

文章编号:1007-9629(2024)11-1039-08

碱式硫酸镁水泥基树脂透光混凝土的界面黏结机理

徐 迅^{1,*}, 孙永涛¹, 李莹江¹, 王宗浩¹, 游潘丽²

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010;

2. 西昌学院 土木与水利工程学院, 四川 西昌 615013)

摘要:使用碱式硫酸镁水泥(BMSC)作为基体材料,制备了树脂透光混凝土(RLTC),并利用界面剪切强度测试、超景深三维显微镜和扫描电镜(SEM)等分析了 BMSC 基体与树脂的界面黏结性能。结果表明:BMSC 与树脂界面处裂纹较少且宽度较窄,在界面处观察到大量针状 $5\cdot 1\cdot 7$ 相($5\text{Mg}(\text{OH})_2\cdot \text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$)结构,微米级 $5\cdot 1\cdot 7$ 相晶须填充了 BMSC 基体与树脂的孔隙,增强了界面间的机械啮合作用;与使用普通硅酸盐水泥的 RLTC 相比,硬化后 BMSC 基体与树脂的界面黏结性能明显提高,其中 28 d 界面剪切强度提高了 59.2%。

关键词:界面黏结;碱式硫酸镁水泥;树脂;透光混凝土;剪切强度

中图分类号:TU528.38

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.11.009

Interface Bonding Mechanism of Basic Magnesium Sulfate Cement-Based Resin Light-Transmitting Concrete

XU Xun^{1,*}, SUN Yongtao¹, LI Yingjiang¹, WANG Zonghao¹, YOU Panli²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Xichang University, Xichang 615013, China)

Abstract: Resin light-transmitting concrete (RLTC) was prepared using basic magnesium sulfate cement (BMSC). Interfacial shear strength testing, ultra-deep field 3D microscopy, and scanning electron microscopy (SEM) were used to analyze the interfacial bonding performance between the BMSC matrix and resin. The results indicate that there are few interface cracks between the BMSC matrix and the resin, with relatively narrow crack widths. A large number of needle-like $5\cdot 1\cdot 7$ phase ($5\text{Mg}(\text{OH})_2\cdot \text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$) structure are observed at the interface, where micro-scale $5\cdot 1\cdot 7$ phase crystals fill the pores between the matrix and resin, enhancing the mechanical interlocking effect. Compared to RLTC prepared with ordinary Portland cement, the interfacial bonding performance between the BMSC matrix and resin are significantly improved after curing, with a 59.2% increase in interface shear strength at 28 d.

Key words: interface bonding; basic magnesium sulfate cement; resin; light-transmitting concrete; shear strength

树脂透光混凝土(RLTC)具备轻质、低能耗的特性^[1-3],其通过混凝土中的树脂材料传递外部光线,可以减少 31% 人造光源的能源消耗^[4-5]。硅酸盐水泥(PO)作为传统 RLTC 的基体材料,在养护过程中伴

随着体积收缩^[6],使树脂与基体间的界面黏结力降低,导致在受力过程中水泥基体与树脂界面间易发生破坏^[7-8]。因此,水泥基体与树脂界面结合程度是影响 RLTC 性能的关键因素。

收稿日期:2023-12-07; 修订日期:2024-09-13

基金项目:四川省科技计划省院省校合作项目(2023YFSY0019);泸州市科技计划项目(2023JYJ061);西南科技大学智慧教育研究中心资助项目(22ZJYB04)

第一作者(通讯作者):徐 迅(1977—),男,湖南津市人,西南科技大学特聘教授,硕士生导师,博士.E-mail:15550045@qq.com

为改善水泥基体与树脂界面黏结力较弱的问题,学者们进行了多方面的研究,包括使用硫铝酸盐水泥^[9]、环氧树脂 AB 胶^[10]、硅烷偶联剂^[9]、铝酸酯偶联剂^[11]等方法,来提高树脂透光水泥基材料的界面黏结性能。然而,这些措施不仅增加了施工的复杂性和成本,而且未能解决 RLTC 制备过程中由于基体材料收缩导致的界面问题。

碱式硫酸镁水泥(BMSC)具有高强、轻质及加工装饰性能较好等特点^[12-14]。利用 BMSC 制备树脂透光混凝土(BMSC-RLTC),通过对其力学性能、界面特性与透光性能^[15-16]的研究,发现相对于 PO 制备的透光混凝土(PO-RLTC),BMSC-RLTC 具有更低的强度损失和更优异的力学性能。本文在此基础上,通过界面剪切强度测试和界面微观形貌分析,对 BMSC-RLTC 中树脂与基体界面黏结机理进行微观分析,研究 BMSC 基体材料与树脂的界面黏结性能,并建立界面微观结构模型,为 BMSC-RLTC 的应用提供了理论基础。

