

环境适应性设计与分析

SiO₂气凝胶砂浆性能的优化研究

王飞¹, 黄露², 刘朝辉¹, 叶圣天¹, 贾艺凡¹

(1. 解放军后勤工程学院 化学与材料工程系, 重庆 401311;
2. 西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 目的 研究 SiO₂气凝胶颗粒体积替换比在 30%前提下砂浆性能的优化, 提高其保温性能和环境适应性。方法 采用正交实验的方法, 通过向砂浆中添加纤维、引气剂和胶粉来改善砂浆的保温性能, 并对比研究各掺杂比例对砂浆密度、力学性能、吸水率, 尤其是对砂浆导热系数的影响。结果 当纤维、引气剂和胶粉的掺量(质量分数)分别为 0.2%, 0.05% 和 1% 时, 导热系数达到最低, $\lambda = 0.3177 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 此时, 砂浆的密度为 $1751.6 \text{ kg}/\text{m}^3$, 抗压强度和抗折强度分别为 13.4 MPa 和 8.02 MPa, 吸水率为 7.19%, 导热系数为 $0.3177 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。结论 通过添加纤维、引气剂和胶粉, 砂浆的性能得到一定程度的改善, 其密度在较小的范围内变化, 抗折强度提高较大, 导热系数在一定范围内降低。

关键词: SiO₂气凝胶; 保温砂浆; 导热系数; 建筑保温

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.02.003

中图分类号: TJ04; TQ177.6 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)02-0013-05

Performance Optimization of SiO₂ Aerogel Mortar

WANG Fei¹, HUANG Lu², LIU Zhao-hui¹, YE Sheng-tian¹, JIA Yi-fan¹

(1. Department of Chemistry & Material Engineering, LEU, Chongqing 401311, China;
2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: Objective To study the performance optimization of mortar at a SiO₂ aerogel particles volume replacement ratio of 30%, in order to improve the thermal insulation performance and environmental adaptability. **Methods** With the method of orthogonal experiment, fiber, air-entraining agent and powder were added into the mortar to improve the insulation performance, and the density, mechanical properties, water absorption, especially the thermal conductivity of mortar were compared to study the influence of different doping ratio. **Results** When the dosages of fiber, air-entraining agent and powder were 0.2%, 0.05% and 1% respectively, the thermal conductivity was the lowest

收稿日期: 2015-12-19; 修订日期: 2015-12-28

Received: 2015-12-19; Revised: 2015-12-28

基金项目: 全军后勤科研计划项目(BY115C007)

Fund: Supported by Logistical Scientific Research Projects of Army(BY115C007)

作者简介: 王飞(1988—),男,安徽人,硕士研究生,主要研究方向为保温隔热材料。

Biography: WANG Fei(1988—), Male, from Anhui, Master graduate student, Research focus: thermal insulation material.

通讯作者: 刘朝辉(1965—),男,重庆人,博士,教授,主要研究方向为保温隔热技术。

Corresponding author: LIU Zhao-hui(1965—), Male, from Chongqing, Ph.D., Professor, Research focus: thermal insulation technology.

(0.3177 W/m·K). At this time, the density of mortar was 1751.6 kg/m³, the compressive strength and flexural strength were 13.4 MPa and 8.02 MPa, the water absorption was 7.19%, and the thermal conductivity was 0.3177 W/m·K.

Conclusion By adding fiber, air-entraining agent and powder, the performance of mortar was improved to a certain degree, its density changed within a smaller range, the flexural strength largely increased, and the thermal conductivity reduced within a certain range.

