

文章编号:1007-9629(2024)07-0589-07

偏高岭土对 NaOH 预处理橡胶混凝土力学性能的影响

姜晓东¹, 张宏¹, 李闯^{1,*}, 任永峰¹, 徐军²

(1. 内蒙古大学 交通学院, 内蒙古 呼和浩特 010070;

2. 内蒙古路桥集团有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:采用偏高岭土(MK)对NaOH预处理橡胶混凝土进行改性并对其进行力学性能试验,同时结合扫描电镜(SEM)、压汞仪(MIP)和热重分析仪(TG-DTG),探究了MK对橡胶混凝土孔隙结构特征和水化产物含量的影响.结果表明:掺加MK能够提高改性橡胶混凝土水化产物的生成量,改善骨料与胶凝材料界面过渡区的质量,细化橡胶混凝土的孔隙结构,减少其内部孔隙率,进而提高橡胶混凝土的力学性能;改性橡胶混凝土的力学性能随着MK掺量的增加先上升后下降,当MK掺量为15%时,改性橡胶混凝土力学性能的提升最为显著.

关键词:偏高岭土;NaOH预处理;橡胶混凝土;力学性能;界面过渡区;孔隙结构

中图分类号:TU528.37

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.07.003

Effect of Metakaolin on Mechanical Properties of NaOH Pretreated Rubber Concrete

JIANG Xiaodong¹, ZHANG Hong¹, LI Chuang^{1,*}, REN Yongfeng¹, XU Jun²

(1. Transportation Institute, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China;

2. Inner Mongolia Road and Bridge Group Co., Ltd., Hohhot 010010, China)

Abstract: The modified rubber concrete's mechanical properties were evaluated after adding metakaolin to NaOH pretreated rubber concrete. The impacts of metakaolin on pore structure characteristics and hydration product content of the material were analyzed using scanning electron microscopy (SEM), mercury porosimeter (MIP) and thermal gravimetric analyzer (TG-DTG). The results show that incorporating metakaolin in modified rubber concrete can enhance the quantity of hydration products, improve the interfacial transition zone quality amidst the aggregate and cementitious material, refine the pore structure, and reduce internal porosity, resulting in improved mechanical properties. The mechanical properties of the modified rubber concrete exhibit an initial increase and then a decrease with rising metakaolin content, with the most significant improvement observed at a content of 15%.

Key words: metakaolin; NaOH pretreatment; rubber concrete; mechanical property; interface transition zone; pore structure

橡胶混凝土(RC)是一种将废旧轮胎处理成颗粒料,具备优异的阻尼性、韧性和耐久性等^[1-4],但也存在部分强度(如抗压强度)下降的问题,限制了其在

收稿日期:2023-08-28; 修订日期:2023-11-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51968053,52268071);内蒙古自治区杰出青年科学基金资助项目(2023JQ03);内蒙古大学高层次人才科研启动基金项目(10000-22311201/008)

第一作者:姜晓东(1998—),男,内蒙古通辽人,内蒙古大学硕士生.E-mail:jxdong1998@163.com

通讯作者:李闯(1987—),男,内蒙古赤峰人,内蒙古大学讲师,博士.E-mail:lichuang8787@163.com

土木工程领域的应用^[5-6]。在目前的研究中,提高传统橡胶混凝土强度的改性方法主要有3类:添加纤维类材料(如钢纤维、玄武岩纤维)、添加掺合料(如硅灰、稻壳灰)和利用化学方法对橡胶表面进行改性(如NaOH溶液、硅烷偶联剂)。

在利用纤维改善橡胶混凝土的强度方面,赵秋红等^[7]发现钢纤维和橡胶的协同作用可以提升混凝土的抗压强度;贺东青等^[8]以等体积替代法在混凝土中混合添加短切玄武岩纤维和橡胶,提高了橡胶混凝土的抗弯拉强度和变形能力,但是对抗压强度的改善效果不明显。

在利用掺合料改善橡胶混凝土的力学性能方面,杨若冲等^[9]研究表明,硅灰替代水泥掺入橡胶混凝土中,对混凝土的抗压强度有一定程度的改善作用;王恒等^[10]研究表明,稻壳灰对橡胶混凝土的抗压强度具备较好的改善效果。