1 试验

1.1 原材料

轻烧氧化镁粉(LBM):辽宁海城生产, α -MgO 含量¹⁾为 62.8%,化学组成见表 1。柠檬酸(CA): $C_6H_8O_7$,国药集团化学试剂有限公司购买,化学纯。七水硫酸镁($MgSO_4 \cdot 7H_2O$):成都科龙化学试剂厂生产,纯度 99%,化学组成见表 2。固硫灰(CFBCA):四川白马循环流化床示范电站生产,化学组成见表 3。水泥:江油拉豪双马水泥厂生产,P·O42.5 级普通硅酸盐水泥。粉煤灰(FA):河南龙泽净水厂生产的 I 级粉煤灰。减水剂:BMSC-RLTC 使用萘系减水剂,由花王化工有限公司生产;PO-RLTC 使用聚羧酸高性能减水剂,由巴斯夫公司生产。砂:德阳创华砂石公司生产石英砂 S1 和 S2,粒径分别为 109~212 μm (70~140 目)、212~380 μm (40~70 目)。树脂:聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),表面光滑,表面粗糙度 $R_a=(0.53 \pm 0.012) \mu m$,万华化学公司生产。水:绵阳市自来水。

表 1 轻烧氧化镁的化学组成
Table 1 Chemical composition (by mass) of LBM

Unit: %						
MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	f-CaO	Other
85.42	0.17	4.96	0.29	1.40	0.73	7.03

表 2 七水硫酸镁的化学组成

Table 2 Chemical composition (by mass) of $MgSO_4 \cdot 7H_2O$

Unit: %						
MgO	SO ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	Other
27.43	72.05	0.06	0.20	0.18	0.06	0.02

表 3 固硫灰和砂的化学组成

Table 3 Chemical compositions (by mass) of CFBCA and sand

Unit: %								
Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Other	IL
CFBCA	46.28	12.57	16.15	13.76	0.21	4.32	2.41	4.30
Sand	98.10	0.50	0.69	0.17				0.54

1.2 试验配比及试验方法

1.2.1 试件制备

BMSC 砂浆按照相当强度的 PO 砂浆进行配置,BMSC 与 PO 砂浆的配合比分别见表 4、5,两者 28 d 立方体抗压强度分别为 76.8、78.3 MPa。BMSC 砂浆的制备过程如下:将 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 与柠檬酸混合,加入沸水,用玻璃棒搅拌,确保 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 完全溶解;待混合溶液冷却并无晶体析出后,将混合溶液与氧化镁、减水剂倒入搅拌锅中搅拌,先慢搅 30 s 再快搅 30 s;随后倒入固硫灰和砂,先慢搅 30 s 再快搅 150 s;在成型砂浆试件时,将充分混合的 BMSC 砂浆置于振实台上振捣,分 2 次倾入模具,并采用小刀多次插捣;成型完毕后,用刮刀将表面刮平,覆盖保鲜膜,待试件硬化后拆模。

表 4 BMSC 砂浆的配合比

Table 4 Mix proportion of BMSC mortar

Unit: kg/m ³							
LBM	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Water	CA	CFBCA	Water reducer	S2	S1
800.00	248.00	272.00	8.00	120.00	6.08	508.00	127.20

表 5 PO 砂浆的配合比

Table 5 Mix proportion of PO mortar

Unit: kg/m ³				
P·O42.5	FA	Water	Water reducer	S1
900	270	351	9	1 700

PO 砂浆的制备过程如下:将水泥、粉煤灰倒入搅拌锅中,再加入混合好的水和减水剂,先慢搅 30 s,再加砂,继续慢搅 30 s,然后快搅 60 s;其试件成型过程与 BMSC 砂浆相同。

1.2.2 测试方法

在制备 RLTC 时,树脂掺入方式与纤维混凝土相似,界面黏结性能在很大程度上决定了非均相系统的一系列性能^[17-18]。

1)文中涉及的含量、组成等均为质量分数。

本文通过拉拔试验来测试树脂与水泥基体的界面剪切强度,如图1所示.将直径为10 mm、长度为80 mm的光导树脂体固定在40 mm×40 mm×160 mm的模具底面,使用胶水粘贴.随后倒入水泥

砂浆,并在试件硬化1 d后拆除模具. PO-RLTC在 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度95%以上的条件下, BMSC-RLTC在 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(60\pm 5)\%$ 的条件下分别养护至测试龄期.

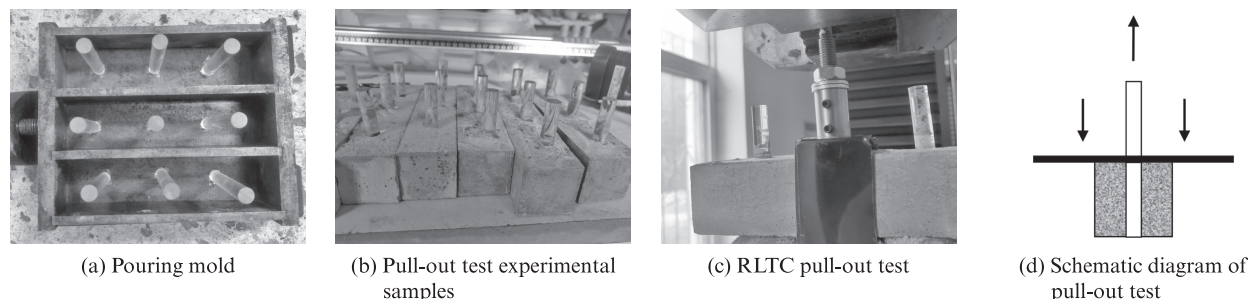


图1 拉拔试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pull-out test

进行拉拔试验时使用内径大于10 mm的延长套杆将树脂导光体牢固固定,分别固定套杆和水泥基体,使用CMT5105万能试验机进行拉拔试验,加载速率为0.5 mm/min.记录树脂导光体与水泥砂浆发生滑动位移时的拉力,作为最大拔出荷载.并计算界面剪切强度 τ ,计算方法如式(1)所示.

$$\tau = \frac{F_m}{\mu_i L} \quad (1)$$

式中: F_m 为最大拔出荷载,N; L 为水泥基体中树脂埋入长度,mm; μ_i 为树脂横截面周长,mm.

