

# 锌铋催化剂对聚氨酯砂浆内部温湿度变化规律的影响

朱 涵<sup>1,2</sup>, 吴科晓<sup>1</sup>, 姜雯丽霞<sup>1</sup>, 邵建文<sup>1</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 目的 提升聚氨酯砂浆快速裂缝修补材料的力学强度及保温、耐老化性能。  
**方法** 测量掺入锌铋复合延迟催化剂的聚氨酯砂浆在7 d龄期内距试件上表面20 mm、50 mm、80 mm处的温湿度变化。结合固化时间、抗折抗压强度及孔隙率研究催化剂对聚氨酯砂浆材料温湿度变化规律的影响。  
**结果** 催化剂促进了聚氨酯砂浆固化反应进程, 温度快速上升, 高于环境温度7~15℃, 并有效抑制了NCO与水反应产生CO<sub>2</sub>, 孔隙率降低了62.29%。随龄期发展, 试件内部温湿度演变机制与环境温湿度波动具有一致性。  
**结论** 锌铋复合催化剂可降低聚氨酯砂浆孔隙率及内部温度的波动幅度, 提升聚氨酯砂浆强度、保温抗渗性能, 有利于其在裂缝修补工程中的应用。

**关键词** 聚氨酯砂浆; 温度; 湿度; 锌铋催化剂; 孔隙率

中图分类号 TU57<sup>+</sup>8.12 文献标志码 A

## Effect of Zinc-bismuth Catalyst on Internal Temperature and Humidity of Polyurethane Mortar

ZHU Han<sup>1,2</sup>, WU Kexiao<sup>1</sup>, JIANG Wenlixia<sup>1</sup>, SHAO Jianwen<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, China, 300350; 2. Coastal Civil Engineering Structure and Safety Key Laboratory of the Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin, China, 300072)

**Abstract:** Heat preservation and aging resistance improve the mechanical properties of polyurethane (PU)-based polymer mortar used for early crack repair. This study investigates the internal temperature and humidity changes of polyurethane mortar incorporated with Zinc-Bismuth catalyst serve as a catalyst measured at 20 mm, 50 mm, and 80 mm from the upper surface of the PU-based polymer specimen for 7 days curing time. Moreover, the flexural strength, compressive strength, and porosity analysis were conducted. The results showed that adding a Zinc-Bismuth catalyst enhances the curing reaction process of PU-based polymer mortar; the internal temperature

收稿日期: 2021-07-11

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51708314)

作者简介: 朱涵(1956—), 男, 教授, 主要从事建筑材料等方面研究。

rises rapidly higher than the ambient temperature of 7 - 15 °C, which effectively inhibits the reaction of NCO water to produce CO<sub>2</sub> in the PU mixture. This led to a reduction of porosity by 62.29% during the curing time of PU-based polymer mortar. The mechanism of internal temperature and humidity of PU mortar specimens are consistent with the environmental temperature and humidity changes. Zinc-Bismuth catalyst was capable of reducing the pore ratio and internal temperature changes; this led to the improved strength, heat preservation, and impermeability of PU-based polymer mortar desirable features for early repair of cracks.

**Key words:** polyurethane mortar; temperature; humidity; zinc-bismuth catalyst; porosity

建筑物长期受气候、地质、荷载等因素影响,会产生各种裂缝<sup>[1]</sup>。传统的水泥基、沥青裂缝修补材料,因粘结强度和韧性较差,修补后极易再次开裂<sup>[2-3]</sup>。高分子聚合物裂缝修补材料,如发泡型聚氨酯材料具有更好的粘结性、耐老化等路用性能<sup>[4]</sup>,但固化过程释放大热量,可能会扩大裂缝<sup>[5]</sup>。相比之下,聚氨酯砂浆可形成高强度弹性体材料加固修补基体<sup>[6]</sup>,固化放热少,产生微膨胀,推动其向裂缝内部扩散密实。因此具有高流动性、微膨胀自密实、快速固化的聚氨酯砂浆是一种更加合适的裂缝修补材料。

聚氨酯固化过程主要为链增长反应、气体反应、交联反应三种<sup>[7-8]</sup>,固化放热以前两种为主,气体反应释放热量最大<sup>[9]</sup>。为控制聚氨酯合成过程最高温度,降低合成温度对性能的不利影响<sup>[10]</sup>。刘军等<sup>[11-13]</sup>研究了矿用聚氨酯材料用量与反应最高温度的关系。于潇洋等<sup>[14-15]</sup>发现使用合适的聚醚多元醇,减少异氰酸酯用量会使反应温度较低。关于其他因素对最高温度的影响,吴怀国<sup>[16]</sup>得出聚氨酯材料的含水量变大会导致反应最高温度升高。石明生等<sup>[17]</sup>发现固化最高反应温度随着材料密度的增大而增大。王伟力等<sup>[18]</sup>通过理论计算得出催化剂对材料内部最高温度有影响。兰金鹏<sup>[19]</sup>研究了DBU季铵盐延迟催化剂的催化过程,表明反应温度升高和催化剂均可促进反应。

