

文章编号:1007-9629(2021)06-1200-08

环氧树脂修复水泥基材料微裂缝的渗透机理

王信刚, 周镇, 赵华, 张晨阳, 李玉洁

(南昌大学建筑工程学院, 江西南昌 330031)

摘要:为了探明微胶囊芯材(环氧树脂)修复水泥基材料微裂缝的毛细渗透机理,采用光学接触角测量仪测量环氧树脂的接触角及表面张力,并用环境扫描电镜观察环氧树脂在水泥基材料裂缝表面的润湿效果,研究温度、裂缝宽度、环氧树脂种类等因素对环氧树脂渗透能力的影响,建立了毛细渗透理论模型,进行模拟渗透试验.结果表明:在20~50℃范围内,升高温度能降低环氧树脂黏度,增强环氧树脂在水泥基材料微裂缝中的毛细渗透能力;环氧树脂在窄裂缝(一般小于200 μm)中渗透时,初期可忽略其自身重力影响,渗透驱动力主要来源于毛细作用;在裂缝宽度为50~200 μm时,环氧树脂的毛细渗透能力与裂缝宽度成反比,宽度越小毛细作用越明显,毛细渗透能力越强;环氧树脂E-51的毛细渗透能力相比环氧树脂E-44增强约17.4%,荧光环氧树脂相比普通环氧树脂的毛细渗透能力降低5%~8%.

关键词:环氧树脂;水泥基材料;自修复;渗透机理;毛细作用力

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.011

Capillary Transport Mechanism of Epoxy Resin Repairing Micro-cracks in Cement-Based Materials

WANG Xingang, ZHOU Zhen, ZHAO Hua, ZHANG Chenyang, LI Yujie

(School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: To investigate the capillary transport mechanism of microcapsule core material (epoxy resin) to repair micro-cracks in cement-based materials, the contact angle and surface tension of epoxy resin were measured by optical contact angle measuring instrument. Environment scanning electron microscopy (ESEM) was used to observe the wetting effect of epoxy resin on the crack surface of cement-based materials. To study the influence of temperature, crack width, epoxy resin and other factors on capillary transport capacity, a theoretical model of capillary flow was established and conducted a simulated capillary flow test. The results show as follows: in the range of 20–50 °C, increasing temperature can reduce epoxy resin viscosity and enhance the capillary transport capacity of micro-cracks in cement-based materials. When epoxy resin permeates through narrow cracks (generally less than 200 μm), its gravity can be ignored in the initial stage, and the driving force is generated by capillary force. In the range of 50–200 μm, epoxy resin capillary transport capacity is inversely proportional to crack width, the smaller the width, the more obvious the capillary force and the stronger the capillary transport capacity. The capillary transport capacity of epoxy resin E-51 is 17.4%, stronger than epoxy resin E-44, the capillary transport capacity of fluorescent epoxy resin is 5%–8% lower than epoxy resin.

Key words: epoxy resin; cement-based material; self-healing; capillary transport mechanism; capillary force

收稿日期:2020-07-28; 修订日期:2020-09-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51972158,52062032);江西省主要学科学术和技术带头人培养计划(20204BCJ22001);江西省自然科学基金重点项目(20212ACB204017)

第一作者:王信刚(1977—),男,江西万载人,南昌大学教授,博士生导师,博士.E-mail:wxglab@126.com

通讯作者:赵华(1982—),女,山东梁山人,南昌大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:zhaohua@ncu.edu.cn

微胶囊法是目前最有希望实现水泥基材料微裂缝自修复的方法,而环氧树脂因具有稳定性好且不与水泥基体发生化学反应的特点而常被用作自修复微胶囊芯材^[1-2],因此,探明环氧树脂修复水泥基材料微裂缝的渗透行为及机理具有重要意义。

Lucija等^[3]、Snoeck等^[4]、Hong等^[5]研究表明,不同流体在水泥基材料中的渗透主要为毛细作用。Dong等^[6]研究表明,裂缝宽度和连通性是影响混凝土渗透性的主要因素。Hans-Wolf等^[7]研究发现,混凝土微裂纹的渗透性与温度和裂纹宽度有关,温度升高,渗透性增大。Cao等^[8]研究了环氧树脂的润湿与黏附作用,证明升高温度、降低树脂黏度可有效改善环氧树脂的浸润特性,有利于环氧树脂与材料的润湿作用。Yu等^[9]研究了水分子在水泥基材料中的毛细运输机制。目前许多学者对自修复微胶囊的制备及修复效果进行了大量研究^[10-11],但对微胶囊芯材修复水泥基材料微裂缝的渗透行为及机理鲜见报道。