取破坏前后的RLTC,用洗耳球吹去样品表面沙砾后,使用基恩士VHX-5000型超景深三维显微系统进行超景深显微分析,利用变焦镜头,全幅对焦,在500倍范围内观察,拍摄后使用配套REMAX V软件进行3D图像处理.

将未破坏的RLTC切割成小块,利用金相研磨抛光机将试块表面打磨平整后,喷金,采用TM-4000型扫描电镜(SEM)对样品进行微观形貌分析,观察RLTC中树脂与水泥砂浆界面黏结情况.

2 结果与讨论

2.1 界面剪切性能

测试BMSC和PO基体与树脂的最大拔出荷载,结果见表6.

表6 树脂与水泥基体的最大拉拔荷载

Table 6 Maximum pull-out load between resin and cement matrix

Unit: N

Specimen	3 d	7 d	28 d
BMSC-RLTC	85.62	285.85	616.86
PO-RLTC	262.10	654.74	983.90

根据式(1)计算界面剪切强度,结果见图2.由图2可见:BMSC-RLTC和PO-RLTC的界面剪切强度均随着龄期的增加而增加,这主要是因为随着龄期的增加,基体持续硬化,基体材料与树脂间的界面摩擦力不断增加;在28 d时PO-RLTC和BMSC-RLTC的界面剪切强度分别为0.49、0.78 MPa;BMSC-RLTC的界面剪切强度更高,其3、7、28 d龄期的界面剪切强度分别比PO-RLTC高出208.8%、126.1%、59.2%.

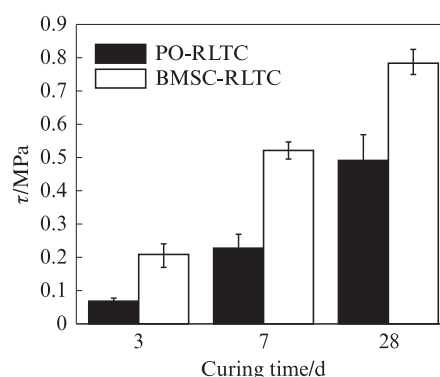


图2 树脂与不同水泥基体间的界面剪切强度

Fig. 2 Interfacial shear strength between resin and different cement matrices

图3为BMSC与PO基体的抗压强度及强度发展规律.由图3可见,BMSC基体早期界面剪切强度高于PO基体.其原因一方面在于BMSC基体早期强度较PO基体更高;另一方面在于BMSC基体水化产物主要为5·1·7相晶须,能够在早期与树脂界面形成机械啮合作用,从而提升其界面剪切强度.同时,随着龄期的增长,PO基体抗压强度增大,其与树脂之间的机械摩擦力增强,因此其界面剪切强度在一定程度上也得到提高,但界面剪切强度在相同龄期下

仍然低于BMSC基体.对比2种基体的强度发展规律可以看出,在7 d龄期以后,2种基体的抗压强度发

展情况以及水化过程均趋于稳定,2种水泥基体水化过程的不同对RLTC力学性能所造成的影响减弱.