目前,关于温度对聚氨酯材料力学性能影响的研究已比较成熟,但还未见研究将聚氨酯砂浆用于裂缝修补,有机金属延迟催化

剂对聚氨酯砂浆影响也有待研究。基于此,笔者提出一种低放热聚氨酯修补新型材料,研究环境温湿度和催化剂对聚氨酯砂浆内部温湿度变化规律的影响规律。研究表明:锌铋催化剂能够提升聚氨酯砂浆的力学性能、保温抗渗性能,可应用于裂缝修补工程中。

## 1 试验

### 1.1 试验材料和设备

双组份聚氨酯树脂(PU),其中A组份为聚醚多元醇(POP),B组份为异氰酸酯(MDI),A、B两组质量比为6:1,参数见表1。环保稀释剂(PD):成分为直链烷基聚合物,水分质量分数小于0.01%,黏度5.0~15.0 cps,固含质量分数大于99.7%。锌铋复合延迟催化剂(PC)产自上海振贵新材料科技有限公司。细砂(Sand)的细度模数为1.88,最大粒径为2.36 mm,表观密度为2 540 kg/m<sup>3</sup>。

表1 PU各项性能参数

Table 1 Performance parameters of PU

POP黏度/cps	MDI黏度/cps	操作时间/min	初步固化时间/h	拉伸剪切强度/MPa
30 000	250	30~50	3~4	≥5

温湿度试验仪器设备如下,无纸记录仪,量测精度0.2% F.S。温湿度变送器,测量精度1%。内置温湿度探测头,量程(温度-20~60 °C,湿度0~100%),精度(温度±0.3 °C,湿度±3%)。COS-03-X型温湿度记录仪,用于测量环境温湿度,量程(温度-40~80 °C,湿度0~100%);精度(温度±0.1 °C;湿度±1.5%)。

## 1.2 配合比及制备方法

参照《聚氨酯灌浆材料》(JC/T 2014—2010)对材料的性能要求,采用胶(POP + MDI)与砂质量比为0.8的PU砂浆,PD为胶质量的5%,配合比见表2。因材料黏性较大不易进行分散,在A组、B组混合后加入稀释剂,并使用搅拌机进行分散,使反应更加充分,以提升砂浆流动性。

表2 聚氨酯砂浆配合比

Table 2 Mix ratio of polyurethane mortar

编号	kg·m <sup>-3</sup>				
	m(Sand)	m(POP)	m(MDI)	m(PD)	m(PC)
PU1	1 059.00	726.12	121.03	42.36	0.00
PU2	1 059.00	726.12	121.03	42.36	3.81

## 1.3 试验设计

参照《聚合物改性水泥砂浆试验规程》(DL/T5126—2001)进行固化时间测试。参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO)法》(GB/T 17671—1999)测量砂浆在龄期1 d、3 d、7 d的强度。抗折试验加载速率2 400 N/s,抗压试

验以50 N/s的速率均匀加载。使用Image-pro Plus 6.0软件对PU砂浆断裂界面图像进行孔隙分析,分析前进行灰度阈值处理。

将掺与未掺催化剂的两组PU砂浆置于室内进行温湿度测试。每组配合比制作3个长×宽×高为100 mm×100 mm×100 mm试件。用扎丝固定置入深度的位置,PU砂浆浇筑完成后,立即放入温湿度探测头。埋入深度分别为20 mm、50 mm、80 mm。置于室内环境中养护7 d,设置参数以实现每30 s监测1次环境温湿度与试件内部温湿度。为防止聚氨酯粘结性较高而造成脱模不便,并保证水分的一维传输,在模具内铺上一层塑料薄膜。将温湿度探测头置于PVC塑料管中,塑料管内径18 mm,距底部3 mm处有2 mm宽切口,下部使用PVC塑料薄片进行封口。为保证测量结果准确,在管口塞入塑料泡沫,顶部用有机硅胶密封,试验装置如图1所示。试验开始前确定各传感器示数与环境温湿度保持一致。