KEY WORDS: SiO₂ aerogel; thermal insulation mortar; thermal conductivity; building insulation

随着人们环保观念和节能理念的提升,建筑保温隔热越来越受到关注,这就极大地推动了建筑保温隔热材料及其技术的发展。SiO₂气凝胶作为一种新型纳米材料,因其具有低密度、低热导率(常温下最低可达0.01 W/(m·K))以及高光透过性等性能^[1-5],可作为一种高效的保温隔热材料,在建筑保温隔热领域有着广泛的应用前景。目前的建筑保温隔热材料不同程度地存在质量、防水、防火以及污染大等方面的缺陷,随着节能技术的发展,建筑保温隔热材料的研究正在向轻质、多功能、绿色环保型复合保温材料发展,而SiO₂气凝胶有着其他材料无法比拟的特性(质轻、憎水、超低绝热、绿色环保),将会成为未来保温材料发展的重点研究方向。

前期由于SiO₂气凝胶生产工艺较为复杂,成本较高,其应用主要限于航空航天等高端领域,但随着研究的深入,目前逐渐开始应用于民用建筑保温隔热领域^[6-7]。主要有气凝胶玻璃^[8-9]、气凝胶涂料^[10]、气凝胶保温板和绝热毡等,而将其用到混凝土和砂浆中的研究还较少。国外方面, Kim^[11]将SiO₂气凝胶粉末加入到水泥浆中发现,当SiO₂气凝胶粉末的质量占总质量的2.0%时,其导热系数下降75%。T. Gao^[12]将SiO₂气凝胶颗粒添加到混凝土中,并与EPS混凝土的性能进行比较,主要研究了其掺量对气凝胶混凝土的密度、力学性能和导热系数的影响,并总结得出了此三者的关系。国内方面,郭金涛^[13]以气凝胶和玻化微珠两种材料为保温骨料,将此两者按级配混合制备出新型保温砂浆,这些研究都为SiO₂气凝胶在建筑中的应用提供参考。因此实验采取替换法将SiO₂气凝胶颗粒添加到砂浆中,并通过掺杂来进一步提高砂浆的保温性能,提高其环境适应性^[14-16],降低材料成本^[17],拓展其在建筑保温领域中的应用。

1 实验

1.1 原材料

实验采用的SiO₂气凝胶颗粒由广东埃力生高新科

技有限公司生产,其主要性能指标:密度为100 kg/m³,颗粒尺寸范围为0.1~5 mm,比表面积为575.64 m²·g,孔隙率为>90%,孔径为20~100 nm,导热系数为0.020 W/(m·K)(常温下)。水泥为P.O42.5R级普通硅酸盐水泥;硅灰为微细硅灰,平均粒径为0.1~0.3 μm;细骨料采用ISO标准砂;纤维采用12 mm聚丙烯纤维;胶粉为临沂市兰山区绿森化工有限公司生产的ZJ-518可再分散胶粉;引气剂采用济南万承化工有限公司生产的混凝土引气剂。

SiO₂气凝胶颗粒的表面形貌如图1所示,可以看出, SiO₂气凝胶颗粒是由小的纳米颗粒聚合而成,属于典型的纳米结构材料。SiO₂气凝胶颗粒的接触角如图2所示,从测试结果可知,其接触角约为145°,疏水性较强,作为保温材料,可以有效减小因材料吸水造成的导热系数上升。

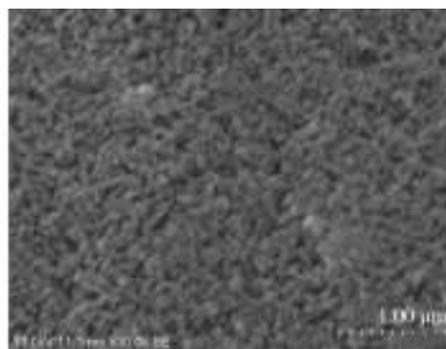


图1 SiO₂气凝胶颗粒的表面形貌
Fig.1 Surface morphology of SiO₂ aerogel particles



图2 SiO₂气凝胶颗粒的接触角
Fig.2 Contact angle of SiO₂ aerogel particles

1.2 实验方法

1.2.1 制备工艺

SiO₂气凝胶砂浆的制备与一般的砂浆不同,一方面SiO₂气凝胶密度低,导致其搅拌过程中容易挥飞;另一方面, SiO₂气凝胶强度低、脆性大,在搅拌过程中,如果转速过快,容易导致SiO₂气凝胶破碎、飞溅出来。为此本实验采用的工艺为:先将水泥、沙、硅灰、纤维、引气剂和胶粉等材料干拌混合,然后加水搅拌均匀,再将SiO₂气凝胶颗粒缓慢地加入到砂浆中(气凝胶颗粒加入速度先慢后快),待气凝胶颗粒搅拌均匀后直接浇筑