本文采用光学接触角测量仪测量环氧树脂接触角 θ 及表面张力 σ ,并用环境扫描电镜(ESEM)观察环氧树脂在水泥基材料裂缝表面的润湿效果。利用润湿行为和毛细作用揭示了环氧树脂在水泥基材料微裂缝中的渗透行为及机理,研究了温度、裂缝宽度、环氧树脂种类等因素对环氧树脂渗透能力的影响。

1 试验

1.1 原材料及仪器

环氧树脂 E-51(工业纯),环氧当量为 184~195 g/mol;环氧树脂 E-44(工业纯),环氧当量为 210~230 g/mol,两者均由山东优索化工科技有限公司出产。荧光素钠,上海阿拉丁生化科技有限公司出产。P·O 42.5 水泥,江西赣州海螺水泥有限公司出产。

KRUSS DSA100 光学接触角测量仪,德国 KRUSS 公司产。MCR302 旋转流变仪,奥地利 Anton paar 公司产。LSM800 激光扫描共聚焦显微镜,Zeiss 光学仪器国际贸易有限公司产。Quanta200F 环境扫描电子显微镜(ESEM),美国 FEI 公司产。

1.2 试验方法

荧光环氧树脂的制备:将 0.2 g 荧光素钠溶于微量水中,与 50 g 环氧树脂充分搅拌混合,静置 3 h 去除内部气泡,制得荧光环氧树脂。图 1 为荧光素钠在环氧树脂内部的分散图。

测量项目:将环氧树脂滴落至水泥基试块表面,采用 DSA100 光学接触角测量仪测量二者接触角;采

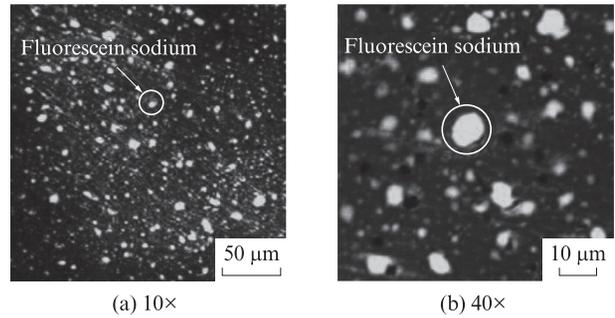


图 1 荧光素钠在环氧树脂中的分散图

Fig. 1 Dispersion diagram of fluorescein sodium in epoxy resin

用悬滴法测量不同温度下环氧树脂的表面张力大小,并重复悬滴 3 次,取其平均值;使用自动升温旋转流变仪分别测量不同温度下的环氧树脂动力黏度。

2 结果与分析

2.1 接触角 θ

接触角作为衡量液体润湿能力的重要量化指标,具有时变性,因此需考虑接触角随时间的变化情况。图 2 为 20 °C 条件下,环氧树脂 E-51、荧光环氧树脂 E-51(FS/E-51)、环氧树脂 E-44、荧光环氧树脂 E-44(FS/E-44)这 4 种环氧树脂与水泥基材料接触角 θ 随着时间 t 的变化图。图 3 为光学接触角测量仪拍摄的 0~300 s 内环氧树脂 E-51 与水泥基材料接触角的光学变化图。

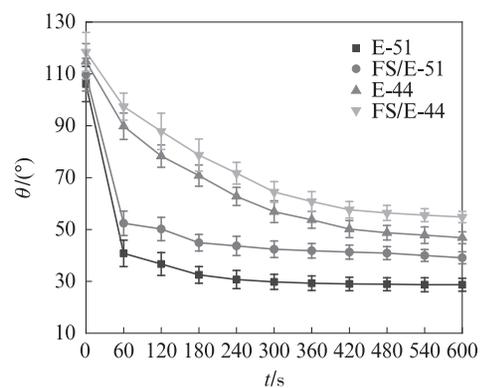


图 2 20 °C 时不同种类环氧树脂与水泥基材料接触角随时间变化图

Fig. 2 Contact angle diagram of different epoxy resins and cement-based materials changing with time at 20 °C

由图 2、3 可见:在 20 °C 条件下,4 种环氧树脂与水泥基材料的接触角均随着时间的增加而减小,稳定后的 θ 值远低于 90°;接触角均在 300 s 后开始趋于稳定;环氧树脂 E-51 的最终接触角小于荧光环氧树脂 FS/E-51、环氧树脂 E-44 的最终接触角小于荧光

