

砂质边坡安全保障新技术研究

牛笑笛, 杨广庆, 刘伟超

(石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043)

摘要: 砂质边坡稳定性差, 常规防护措施的防护效果较差。为了有效地对砂质边坡进行防护, 笔者研制了一种新型固砂剂——TD-1。为了验证 TD-1 的固砂效果, 笔者进行了配比优化试验、渗透试验、干湿循环试验和现场试验。试验结果表明: 在磷酸硅、硅酸锂、硅溶胶掺入比例相同的条件下, 固砂试样的强度随钾水玻璃模数的增加而增大; 钾水玻璃的最佳添加量为固化砂质量的 3%; 加入改性剂的试样, 强度有明显的增长; 使用低模数钾水玻璃的试样, 渗透能力相对更好; 随着干湿循环次数的增加, 试样的强度逐渐下降, 经过 3 次循环之后, 试样的强度基本趋于稳定。TD-1 固砂剂还可与客土喷播技术结合使用, 进行边坡绿化防护, 固化产物有利于植物生长。

关键词: 砂质边坡; 固砂剂; 室内试验; 现场试验

中图分类号: U416.1⁺4 **文献标识码:** A

Research on New Technology for Sandy Slope Safety Protection

Niu Xiaodi, Yang Guangqing, Liu Weichao

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The stability of sandy slopes is poor, as are the protective effects of conventional protection measures. To effectively protect sandy slopes with chemical sand consolidation technology, a new type of sand consolidation agent, TD-1, was developed. In order to study the effect of sand consolidation, proportion optimization tests, penetration tests, wetting-drying cycle tests, and field tests were carried out. The results showed that the strength of the sand samples increases with the increase in the potassium water glass modulus when the ratios of the incorporated silica phosphate, lithium silicate, and silica sol remain the same; the optimum amount of potassium water glass added was 3% of the solidified sand. The strength of the samples containing the modifier obviously increases, and the permeability of samples with low-modulus potassium water glass is relatively better; the strength of the samples decreases gradually with the increase in the wetting-drying cycle index, and after three cycles, the strength tends to be stable. TD-1 can be used with soil spraying technology for slope greening protection, and the solidified product is good for plant growing.

Keywords: sandy slope; sand consolidation agent; laboratory tests; field tests

路基是保证正常交通秩序的关键因素之一,一旦损毁,将阻断交通,危及行车安全。其中边坡稳

定性对路基结构的整体性能具有很大影响。工程实践表明,地质要素是公路边坡开挖和防护决策的根

收稿日期: 2017-11-16; 修回日期: 2017-12-20

通讯作者: 杨广庆, 石家庄铁道大学, 教授、博士生导师, 主要研究方向为土工合成材料加筋、路基工程及地基处理;
E-mail: gtsyang@vip.163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“交通基础设施重大结构安全保障战略研究”(2015-XZ-28)

本刊网址: www.enginsci.cn

本依据。对于砂质边坡而言, 风积砂黏聚力几乎为零, 边坡稳定性差, 易受雨水冲刷而发生滑坡等地质灾害。砂质边坡一般采用常规防护措施, 包括工程类防护和植物类防护。工程类防护主要为土工合成材料防护, 沥青类防护, 水泥混凝土类防护, 卵石、砾石、片石类防护, 土类防护, 柴草类防护等; 植物类防护主要为种植乔木、灌木、草本植物等 [1,2]。

使用常规防护措施存在许多不足之处。片石、混凝土、沥青等易发生老化, 增加后期的维修费用, 不易进行绿化。柴草类防护和土类防护只能应用于低等级公路。单纯采用植物类防护, 在植物长成之前, 边坡不够稳定, 边坡坡面在雨水的冲刷作用下容易损坏, 使植物防护失去效果 [3~5]。