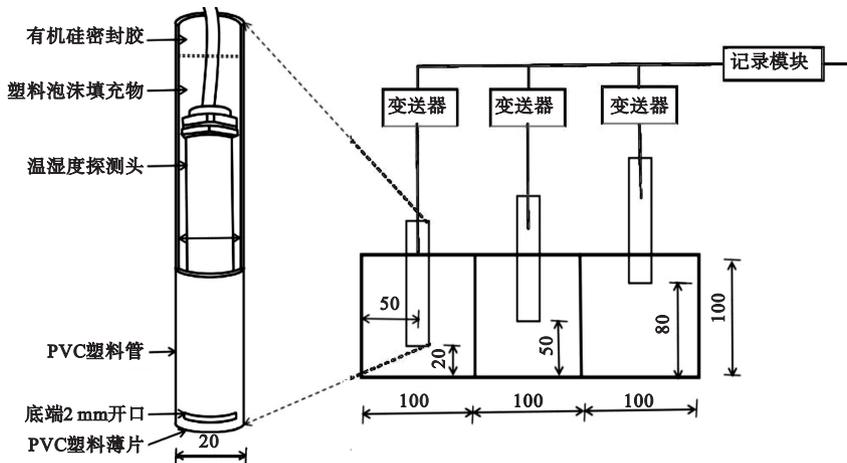


图1 仪器分布及探测头布置示意图

Fig. 1 Diagram of instrument distribution and probe head arrangement

## 2 试验结果及分析

### 2.1 催化剂对固化时间的影响

砂浆凝固时间见表3。从表中可以看出,PU1砂浆的操作时间为40 min,与之相比PU2砂浆操作时间缩短了50%,可有效解

决工程过程中快速修补砂浆流动性急速降低而难以达到修补要求的施工难点。PU2砂浆初步固化时间缩短了61.11%,最终固化时间缩短了73.81%。可见催化剂对初步固化到最终固化所需时间促进效果明显。

表3 PU砂浆凝固时间

编号	操作时间	初步固化时间	最终固化时间
PU1	40	90	210
PU2	20	35	55

### 2.2 抗压抗折强度

图2为PU砂浆不同龄期下抗压抗折强度。从图中可以看出,催化剂对PU砂浆抗折强度的提升较为明显。PU1砂浆1d、3d、7d龄期的抗折强度分别为4.4MPa、5.4MPa、6.7MPa,相同龄期之下,PU2抗折强度分别提

升了29.55%、25.93%、7.46%。观察早期(1~3d)与晚期(3~7d)的抗压强度提升速率,催化剂对抗压强度的增长速率无明显影响。PU1与PU2的抗折强度在早期的提升速率分别为0.50MPa/d、0.55MPa/d,两者差距很小;而PU2砂浆晚期抗折强度的提升速率仅为0.10MPa/d,明显低于PU1砂浆抗折强度提升速率0.33MPa/d。表明催化剂使砂浆1d内抗折强度快速提升,当龄期达到3d时强度基本稳定。7d时PU1与PU2砂浆的折压比分别为0.39、0.41,说明催化剂增强了砂浆的韧性。

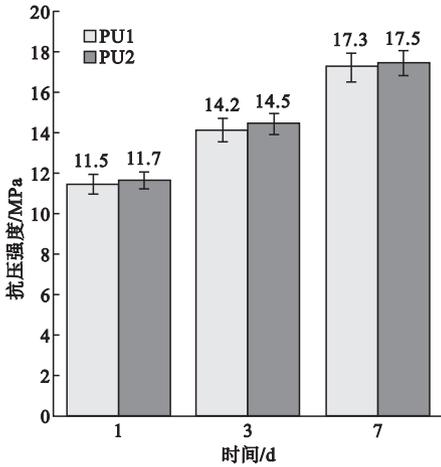


图2 催化剂对PU砂浆抗压抗折强度影响

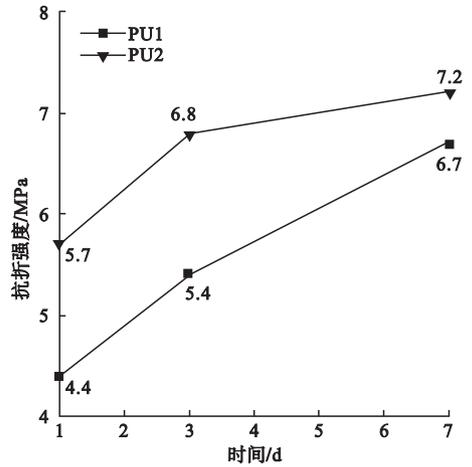


Fig.2 Influence of catalyst on compressive and flexural strength of PU mortar

### 2.3 基于Image-pro的孔隙率分析

MDI中NCO基团会与水反应生成CO<sub>2</sub>(见图3和图4)。由图3与图4可以看出,PU1砂浆断面结构遍布气泡,PU2与之相比界面气泡孔径明显减小。PU1与PU2砂浆孔隙率分别为54.17%、20.43%,PU2孔隙率降低

了62.29%。PU1孔径面积平均为0.965mm<sup>2</sup>,最大为6.182mm<sup>2</sup>,最小为0.032mm<sup>2</sup>;PU2孔径面积平均为0.032mm<sup>2</sup>,最大为2.865mm<sup>2</sup>,最小为0.007mm<sup>2</sup>。孔隙尺寸分布如图5所示,PU1与PU2孔隙尺寸最高占比均在0.05~0.10mm。在0.4mm之前PU1孔径尺寸百分