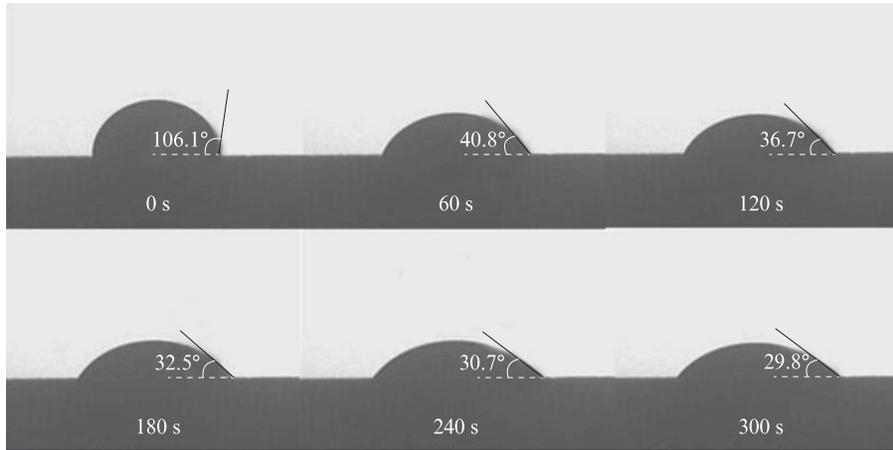


图3 20 °C时环氧树脂E-51与水泥基材料接触角随时间变化光学图

Fig. 3 Optical diagram of contact angle between epoxy resin E-51 and cement-based materials at 20 °C

环氧树脂FS/E-44.由此可知,环氧树脂对水泥基材料表面具有良好润湿性,这为环氧树脂在水泥基材料微裂缝中的渗透提供了理论基础;而且,为使环氧树脂能充分润湿水泥基材料表面,两者接触时间应不小于5 min;添加荧光素钠将使环氧树脂接触角增大.

图4为20~60 °C条件下E-51、FS/E-51、E-44和FS/E-44这4种环氧树脂与水泥基材料的接触角 θ 随着温度 T 的变化图.图中所测接触角均为几种环氧树脂在水泥基材料表面充分铺展后的稳定接触角.

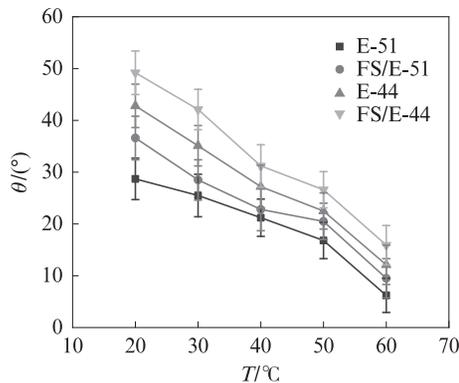


图4 不同种类环氧树脂与水泥基材料接触角随温度变化图

Fig. 4 Contact angle diagram of different epoxy resins and cement-based materials changing with temperatures

由图4可知,4种环氧树脂与水泥基材料的接触角随着温度升高均有不同程度的减小.原因是随着温度升高,分子内能增加、运动加快,从而使环氧树脂的流动性增强,容易在水泥基材料表面润湿铺展.其接触角大小关系为:环氧树脂E-51<环氧树脂FS/E-51<环氧树脂E-44<环氧树脂FS/E-44.

2.2 表面张力 σ

表面张力 σ 的大小同样是衡量环氧树脂在水泥基材料表面润湿能力的一个重要量化指标.图5为4种环氧树脂在20~60 °C条件下表面张力 σ 的变化图.

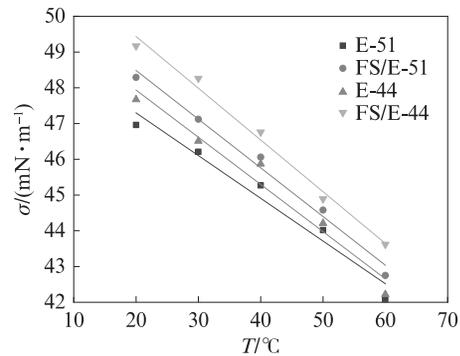


图5 不同种类环氧树脂的表面张力随温度变化图

Fig. 5 Change diagram of surface tension of different epoxy resins with temperatures

由图5可知,4种环氧树脂的表面张力均随着温度增高而减小,且温度每升高10 °C,环氧树脂的表面张力约减小1.2 mN/m.原因是随着温度升高,分子热运动加剧,环氧树脂内部分子间距变大,对表面层分子的引力减弱,从而使其表面张力下降.此外,添加荧光素钠将使环氧树脂表面张力增大.

