

# 新型石蜡防水剂对磷建筑石膏性能的影响

赵志曼<sup>2</sup>, 王思骅<sup>1</sup>, 全思臣<sup>3</sup>, 赵彬宇<sup>1</sup>, 张毅<sup>1</sup>, 李丹<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省土木工程防灾重点实验室, 云南 昆明 650500;  
3. 云南凝创环保科技有限公司, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 在石蜡中加入十二烷基苯磺酸钠、吐温-80 等表面活性剂制备出新型石蜡防水剂, 掺入到磷建筑石膏中制备试块, 再分别与掺入石蜡和空白组进行对比, 分析了其防水机理和对磷建筑石膏性能的影响, 以及不同类型、掺量表面活性剂对新型石蜡乳液的作用机理。分析可得, 掺入的新型石蜡防水剂所制备的磷建筑石膏试块具有较好的防水性能, 且当新型石蜡防水剂掺入量为 0.6% 时, 软化系数达到 0.78, 与空白组相比提高了 90%。当掺入量为 1% 时, 磷建筑石膏吸水率与掺入量为 0.2% 相比降低了 41.9%, 比空白组降低了 60.4%。

**关键词:** 石蜡; 表面活性剂; 磷建筑石膏; 防水

中图分类号: TU578.1, TS6536

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)06-0791-06

## Effect of new wax waterproofing agent on properties of phosphorus building gypsum

ZHAO Zhiman<sup>2</sup>, WANG Sihua<sup>1</sup>, QUAN Sichen<sup>2</sup>, ZHAO Binyu<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, LI Dan<sup>1</sup>

(1. Faculty of Architecture and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Province Civil Engineering Disaster Prevention Key Laboratory, Kunming 650500, China;

3. Yunnan Ningchuang Environmental Protection Technology Co., Ltd., Kunming 650500, China)

**Abstract:** A new paraffin waterproofing agent was prepared by adding Sodium dodecylbenzene sulfonate and Twain-80 surfactants into the paraffin wax, and the test blocks were added to phosphorus building gypsum. The waterproofing mechanism and the influence on the energy properties of phosphogypsum gypsum were analyzed respectively, and the mechanism of different types and dosage of surfactants on the new paraffin emulsion was compared. The results show that the phosphorus building gypsum sample prepared by adding new paraffin waterproofing agent has better waterproofing performance, and when the new paraffin waterproofing agent is 0.6%, the softening coefficient reaches 0.78, which is 90% higher than that of the blank group. When the content of phosphorus building gypsum is 1%, the water absorption of phosphorus building gypsum is 41.9% lower than that of 0.2% and 60.4% lower than that of blank group.

**Key words:** paraffin; surfactant; phosphorus building gypsum; waterproof

磷石膏作为湿法生产磷酸产生的工业固体废弃物, 属于危废污染物, 其性能极不稳定, 通常每生产磷酸(以  $\omega(\text{P}_2\text{O}_5)$  100% 计)1 t 副产磷石膏 4.5~5.0 t<sup>[1-2]</sup>。新《环保法》规定, 从 2018 年 1 月 1 日起排放磷石膏要收取排污费 25 元/t, 因此有必要寻求磷石膏的合理利用途径, 例如 Zolotukhin S N 等<sup>[3]</sup>制备出一种新型复合材料石灰石-砂-磷石膏, Mridul Garg 等<sup>[4]</sup>研究高附加值建筑中磷建筑石膏的性能, 李美等<sup>[5]</sup>提出在生产磷建筑石膏时加入缓凝剂调节凝结时间, 克服凝结时间短的缺

陷, 满足施工的需求, 更合理且更充分的对磷石膏合理化利用。由于磷建筑石膏本身耐水性差, 阻碍其综合利用和发展, 因此改善磷建筑石膏防水效果的重要性就凸显出来了。

石蜡的主要化学成分是饱和正构烷烃, 本身具有防水性能<sup>[6]</sup>, 但是, 由于其自身的附着力较差, 不能很好的与其他物体相融合, 因此不能充分体现其防水性能, 达不到较好的防水效果, 为改善其防水效果, 故选择可增强石蜡表面活性的物质, 使石蜡能更好的与磷建筑石膏相结合, 增