为了提高砂质边坡的防护效果, 笔者研究了砂质边坡安全保障新技术。该技术采用化学固砂方法在边坡表层形成 10~30 cm 的砂土固化层, 增加了边坡稳定性与抗风蚀、水蚀性能。之后结合客土喷播技术, 在边坡表面植草, 增强生态效应。近年来, 化学固砂技术日益得到关注。我国在 20 世纪 60 年代也开始出现了化学固砂的研究。李婷等 [6] 使用钠水玻璃作为固砂材料, 选用 AlCl_3 溶液作钠水玻璃固化剂, 固化后形成的固化体的耐酸性能较好。蒋富强等 [7] 研制了一种由水玻璃、山梨醇、碳酸锂等组成的固砂剂, 抗老化性能较好, 提高了冻融稳定性。Dong Z 等 [8] 在造纸废液中提取出木质素磺化盐, 在木质素磺化盐溶液中加入甲醛和丙烯酸, 使其发生共聚反应得到固砂剂。该种固砂剂具有良好的抗风蚀性和生物降解能力。Achilias 等 [9] 利用废塑料生产固砂材料, 把废弃产品和塑料聚合物溶解再沉淀, 之后提取出高密度的聚乙烯和聚丙烯。使用其固砂后, 得到的砂土固化层具有较高的强度。多数固砂剂室内试验效果较好, 但制作相对复杂, 耐水性相对较差, 不适应野外的恶劣环境。

针对现有化学固砂方法的局限性, 笔者研究出了一种新型的固砂剂——TD-1。TD-1 的原材料易得, 施工方便, 可在野外大面积使用。TD-1 的主要材料由钾水玻璃溶液和新型磷酸硅配制而成, 还加入了硅酸锂溶液和硅溶胶溶液 [10]。TD-1 固砂剂固化后的产物可促进植物生长, 固砂效果良好。另外, 笔者还提供了一种改性剂, 可以在环境恶劣、植物不易生长的地区配合固砂剂使用, 增强固砂强

度。为研究其固砂效果, 笔者进行了配比优化试验、渗透试验、干湿循环试验。在张承高速公路试验段试用此固砂剂, 并结合客土喷播技术进行植草, 取得了良好的防护效果。

一、室内试验材料及试验方案

(一) 试验材料

(1) 风积砂: 取自张家口沽源地区, 为级配不良的中砂; 最优含水率为 12.8%, 对应的最大干密度为 1.627 g/cm^3 。

(2) 钾水玻璃溶液: 取 6 种不同模数的钾水玻璃 ($M=3.20、3.25、3.30、3.35、3.40、3.45$)。

(3) 固化剂: 新型磷酸硅, 是无毒无味的白色粉末晶体, 可充分溶于水, 促进固化反应的进行。

(4) 硅酸锂溶液: 模数为 4.8, 浓度为 0.2 g/mL 。硅酸锂溶液具有自干性, 不需要固化剂的固化作用。硅酸锂与钾水玻璃混合使用能够降低成本, 并改善硅酸锂的成膜反应。

(5) 硅溶胶溶液: 碱性硅溶胶 ($\text{pH}=7.5\sim 9$), 浓度为 0.3 g/mL 。硅溶胶溶液的分散性好、黏度低, 可以充分填充到孔隙中。硅溶胶粒子比表面积为 $50\sim 400 \text{ m}^2/\text{g}$, 粒径范围在 $10\sim 20 \text{ nm}$ [11]。硅溶胶比表面积大, 表面能大, 有自动减少表面能的趋势, 小粒子能够凝聚成大颗粒, 进而形成凝胶, 并凝聚成黏结膜 [12]。

(二) 试验方案

将钾水玻璃、磷酸硅、硅酸锂溶液、硅溶胶溶液加水混合配制成固砂剂浆液。为优化固砂剂配比及研究其固砂效果, 制定以下试验方案。

(1) 钾水玻璃的固含量分别为所需固化风积砂质量的 2%、3%、4%; 添加的磷酸硅固含量为钾水玻璃固含量的 6%; 硅酸锂固含量为钾水玻璃固含量的 2%; 硅溶胶固含量为钾水玻璃固含量的 3%。磷酸硅、硅酸锂、硅溶胶添加比例固定。

(2) 使用 6 种模数的钾水玻璃配制固砂剂 (每种模数的钾水玻璃固含量分别为 2%、3%、4%) 制作试样, 进行无侧限抗压强度试验, 根据结果优化固砂剂配比。