2.3 黏度 η

黏度 η 是衡量液体流动能力的一个重要量化指标,黏度越大,液体在流动过程中需克服的阻力就越大.图6为20~60 °C条件下,4种环氧树脂的黏度 η 随温度 T 的变化图.

由图6可知:20 °C时,环氧树脂E-44的黏度约为环氧树脂E-51的2倍;随着温度升高,4种环氧树脂的黏度急剧下降,当温度大于50 °C后,其黏度趋于稳定,其中环氧树脂E-51的60 °C黏度为128.6 mPa·s,

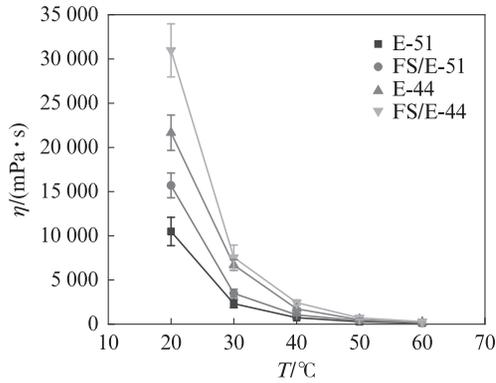


图6 不同种类环氧树脂黏度随温度变化图

Fig. 6 Viscosity change chart of different epoxy resins with different temperatures

环氧树脂 FS/E-51 的 60 °C 黏度为 181.54 mPa·s. 添加荧光素钠后环氧树脂黏度增大的原因可能是添加荧光染料后,环氧树脂内存在微小液滴,使其内部摩擦力增大所致. 根据 Lucas-Washburn 方程 $h(t) = \left(\frac{r\sigma \cos \theta}{2\eta}\right)^{1/2} \sqrt{t}$ (式中: $h(t)$ 为渗透高度; r 为粗糙因子,大小等于液体与固体实际接触面积除以投影接

触面积)可知,黏度主要影响环氧树脂在裂缝中的渗入速度.

3 讨论

3.1 渗透机理分析

环氧树脂修复水泥基材料微裂缝的渗透机理主要包括润湿作用和毛细渗透:首先,环氧树脂能充分润湿水泥基材料微裂缝表面,是渗入微裂缝的前提^[12-13];其次,环氧树脂在毛细作用驱动下,逐渐向微裂缝内部渗透并填充微裂缝^[14].

3.1.1 润湿作用

润湿作用可用接触角模型进行描述,比较经典的有 Young 模型、Wenzel 模型和 Cassie-Baxter 模型. Young 模型假设固体表面绝对光滑,是一种理想状态下固体表面本征接触角模型;Wenzel 模型假设固体表面粗糙且化学成分均匀,其公式是对 Young 方程的修正;Cassie-Baxter 模型假设固体表面化学成分均匀且存在粗糙凹槽,但液体在固体上铺展时无法渗入凹槽内部,在固体凹槽与液体中形成空气气垫. 3 种接触模型如表 1 所示.

表 1 接触角模型

Table 1 Contact angle models

Item	Young model	Wenzel model	Cassie-Baxter model
Contact angle model diagram			
Contact angle equation	$\cos \theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}}$	$\cos \theta^* = r \cos \theta$	$\cos \theta^* = \varphi(\cos \theta + 1) - 1$

表 1 中: γ_{SG} 表示固-气界面张力; γ_{SL} 表示固-液界面张力; γ_{LG} 表示气-液界面张力; θ 表示液体接触角; r 为粗糙因子,大小等于液体与固体实际接触面积除以投影接触面积; φ 表示液体与固体实际接触面

积除以投影接触面积.

图 7 为 ESEM 拍摄的水泥基材料裂缝表面形貌图;图 8 为 ESEM 拍摄的环氧树脂在水泥基材料裂缝表面润湿图.