收稿日期: 2019-03-22

修改稿日期: 2019-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51662022)、昆明理工大学分析测试基金项目(2018M20172210090)

第一作者: 赵志曼(1965—), 女, 博士, 教授。主要从事新型材料研究。E-mail: lzd 2005@126.com

通信作者: 王思骅(1994—), 女, 硕士生。主要从事新型材料研究。E-mail: 964846657@qq.com

强石蜡的防水效果。将表面活性剂添加到石蜡中,表面活性剂能够促使石蜡更容易且充分的与其他物质相结合使用,不仅可以提高耐腐蚀性<sup>[7]</sup>,而且具有安全、便利和高效等优势<sup>[8]</sup>。Kapustin V M<sup>[9]</sup>研究发现,石蜡中含有油量可以增强防水性能。改进防水有外涂和内掺两种方法,而外涂型防水只是暂时改变其防水效果,无法从根本上解决磷建筑石膏耐水性的问题。因此本实验选择在石蜡中加入表面活性剂制备出新型石蜡防水剂,将新型石蜡防水剂掺入到磷建筑石膏中,将两者混合搅拌制备试块。

## 1 实验

### 1.1 主要原料

(1)磷石膏:取自云南云天化三环公司,呈灰黄色,附着水含量 0.745%,加入 50%洁净水,测

pH 值约为 6。经云南省有色地质测试中心和昆明理工大学化工学院实验室测试可知,其主要成分为  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,其含量为 86.49%,主要矿物组成成分见表 1。

(2)石蜡(液体),硅油,十二烷基三甲基氯化铵,十二烷基苯磺酸钠,吐温-80,油酸,硬脂酸,三乙醇胺均为工业级,市售产品。

### 1.2 配方与工艺

取石蜡 20%~30%,置于烧杯中,放入 0.3%~0.4%硬脂酸,加热至 90℃使石蜡和硬脂酸全部融化,加入 4%~5%硅油,再加入 60%~70%85℃水,搅拌均匀,加入 3%~4%油酸,2%~3%吐温-80,2%~3%十二烷基苯磺酸钠,1.8%~2.2%十六烷基三甲基溴化铵,1.5%~2.5%三乙醇胺,加入消泡剂消泡,调节 pH 值在 8~10 之间,充分乳化,得到淡黄色的微透明乳液即为产品。

表 1 磷石膏矿物组成

Tab. 1 Mineral composition of phosphogypsum

原料	状态	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	有机物
磷石膏	粉状	14.52	1.66	0.15	0.005	0.17	31.94	0.22	0.94	45.38	0.027	0.25

### 1.3 原料处理

水洗法:将水:磷石膏=1:3 充分搅拌,静置,反复洗涤 3~4 次加入  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  将溶液 pH 调至中性,将处理后的磷石膏放入烘箱中在 155℃条件下烘 4~6 h,过尺寸为 0.15 mm 筛孔的筛。

### 1.4 实验方法

#### 1.4.1 强度及软化系数的测试

参照《建筑石膏力学性能的测定》,将已处理好的原料制备 40 mm×40 mm×160 mm 试块,放置烘箱中至恒重,将烘干后的试块放置水中浸泡 24 h。

参照《建筑石膏》测定试块浸泡 24 h 和未浸泡的强度,并计算软化系数即试块泡水 24 h 与绝干时抗折或抗压强度的比值。

#### 1.4.2 吸水率测试

记烘干至恒重的试块重量为( $G_0$ ),记浸泡在温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  的水中 24 h 的试块重量为( $G_1$ ),吸水率为:  $(G_1 - G_0)/G_0 \times 100\%$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 防水剂对磷建筑石膏强度的影响

#### 2.1.1 新型石蜡防水剂与石蜡对比分析

按 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0% 的掺入量在磷建筑石膏中分别掺入石蜡和新型石蜡防水剂。制备成试块经成型、养护、烘干、浸水

24 h,测定其饱和水和绝干时的抗压、抗折强度。新型石蜡防水剂和石蜡对磷建筑石膏的绝干试块强度和饱和水试块强度变化趋势分别如图 1、图 2 所示。从图中分析可得,总体上新型石蜡防水剂的抗压、抗折强度均低于石蜡,并且随着掺量的增加两种防水剂在两种状态下的抗折强度都呈现缓慢降低的趋势,而抗压强度呈现上升的趋势。当掺量为 0.6% 时,石蜡的饱和水抗压强度达到最大值 10.67 MPa。在绝干状态下,当掺量在 0.2%~0.4%,石蜡的抗折强度略高于新型石蜡防水剂,当掺量在 0.4%~1% 时则相反。在饱和水的状态