(3) 使用 6 种模数的钾水玻璃制作试样 (钾水玻璃固含量为 3%), 每个试样添加 5 g 改性剂。进

行无侧限抗压强度试验, 研究改性剂对固砂试样强度的影响。

(4) 使用两种模数的钾水玻璃 ($M=3.20$ 、 3.45 , 钾水玻璃固含量为 3%) 配制固砂剂, 制作试样。进行渗透试验和干湿循环试验。

(5) 进行强度测试的试样规格为 $70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm}$, 压实度为 97%; 进行渗透试验的试样使用环刀制作, 环刀内径为 61.8 mm , 高 40 mm , 压实度为 97%。

二、室内试验结果分析

(一) 钾水玻璃模数和固含量对固化砂强度的影响

使用不同模数和固含量的钾水玻璃制作试样。分析试样 14 d 时的无侧限抗压强度, 试验结果见表 1。

表 1 试样 14 d 时的无侧限抗压强度

| 组号 | 钾水玻璃模数 | 钾水玻璃固含量 / % | 无侧限抗压强度 / kPa |
|----|--------|-------------|---------------|
| 1 | 3.20 | 2 | 702.41 |
| 2 | 3.20 | 3 | 865.42 |
| 3 | 3.20 | 4 | 844.38 |
| 4 | 3.25 | 2 | 854.07 |
| 5 | 3.25 | 3 | 950.37 |
| 6 | 3.25 | 4 | 865.87 |
| 7 | 3.30 | 2 | 897.53 |
| 8 | 3.30 | 3 | 1060.77 |
| 9 | 3.30 | 4 | 924.21 |
| 10 | 3.35 | 2 | 999.00 |
| 11 | 3.35 | 3 | 1246.32 |
| 12 | 3.35 | 4 | 1077.05 |
| 13 | 3.40 | 2 | 1097.62 |
| 14 | 3.40 | 3 | 1419.10 |
| 15 | 3.40 | 4 | 1196.25 |
| 16 | 3.45 | 2 | 1228.23 |
| 17 | 3.45 | 3 | 1431.45 |
| 18 | 3.45 | 4 | 1301.37 |

由试验结果可知, 风积砂在固砂剂 TD-1 的作用下形成了一定的强度, 试样在 14 d 时的固砂强度均超过了 700 kPa。磷酸硅在钾水玻璃溶液中水解出 H^+ , 代替钾水玻璃中易引起水解的 K^+ , 并与钾水玻璃溶液中的硅酸离子反应生成硅酸二聚体, 并进一步融合生成多硅酸, 多硅酸聚合形成 SiO_2 。当形成的 SiO_2 含量超过一定量时便凝聚形成凝胶网络结构。形成的凝胶与砂粒混合后, 在砂粒表面形

成一层黏结膜, 使松散的砂粒黏结在一起, 产生一定的强度。没有参与反应的钾水玻璃、硅酸锂、硅溶胶也会在砂粒表面形成黏结膜, 增加固化砂试样的强度。

由图 1 可知, 添加相同固含量的钾水玻璃和磷酸硅, 固化砂试样的强度随着钾水玻璃模数的增大呈现增长的趋势。钾水玻璃的模数越高, 在混合溶液中形成的凝胶网络结构也就越多。固化砂试样的表层先失水发生凝结硬化, 形成一层坚硬的外壳, 之后由外向内逐步硬化。

由图 2 可知, 在到达 14 d 龄期时, 使用钾水玻璃固含量为 3% 的试样, 试样强度大于使用钾水玻璃固含量为 2% 和 4% 的试样。当添加的钾水玻璃固含量从 2% 提高到 3% 时, 试样强度有明显的增长; 当固含量超过 3% 以后, 试样强度增长速率放缓, 甚至强度有所下降。当钾水玻璃固含量为 3% 时, 已经基本能够在砂粒表面形成一层包覆的黏结膜, 并使相邻的砂粒通过黏结膜连接起来形