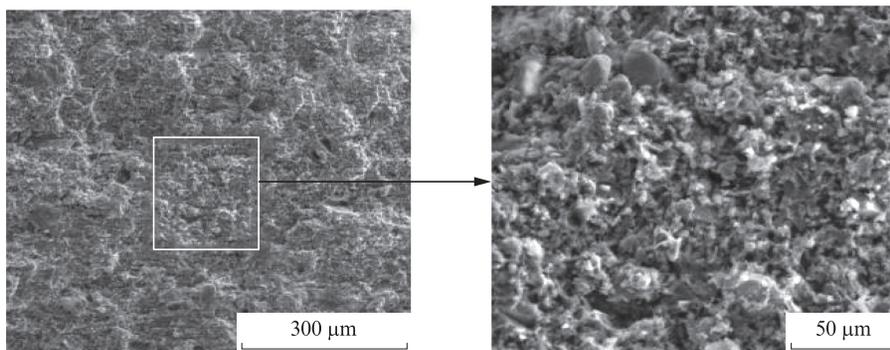


图 7 水泥基材料裂缝表面形貌图

Fig. 7 ESEM image of the crack surface of cement-based materials

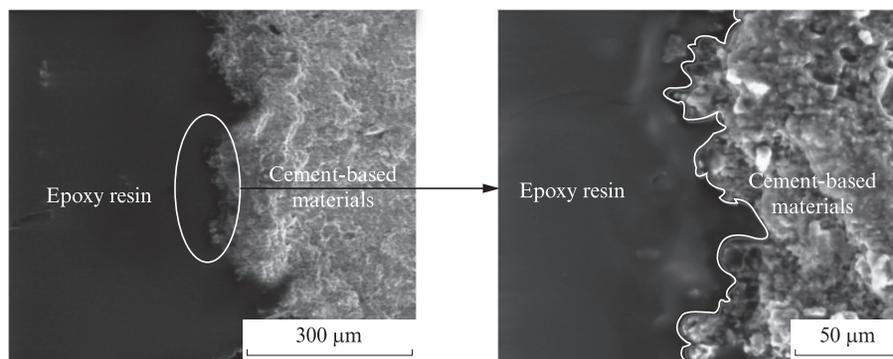


图8 环氧树脂在水泥基材料裂缝表面润湿图

Fig. 8 Wetting diagram of epoxy resin on crack surface of cement-based materials

观察图7可知,水泥基材料裂缝表面粗糙不平,凸起较多,其实际表面积大于投影表面积.由图8可知,环氧树脂在水泥基材料裂缝表面具有良好润湿性,能渗入裂缝表面粗糙凹陷处.原因是环氧树脂分子链中存在极性羟基和醚键,使其对各种物质都具有非常高的黏附力.根据上述可判断,环氧树脂在水泥基材料裂缝表面的润湿行为大致符合 Wenzel 模型.

图9为水泥基材料裂缝表面粗糙度模型图.由于水泥基材料属亲水材料且表面粗糙,为方便后续计算及研究,可建立混凝土表面理想化模型,即假设材料表面凸起为规则小立方体,其粗糙因子 r 为材料总表面积除以投影面积.根据图9模型计算得出, r 值大致为1~3,具体取决于裂缝表面粗糙程度.

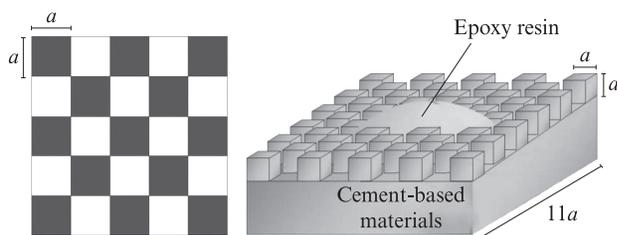


图9 水泥基材料裂缝表面粗糙度模型

Fig. 9 Surface roughness model of cracks on cement-based materials

3.1.2 渗透模型

根据 Poiseuille 定律,在忽略渗透惯性力作用的条件下,表示黏性力与毛细作用及静水力平衡的液体渗透速率 v 的公式为:

$$v = \frac{dh}{dt} = \frac{R_d^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{h} \quad (1)$$

渗透压力差 Δp 为:

$$\Delta p = \frac{2\sigma \cos \theta}{R_s} - \rho gh \quad (2)$$

式中: R_s 为孔隙的平均毛细管半径; R_d 为孔的平均流

体动力学半径.

将式(2)代入式(1),可得出经典的液体渗透动力学 Lucas-Washburn 方程:

$$h(t) = \left(\frac{r\sigma \cos \theta}{2\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} \quad (3)$$

当毛细作用与液体重力大小相等时($\Delta p=0$),液体处于平衡状态,此时能达到的最大渗透高度 h_{\max} 为^[15]:

$$h_{\max} = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g R_s} \quad (4)$$