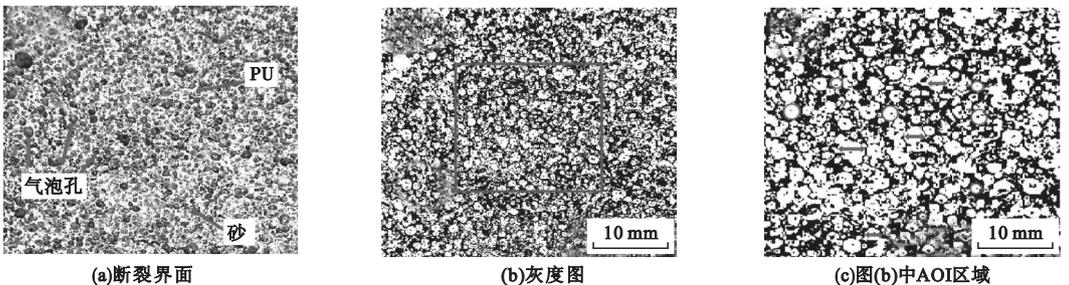


图3 PU1砂浆界面气泡图像

Fig.3 Interface bubble image of PU1 mortar

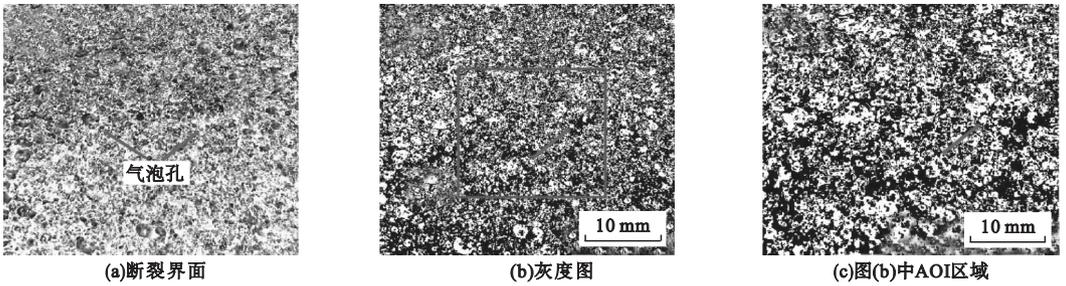


图4 PU2 砂浆界面气泡图像

Fig. 4 Interface bubble image of PU2 mortar

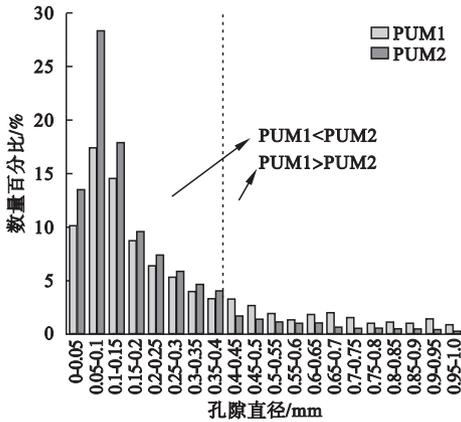


图5 基于气泡尺寸的统计结果

Fig. 5 Statistical results based on bubble size

比小于 PU2, 之后相反。故催化剂可显著降低孔隙率, 使材料更密实, 从而提升 PU 砂浆的强度。分析原因: 一是催化剂有效降低反应产生的 CO<sub>2</sub>; 二是催化剂提升了 NCO 与 OH 的反应, 使交联反应更加彻底, 分子间胶结力更强。

### 2.4 内部温度变化规律

PU1 和 PU2 砂浆内部温度变化曲线如图 6 ~ 图 10 所示。分为三个阶段: 第一阶段, 内部温度快速上升 (见图 6 虚线左侧); 第二阶段, 内部温度下降 (见图 6 虚线右侧, 图 7 虚线左侧); 第三阶段, 内部温度随环境温度上下波动 (见图 7、图 8 虚线右侧)。

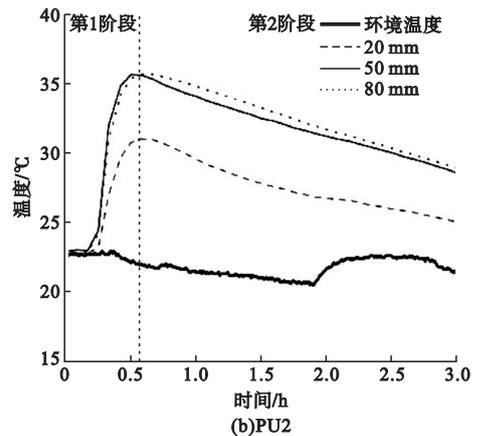
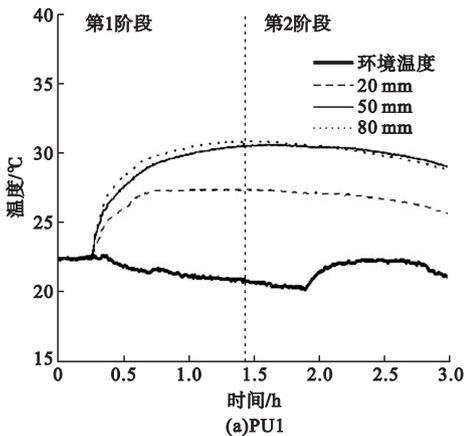