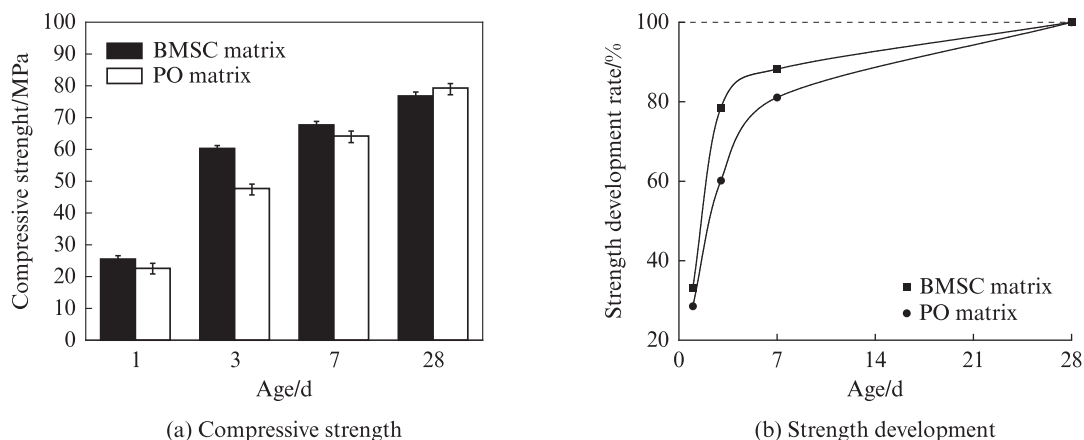


图3 2种水泥基体的抗压强度及强度发展规律

Fig. 3 Compressive strength and strength development law of two cement matrices

2.2 界面表现形貌分析

图4为BMSC与PO基体制备的RLTC的表现与破坏形貌.对比图4(a)、(d)可看出,BMSC-RLTC表面更密实,气孔相对较少,且表面较光滑,而PO-RLTC气孔较多,在树脂周围与水泥基体材料表面均有分布.对比2种RLTC在受力过程中的破坏形式,从图4(b)、(e)可以看出:PO-RLTC和BMSC-RLTC的裂纹扩展均出现在树脂与水泥基体界面处;在破坏后,树脂保持其完整形态,未受到明

显破坏,说明其强度远高于界面剪切强度;PO-RLTC的破坏程度较严重,裂纹更为密集,形成更多细小碎块;相比之下,BMSC-RLTC破坏后裂纹相对较少,其中多为微小裂纹,细小碎块较少.从图4(c)、(f)可以看出,对于混凝土破坏后的内部情况,2种水泥基体与树脂的界面结合位置都呈现一定的反光.这主要是因为RLTC浇筑成型过程中,由于边缘效应,水泥砂浆中多余的水分在树脂与基体界面处形成水膜,导致界面的水灰比大于水泥浆体本身

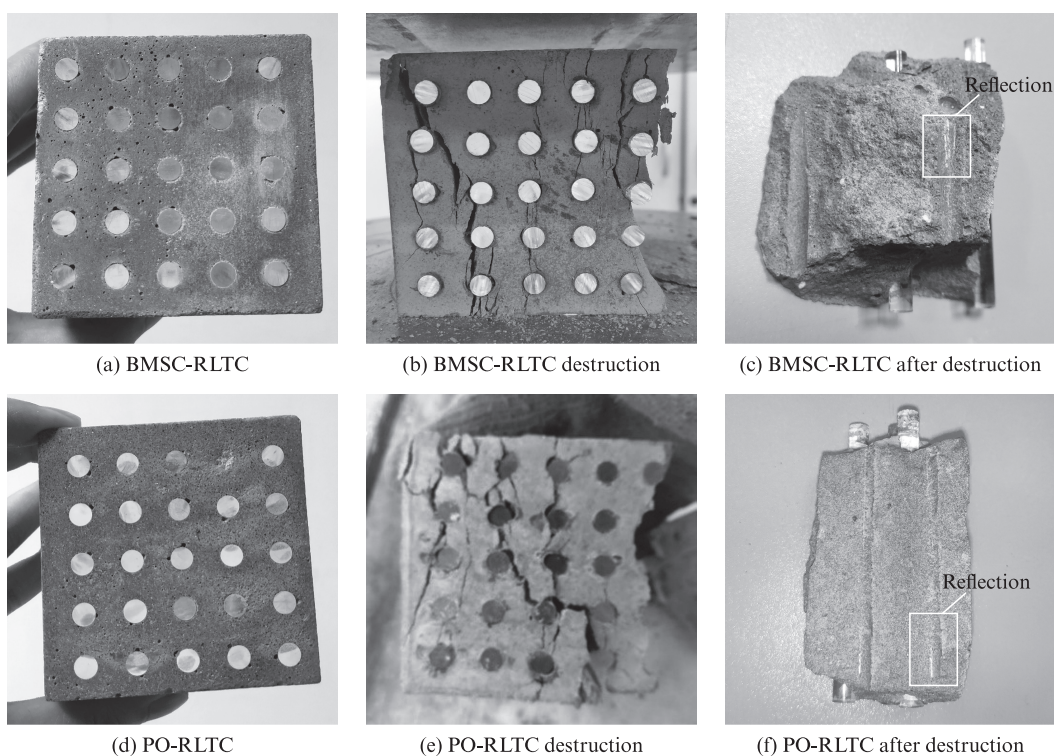


图4 BMSC与PO基体制备的RLTC的表现与破坏形貌

Fig. 4 Surface appearance and failure morphology of RLTC prepared with BMSC and PO matrices

的水灰比.另外,在混凝土成型过程中,水泥砂浆自身的重力会导致应力在树脂与基体材料的界面处集中,使得该区域的浆体更加紧密.