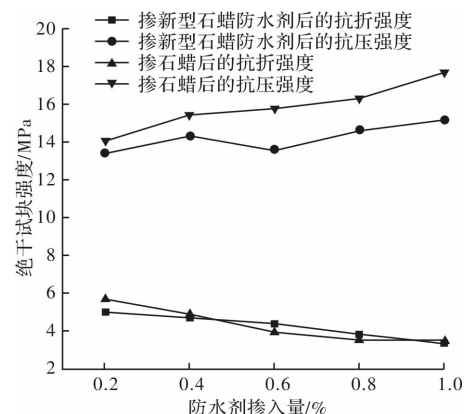


图 1 防水剂掺量对绝干试块强度的影响

Fig. 1 Effect of water proofing agent contenton the strength of absolute dry test block

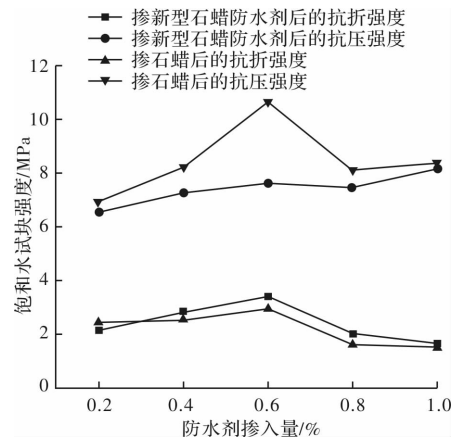


图 2 防水剂掺入量对饱和水试块强度的影响

Fig. 2 Effect of amount of waterproof agent on the strength of saturated water test block

下,当掺量为 0.2%时,石蜡的抗压强度均略高于新型石蜡防水剂,当掺量为 0.4%~1%时则相反。

2.1.2 新型石蜡防水剂与空白组对比分析

将掺量不同的新型石蜡防水剂与空白组进行

对比,显示绝干时抗压、抗折强度的变化率并不大,当掺量相同时,新型石蜡防水剂绝干抗压强度略比空白组低,随着掺量的增加,变化率趋于零。而当掺量为 0.4%以下时,新型石蜡防水剂的绝干抗折强度高于空白组,当掺量为 0.6 以上时,其绝干抗折强度比空白组低,具体数据见表 2。从表 2 中可看出新型石蜡防水剂加入到磷建筑石膏中对其强度没有产生明显的变化以及不利影响,证明新型石蜡防水剂可以运用在磷建筑石膏中。表 3 中是对比饱和水状态下的石蜡乳液与空白组的强度,抗折强度相比变化较大,当掺量为 0.6%,饱和水抗折强度高于空白组 48.5%,而掺量为 1%时,低于空白组 30.7%。随着掺量的增加,饱和水与空白组的抗压强度差值也在增加。绝干试块抗折强度从掺量为 0.2%~0.4%时高于空白组到掺量为 0.6%~1%时高于空白组,并且当掺量为 1%时,绝干和饱和水试块的抗折强度低于空白组达到最大值,分别低于空白组:24.8%和 30.7%。

表 2 对比新型石蜡防水剂与空白组绝干试块强度变化

Tab. 2 Comparison of the strength changes of the new paraffin waterproof agent and the blank dry test block

新型石蜡防水 剂掺入量/%	抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa	空白组		抗压强度 变化率/%	抗折强度 变化率/%
			抗压强度/MPa	抗折强度/MPa		
0.2	13.43	5.05			−14.3	+10.9
0.4	14.33	4.75			−8.6	+4.4
0.6	13.62	4.40	15.68	4.55	−13.1	−3.3
0.8	14.62	3.84			−6.8	−15.6
1.0	15.18	3.42			−3.2	−24.8

注:强度变化率是针对空白组的比较, + 表示高于, − 表示低于。

表 3 对比新型石蜡防水剂与空白组饱和水试块强度变化

Tab. 3 Strength charge of new paraffin waterproof agent and blank saturatal test block