图6 聚氨酯砂浆早期 3 h 内部温度变化

Fig. 6 Changes of internal temperature of polyurethane mortar in early 3 h

#### 2.4.1 内部温度快速上升阶段变化

PU 砂浆 3 h 内温度变化曲线如图 6 所示。从图中可以看出, 砂浆内部温度在第一阶段快速上升, 高于环境温度 7 ~ 15 °C。PU1 砂浆在距上表面 20 mm、50 mm、80 mm 处的最高温度分别为 27.47 °C、30.65 °C、

30.93 °C, PU2 相应位置的最高温度与 PU1 相比分别提升了 12.00%、15.70%、14.70%。同时, 距试件上表面 80 mm 和 50 mm 处的温度明显高于 20 mm 处的温度。这是因内部反应热量相对于外部不容易散发, 造成上部温度低于下部和中间温度。

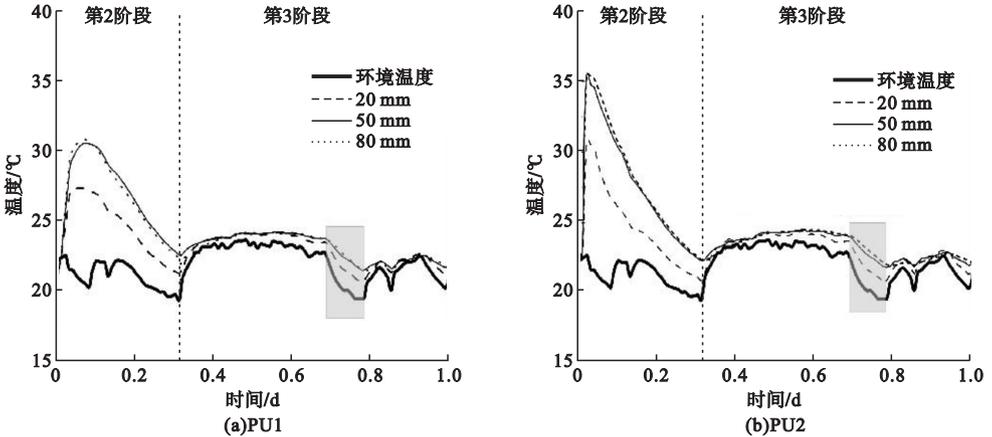


图7 聚氨酯砂浆1 d内部温度变化

Fig. 7 Changes of internal temperature of polyurethane mortar in 1 d

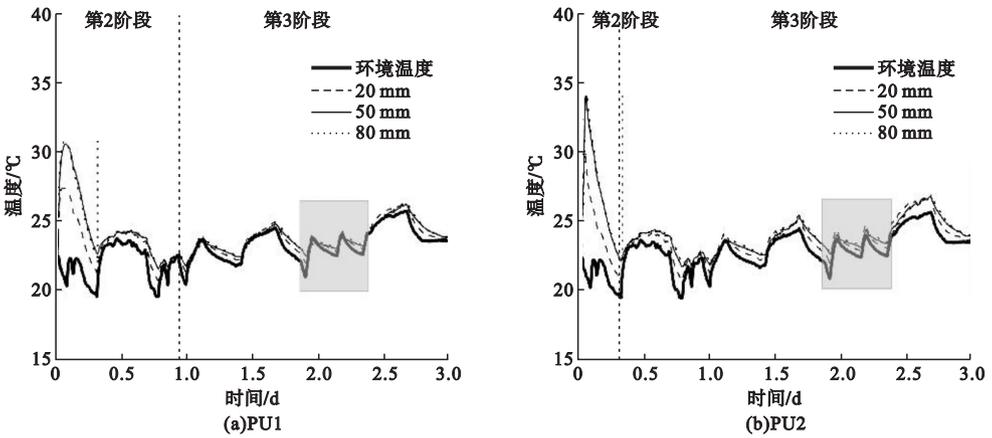


图8 聚氨酯砂浆3 d内部温度变化

Fig. 8 Changes of internal temperature of polyurethane mortar in 3 d

对比图6(a)和图6(b)可以看出,PU1砂浆内部温度明显低于PU2砂浆,分别于1.48 h、0.58 h处达到峰值。由此表明催化剂可促进反应放热,提升升温速率,缩短链增长、气体反应时间。

### 2.4.2 内部温度下降阶段变化

PU1和PU2砂浆1 d内第二阶段温度变化曲线如图7所示。从图中可以看出,反应放热速率低于环境散热速率,内部温度逐减下降并于0.33 d时停止下降。PU1砂浆在距上表面20 mm、50 mm、80 mm处的温度为21.53 °C、22.20 °C、22.51 °C,PU2为21.14 °C、22.43 °C、22.43 °C。由此可见,停止散热后,PU1砂浆相同位置处温度与PU2基本一致。此时距上表面80 mm、50 mm处