2.3 界面微观分析

破坏前 RLTC 中树脂与水泥基体界面的 SEM

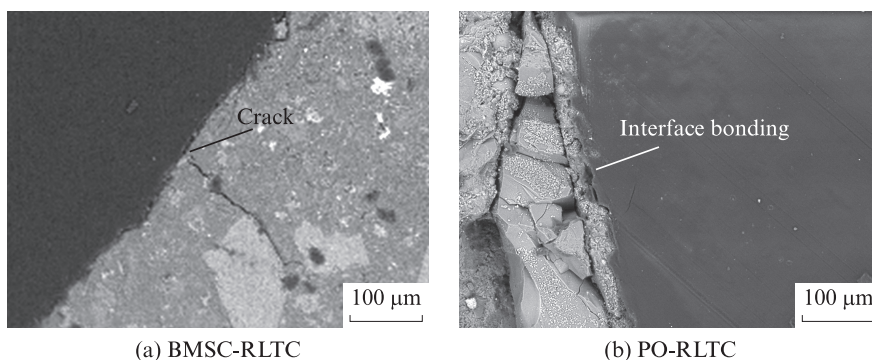


图5 破坏前树脂与水泥基体界面的SEM照片

Fig. 5 SEM images of interface between resin and cement matrix before destruction

图6为破坏前后树脂与水泥基体界面的超景深三维显微镜图像.对比破坏前的图6(a)、(b)、(e)、(f)可以发现:BMSC基体与树脂间的界面过渡区相对PO基体更为紧密,没有由于收缩产生的微裂纹;PO基体出现了由基体收缩所致的裂纹,基体与界面呈楔形向内分离.对比破坏后的图6(c)、(d)、(g)、(h)可以看出,BMSC基体与树脂间仍然存在连接,部分基体附着在树脂表面没有脱落,界面裂纹发展呈齿状;PO-RLTC树脂表面光滑,没有水泥基体残留在树脂表面,基体与树脂剥离,失去相互作用力.

图7为树脂与水泥基体界面水化产物的SEM照片.由图7(a)可见:在水泥基体与树脂界面处存在大量的针状 $5\cdot1\cdot7$ 相晶须,以及少量 $Mg(OH)_2$; $5\cdot1\cdot7$ 相生长受到树脂的阻碍,导致其在界面处黏结,与树脂形成了机械啮合,显著提高了树脂与水泥基体界面的相互作用力,从而有效增强了界面黏结强度.这说明 $5\cdot1\cdot7$ 相晶须的生成可以增加界面的粗糙程度,提高界面结合力.由图7(b)可以看出:PO基体主要水化产物为 $Ca(OH)_2$ 、水化硅酸钙(C-S-H)凝胶及少许钙矾石(Aft);与BMSC基体不同,树脂与PO基体界面相对光滑;其界面水化产物与BMSC基体相似,部分 $Ca(OH)_2$ 的生长受到树脂的阻碍,呈现片状形态.由于PO基体与树脂之间主要依靠范德华力黏合,而片状 $Ca(OH)_2$ 晶体的比表面积较小,黏结力较差,导致其界面黏结强度较低,因此当其受到外力作用时,此区域往往成为首要发生开裂的位置.

2.4 界面微观结构模型

本文建立了水泥基体与树脂界面黏结模型,如图8

照片见图5.由图5可见:树脂与BMSC基体的结合更紧密,界面处几乎没有裂纹,基体中存在细小裂纹,说明两者的结合效果优良;PO基体与树脂界面处存在较多由基体本身收缩所致的基体破坏,且基体中裂纹更多.

所示.由图8可见:(1)对PO-RLTC来说,由于边壁效应的影响,PO基体在树脂界面处形成水膜,并为水泥水化过程中 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 SO_4^{2-} 等离子迁移提供了快速通道; $Ca(OH)_2$ 晶体、Aft晶体和C-S-H凝胶晶体等富集在树脂表面附近,随着水化的不断进行,在PO基体和紧贴树脂表面处形成一层平行于黏结面的条状 $Ca(OH)_2$ 晶体,其中还含有少量的Aft晶体;该层 $Ca(OH)_2$ 晶体生长受到树脂的阻碍,因此尺寸较小,平行黏结在树脂表面; $Ca(OH)_2$ 晶体呈现片状,与树脂间的黏结主要依靠范德华力与摩擦力,从而降低了界面黏结强度;同时,PO基体水化前期的水化收缩致使PO基体与树脂界面处形成缺陷与空隙,导致该层与树脂界面黏结性较弱.(2)对于BMSC-RLTC来说,BMSC基体水化产物中存在大量的 $5\cdot1\cdot7$ 相晶须^[19-20],使得BMSC基体与树脂形成更强的范德华力与摩擦力,因而界面黏结性更好;与PO基体相同,BMSC基体与树脂间也存在边壁效应,而 $5\cdot1\cdot7$ 相晶须的不断生长可以在基体间起到一定填充作用,降低边壁效应的影响;BMSC基体在界面处形成 Mg^{2+} 、 OH^- 、 SO_4^{2-} 离子通道,促使 $5\cdot1\cdot7$ 相晶须不断生成,不断生长的 $5\cdot1\cdot7$ 相晶须也容易在界面过渡区交错搭接,提升黏结能力,部分MgO缺少诱导形成少量 $Mg(OH)_2$;界面处还存在大量生长受到树脂阻碍的 $5\cdot1\cdot7$ 相晶须,这也说明微米级的 $5\cdot1\cdot7$ 相晶须可以在树脂与BMSC基体界面处更好地生长, $5\cdot1\cdot7$ 相晶须填充于界面过渡区,使基体与树脂结合更加致密,显著改善了BMSC-RLTC中基体与树脂间的界面黏结性能.