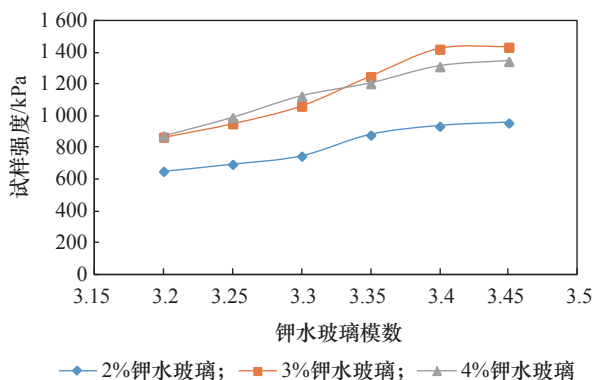


图 1 不同模数钾水玻璃对试样强度的影响曲线

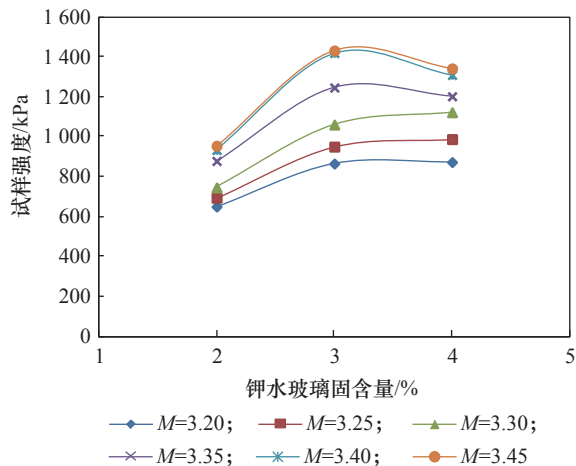


图 2 钾水玻璃固含量对试样强度的影响曲线

成黏结桥。当钾水玻璃固含量超过3%时,作为骨料的风积砂相对含量有所降低,试样结构的稳定性受到了影响,无法形成更高的强度。

(二) 改性剂对固化砂强度的影响

测定龄期14 d试样的无侧限抗压强度。添加改性剂与不添加改性剂试样的强度对比如表2所示。

添加改性剂后,龄期14 d的试样强度均能达到1 000 kPa以上,相对于不添加改性剂的试样强度增长了32.5%~60.8%。添加的改性剂能够产生类似于沸石的致密胶凝结构,使砂土颗粒之间的黏结力增强。产生的胶凝产物填充于骨架之间,使孔隙变小,界面趋于密实。添加改性剂后,在酸性环境下不受腐蚀,有较好的耐酸性。

(三) 固化砂的渗透性能

为了能与客土喷播植草结合使用,固化砂需要有一定的渗透能力,为此进行了固化砂的渗透试验。由于风积砂添加固砂剂后形成的固化砂与单纯的砂土不同,所以对龄期7 d的试样使用变水头法进行渗透试验。试验完成后,试样无明显孔隙,渗透试验如图3所示。

使用模数为3.20钾水玻璃的试样渗透系数为 1.69×10^{-4} cm/s,使用模数为3.45钾水玻璃的试样渗透系数为 8.25×10^{-5} cm/s,固化砂具有一定的渗透能力。固砂剂在砂粒周围形成黏结膜,黏结膜互相连接,但仍有孔隙存在。在渗透过程中,水从黏结膜间的孔隙经过。使用高模数钾水玻璃的试样,试样内部黏结膜较多,孔隙小于使用低模数钾水玻璃的试样,所以渗透能力相对较低。

(四) 固化砂干湿循环特性

为模拟沾源地区夏季多雨情况,防止边坡表

表2 不添加改性剂试样与添加改性剂试样的强度对比

| 钾水玻璃模数 | 不添加改性剂试样的强度/kPa | 添加改性剂试样的强度/kPa | 强度增长率/% |
|--------|-----------------|----------------|---------|
| 3.20 | 865.42 | 1 146.63 | 32.5 |
| 3.25 | 950.37 | 1 356.81 | 42.8 |
| 3.30 | 1 060.77 | 1 605.84 | 60.8 |
| 3.35 | 1 246.32 | 1 817.12 | 45.8 |
| 3.40 | 1 419.10 | 2 207.96 | 55.6 |
| 3.45 | 1 431.45 | 2 174.79 | 51.9 |