在利用化学方法对橡胶表面进行改性方面,杨长辉等^[11]研究表明,NaOH溶液预处理可以改善橡胶混凝土的毛细孔隙率,进而增加橡胶混凝土的韧性和抗折强度;刘誉贵等^[12]利用尿素和NaHSO₃改性橡胶,发现氨化和磺化可以降低橡胶与水的接触角,增加亲水性,进而增加了橡胶与胶凝材料的黏结性,改善了界面的致密性,提升了橡胶混凝土的强度。同时,也存在2种改性方法同时使用的情况^[6]。

偏高岭土(MK)是高岭石经高温活化后形成的矿物掺合料,具有较高的火山灰活性,可以在常温条件下与Ca(OH)₂发生二次水化反应。同时,MK的粒径较小,可以填充水泥或颗粒之间的孔隙,优化混凝土的内部结构,进而提高混凝土的耐久性和力学性能^[13]。余强等^[14]研究表明,MK对混凝土具有早强效应,对抗压强度和抗折强度有较好的提升作用,但是当MK掺量超过9%时的增强效果会下降;刘红彬等^[15]定量研究了MK对混凝土强度的影响,发现MK可以显著提高混凝土的力学性能,改善混凝土的内部结构,且当MK掺量为15%时的效果最好;Moduli等^[16]研究表明,MK对再生混凝土(RAC)的力学性能具有增强效果,可以改善其内部水化产物的结构,增加其与骨料之间的黏结性能,具有更好的密实性;Williams等^[13]研究表明,MK能够提高混凝土的劈裂抗拉强度,在混凝土中展现出较好的收缩能力,但混凝土的徐变能力降低。

目前,对橡胶混凝土和偏高岭土混凝土的研究主要以单一材料的力学性能为主,针对橡胶和偏高岭土共同作用下混凝土力学性能的研究甚少。本文

采用添加掺合料(MK)和化学改性(利用NaOH溶液对橡胶表面进行预处理)的复合改性方法,改善橡胶混凝土的力学性能,探究其强度变化规律和相关机理,以期橡胶混凝土在实际工程中的应用提供参考。

1 试验

1.1 原材料

水泥采用金隅冀东牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥;拌和水为自来水;粗骨料为5~20 mm连续级配的碎石;细骨料为中砂,细度模数为2.8;橡胶颗粒通过废弃橡胶轮胎处理得到,由都江堰市华益橡胶有限公司生产,颗粒粒径为600 μm(30目),堆积密度为314 kg/m³。NaOH为分析纯,由国药集团化学试剂有限公司生产,配置5%(质量分数,文中涉及的含水量、掺量、水灰比等除特别说明外均为质量分数或质量比)NaOH溶液对橡胶颗粒进行预处理,以降低橡胶颗粒的疏水性^[17];减水剂为聚羧酸粉体减水剂,减水率为18%~20%;MK由内蒙古超牌偏高岭土有限公司生产,由高岭石原矿经煅烧后研磨而成,活性指数120,比表面积20 m²/g,粒径约1 μm,其微观形貌如图1所示。

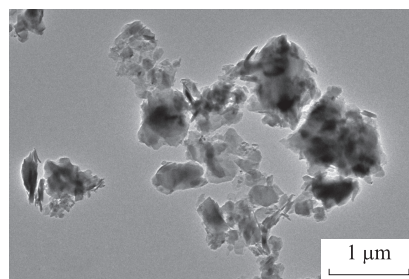


图1 MK的微观形貌

Fig. 1 Micromorphology of MK

1.2 配合比及试验方法

MK以等质量替代水泥的方法掺入,MK掺量分别为0%、5%、10%、15%、20%和25%,共6组试件,水灰比为0.4。混凝土的配合比如表1所示。

参照GB/T 50081—2019《普通混凝土物理力学性能试验方法标准》,开展抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度试验。采用美国ACI 544委员会提出的落球冲击试验来评价混凝土的抗冲击性能。

记录第1条裂缝出现时的冲击次数(n_1)、试件完全破坏时的冲击次数(n_2)。混凝土的冲击能耗(W_i)计算如式(1)所示。

$$W_i = mghn_i \quad (1)$$

式中: m 为冲击球质量,kg; g 为重力加速度,9.8 m/

表1 混凝土的配合比
Table 1 Mix proportions of concretes

Unit: kg/m ³							
Specimen	Cement	Water	Coarse aggregate	Fine aggregate	Rubber particle	MK	Water reducer
RC	425.00	170.00	1 110.00	675.00	17.96	0	4.25
MRC5	403.75	170.00	1 110.00	675.00	17.96	21.25	4.25
MRC10	382.50	170.00	1 110.00	675.00	17.96	42.50	4.25
MRC15	361.25	170.00	1 110.00	675.00	17.96	63.75	4.25
MRC20	340.00	170.00	1 110.00	675.00	17.96	85.00	4.25
MRC25	318.75	170.00	1 110.00	675.00	17.96	106.25	4.25

s^2 ; h 为冲击球下落高度,mm; n_i 为冲击次数.