(为防止SiO₂气凝胶颗粒上浮,浇筑过程中不可振捣)。

1.2.2 配合比设计

实验采用的基础配合比为: $m(\text{水泥}):m(\text{沙})=1:3$,硅灰质量占水泥的10%,水胶比为0.38,采用SiO₂气凝胶颗粒等体积替换砂浆中的沙。选取SiO₂气凝胶颗粒替换砂的比例为30%时作为研究对象,通过添加纤维、引气剂和胶粉来对砂浆作优化研究(其掺杂比例为胶凝材料的质量分数),其中,纤维、引气剂和胶粉的掺杂比例分别为(0.1%, 0.2%, 0.3%), (0.05%, 0.1%, 0.15%)和(0.5%, 1%, 1.5%),具体配合比见表1。

表1 SiO₂气凝胶砂浆配合比(40mm × 40mm × 160mm)

Table 1 Mix proportions of SiO₂ aerogel mortar

| 试验编号 | 配合比 | | | | | | | | |
|------|------|------|-----|-------|------|--------|------|-------|------|
| | 水泥/g | 硅灰/% | 水/g | 减水剂/% | 细骨料 | | 纤维/% | 引气剂/% | 胶粉/% |
| | | | | | 沙/g | 气凝胶/mL | | | |
| 1 | 900 | 10 | 380 | 1 | 2100 | 540 | 0.1 | 0.05 | 0.5 |
| 2 | 900 | 10 | 380 | 1 | 2100 | 540 | 0.1 | 0.1 | 1 |
| 3 | 900 | 10 | 380 | 1 | 2100 | 540 | 0.1 | 0.15 | 1.5 |
| 4 | 900 | 10 | 380 | 1 | 2100 | 540 | 0.2 | 0.05 | 1 |
| 5 | 900 | 10 | 380 | 1 | 2100 | 540 | 0.2 | 0.1 | 1.5 |
| 6 | 900 | 10 | 380 | 1 | 2100 | 540 | 0.2 | 0.15 | 0.5 |
| 7 | 900 | 10 | 380 | 1 | 2100 | 540 | 0.3 | 0.05 | 1.5 |
| 8 | 900 | 10 | 380 | 1 | 2100 | 540 | 0.3 | 0.1 | 0.5 |
| 9 | 900 | 10 | 380 | 1 | 2100 | 540 | 0.3 | 0.15 | 1 |

1.3 性能测试与表征

采用Drop Meter A-100型接触角测量仪(宁波海曙迈时检测科技有限公司)对SiO₂气凝胶颗粒的接触角进行测试;用TYEH-2000型微机控制恒加载压力试验机(无锡新路达仪器设备有限公司)按GB/T JGJ/T 70—2009测量砂浆的抗压和抗折强度,试样尺寸为40 mm × 40 mm × 160 mm;采用博远CABR-NES-E型非接触式混凝土收缩变形测定仪(舟山市博远科技开发有限公司)对SiO₂气凝胶砂浆的自收缩率进行测定;采用DR-300A+型平板导热仪(武汉盛科技发展有限公司)按GB/T 10294—2008测量砂浆的导热系数,试样尺寸为300 mm × 300 mm × 30 mm;采用HITACHI S-3700N(日本日立公司)观察SiO₂气凝胶颗粒及砂浆的表面形貌。