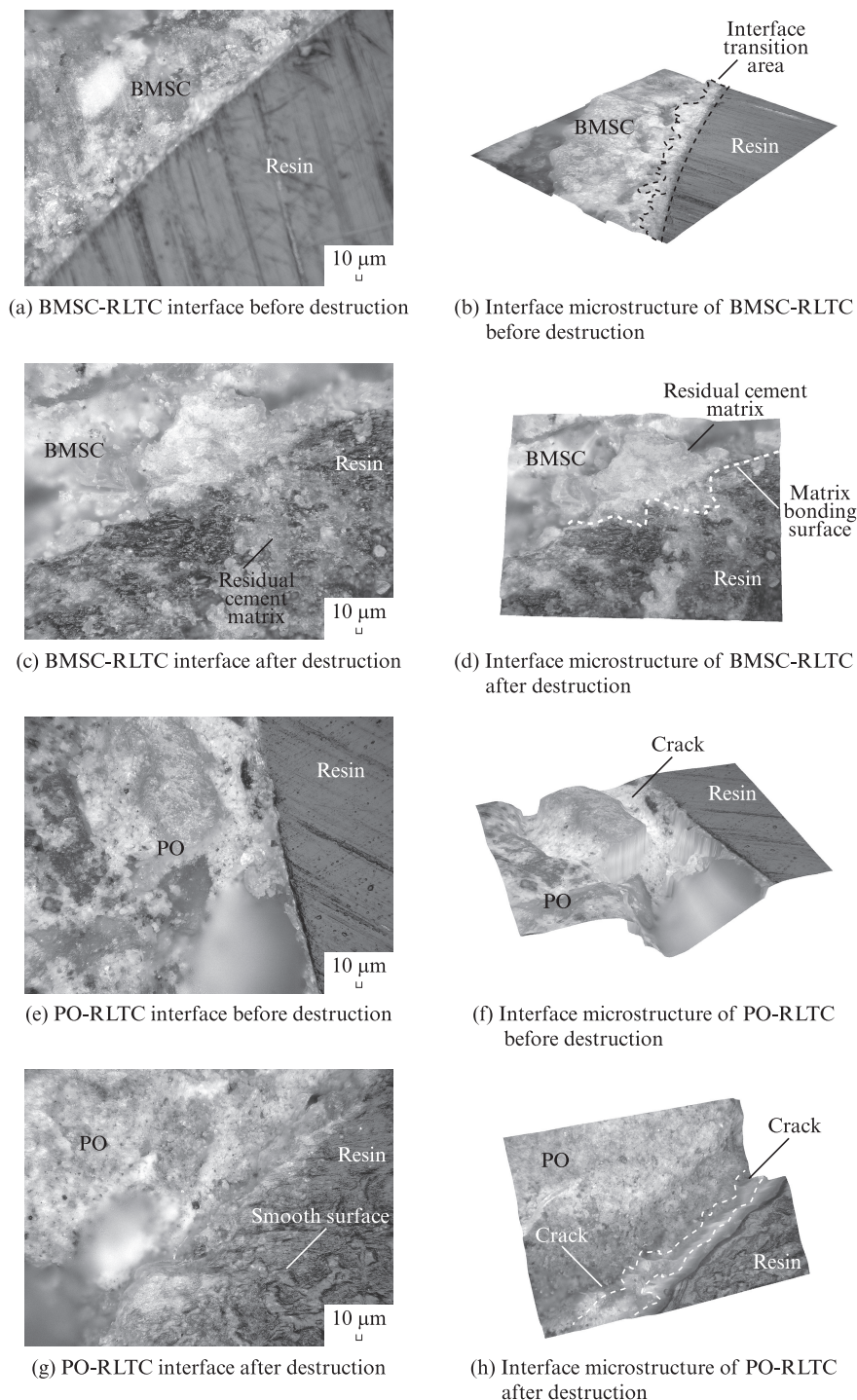


图6 破坏前后树脂和水泥基体界面的超景深三维显微镜图像

Fig. 6 Ultra-deep 3D microscopic images of interface between resin and cement matrix before and after destruction

BMSC基体与树脂界面的受力示意图如图9所示.由图9可见,5·1·7相晶须可以抑制初始阶段基体中微裂纹的发展.首先,当基体中的裂纹开裂到晶须所在区域时,靠近裂纹尖端的晶须可以将裂纹桥接起来,并在裂纹表面增加闭合应力,防止裂纹进一步扩展.其次,当裂纹扩展到晶须所在区域时,裂纹扩展的方向会发生一定角度的偏转,裂纹扩展路径也由于晶须的阻裂而发生改变,使断裂能可以被有效

吸收.再次,由于晶须的拉拔效应,当基体开裂时,基体向晶须传递的力在界面处形成剪应力,产生一定的剪切屈服强度,同时由于晶须抗拉强度较高,当晶须没有断裂而是被拉出基体时,能量耗散较大,因此界面黏结性能有所提升.综上,BMSC-RTLC基体中5·1·7相晶须的桥接、裂纹偏转和拉拔在微观尺度上抑制了裂纹的产生和发展,有利于提高RTLC的力学性能.