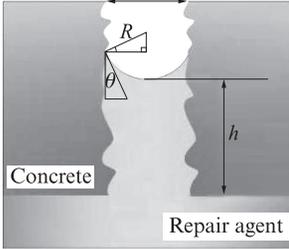
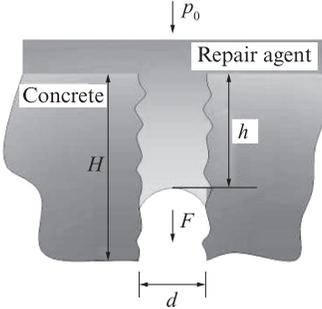
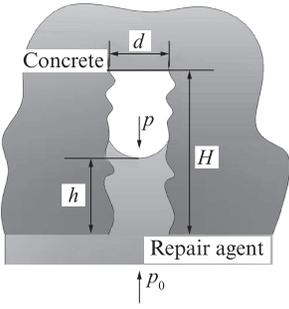
结合上述渗透方程和毛细作用公式,可建立下列3种常见渗透模型:(1)在贯穿型裂缝(I)中渗透,此时修复剂在上升过程中需克服自身重力做功;(2)在贯穿型裂缝(II)中渗透,此时修复剂所受合力 F 方向向下,在无阻碍情况下持续向下渗透;(3)在非贯穿型裂缝中渗透,此时除考虑重力因素外,还需考虑裂缝封闭区域内气体的压强作用,封闭区域内气体压强将会阻碍修复剂的渗入,从而影响修复效果.根据 Wenzel 润湿模型,引入水泥基材料表面粗糙因子 r ,得出适用于水泥基材料微裂缝的渗透公式,如表2所示.表中 h_{\max} 为修复剂(环氧树脂)的最大渗透高度; σ 为修复剂表面张力; ρ 为修复剂密度; d 为裂缝宽度; H 为非贯穿型裂缝高度; p_0 为大气压强.

假设水泥基材料微裂缝表面光滑,环氧树脂在水泥基材料微裂缝内渗透时符合 Young 模型,根据毛细渗透公式:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g d} \quad (5)$$

可计算出20℃条件下环氧树脂在宽0.5 mm裂缝中的理论最大渗透高度 $h_{\max,T}=13.3$ mm.事实上水泥基材料裂缝表面粗糙,其润湿模型为 Wenzel 模型,此时需引入水泥基材料表面粗糙因子 r .因此,实际最大渗透高度 $h_{\max,E}$ 的计算公式变为:

表2 毛细渗透模型
Table 2 Capillary transport model

Penetrating crack(I)	Penetrating crack(II)	Non-penetrating crack
 $h_{max} = \frac{2r\sigma \cos \theta}{\rho g d}$	 $F = 2r\sigma \cos \theta + \rho g v$	 $h_{max} = \frac{H}{1 + (p_0 d / 2r\sigma \cos \theta)}$

$$h_{max,E} = \frac{2r\sigma \cos \theta}{\rho g d} \quad (6)$$

此时通过制作裂缝宽度为0.5 mm的水泥基试块进行模拟渗透试验,测得环氧树脂在宽度为0.5 mm裂缝内的实际最大渗透高度 $h_{max,E}=15$ mm.将此实际最大渗透高度除以按式(5)计算的理论最大渗透高度,便可求出粗糙因子 $r = \frac{h_{max,E}}{h_{max,T}} = \frac{15}{13.3} \approx 1.1$.

为探究渗透初期环氧树脂自身重力对其渗透能力的影响,研究早期渗透驱动力来源.假设环氧树脂FS/E-51在贯穿型裂缝(II)中由上往下渗透,裂缝宽度 d 为0.05 mm、长度 L 为150 mm、渗透深度 h 定为15 mm,则环氧树脂FS/E-51在渗透过程中所受合力为:

$$F = 2r\sigma \cos \theta + \rho g v \quad (7)$$

在20℃条件下,环氧树脂FS/E-51的表面张力为48.29 mN/m,接触角为36.6°,密度为1.16 g/cm³,粗糙因子取1.1;毛细作用所提供的向下力 $f_1 = 2\sigma r \cos \theta = 85.3$ mN,环氧树脂自身重力所提供的向下力 $f_2 = \rho g v = 1.3$ mN.由于 $f_1 \gg f_2$,可认为在一定裂缝宽度范围内(一般小于200 μm),在渗透初期可忽略环氧树脂自身重力影响.原因是早期环氧树脂渗透深度较浅,自身重力影响较小,其渗透驱动力主要来源于毛细作用.但当渗透深度较大时(一般为 $0.1h_{max}$)^[16],环氧树脂的重力影响将不能忽略.

3.2 渗透机理验证

为比较修复剂环氧树脂在非贯穿型裂缝中的毛细渗透能力,探究微裂缝宽度对修复剂渗透能力的影响,进行如下模拟试验:制作固定裂缝宽度水泥基试块,试块尺寸为20 mm×20 mm×20 mm,裂缝宽度 d 分别为0.05、0.10、0.20 mm,裂缝高度 H 为15 mm,均为非贯穿型裂缝.由于混凝土内部及表面存在微小

孔隙,气密性较差,为精确模拟修复剂在非贯穿型裂缝的渗入过程,在试块表面涂抹石蜡密封,密封面为除裂缝面以外另5个表面.在20℃条件下,将蜡封试块裂缝面朝下水平放置在环氧树脂FS/E-51中,模拟修复剂渗入微裂缝过程.5 min后剖开试块,观察环氧树脂FS/E-51的渗透高度.