孔结构测试采用 AutoPore IV 9500 型压汞仪(MIP),热重分析采用德国耐驰 STA 449C 型同步热分析仪(TG-DTG),微观形貌观察采用蔡司 SIGMA300型扫描电镜(SEM).

2 结果与分析

2.1 偏高岭土对橡胶混凝土抗压强度的影响

图2为试件的抗压破坏形态.由图2可知:试件RC在受压破坏时表现为局部破坏,表面出现细微裂纹,试件边缘骨料有少量脱落;试件MRC15与RC的破坏特征相近;试件MRC25的破坏形态加剧,出现多条整体性的贯穿裂缝,骨料的脱落量明显增加.

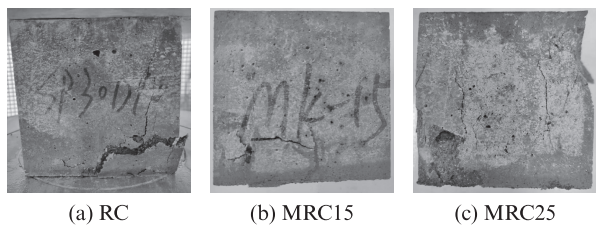


图2 试件的抗压破坏形态
Fig. 2 Compressive failure modes of specimens

图3为试件的抗压强度.由图3可知:在同一龄期时,掺MK试件的抗压强度随着MK掺量的增加先上升后下降;当龄期为3 d时,试件MRC10的抗压强

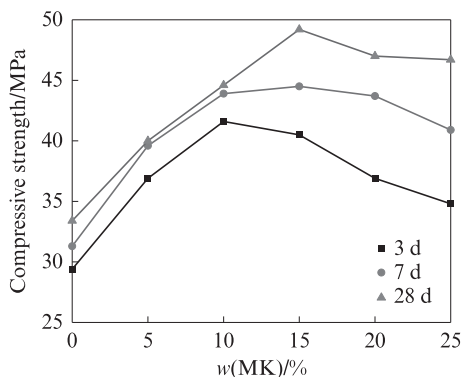


图3 试件的抗压强度
Fig. 3 Compressive strength of specimens

度最高,相较于试件RC提高了41.5%;当龄期为7、28 d时,试件MRC15的抗压强度最高,相较于试件RC分别提高了42.2%和47.3%.

2.2 偏高岭土对橡胶混凝土劈裂抗拉强度的影响

图4为试件的劈裂抗拉破坏形态.由图4可知:试件RC在达到极限荷载时并未出现明显破坏,仅受压部位出现细微的裂缝;当MK掺量在15%范围内,掺MK试件的破坏情况与RC基本相似,完整性良好;当MK掺量为25%时,试件MRC25的破坏程度加剧,由试件受压部位的细微裂缝发展为贯穿裂纹,试件完全断裂.

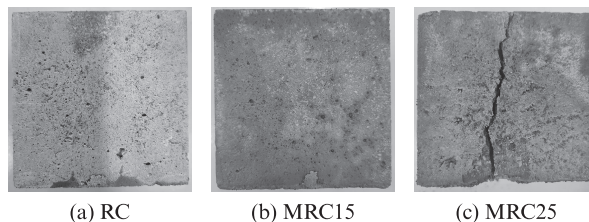


图4 试件的劈裂抗拉破坏形态
Fig. 4 Splitting failure modes of specimens

图5为试件的劈裂抗拉强度.由图5可知:在同一龄期时,掺MK试件的劈裂抗拉强度随着MK掺量的增加先上升后下降;当龄期为3 d时,试件MRC15的劈裂抗拉强度最高,相较于试件RC提高了68.0%;当龄期为7 d时,试件MRC20的劈裂抗拉强度最高,相较于试件RC提高了37.5%;当龄期为