新型石蜡防水 剂掺入量/%	抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa	空白组		抗压强度 变化率/%	抗折强度 变化率/%
			抗压强度/MPa	抗折强度/MPa		
0.2	6.56	2.20			+1.6	−4.8
0.4	7.28	2.87			+12.7	+24.2
0.6	7.63	3.43	6.46	2.31	+18.1	+48.5
0.8	7.47	2.00			+15.6	−13.4
1.0	8.24	1.60			+27.6	−30.7

注:强度变化率是针对空白组的比较, + 表示高于, − 表示低于。

2.2 防水剂对磷建筑石膏吸水率的影响

从图 3 中可得新型石蜡防水剂和石蜡掺入磷建筑石膏试块时所得吸水率的趋势,两种防水剂均可以使吸水率降低;当掺量小于 0.6%时,石蜡对

磷建筑石膏的吸水率略高于新型石蜡防水剂,但在掺量大于 0.6%时掺入新型石蜡防水剂的磷建筑石膏试块的吸水率减低得更快,并低于石蜡。这说明新型石蜡防水剂较石蜡防水剂在磷建筑石膏

吸水率方面有明显降低. 当新型石蜡防水剂掺入量为1%时比掺入量为0.2%时磷建筑石膏试块吸水率降低了41.9%. 比空白组的磷建筑石膏试块吸水率降低了60.4%.

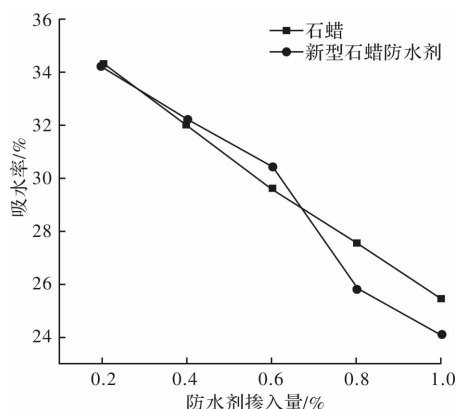


图3 防水剂对磷建筑石膏吸水率的影响

Fig. 3 Effect of waterproof agent on water absorption of phosphogypsum

### 2.3 防水剂对磷建筑石膏软化系数的影响

由图4可得, 磷建筑石膏中掺入新型石蜡防水剂和石蜡后所得到的软化系数趋势大致相同, 并且掺入新型石蜡防水剂对磷建筑石膏的软化系数优于石蜡. 当掺量0.2%~0.6%时, 随着掺量的增加, 掺入石蜡和新型石蜡防水剂的磷建筑石膏的软化系数均提高, 当掺量为0.6%时, 掺入石蜡和新型石蜡防水剂都可以使磷建筑石膏的软化系数达到最大值, 分别为0.74、0.78, 当掺量0.6%~0.8%时, 软化系数明显下降, 但当掺量0.8%~1%时, 软化系数趋于平稳. 根据表2、3可以计算出空白组的软化系数为0.41, 当掺入量为0.6%的石蜡和新型石蜡防水剂制备磷建筑石膏试块的软化系数相对于掺入量0.2%的分别提高了43%、45%, 而对于空白组提高更为明显, 分别为80%、90%. 说明在软化系数改善方面, 新型石蜡防水剂较石蜡有明显提高.

### 2.4 防水机理

#### 2.4.1 表面活性剂对新型石蜡防水剂的机理分析

将石蜡中加入表面活性剂能够使其表面定向吸附表面活性剂分子<sup>[10]</sup>, 在其表面形成具有一定机械强度的带有电荷的表面活性剂单分子于界面膜, 亲油基团朝蜡, 极性基团朝水, 蜡滴稳定地分散在水中并且不容易聚集. 因为十二烷基苯磺酸钠和十六烷基三甲基溴化铵单独作为表面活性剂时稳定性都差, 遇水能够分解成负、正电离子, 不能够形成稳定的乳液体系. 因此, 选择将两种表面活性剂混合使用, 十六烷基三甲基溴化铵起

