Zhang Q Z. Comparison of anchoring force between grouted bolt and frictional metal bolt [J]. Copper Engineering,2003(2):17-20.
- [14] Bouzabata H, Multon S, Sellier A, et al. Swellings due to alkali-silica reaction and delayed ettringite formation: Characterisation of expansion isotropy and effect of moisture conditions[J]. Cement & Concrete Composites, 2012, 34(3): 349-356.

(编辑 胡英奎)