采用毫米刻度尺测量环氧树脂FS/E-51的实际最大渗透高度 $h_{max,E}$;同时根据公式:

$$h_{max} = \frac{H}{1 + (p_0 d / 2r\sigma \cos \theta)} \quad (8)$$

计算环氧树脂FS/E-51在非贯穿型裂缝中的理论最大渗透高度 $h_{max,T}$,粗糙因子取1.1.结果如表3所示.

表3 不同裂缝宽度下环氧树脂FS/E-51的渗透高度
Table 3 FS/E-51 epoxy resin capillary transport height at different crack widths

$T/^\circ\text{C}$	$\sigma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	$\theta/^\circ$	d/mm	H/mm	$h_{max,T}/\text{mm}$	$h_{max,E}/\text{mm}$
20	48.29	36.6	0.20	15	0.061	2.3
20	48.29	36.6	0.10	15	0.125	4.3
20	48.29	36.6	0.05	15	0.248	6.2

由表3可知,裂缝宽度对环氧树脂的渗透能力具有明显影响,裂缝宽度越小其渗透高度越大,说明其渗透能力越强.理论最大渗透高度与实际最大渗透高度偏差较大的原因是:水泥基材料气密性较差,蜡封无法做到完全密封,导致裂缝内部气体与大气互通,裂缝内气压远小于理论气压 p .虽然如此,两者的整体变化趋势还是完全一致的.

为探究温度和环氧树脂种类对环氧树脂渗透能力的影响,进行如下试验:将试块裂缝面朝下,水平放置在环氧树脂中模拟渗透过程.为避免偶然因素影响,每种环氧树脂中放置3个试块,渗透时间为3 min.

通过比较相同时间下环氧树脂的渗透高度来间接反映其渗透能力的强弱.测得环氧树脂的实际最大渗

透高度 $h_{\max,E}$ 以及采用式(8)计算的理论最大渗透高度 $h_{\max,T}$,结果如表4所示.

表4 环氧树脂渗透高度
Table 4 Capillary transport height of epoxy resin

Type of epoxy resin	$T/^\circ\text{C}$	$\sigma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	$\theta/^\circ$	d/mm	H/mm	$h_{\max,T}/\text{mm}$	$h_{\max,E}/\text{mm}$	$h_{\max,E}/h_{\max,T}$
E-51	20	47.26	28.7	0.05	15	0.265	4.5	17.1
FS/E-51	20	48.29	36.6	0.05	15	0.248	4.3	17.3
E-44	20	47.67	42.8	0.05	15	0.224	3.5	15.6
FS/E-44	20	49.17	49.2	0.05	15	0.206	3.1	15.0
FS/E-51	30	47.12	28.5	0.05	15	0.266	4.6	17.4
FS/E-51	40	46.06	22.8	0.05	15	0.272	4.8	17.6
FS/E-51	50	45.58	20.5	0.05	15	0.273	5.1	18.7
FS/E-51	60	42.75	9.5	0.05	15	0.270	5.1	18.5

由表4可知,20℃条件下,在非贯穿型裂缝中环氧树脂 E-51的理论最大渗透高度比环氧树脂 E-44提高约17.4%、实际最大渗透高度则提高28.6%,表明环氧树脂 E-51的渗透能力强于环氧树脂 E-44.与普通环氧树脂相比,荧光环氧树脂的理论最大渗透高度降低5%~8%,实际最大渗透高度则降低4%~10%,说明添加荧光素钠将略微降低环氧树脂的渗透能力.温度对环氧树脂渗透能力具有明显影响,50℃时环氧树脂 FS/E-51的理论最大渗透高度相比20℃时提高10.1%左右,实际最大渗透高度则提高18.6%左右,原因是随着温度升高,环氧树脂黏度降低,渗透能力增强;但当升温到50℃以上时,环氧树脂黏度趋于稳定,其渗透能力不再有明显变化.表4中,理论与实际最大渗透高度存在较大偏差,原因是蜡封后混凝土气密性仍然较差,但两者的变化趋势完全一致.