2 结果与分析

2.1 在砂浆中的稳定性

SiO₂气凝胶颗粒强度低,极易在搅拌中出现破碎,或在水泥水化过程中有可能因水化作用导致其发生化学反应,造成SiO₂气凝胶颗粒性质发生根本性变化^[18-19]。图3表示替换比例为30%的SiO₂气凝胶颗粒在砂浆中的表面形貌,图中A代表SiO₂气凝胶颗粒。图4表示SiO₂气凝胶颗粒与砂浆粘接的界面。从图3中可以看出, SiO₂气凝胶颗粒能够稳定地存在于砂浆中,且保持原有的大概尺寸,与砂浆能够较好地共存,且并没有因水泥水化作用而发生性质改变。图4则可说明SiO₂气凝胶颗粒能够与砂浆表现较好的粘结性能,可形成

较为稳定的复合体系。

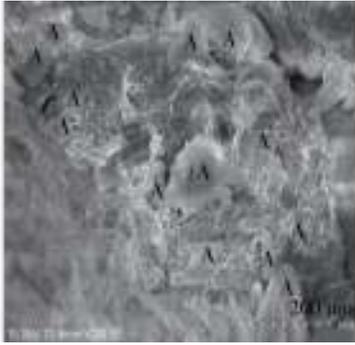


图3 SiO₂气凝胶颗粒的表面形貌

Fig.3 Surface morphology of SiO₂ aerogel particles



图4 SiO₂气凝胶颗粒与砂浆粘接界面

Fig.4 Bonding section of SiO₂ aerogel particles with mortar

2.2 SiO₂气凝胶砂浆性能优化

图5a表示不同比例的纤维、引气剂和胶粉掺量与砂浆密度的关系。未掺杂时,砂浆的密度为1669.7 kg/m³。结合表1可以得出:SiO₂气凝胶砂浆的密度变化幅度并不是太大,但总体趋势是随着纤维掺入比例的增加,砂浆的密度呈现小幅的增加,主要原因可能是各组分的掺量较少的缘故。

图5b表示不同比例的纤维、引气剂和胶粉与砂浆力学性能的关系。未掺杂时,砂浆的抗压和抗折强度分别为23.7 MPa和6.89 MPa。可以看出:与未掺杂相比,砂浆的抗压强度下降较为明显,主要原因可能是因为引气剂和胶粉的加入使砂浆内部引入了大量、封闭均匀的气泡,进而导致抗压强度降低;抗折强度得到了一定程度的提高,主要可能是聚丙烯纤维的加入,因其具有较高的强度和韧性,能够有效提高基体材料的密实性,所以,砂浆的抗折强度得到提高。

导热系数是衡量一个材料保温性能最直接的体现,该实验的目的在于:在保证砂浆具备良好的力学性能和施工性能前提下,通过其他方法最大程度地降低砂浆的导热系数,提高砂浆保温性能,降低SiO₂气凝胶砂浆的材料成本。图5c表示不同比例的纤维、引气剂和胶粉与砂浆导热系数的关系。未掺杂时,当SiO₂气凝胶颗粒替换比例为30%,砂浆的导热系数为