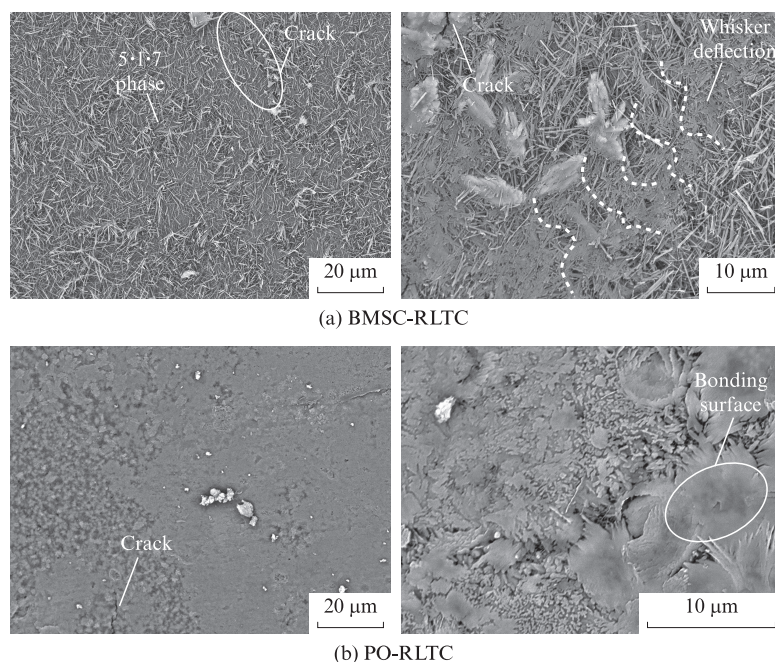


图 7 树脂与水泥基体界面水化产物的 SEM 照片

Fig. 7 SEM images of hydration product in interface between resin and cement matrix

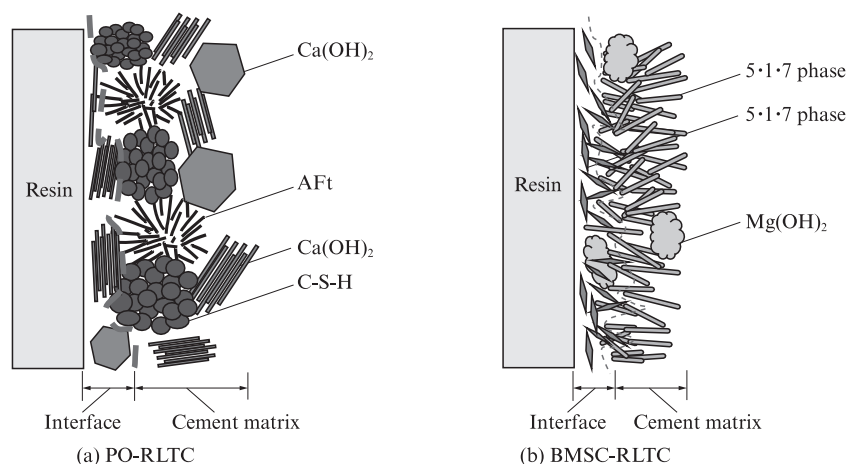


图 8 水泥基体与树脂界面黏结模型

Fig. 8 Interface bonding model between cement matrix and resin

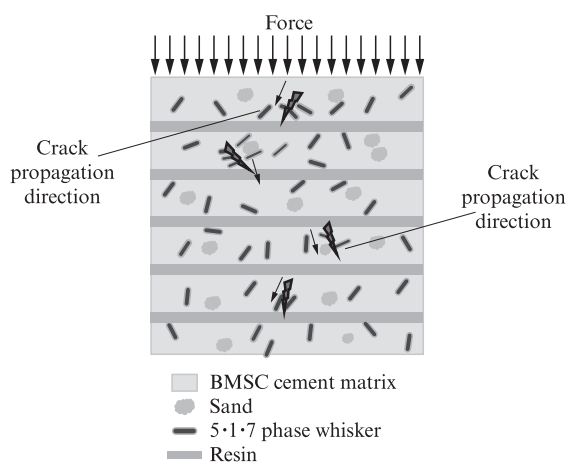


图 9 BMSC 基体与树脂界面的受力示意图

Fig. 9 Schematic diagram of interface bonding force between BMSC matrix and resin

3 结论

(1)与 PO 基体相比,BMSC 基体与树脂的界面黏结性能更强.BMSC-RLTC 与 PO-RLTC 的界面剪切强度均随龄期增加而增加,但 BMSC-RLTC 的 3、7、28 d 界面剪切强度均高于 PO-RLTC,其中 28 d 界面剪切强度比 PO-RLTC 高 59.2%.BMSC 基体在整个龄期内都表现出比 PO 基体更好的界面黏结性能.

(2)在微观形貌上,BMSC 基体与树脂的界面比 PO 基体更紧密,裂纹更少,裂纹宽度更窄.同时 BMSC 水化生成的 5·1·7 相晶须能有效增强水泥基体与树脂界面的机械啮合作用,进一步提高界面黏

结性能.微米级5·1·7相晶须填充了BMSC基体与树脂的孔隙,使界面结构更致密,增加了黏结强度.