的温度仍高于20 mm。

### 2.4.3 内部温度随环境温度波动阶段变化

从0.33 d开始,砂浆内部温度随环境温度上下波动如图7、图8所示。环境温度在0.68~0.78 d内首次出现明显波动(见图9)。在此阶段内,PU1砂浆距上表面20 mm、50 mm、80 mm处的温度分别下降了2.96 °C、2.33 °C、2.28 °C,与环境温度在此阶段内下降的3.5 °C相比,距上表面20 mm、50 mm、80 mm的温度降低幅度分别减少了15.43%、33.43%、34.86%;PU2距上表面20 mm、50 mm、80 mm处的温度降低幅度分别减少了17.71%、41.43%、44.00%。说明催化剂降低了环境温度对内部温度变化幅度的影响,可减少温度应力对裂缝扩展的影响。

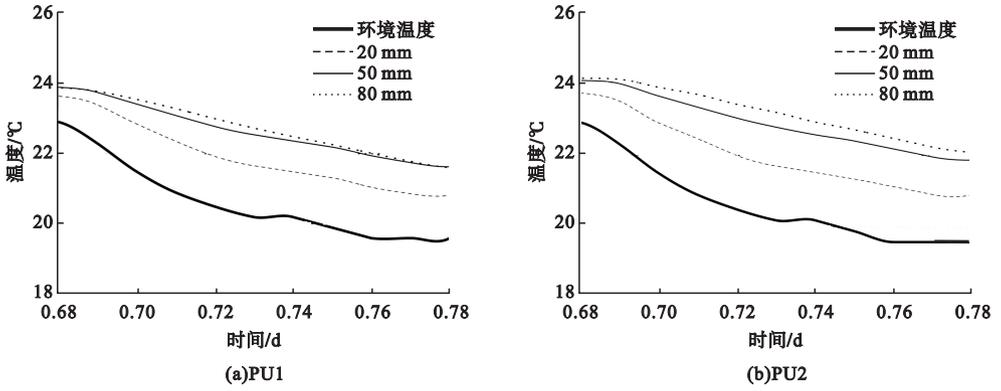


图9 环境温度首次波动内部温度变化

Fig. 9 Internal temperature variation when the ambient temperature first fluctuates

当环境温度连续波动时(见图 10),不同深度的温度出现明显交叉点。环境温度升高时,20 mm 处温度快速升高,于峰值处达到最高,50 mm 处次之,80 mm 处最低;环境温度降低,情况与之相反。表明距试件表面 20 mm 处温度受环境影响最先发生变化,波动最大;80 mm 处受环境影响最小,这与前文环境温度对聚氨酯内部温度的影响随深度增加而减小结论一致。对比可得,PU2 温度

高于 PU1,峰值更加明显。以 1.96 ~ 2.14 d 为例,环境温度波动为 1.4 °C,距上表面 20 mm、50 mm、80 mm 处 PU1 的温度波动分别为 1.37 °C、0.71 °C、0.18 °C,PU2 为 1.56 °C、0.87 °C、0.38 °C。由此可知,PU 砂浆具有一定的保温性能,且催化剂提升了 PU 砂浆对热量的存储性能。表明 PU 砂浆具有作为建筑节能材料可替代品的潜质。

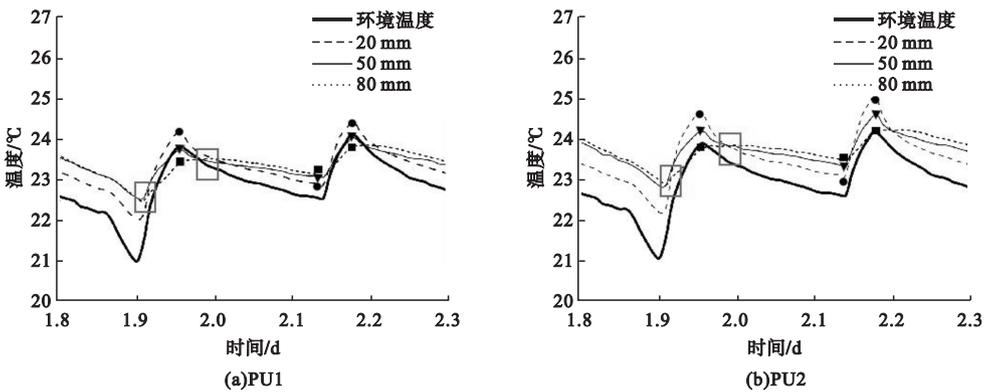


图10 环境温度连续波动内部温度变化

Fig. 10 Internal temperature variation when the ambient temperature fluctuates continuously

### 2.5 试件内部湿度变化规律

PU1 和 PU2 砂浆 7d 内湿度变化如图 11 所示。从图中可以看出,砂浆内部湿度与各组分的水分子含量、空气湿度及反应进程相关,明显低于环境湿度。探测头置入后,PU 内部湿度快速下降。随着龄期增长,受环境

湿度的影响距上表面 20 mm 处的内部湿度下降至最低点后明显上升,并随着环境湿度进行波动,50 mm 与 80 mm 处的湿度只有小幅度的上升,无明显波动。这是由于环境湿度向试件扩散,表层受环境湿度的影响较大,故表层湿度高于内部,而 PU 砂浆非表层的