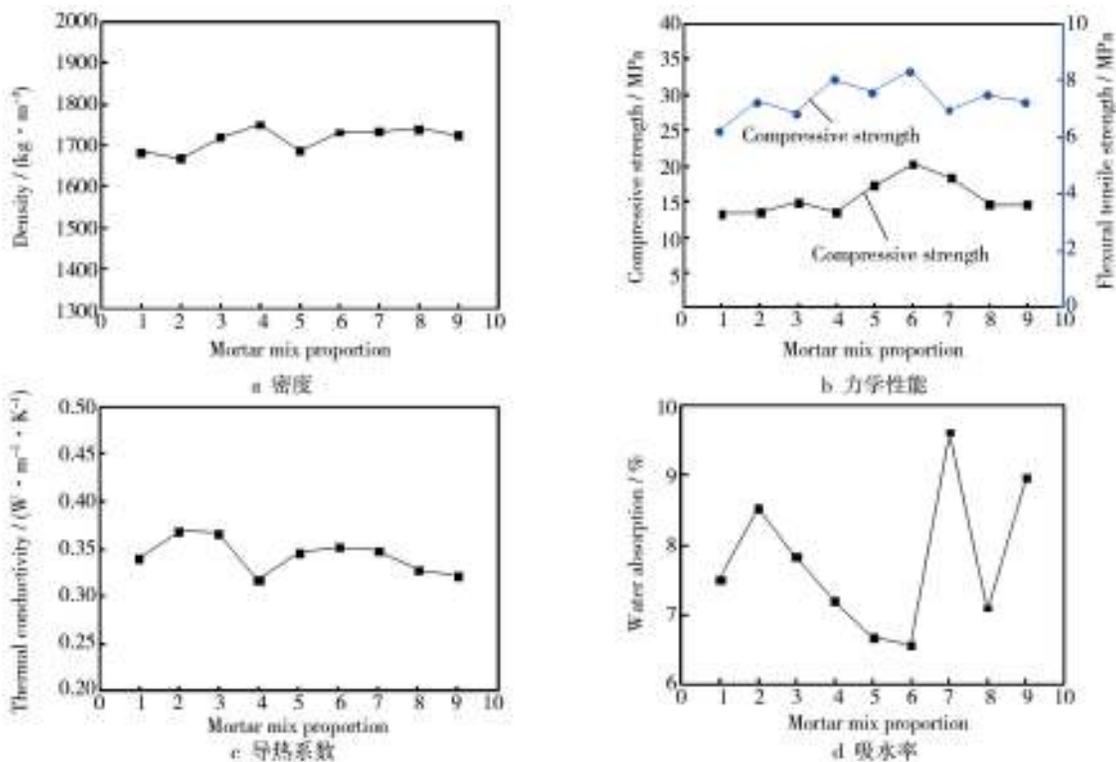


图5 SiO₂气凝胶砂浆的性能参数

Fig.5 Performance parameters of SiO₂ aerogel mortar

0.3669 W/(m·K)。从图中5c可以看出:纤维、引气剂和胶粉的加入能一定程度降低砂浆的导热系数,其大致趋势为:随着纤维比例的增加,呈现出先增加后减小再增加的状态,当纤维、引气剂和胶粉的比例分别为0.2%,0.05%,1%时,导热系数降低程度最大,此时砂浆的导热系数为0.3177 W/(m·K)。

图5d表示不同掺量的纤维、引气剂和胶粉与砂浆吸水率的关系。未掺杂时,砂浆的吸水率为8.18%,从图中看出其吸水率有较大变化。结合图5c可知,当砂浆的导热系数最低时,其吸水率为7.19%,在一定程度上得到降低,从而也说明在此掺杂比例下,砂浆的结构较为密实,对吸水率有一定的削弱作用。

综合以上实验结果可知:外加剂的掺杂对砂浆的各种性能几乎都有改善。配方4导热系数最低,其他性能与未掺杂相比也得到一定程度的改善,配方5密度最低,配方6抗压、抗折强度最高,吸水率最低,但这两个配方的导热系数较高。因此,从节能、节约成本以及环境的适应性角度出发,配方4不仅导热系数最低,而且吸水率也较低,保温效果相比较而言最好,同时其抗压强度也较高,也不会影响其使用性能,与其他配方相比较而言,此配方为最优配方。

3 结论

1) 在添加纤维、引气剂和胶粉的条件下, SiO₂气凝胶颗粒依然能够稳定地存在于砂浆中,水泥的水化作用并没有改变其性质。

2) 与未掺杂相比, SiO₂气凝胶砂浆的导热系数基本上都得到一定程度的降低。当纤维、引气剂和胶粉的掺入比例分别为0.2%,0.05%,1%时,导热系数降至0.3177 W/(m·K),可为下一步从事SiO₂气凝胶砂浆保温性能的研究提供参考。