(3)5·1·7相晶须能够较好地能在BMSC基体与树脂界面处生长,使BMSC基体与树脂结合更加致密,提高界面黏结性能,并在微观尺度上抑制裂纹的产生和发展,从而有助于提高树脂透光混凝土的力学性能和耐久性.

参考文献:

- [1] CHIEW S M, IBRAHIM I S, MOHD ARIFFIN M A, et al. Development and properties of light-transmitting concrete (LTC)—A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 284:124780.
- [2] NAVABI D, AMINI Z, RAHMATI A, et al. Developing light transmitting concrete for energy saving in buildings[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18:e01969.
- [3] 黄宝锋, 吴鹏, 卢文胜. 半透明混凝土幕墙能耗分析[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6):1488-1495.
HUANG Baofeng, WU Peng, LU Wensheng. Energy efficient analysis of translucent concrete panel curtain wall[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1488-1495.(in Chinese)
- [4] LUHAR I, LUHAR S, SAVVA P, et al. Light transmitting concrete: A review[J]. Buildings, 2021, 11(10):480.
- [5] SHEN J, ZHOU Z. Performance and energy savings of resin translucent concrete products[J]. Journal of Energy Engineering, 2020, 146(3):04020007.
- [6] 韩宇栋, 李威, 岳清瑞, 等. 内养护剂和膨胀剂组合对混凝土收缩的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(6):604-611.
HAN Yudong, LI Wei, YUE Qingrui, et al. Effect of internal curing agent and expansion agent on concrete shrinkage[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6):604-611. (in Chinese)
- [7] PILIPENKO A, BAZHENOVA S, KRYUKOVA A, et al. Decorative light transmitting concrete based on crushed concrete fines [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.[S.l.:s.n.], 2018, 365:032046.
- [8] SHEN J, ZHOU Z. Preparation and study of resin translucent concrete products[J]. Advances in Civil Engineering, 2019: e8196967.
- [9] LI Y, LI J Q, GUO H. Preparation and study of light transmitting properties of sulfoaluminate cement-based materials[J]. Materials and Design, 2015, 83:185-192.
- [10] 王信刚, 谢涛, 叶棚娜, 等. 环氧树脂AB胶对树脂导光水泥基材料界面性能的影响[J]. 南昌大学学报(理科版), 2016, 40(1): 44-47.
WANG Xingang, XIE Tao, YE Xuna, et al. Influence of epoxy resin AB glue on the interface performance of resin light conductive cementitious materials [J]. Journal of Nanchang University(Natural Science), 2016, 40(1):44-47.(in Chinese)
- [11] 王睿, 王昕霞, 谢涛. 树脂-水泥界面改性的多尺度表征[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(1):67-72.
- [12] 张晓媛, 吴成友, 张勇, 等. 矿物掺合料对含硼碱式硫酸镁水泥强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(3):221-227.
ZHANG Xiaoyuan, WU Chengyou, ZHANG Yong, et al. Influence of mineral admixtures on strength of boron-containing basic magnesium sulfate cement [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(3):221-227. (in Chinese)
- [13] ZENG X C, YU H F. Review of studies on structural performance of basic magnesium sulfate cement concrete in China (2014—2019)[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(5): 1524-1530.
- [14] 巴明芳, 朱杰兆, 薛涛, 等. 原料摩尔比对硫氧镁胶凝材料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(1):124-130.
BA Mingfang, ZHU Jiezhao, XUE Tao, et al. Influence of molar ratio on properties of magnesium oxysulfate cementitious materials [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(1):124-130. (in Chinese)
- [15] 陈思佳, 徐迅, 王宗浩, 等. 碱式硫酸镁水泥基树脂透光混凝土界面特性的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(4):9-13.
CHEN Sijia, XU Xun, WAN Zonghao, et al. Study on interface characteristics of basic magnesium sulfate cement-based resin transparent concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(4):9-13.(in Chinese)
- [16] 徐迅, 李莹江, 王宗浩, 等. 基于高树脂掺量的透光混凝土的砂浆性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43(7):13-21.
XU Xun, LI Yingjiang, WANG Zonghao, et al. Study on mortar performance of transparent concrete based on high resin content [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2021, 43(7): 13-21. (in Chinese)
- [17] ZHANDAROV S, MÄDER E. Characterization of fiber/matrix interface strength: Applicability of different tests, approaches and parameters[J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(1):149-160.
- [18] PISANOVA E, ZHANDAROV S, MÄDER E. How can adhesion be determined from micromechanical tests? [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001, 32(3/4):425-434.
- [19] 吴成友, 苗梦, 余红发. MgO活性和摩尔比对碱式硫酸镁水泥强度的影响机理[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4):360-366.
WU Chengyou, MIAO Meng, YU Hongfa. Effect of MgO activity and molar ratio on strength of basic magnesium sulfate cement and its mechanism [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):360-366.(in Chinese)
- [20] 李振国, 余四文, 刘同海, 等. 活性MgO含量对碱式硫酸镁水泥强度及水化产物的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(7): 2259-2262, 2267.
LI Zhenguo, YU Siwen, LIU Tonghai, et al. Influence of reactive magnesium oxide content on strength and hydration products of basic magnesium sulfate cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(7):2259-2262, 2267.(in Chinese)