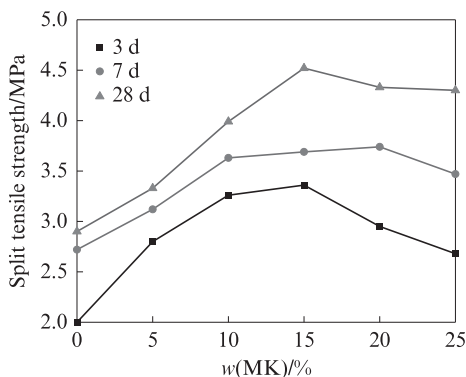


图5 试件的劈裂抗拉强度
Fig. 5 Splitting tensile strength of specimens

28 d时,试件MRC15的劈裂抗拉强度最高,相较于试件RC提高了55.9%。

2.3 偏高岭土对橡胶混凝土抗折强度的影响

图6为试件的抗折破坏形态。由图6可知:试件

RC在达到极限荷载时,不会立即断裂,而是首先在底部出现1道细微裂纹,然后随着荷载的增加逐渐开裂,呈延性破坏特征;在不同MK掺量的情况下,掺MK试件的破坏形式均与RC类似。

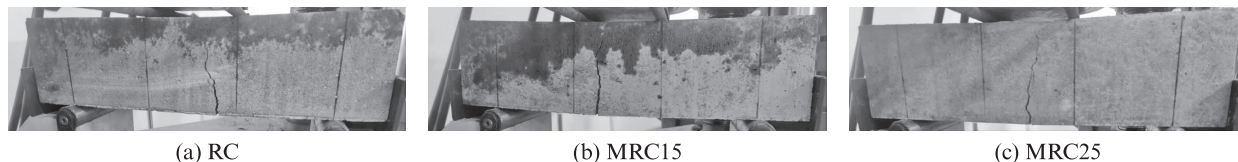


图6 试件的抗折破坏形态

Fig. 6 Flexural failure models of specimens

图7为试件的28 d抗折强度。由图7可知:掺MK试件的抗折强度随着MK掺量的增加呈先上升后下降的趋势;当MK掺量在5%~15%时,掺MK试件的抗折强度呈上升趋势;当MK掺量超过15%后,掺MK试件的抗折强度降低。

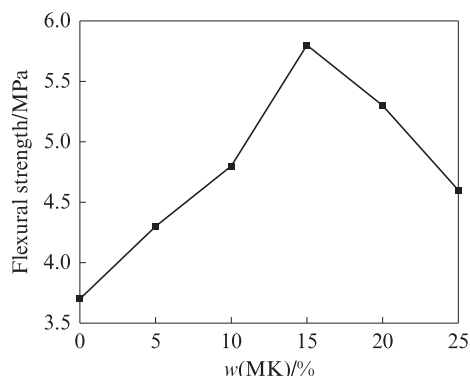


图7 试件的28 d抗折强度

Fig. 7 28 d flexural strength of specimens

2.4 偏高岭土对橡胶混凝土抗冲击性能的影响

图8为试件的冲击破坏形态。由图8可知:试件RC表面在冲击荷载作用下的裂纹较为细碎,并碎裂为多块,这是由于橡胶在冲击荷载作用下发挥了缓冲、吸能作用,使得动荷载在传递过程中被分散^[18];当MK掺量在15%以下时,在冲击荷载的作用下,掺MK试件与RC的破坏特征相似,同样表现为裂纹细密,并碎裂为多块;当MK掺量在25%时,试件MRC25的破坏特征发生转变,表现为1条贯穿裂缝。

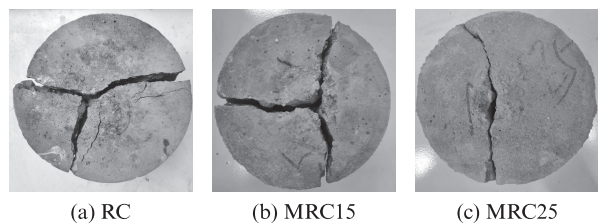


图8 试件的冲击破坏形态

Fig. 8 Impact failure modes of specimens

表2为试件的冲击次数与耗能数据。由表2可见:掺加MK后橡胶混凝土的初裂冲击次数和终裂冲击次数明显增多,掺MK试件的抗冲击性能得到提升;冲击次数差值(n_{2-1})有所降低,表明掺MK试件在冲击荷载作用下的裂纹发展速率有所提升;掺MK试件的冲击耗能随着MK掺量的增加呈先上升后下降的趋势,且在MK掺量为15%时的效果最佳,这表明掺加MK可以显著提高RC的初裂冲击耗能(W_1)和终裂冲击耗能(W_2)。