3) 在最优配方下, SiO₂气凝胶砂浆的密度虽然较大,但其吸水率较低,环境的适应性较好,在潮湿的环境中使用时对砂浆的保温性能影响较小。

参考文献:

[1] HRUBESH L W. Aerogels: The World's Lightest Solids[J]. Chemistry and Industry, 1990 (24): 824—827.
 [2] FRICKE J, EMMERLING A. Aerogels—Preparation, Properties, Applications Chemistry, Spectroscopy and Applications of Sol-Gel Glasses[M]. Berlin: Springer-Heidelberg, 1992.
 [3] FESMIRE J E. Aerogel Insulation Systems for Space Launch Applications[J]. Cryogenics, 2006, 46(2): 111—117.

[4] WOIGNIER T, PHALIPPOU J. Mechanical Strength of Silica Aerogels[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1988, 100(1): 404—408.
 [5] FRICKE J. Aerogels—Highly Tenuous Solids with Fascinating Properties[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1988, 100(1): 169—173.
 [6] 路国忠,何光明,郭建平. SiO₂气凝胶性能研究及其在建筑保温中的应用[J]. 墙材革新与建筑节能, 2013(2): 41.
 LU Guo-zhong, HE Guang-ming, GUO Jian-ping. Performance Research of SiO₂ Aerogel and Its Application in Building Insulation[J]. Journal of Wall Materials Innovation and Building Energy Conservation, 2013(2): 41.
 [7] BAETENS R, JELLE B P, GUSTAVSEN A. Aerogel Insulation for Building Applications: A State-of-the-Art Review[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(4): 761—769.
 [8] JENSEN K I. Passive Solar Component Based on Evacuated Monolithic Silica Aerogel[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1992, 145: 237—239.
 [9] SCHULTZ J M, JENSEN K I, KRISTIANSEN F H. Super Insulating Aerogel Glazing[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2005, 89(2): 275—285.
 [10] 刘红霞,陈松,贾铭琳,等. 疏水SiO₂气凝胶的常压制备及在建筑隔热涂料中的应用[J]. 涂料工业, 2011, 41(8): 64—67.
 LIU Hong-xia, CHEN Song, JIA Ming-lin, et al. Preparation of Hydrophobic SiO₂ Aerogel under Ambient Pressure and Its Application in Heat-insulating Architectural Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2011, 41(8): 64—67.
 [11] KIM S, SEO J, CHA J, et al. Chemical Retreating for Gel-typed Aerogel and Insulation Performance of Cement Containing Aerogel[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 501—505.
 [12] GAO T, JELLE B P, GUSTAVSEN A, et al. Aerogel-incorporated Concrete: An Experimental Study[J]. Construction and Building Materials, 2014, 52: 130—136.
 [13] 郭金涛. 硅气凝胶/玻化微珠复合保温砂浆研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
 GUO Jin-tao. Study on Silica Aerogels/Glazed Hollow Beads Composite Thermal-Insulating Mortar[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
 [14] 赵保平,孙建亮,张韬,等. 产品定寿与延寿中的几个环境问题[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 21—25.
 ZHAO Bao-ping, SUN Jian-liang, ZHANG Tao, et al. Some Problems of Environment Engineering in Life Estimation and Prolongation of Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 21—25.
 [15] 阮峥,刘朝辉,邓智平,等. 环氧树脂体系功能化研究进展 (下转第38页)