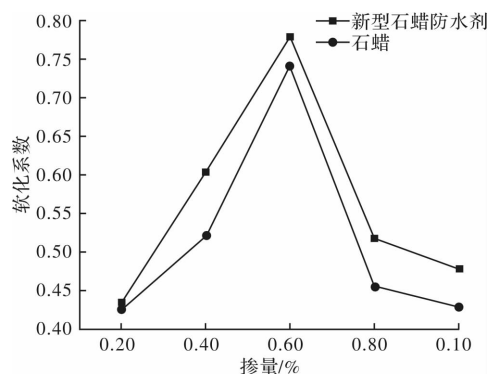


图4 防水剂掺量对试块软化系数的影响

Fig. 4 Effect of water repellent content on softening coefficient of test block

主导作用, 作为阴离子表面活性剂对酸、碱、硬水都很敏感, 能与磷建筑石膏混合后紧密结合. 本实验中选择将阴离子表面活性剂和阳离子表面活性剂混合添加到石蜡中, 能够使石蜡中粒子有更好的排列, 使其更紧密均匀, 形成密切且机械强度高的膜. 而吐温-80属于多元醇型非离子表面活性剂, 其中含有极性基团, 吸附粒子从而形成絮凝物, 有较好的相容性, 增加溶液中的溶解性<sup>[11]</sup>. 因此将其三种表面活性剂结合为基体, 能够更好的与石蜡相结合, 使配置的乳液更稳定.

#### 2.4.2 表面活性剂用量对新型石蜡防水剂性能的影响分析

在本实验中, 当新型石蜡防水剂掺入量过少时, 制备防水剂所需的表面活性剂掺入量也过少, 使石蜡未能与表面活性剂充分反应, 使其不能完全被乳化, 会有部分残余的现象, 影响防水剂的性能. 随着新型石蜡防水剂掺量的增加, 其表面活性剂也逐渐增加, 当新型石蜡防水剂掺量达到0.6%时, 表面活性剂能完全乳化石蜡, 充分反应后制备出的新型石蜡防水剂具备最优性能, 掺入到磷建筑石膏中制备出试块的软化系数达到最大值. 但当新型石蜡防水剂掺量大于0.6%时, 其防水剂中的表面活性剂掺量也会变多, 以至于产生大量的泡沫, 增加了整个体系的粘粘程度, 阻碍搅拌, 影响新型石蜡防水剂的性能<sup>[12]</sup>.

#### 2.4.3 新型石蜡防水剂对磷建筑石膏的机理分析

石蜡属于烃类混合物, 主要化学成分是直链烷烃的有机化合物, 分子中不含亲水基团, 油性极强. 在石蜡中添加乳化剂使其具备定向吸附作用, 具有良好的覆盖性<sup>[13]</sup>. 磷建筑石膏化学成分主要为  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 其中  $\text{H}_2\text{O}$  分子分布于  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  形成的双层结构之间, 形成一种离子和水分子相互交替的结构<sup>[14]</sup>. 在未掺入石蜡乳

液时,石膏晶体呈现的是针状。

新型石蜡防水剂对磷建筑石膏晶体在长轴(c轴)的生长有抑制作用,改变生长速率,从而使晶体形成短粗状,随着掺量的增加,石膏晶体变得粗大。在石蜡中添加的表面活性剂能使其粒子排列均匀且紧密,并且憎水基团一致朝外,形成致密的保护层<sup>[14-15]</sup>。乳化成一种颗粒且均匀分布在水中的微乳液,当掺入防水剂后,石膏晶体表面碳元素增加,由图5、图6对比可看出,未掺入防水剂的磷建筑石膏中的晶体无序交错、搭接松散,掺入新型防水剂的磷建筑石膏中,形成紧密均匀的网膜,没有明显的缝隙,表面活性剂吸附的粒子形成絮凝物包裹在晶体周围,从而可改善磷建筑石膏的防水性<sup>[16]</sup>。