表2 试件的冲击次数与耗能结果

Table 2 Impact resistance times and energy consumption results of specimens

Specimen	n_1 /times	W_1 /J	n_2 /times	W_2 /J	n_{2-1} /times
RC	28	617.96	33	728.31	5
MRC5	35	772.45	37	816.59	2
MRC10	40	882.80	42	926.94	2
MRC15	45	993.15	49	1 081.43	4
MRC20	41	904.87	44	971.08	3
MRC25	38	838.66	40	882.80	2

2.5 微观结构

界面过渡区(ITZ)的结构特征和胶凝材料自身的孔隙特征是影响混凝土强度的两个重要原因。橡胶集料为疏水材料,橡胶集料混杂在胶凝材料之中,可能造成橡胶与骨料直接接触,使得胶凝材料与骨料之间的界面过渡区更容易出现连接薄弱的区域,进而影响橡胶混凝土的宏观力学性能。此外,混凝土内部胶凝材料的孔隙结构也是影响混凝土强度的重要原因。为此,选取代表试件RC、MRC5和MRC15观察其内部的微观形貌。

图9为试件界面过渡区的微观形貌。由图9可见:试件RC的断面处出现了裸露的橡胶颗粒,说明胶凝材料未能将橡胶颗粒紧密包裹,并且界面处存在明显的脱开现象,表现为连续裂缝,导致骨料与胶凝材料间连接关系薄弱;试件MRC5中未见到裸露

的橡胶颗粒,说明橡胶颗粒被胶凝材料紧密包裹,骨料与胶凝材料之间通过絮状的水化产物紧密地连接在一起,未出现脱开的情况,界面过渡区结构得到明

显改善;试件MRC15中骨料与胶凝材料之间的水化产物堆积更为紧密,骨料与胶凝材料之间的连接更为可靠,界面过渡区的连接质量得到了进一步的提升。

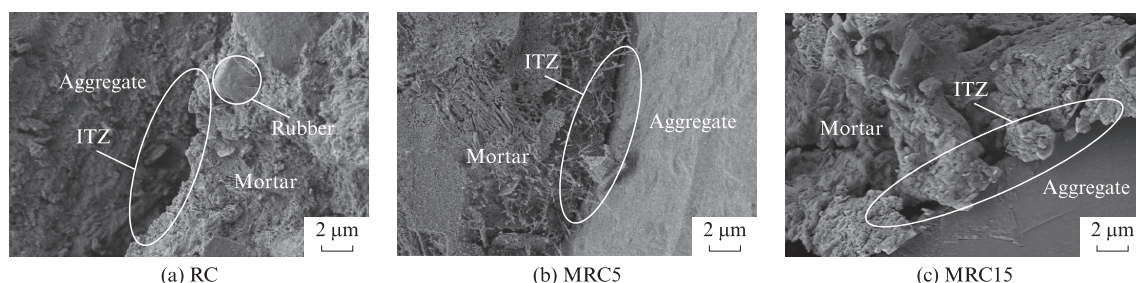


图9 试件界面过渡区的微观形貌

Fig. 9 Microstructure of interfacial transition zone of specimens

图10为试件内部的微观形貌.由图10可见:试件RC内部胶凝材料表面分布了较多的颗粒状凸起,导致水化产物表面凹凸不平,并且内部孔隙较多;试件MRC5内部水化产物表面的平整度较高,内部孔隙数量减少,密实程度较高;试件MRC15内