内部湿度几乎不受环境湿度影响。表明 PU 砂浆抗渗性能强,可有效阻隔有害离子进入

裂缝发生侵蚀,适宜作为裂缝修补材料。

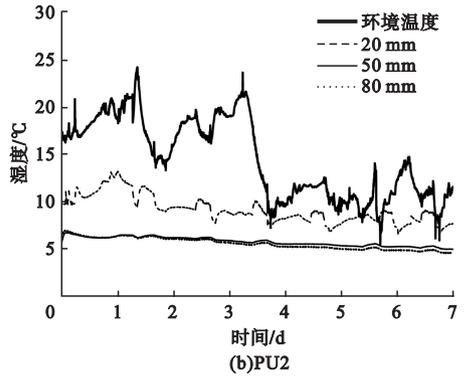
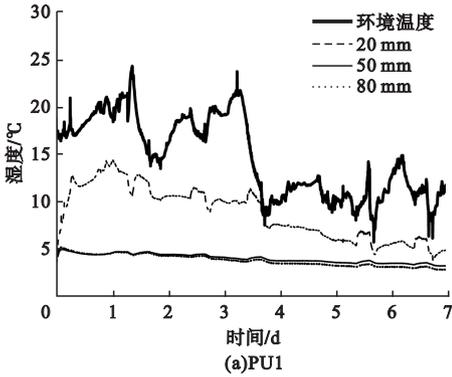


图 11 聚氨酯砂浆 7 d 内部湿度变化

Fig. 11 Variation of internal humidity of polyurethane mortar in 7 d

PU1 和 PU2 砂浆在龄期 3 h 内的内部湿度变化如图 12 所示。从图中可以看出,PU1 在距上表面 20 mm、50 mm、80 mm 处的相对湿度分别由初始值 18.95% 下降至 4.63%、4.16%、3.94%,PU2 对应的数值分别降至 7.46%、6.13%、5.65%。由此可见,PU1 砂

浆内部水分子消耗更多,气体反应更加彻底,这是由于锌铋复合催化剂有效降低了 PU2 砂浆内部 NCO 基团的副反应,减少 NCO 基团与水反应产生 CO<sub>2</sub>。这与前文所得催化剂可以降低砂浆的孔隙率,提升砂浆力学强度相一致。

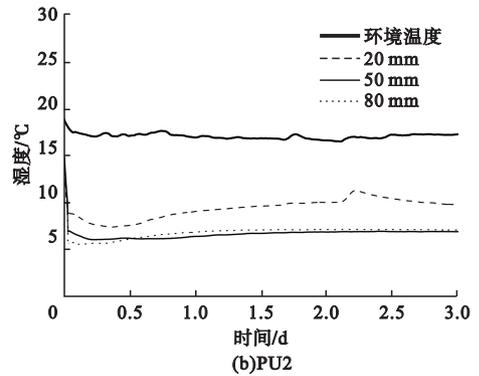
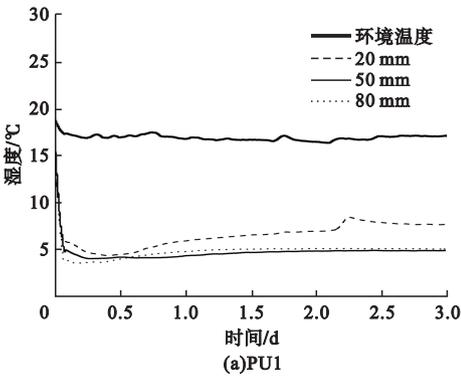


图 12 聚氨酯砂浆 3 h 内部湿度变化

Fig. 12 Variation of internal humidity of polyurethane mortar in 3 h

### 3 结 论

(1) 催化剂增强了聚氨酯砂浆的韧性,使砂浆 1 d、3 d、7 d 龄期的抗折强度分别提升了 29.55%、25.93%、7.46%。

(2) 掺入催化剂有效抑制了 NCO 与水反应产生 CO<sub>2</sub>,孔隙率显著降低了 62.29%,其宏观力学表现为力学强度的提升。

(3) 砂浆内部温度变化分为三个阶段:第一阶段,内部温度快速上升,高于环境温度

7~15℃;第二阶段,停止散热后,PU1 砂浆相同位置处温度与 PU2 基本一致;第三阶段,催化剂可降低环境对内部温度变化的影响,提升砂浆对热量的存储性能。

(4) PU 砂浆具备作为保温、抗渗堵漏材料的潜质,催化剂的加入可以减小温度应力损伤,有利于其在裂缝修补工程中的应用。

### 参考文献

[1] 宋亚涛. 新型聚氨酯灌浆材料的开发与应用技术研究[D]. 郑州:郑州大学,2019.