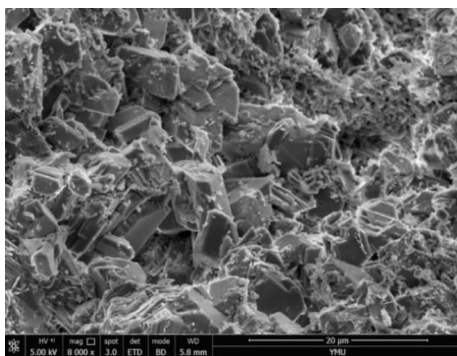


图5 未掺入防水剂磷建筑石膏 SEM

Fig. 5 SEM of phosphogypsum without waterproof agent

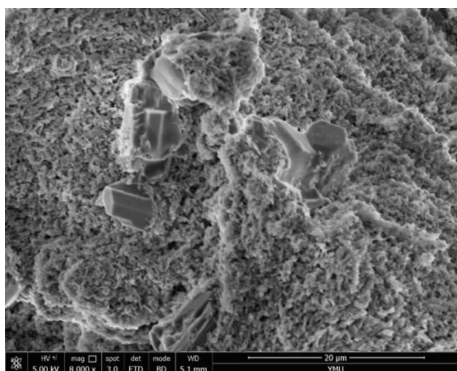


图6 掺入新型防水剂磷建筑石膏 SEM

Fig. 6 SEM of phosphogypsum

### 3 结论

(1)新型石蜡防水剂加入到磷建筑石膏中对其强度没有产生明显的变化以及不利影响,证明新型石蜡防水剂可以运用在磷建筑石膏中。

(2)两种防水剂对磷建筑石膏的吸水率都有降低,但新型石蜡防水剂对吸水率的影响整体优于石蜡,新型石蜡防水剂掺入量为1%时比掺入量为0.2%时吸水率降低了41.9%;比空白组降低

了60.4%。

(3)磷建筑石膏中掺入新型石蜡防水剂和石蜡后所得到的软化系数趋势大致相同,并且掺入新型石蜡防水剂对磷建筑石膏的软化系数优于石蜡。当掺量为0.6%时,掺入新型石蜡乳液的磷建筑石膏的软化系数比空白组提高了90%。

### 参考文献 References

- [1] 孙志立. 中国磷石膏资源化利用的展望与思考[J]. 硫酸工业, 2016(1):55-58.  
SUN Zhili. Prospect and thinking on utilization of phosphogypsum resources in China [J]. Sulfuric Acid Industry, 2016 (1): 55-58.
- [2] 李欣霖, 纪利俊, 陈葵, 等. 有机溶剂浸取法净化磷石膏[J]. 化工矿物与加工, 2018(3): 23-27.  
LI Xinlin, JI Lijun, CHEN Kui, et al. Purification of phosphogypsum by organic solvent extraction [J]. Chemical Minerals and Processing, 2018(3): 23-27.
- [3] ZOLOTUKHIN S N, KUKINA O B, ABRAMENKO A A, et al. Energy-efficient unburned technologies for the use of phosphogypsum[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 90:012088.
- [4] GARG M, MINOCHA A K, JAIN N. Environment hazard mitigation of waste gypsum and chalk: Use in construction materials[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2):944-949.
- [5] 李美, 彭家惠, 张建新, 等. 磷建筑石膏的特性及其改性[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(3):553-558.  
LI Mei, PENG Jiahui, ZHANG Jianxin, et al. Characteristics and modification of phosphogypsum [J]. Silicate Bulletin, 2012, 31 (3):553-558.
- [6] RAMSSON E S, CHOLGER D, DIONISE A, et al. Characterization of fast-scan cyclic voltammetric electrodes using paraffin as an effective sealant with in vitro and in vivo applications[J]. Plos One, 2015, 10 (10):1-15.
- [7] LIU M, ZHONG H, MA E, et al. Resistance to fungal decay of paraffin wax emulsion/copper azole compound system treated wood[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018,129:61-66.
- [8] 王宝峰, 张裕丁, 孙德军. 乳化石蜡的研制及应用[J]. 山东化工, 2004(2):14-17.  
WANG Baofeng, ZHANG Yuding, SUN Dejun. Development and application of emulsified paraffin [J]. Shandong Chemical Industry, 2004 (2): 14-17.
- [9] KAPUSTIN V M, MAKHIN D Y. Effect of oil content in paraffin on waterproofing properties of paraffin emulsions[J]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2012, 48(1):62-66.