部水化产物的表面平整,孔隙大幅减少,密实程度显著提升。

综合图9、10可以看出,掺加MK能够明显提高橡胶混凝土内部界面过渡区的连接质量,改善橡胶混凝土内部胶凝材料的孔隙结构,提高其密实程度。

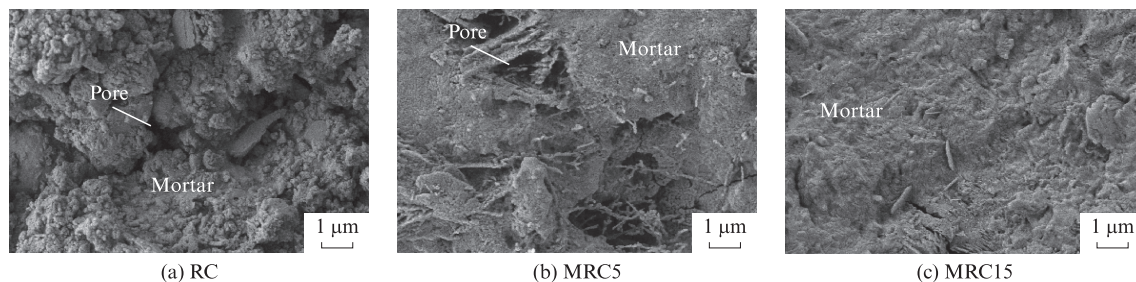


图10 试件内部的微观形貌

Fig. 10 Internal microstructure of specimens

2.6 偏高岭土对橡胶混凝土孔结构参数的影响

为进一步验证SEM试验中橡胶混凝土微观形貌密实程度的准确性,对养护28d的橡胶混凝土试件进行压汞测试,通过孔隙结构参数进行定量分析,揭示其与MK掺量之间的关系,得到孔径分布如图11所示,孔隙结构参数如表3所示。

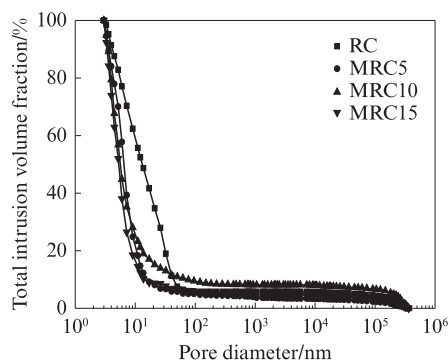


图11 养护28d时试件的孔径分布

Fig. 11 Pore size distributions of specimens at 28 d

由表3可知:

(1)随着MK掺量的增加,掺MK试件的平均孔径、中位孔径和孔隙率减小,比表面积增大;相较于试件RC,试件MRC15的平均孔径和孔隙率分别下降了44.3%和20.5%。这说明MK提高了橡胶混凝土的密实程度,细化了其孔隙结构。

(2)当MK掺量在15%以内时,掺MK试件的孔隙率随着MK掺量的增加而减小;当MK掺量在5%~10%时,孔隙率下降缓慢;当MK掺量为15%时,橡胶混凝土的孔隙率下降明显,相较于未掺MK时的孔隙率下降了20.5%,改善效果显著。

2.7 偏高岭土对橡胶混凝土中水化产物的影响

图12为试件的TG-DTG曲线.由图12可以看出,各试件的TG-DTG曲线形态相似,主要存在3个失重过程:(1)30~300℃主要为水化硅酸钙(C-S-H)凝胶和钙矾石(Aft)等水化产物的分解过程;(2)370~450℃主要为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的分解过程;(3)530~660℃主要为 CaCO_3 的分解过程^[19]。

表3 养护28 d时试件的孔隙结构参数
Table 3 Pore structures parameters of specimens at 28 d

Specimen	Average pore diameter/nm	Median pore diameter/nm	Porosity(by volume)/%	Specific surface area/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
RC	9.7	13.2	26.4	20.9
MRC5	6.3	6.5	24.9	29.1
MRC10	6.1	5.6	24.7	30.8
MRC15	5.4	5.3	21.0	31.1