- (SONG Yatao. Research on development and application technology of new polyurethane grouting materials [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019. )
- [ 2 ] AWAJA F, ZHANG Shengnan, TRIPATHI M, et al. Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: formation, detection, autonomic repair [J]. Progress in materials science, 2016, 83: 536 - 573.
- [ 3 ] SMITH K L, ROMINE A R. Materials and procedures for sealing and filling cracks in asphalt-surfaced pavements-manual of practice [M]. Washington D C: National Academy of Sciences, 2001.
- [ 4 ] LIAO Honghui. A flame-retardant composite foam: foaming polyurethane in melamine formaldehyde foam skeleton [J]. Polymer international, 2019, 68(3): 410 - 417.
- [ 5 ] 董全霄, 李书明, 郑新国, 等. 温度对聚氨酯固化材料力学性能的影响[J]. 中国塑料, 2018, 32(9): 36 - 41.  
(DONG Quanxiao, LI Shuming, ZHENG Xinguo, et al. Effect of temperature on mechanical properties of polyurethane solidifying system [J]. China plastics, 2018, 32(9): 36 - 41. )
- [ 6 ] 朱涵, 姜金龙, 姜雯丽霞, 等. 钢纤维对聚氨酯砂浆力学性能及弯曲韧性的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(1): 95 - 103.  
(ZHU Han, JIANG Jinlong, JIANG Wenlixia, et al. Effect of steel fiber on mechanical properties and flexural toughness of polyurethane mortar [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(1): 95 - 103. )
- [ 7 ] 李绍雄, 朱吕民. 聚氨酯树脂[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.  
(LI Shaoxiong, ZHU Lümin. Polyurethane resin [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. )
- [ 8 ] 傅明源, 孙酣经. 聚氨酯弹性体及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1994.  
(FU Mingyuan, SUN Hanjing. Polyurethane elastomer and its application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1994. )
- [ 9 ] 冉中瑞. 低放热高聚物注浆材料放热特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.  
(RAN Zhongrui. Study on the interaction mechanism between polymer material and permafrost subgrade under multi-field coupling [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020. )
- [ 10 ] CHEE K K, FARRIS R J. Kinetics of phase separation in segmented polyurethanes [J]. Journal of applied polymer science, 1984, 29(8): 2529 - 2535.
- [ 11 ] 刘军. 矿用有机充填聚氨酯材料反应放热风险研究[J]. 山西煤炭, 2018, 38(4): 40 - 43.  
(LIU Jun. Reactive exothermic risk of filled polyurethane materials in mines [J]. Shanxi coal, 2018, 38(4): 40 - 43. )
- [ 12 ] 徐叶. 矿用聚氨酯材料放热致灾成因及控制[D]. 北京: 中国煤炭科学研究院, 2019.  
(XU Ye. Causes and control of disaster by the heat from polyurethane materials used in mine [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2019. )
- [ 13 ] 蔡明, 倪建明, 马东东, 等. 煤矿用高分子加固材料的放热特性及安全性研究[C]//2013年煤炭开采与安全国际学术研讨会. 北京: 中国煤炭学会, 2013.  
(CAI Ming, NI Jianming, MA Dongdong, et al. Study on exothermic characteristics and safety of polymer reinforcement materials for coal mine [C]//2013 International Symposium on Coal Mining and Safety. Beijing: China Coal Society, 2013. )
- [ 14 ] 于潇洋, 柏广峰, 赵昕楠, 等. 巷道注浆加固材料的应用性能研究[J]. 煤炭与化工, 2020, 43(3): 145 - 147.  
(YU Xiaoyang, BAI Guangfeng, ZHAO Xinnan, et al. Study on the application performance of grouting reinforcement materials in roadway [J]. Coal and chemical industry, 2020, 43(3): 145 - 147. )
- [ 15 ] 徐军, 魏光曦, 李明友, 等. 低放热双组分聚氨酯加固材料的开发研究[J]. 聚氨酯工业, 2020, 35(4): 53 - 56.  
(XU Jun, WEI Guangxi, LI Mingyou, et al. Development of low exothermic T two-component polyurethane reinforcing material [J]. Polyurethane industry, 2020, 35(4): 53 - 56. )
- [ 16 ] 吴怀国. 矿用高分子注浆加固材料安全性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(11): 53 - 55.  
(WU Huaiguo. Experiment study on the safety of polymer grouting reinforcement materials applied in coal mine [J]. Coal science and technology, 2013, 41(11): 53 - 55. )
- [ 17 ] 石明生, 夏威夷. 聚氨酯高聚物注浆固化温度试验研究[J]. 化工新型材料, 2014, 42(7): 133 - 135.  
(SHI Mingsheng, XIA Weiyi. Experimental research on curing temperature of polyurethane polymer [J]. New chemical materials, 2014, 42(7): 133 - 135. )
- [ 18 ] 王伟力, 钱七虎. 聚氨酯反应体系的固化和温度[J]. 化工生产与技术, 2001, 8(6): 18 - 21.  
(WANG Weili, QIAN Qihu. Curing and temperature of polyurethane reaction system [J]. Chemical production and technology, 2001, 8(6): 18 - 21. )
- [ 19 ] 兰金鹏. 双组份无溶剂聚氨酯反应过程的调控研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.  
(LAN Jinpeng. Regulation of reaction process of two component solvent-free polyurethane [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018. )