层固化砂经过雨水冲蚀和自然干燥后发生开裂、坍塌的现象,采用常规的浸水饱和、自然蒸干的方法进行干湿循环试验。固砂试样分别进行0次、1次、2次、3次、4次、5次干湿循环。进行0次循环的试样不浸水,到28 d龄期后直接测试其强度。其余每次干湿循环都将试样浸水饱和24 h,之后干燥48 h再测定其强度。饱水是将试样直接放入水中,水面完全没过试样,经过饱水24 h后,试样没有在水中溃散,表面有小部分砂粒脱落。干湿循环后,对试样进行无侧限抗压强度试验,结果如图4所示。

由图4可知,随着干湿循环次数的增加,试样的强度逐渐下降。经过1~3次循环,试样强度下降速率快;经过3次循环之后强度基本趋于稳定;经过5次循环之后,试样强度均在600 kPa以上。

固砂试样经过多次干湿循环之后,能够保持一定的强度。在配制固砂剂时,钾水玻璃与磷酸硅反应生成的凝胶网络结构不易在水中溶解,硅溶胶和硅酸锂形成的黏结膜耐水性良好。但是钾水玻璃自



图3 渗透试验

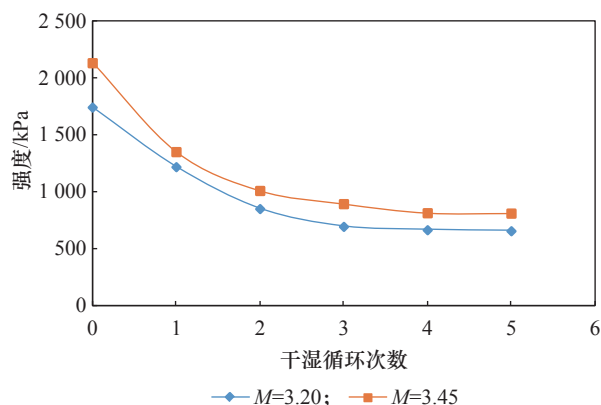


图4 试样强度随干湿循环次数的变化

行脱水形成的黏结膜在饱水情况下容易被破坏。在饱水过程中，固砂剂形成的黏结膜部分溶解于水中，使试样的强度有所下降。在3次循环之后，剩余部分的黏结膜不溶于水中，形成的结构不易被破坏。

三、边坡固化试验

在张承高速公路试验段试用此固砂剂。试验边坡为砂质挖方边坡，坡高13 m，长度50 m，坡角45°，坡面总面积为920 m²。

计算边坡表层需要固化的砂体质量，现场配制固砂剂：钾水玻璃的固含量为固化砂体质量的3%；磷酸硅的固含量为钾水玻璃固含量的6%；硅酸锂的固含量为钾水玻璃固含量的2%；硅溶胶的固含量为钾水玻璃固含量的3%；根据风积砂的最优含水率添加一定量的水，搅拌均匀。使用喷涂设备将固砂剂呈雾状均匀喷涂在砂质边坡表层。喷涂完成后的效果如图5所示。

固砂剂在2 h之后开始凝结固化，24 h之后形成一定强度。固砂剂在边坡表面固化后，形成的固化层表面平整。检查固砂剂在边坡表面的入渗、固化情况，如图6所示。

喷洒固砂剂7 d之后检测边坡表面固化层强度。每100 m²取一个试样，进行强度测试，结果见表3。由表3可知在野外使用固砂剂，7 d后固化层的强度在800 kPa以上，固化层密实，强度较高。之后结合客土喷播技术进行植草，两年后效果如图7所示。

两年后砂质边坡坡面没有出现水蚀、开裂、坍塌等现象。固化层具有良好的耐候性。固砂剂固化

后的产物可作为植物的肥料，促进坡面植物的生长。使用客土喷播技术植草后，不但绿化了砂质边坡坡面，而且增加了边坡的稳定性。

四、结语

本研究通过对固砂试样进行配比优化试验、渗透试验、干湿循环试验、现场试验，研究固砂剂的固砂效果，提出了保障公路砂质边坡安全的新型化学固砂技术。得到如下结论。

(1) 试样的强度随钾水玻璃模数的增加而增加，

表3 边坡测试点取样强度

| 取样点 | 强度 /kPa | 取样点 | 强度 /kPa |
|-----|----------|-----|----------|
| 1 | 823.65 | 6 | 1 039.19 |
| 2 | 1 089.96 | 7 | 912.56 |
| 3 | 963.41 | 8 | 1 036.59 |
| 4 | 952.86 | 9 | 996.38 |
| 5 | 826.35 | 10 | 886.39 |