- 及动力提升措施[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 45—51.
- ZHOU Guang-meng, LIU Rui-lin, XU Xiang, et al. Countermeasures on Influence of Plateau Climate Environment on Equipment and Its Environmental Worthiness[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(3): 45—51.
- [7] 王亚生, 杨建军, 赵炳峰. 高原寒区对车辆性能的影响及对策[J]. 汽车运用, 2012(3): 20.
- WANG Ya-sheng, YANG Jian-jun, ZHAO Bing-feng. Influence and Countermeasures of Plateau Environment on Car Equipment[J]. Auto Application, 2012(3): 20.
- [8] 季慧玉, 邹其文, 黄兢业. 低压电器在高原环境中使用的适应性研究[J]. 低压电器, 2005(3): 45—49.
- JI Hui-yu, ZOU Qi-wen, HUANG Jin-ye. Adaptability Research on Low-voltage Electrical Apparatus for Plateau Environment[J]. Low Voltage Apparatus, 2005(3): 45—49.
- [9] 雷学敏. 高原环境对电工电子产品的影响及防护探讨[J]. 价值工程, 2011(19): 37—38.
- LEI Xue-min. Effect of Altitude Environment on Electric and Electronic Products and Protection[J]. Value Engineering, 2011(19): 37—38.
- [10] 侯宪春, 胡清森. 军运保障中高原和山区对汽车性能的影响研究[J]. 汽车运用, 2007(3): 61—63.
- HOU Xian-chun, HU Qing-sen. A Study of the Effects of Tableland and Mountainous Areas on Automobile—Transportation and Our Countermeasures[J]. Auto Application, 2007(3): 61—63.
- [11] 刘瑞林. 柴油机高原环境适应性研究[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.
- LIU Rui-lin. Research on Plateau Environmental Adaptability of Diesel Engines[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013.
- [12] 周广猛, 刘瑞林, 董素荣, 等. 柴油机高原环境适应性研究综述[J]. 车用发动机, 2013(4): 1—5.
- ZHOU Guang-meng, LIU Rui-lin, DONG Su-rong, et al. Review on Plateau Environment Adaptability of Diesel Engine[J]. Vehicle Engine, 2013(4): 1—5.
- [13] 赵士伟, 王崇哲, 杨健, 等. 不同气体状态方程在高原环境下应用的差异分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2014(4): 17—20.
- ZHAO Shi-wei, WANG Chong-zhe, YANG Jian, et al. Analysis of Different Gas State Equations Applied in the Altitude Environment[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2014(4): 17—20.
- [14] 胡连桃, 魏东涛, 罗光旭. 高原环境下航空地面制氧设备的技术选择及改进措施[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 88—90.
- HU Lian-tao, WEI Dong-tao, LUO Guang-xu. Technology Selection of Aviation Oxygen Equipment for Plateau Environment and Improvement Measures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 88—90.
- [15] 许翔, 张众杰, 郑智, 等. 叉车液压系统高原举升性能模拟试验研究[J]. 军事交通学院学报, 2012, 14(3): 45—48.
- XU Xiang, ZHANG Zhong-jie, ZHENG Zhi, et al. Experimental Study on Loading and Unloading Performance of Hydraulic System of Forklift at Plateau[J]. Journal of Military Transportation University, 2012, 14(3): 45—48.

(上接第 17 页)

- [J]. 装备环境工程, 2015, 12(1): 51—58.
- RUAN Zheng, LIU Zhao-hui, DENG Zhi-ping, et al. Research Progress in Functionalization of Epoxy Resin Systems [J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(1): 51—58.
- [16] 封先河. 环境作用动力学基础及应用[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 15—18.
- FENG Xian-he. Basement and Application of Dynamics of Environmental Effect[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 15—18.
- [17] 朱强, 李元章, 李云仲, 等. 低成本复合材料在小型飞艇吊舱上的应用[J]. 装备环境工程, 2015, 12(1): 110—113.
- ZHU Qiang, LI Yuan-zhang, LI Yun-zhong, et al. Application of Low-cost Composite Materials in the Small Airship Pod[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(1): 110—113.
- [18] FERRARIS C F. Alkali-silica Reaction and High Performance Concrete[R]. NIST Interagency/Internal Report, (NISTIR)—5742, 1995.
- [19] HEWLETT P C. Lea's Chemistry of Cement and Concrete[J]. Stat Bull Metrop Insur Co, 2004, 72(2): 14—33.