根据本文研究可知,环氧树脂修复剂在水泥基材料微裂缝中的渗透能力受多种因素影响.采取升高环境温度、添加稀释剂以减小接触角、降低黏度、选择高流动性环氧树脂等方式均能增强环氧树脂在水泥基材料微裂缝中的渗透能力,进而增强微胶囊对水泥基材料微裂缝的修复效果.此外,本文研究内容同样可为其他裂缝修复剂的选用提供一定参考.

4 结论

(1)通过建立润湿模型,证明了环氧树脂对水泥基材料微裂缝表面具有良好润湿性,二者接触角在5 min时趋于稳定.在20~50℃下,升温会使环氧树脂接触角减小,黏度降低,渗透能力增强,但当温度超过50℃后,其渗透能力几乎不再提升.

(2)环氧树脂在水泥基材料微裂缝(裂缝宽度一般小于200 μm)中渗透时,初期可忽略其自身重力影

响,渗透驱动力主要来源于毛细作用.

(3)在非贯穿型裂缝中,裂缝宽度对环氧树脂的渗透能力具有显著影响.在裂缝宽度为50~200 μm范围内,裂缝宽度越小,其毛细虹吸现象越明显,渗透能力越强.

(4)20℃条件下,荧光环氧树脂比普通环氧树脂的理论最大渗透高度降低5%~8%;环氧树脂 E-51的理论最大渗透高度比环氧树脂 E-44增加约17.4%,实际最大渗透高度则增加28.6%.表明环氧树脂 E-51的渗透能力强于环氧树脂 E-44,而添加荧光素钠会略微降低环氧树脂的渗透能力.

参考文献:

- [1] WANG X F, HUANG Y J, HUANG Y X, et al. Laboratory and field study on the performance of microcapsule-based self-healing concrete in tunnel engineering [J]. Construction and Building Materials, 2019, 220:90-101.
- [2] DONG B Q, FANG G H, DING W J, et al. Self-healing features in cementitious material with urea-formaldehyde/epoxy microcapsules [J]. Construction and Building Materials, 2016, 106:608-617.
- [3] LUCIJA H, LADISLAV K, IVAN A, et al. Capillary absorption in concrete and the Lucas-Washburn equation [J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(1):84-91.
- [4] SNOECK D, VANDEN P H, VAN T M, et al. Water penetration through cracks in self-healing cementitious materials with superabsorbent polymers studied by neutron radiography [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 113:86-98.
- [5] HONG S X, YAO W Q, GUO B W, et al. Water distribution characteristics in cement paste with capillary absorption [J]. Construction and Building Materials, 2020, 240:117767.
- [6] DONG B Q, FANG G H, WANG Y H, et al. Performance recovery concerning the permeability of concrete by means of a microcapsule based self-healing system [J]. Cement and Con-

- crete Composites, 2017, 78:84-96.
- [7] REINHARDT H W, JOOSS M. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(7):981-985.
- [8] 曹芳维,李敏,王绍凯,等.碳纤维与环氧树脂润湿和黏附作用[J].复合材料学报,2011,28(4):23-28.
CAO Fangwei, LI Min, WANG Shaokai, et al. Wetting and adhesion of epoxy resin on carbon fiber[J]. Journal of Composite Materials, 2011, 28(4):23-28. (in Chinese)
- [9] YU J, ZHENG Q, HOU D S, et al. Insights on the capillary transport mechanism in the sustainable cement hydrate impregnated with graphene oxide and epoxy composite[J]. Composites Part B:Engineering, 2019, 173:106907.
- [10] HAN T L, WANG X F, LI D W, et al. Stress-strain behaviour and pore structure of microcapsule-based self-healing cementitious composite under triaxial tests[J]. Construction and Building Materials, 2020, 241:118009.
- [11] WANG X G, CHEN Z F, XU W, et al. Fluorescence labeling and self-healing microcapsules for detection and repair of surface microcracks in cement matrix[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 184:107744.
- [12] WANG H, LIANG J J, PENG Y Y, et al. Coupled wetting meniscus model for the mechanism of spontaneous capillary action[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 50:200-218.
- [13] SUCHATA K, MUENDUEN P, BI-MIN Z N. Applicability of Washburn capillary rise for determining contact angles of powders/porous materials[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 397:169-176.
- [14] DIANE G, ANTHONY J, ANDREA H, et al. Simulation of the capillary flow of an autonomic healing agent in discrete cracks in cementitious materials[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 58:35-44.
- [15] ALAIN S, MICHEL N, JACQUES S, et al. Effect of dynamic contact angle on capillary rise phenomena[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2000, 161(1):81-87.
- [16] BAO J W, WANG L C. Capillary imbibition of water in discrete planar cracks [J]. Construction and Building Materials, 2017, 146:381-392.