图6 固砂剂边坡入渗、固化情况



图5 喷涂完成后的效果



图7 两年后砂质边坡的固化效果

添加钾水玻璃的最佳固含量为固化砂质量的 3%。

(2) 添加改性剂后试样强度相对于不添加改性剂的试样强度增长了 32.5%~60.8%。

(3) 固砂试样具有一定的渗透能力。使用低模数钾水玻璃制作的试样相对于高模数钾水玻璃制作的试样渗透能力更好。

(4) 固砂剂具有良好的耐水性。随着干湿循环次数的增加, 固砂试样的强度逐渐下降, 3 次循环之后, 强度基本趋于稳定。

(5) 在张承高速公路试验段, 喷涂固砂剂固砂, 并结合客土喷播技术植草, 不仅绿化了坡面而且增加了边坡的稳定性。经过两年观测, 效果良好。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. JTG D30—2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the PRC. JTG D30—2015, specifications for design of highway subgrades [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [2] 中华人民共和国铁道部. TB10035—2006 铁路特殊路基设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
Ministry of Railways of the PRC. TB10035—2006, code for design on special subgrade of railway [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
- [3] 刘瑞顺, 王文龙, 廖超英, 等. 露天煤矿排土场边坡防护措施减水减沙效益分析 [J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4): 59–64.
Liu R S, Wang W L, Liao C Y, et al. Benefits in runoff and sediment reductions of the protection methods for the dump slope of opencast coal mine [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(4): 59–64.
- [4] 杨钊. 道路防护工程的再生混凝土试验研究(硕士学位论文) [D]. 扬州: 扬州大学, 2015.
Yang Z. Experimental research of recycled concrete in road protective engineering (Master's thesis) [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015.
- [5] 刘睿军. 三峡库区低等级土质道路侵蚀及防护研究(博士学位论文) [D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
Liu Y J. Research of the soil erosion and protection on the low-volume unpaved road in the three gorge reservoir area (Doctoral dissertation) [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.
- [6] 李婷, 邓湘云, 李建保, 等. 铝硅酸盐改性固沙材料的研究 [J]. 材料导报, 2010, 24(15): 431–435.
Li T, Deng X Y, Li J B, et al. A study on the modified aluminosilicate sand stabilization material [J]. Materials Review, 2010, 24(15): 431–435.
- [7] 蒋富强, 熊治文, 李凯崇, 等. 一种化学固沙剂及其制备方法: 中国, 102127453 [P]. 2011-07-20.
Jiang F Q, Xiong Z W, Li K C, et al. A chemical sand fixing agent and its preparation method: China, 102127453 [P]. 2011-07-20.
- [8] Dong Z, Wang L, Zhao S. A potential compound for sand fixation synthesized from the effluent of pulp and paper mills [J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(7): 1388–1392.
- [9] Achilias D S, Roupalias C, Megalokonomos P, et al. Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene and polypropylene [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 149(3): 536–540.
- [10] 牛笑笛, 杨广庆, 蒲昌瑜, 等. 新型固砂剂试验效果分析及边坡防护施工工艺研究 [J]. 铁道建筑, 2017 (2): 86–90.
Niu X D, Yang G Q, Pu C Y, et al. Analysis on experiment effect of new-type sand consolidating agent and research on construction technique of slope protection [J]. Railway Engineering, 2017 (2): 86–90.
- [11] 田华, 陈连喜, 刘全文. 硅溶胶的性质、制备和应用 [J]. 国外建材科技, 2007, 28(2): 8–11.
Tian H, Chen L X, Liu Q W. Prosperities, manufactures and application of silica sol [J]. The World of Building Materials, 2007, 28(2): 8–11.
- [12] 殷馨, 戴媛静. 硅溶胶的性质、制法及应用 [J]. 化学推进剂与高分子材料, 2005, 3(6): 27–32.
Yin X, Dai Y J. Characteristics, manufacture and application of silica sol [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2005, 3(6): 27–32.