- [10] 罗钰. 纳米的空间限制对表面活性剂吸附和自聚的影响[D]. 北京:北京化工大学, 2010.  
LUO Yu. The influence of nano space limitation on the adsorption and self polymerization of surfactants [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010.
- [11] 罗宏宇. 新型无机/聚合物复合微纳米吸附剂的制备及其对污染物的吸附行为和机理研究[D]. 镇江:江苏大学, 2015.  
LUO Hongyu. Preparation of new inorganic / polymer composite micro nano adsorbent and its adsorption behavior and mechanism for pollutants [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015.
- [12] 黄平平. 基于丙烯酸改性液体石蜡制备环保型防水纤维板的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学 2015.  
HUANG Pingping. Study on preparation of environmentally friendly waterproof fiberboard based on acrylic modified liquid paraffin [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.
- [13] 李光明, 李霞, 贾磊, 等. 国内外磷石膏处理和处置概况[J]. 无机盐工业, 2012, 44(10):11-13.  
LI Guangming, LI Xia, JIA Lei, et al. Overview of phosphogypsum treatment and disposal at home and abroad [J]. Inorganic Salt Industry, 2012, 44 (10): 11-13.
- [14] 李建权, 李国忠, 张国辉. 石膏复合防水剂对石膏晶体形成的影响[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(2): 137-141.  
LI Jianquan, LI Guozhong, ZHANG Guohui. Effect of gypsum composite waterproof agent on gypsum crystal formation [J]. Journal of Building Materials, 2007, 10 (2): 137-141.
- [15] 潘红, 李国忠. 含氟硅乳液防水剂制备及其对石膏性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2013(2):226-231.  
PAN Hong, LI Guozhong. Preparation of fluorosilicone emulsion waterproofing agent and its effect on gypsum properties [J]. Journal of Building Materials, 2013 (2): 226-231.
- [16] 潘红. 含氟硅丙烯酸酯乳液防水剂制备及其在石膏建材中的应用[D]. 济南:济南大学, 2014.  
PAN Hong. Preparation of fluorosilicone acrylate emulsion waterproofing agent and its application in gypsum building materials [D]. Jinan: University of Jinan, 2014.

(编辑 吴海西 桂智刚)

(上接第 774 页)

- [10] 邢海燕, 徐敏强, 陈鑫彧, 等. 焊缝两种典型缺陷的磁记忆特征对比[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(6): 65-69.  
XING Haiyan, XU Minqiang, CHEN Xinyu, et al. Two kinds of welded joint typical defects comparison based on MMM characteristics[J]. Materials Science & Technology, 2011, 19(6): 65-69.
- [11] 邢海燕, 陈鑫彧, 黄保富, 等. 拉压荷载下焊缝的磁记忆表征及热处理评价[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(1): 100-104.  
XING Haiyan, CHEN Xinyu, HUANG Baofu, et al. MMM characterization of welded joint and heat treating evaluation under tension and compression loading [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011, 35 (1): 100-104.
- [12] 董丽虹, 徐滨士, 董世运, 等. 金属磁记忆技术检测低碳钢静载拉伸破坏的实验研究[J]. 材料工程, 2006(3):40-43.  
DONG Lihong, XU Binshi, DONG Shiyun, et al. Study on metal magnetic memory signals of low carbon steel under static tension test condition[J]. Journal of Materials Engineering, 2006(3):40-43.
- [13] 王威, 樊浩, 苏三庆, 等. 钢结构对接焊缝隐性损伤的磁记忆检测试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(4):497-501.  
WANG Wei, FAN Hao, SU Sanqing, et al. Experimental detection on implicit damage of butt weld of steel structure by magnetic memory testing[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(4): 497-501.
- [14] 任吉林, 陈曦, 宋凯. 金属构件磁记忆效应影响因素研究[J]. 无损检测, 2006(6):292-295.  
REN Jilin, CHEN Xi, SONG Kai. Study on the influencing factors of magnetic memory effect of metal components [J]. Nondestructive Testing, 2006(6):292-295.
- [15] 赵鹏, 潘清红, 邹宗树. Q235 钢板表面裂纹形成原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2016, 52(3): 210-212, 216.  
ZHAO Peng, PAN Qinghong, ZOU Zongshu. Formation cause analysis of crack on the surface of Q235 steel plate [J]. Physical and Chemical Examination (Physical Volume), 2016, 52(3):210-212, 216.

(编辑 吴海西 桂智刚)