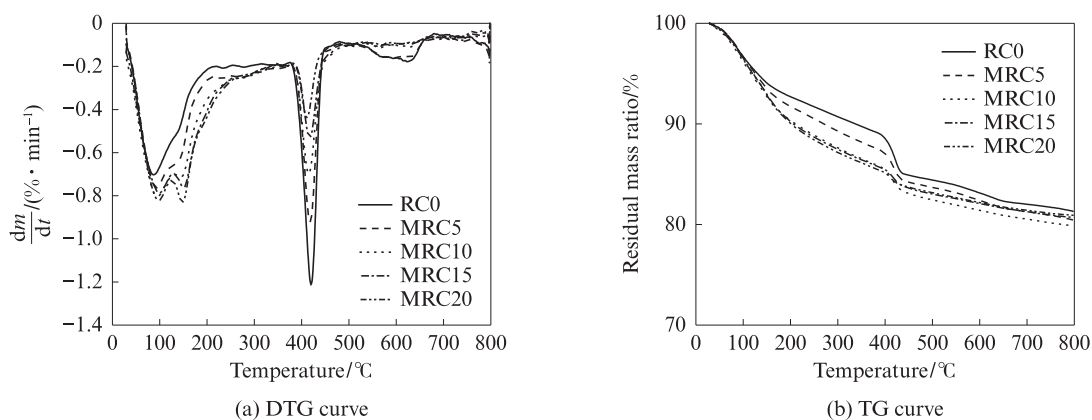


图12 试件的TG-DTG曲线
Fig. 12 TG-DTG curves of specimens

表4为养护28 d时水泥净浆中主要水化产物的化学结合水含量.由表4可见:随着MK掺量的增加,水泥净浆中C-S-H凝胶和AFt等水化产物的化学结合水含量呈增加趋势;相对于试件RC,试件MRC5、MRC10、MRC15和MRC20中C-S-H凝胶和AFt等水化产物的化学结合水含量分别增加了15.0%、33.0%、35.0%和34.4%;随着MK掺量的增加,水泥净浆中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的化学结合水含量呈降低趋势,相对于试件RC,试件MRC5、MRC10、MRC15和MRC20中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的化学结合水含量分别降低了20.0%、31.0%、47.0%和48.9%.

表4 养护28 d时水泥净浆中的化学结合水含量
Table 4 Chemical bound water contents (by mass) of cement pastes at 28 d

Specimen	Unit: %		
	C-S-H gel and AFt	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Total loss of water
RC	9.3	4.5	18.7
MRC5	10.7	3.6	19.3
MRC10	12.4	3.1	19.6
MRC15	12.6	2.4	20.1
MRC20	12.5	2.3	19.1

掺加MK后,降低了水泥净浆中水泥的含量,但由于MK具有较强的火山灰活性,使得水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被大量消耗,经二次水化反应生成了较多的C-S-H凝胶以及AFt等水化产物.C-S-H凝胶和AFt等水化产物增强了胶凝材料与骨料之间的连接

关系(如图9所示);同时C-S-H凝胶和AFt相互叠加,形成了致密的空间网架结构,降低了MRC内部的孔隙率(如表3所示),进一步提升了MRC内部的密实程度(如图10所示).

3 结论

(1)偏高岭土可以显著提升NaOH预处理橡胶混凝土的力学性能.掺加5%~25%偏高岭土后,橡胶混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度和抗冲击性能均得到了有效改善,力学性能随着偏高岭土掺量的增加先上升后下降,总体而言,在偏高岭土掺量为15%时,橡胶混凝土的力学性能最优.

(2)偏高岭土可以有效提高骨料与胶凝材料界面过渡区的质量.掺加偏高岭土后,明显改善了NaOH预处理橡胶混凝土内部骨料与胶凝材料界面的脱开现象,骨料与凝胶材料之间由絮状的水化产物紧密连接在一起,优化了内部胶凝材料的密实程度.

(3)偏高岭土可以促进水泥的水化反应,细化材料内部的孔隙结构,减小孔隙率.偏高岭土的高火山灰活性可以使NaOH预处理橡胶混凝土内部水化硅酸钙凝胶、钙矾石等水化产物的含量增加,增强了胶凝材料与骨料之间的连接关系,使其内部平均孔径、中位孔径和孔隙率减小,比表面积增大.其中偏高岭土掺量在15%时的平均孔径和孔隙率相较于未改性处理时分别下降了44.3%和20.5%,橡胶混凝土的

密实程度显著提升,最终使力学性能得到有效提高。

参考文献:

- [1] XUE J, SHINOZUKA M. Rubberized concret: A green structural material with enhanced energy-dissipation capability [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 42:196-204.
- [2] RIDA A A, SALAH A U, MOHAMMED M, et al. Effect of different treatments of crumb rubber on the durability characteristics of rubberized concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 318:126030.
- [3] LUO T, ZHANG C, SUN C W, et al. Experimental investigation on the freeze-thaw resistance of steel fibers reinforced rubber concrete[J]. *Materials*, 2020, 13(5):1260.
- [4] 王娟, 王文超, 许耀群, 等. 纳米SiO₂对橡胶混凝土断裂行为的影响[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(7):731-738.
WANG Juan, WANG Wenchao, XU Yaoqun, et al. The effect of nano-SiO₂ on the fracture behavior of rubber concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(7):731-738. (in Chinese)
- [5] 胡艳丽, 高培伟, 李富荣, 等. 不同取代率的橡胶混凝土力学性能试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(1):85-92.
HU Yanli, GAO Peiwei, LI Furong, et al. Experimental study on mechanical properties of rubber concrete with different substitution rates[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(1):85-92. (in Chinese)
- [6] 徐颖, 刘家兴, 杨荣周, 等. 超高强度橡胶混凝土的力学特性及能量演化[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(6):612-622.
XU Ying, LIU Jiaying, YANG Rongzhou, et al. Mechanical properties and energy evolution of ultra-high strength rubber concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(6):612-622. (in Chinese)
- [7] 赵秋红, 董硕, 朱涵. 钢纤维-橡胶/混凝土抗剪性能试验[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(12):3201-3213.
ZHAO QiuHong, DONG Shuo, ZHU Han. Shear performance test of steel fiber-rubber/concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(12):3201-3213. (in Chinese)
- [8] 贺东青, 王金歌, 王一鸣. 橡胶掺量对CBFRC的物理力学性能影响[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(5):857-860.
HE Dongqing, WANG Jing, WANG Yiming. Effect of rubber content on the physical and mechanical properties of CBFRC[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(5):857-860. (in Chinese)
- [9] 杨若冲, 谈至明, 黄晓明, 等. 硅灰改性橡胶混凝土路用性能研究[J]. *公路交通科技*, 2010, 27(10):6-10.
YANG Ruochong, TAN Zhiming, HUANG Xiaoming, et al. Study on road performance of silica fume modified rubber concrete [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(10):6-10. (in Chinese)
- [10] 王恒, 徐义华, 姚韦靖, 等. 稻壳灰橡胶混凝土抗冻融性能及微观结构[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(5):2951-2959.
WANG Heng, XU Yihua, YAO Weijing, et al. Freeze-thaw resistance and microstructure of rice husk ash rubber concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(5):2951-2959. (in Chinese)
- [11] 杨长辉, 田义, 王磊, 等. NaOH预处理对橡胶混凝土性能的影响[J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(2):44-50.
YANG Changhui, TIAN Yi, WANG Lei, et al. Effect of NaOH pretreatment on the properties of rubber concrete [J]. *Civil Building and Environmental Engineering*, 2016, 38(2):44-50. (in Chinese)
- [12] 刘誉贵, 马育, 刘攀. 氨化与磺化改性橡胶混凝土机理及强度研究[J]. *材料导报*, 2018, 32(18):3142-3145, 3153.
LIU Yugui, MA Yu, LIU Pan. Study on the mechanism and strength of ammoniated and sulfonated modified rubber concrete [J]. *Material Review*, 2018, 32(18):3142-3145, 3153. (in Chinese)
- [13] WILLIAMS A, ANANYA M, YURIY S, et al. Cracking potential and temperature sensitivity of metakaolin concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120:172-180.
- [14] 余强, 曾俊杰, 范志宏, 等. 偏高岭土和硅灰对混凝土性能影响的对比分析[J]. *硅酸盐通报*, 2014, 33(12):3134-3139.
YU Qiang, ZENG Junjie, FAN Zhihong, et al. Comparative analysis of the effect of metakaolin and silica fume on the performance of concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 33(12):3134-3139. (in Chinese)
- [15] 刘红彬, 鞠杨, 彭瑞东, 等. 低水胶比偏高岭土混凝土的强度和微观结构的分形特征[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(8):1820-1826.
LIU Hongbin, JU Yang, PENG Ruidong, et al. Fractal characteristics of strength and meso-structure of metakaolin concrete with low water-binder ratio[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(8):1820-1826. (in Chinese)
- [16] MUDULI R, MUKHARJEE B B. Performance assessment of concrete incorporating recycled coarse aggregates and metakaolin: A systematic approach[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 233:117223.
- [17] 李振霞, 陈渊召, 郭滕滕, 等. 改性橡胶碾压混凝土路用性能及作用机理[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(5):38-48.
LI Zhenxia, CHEN Yuanzhao, GUO Tengting, et al. Pavement performance and action mechanism of modified rubber roller compacted concrete[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(5):38-48. (in Chinese)
- [18] 郭永昌, 刘锋, 陈贵炫, 等. 橡胶混凝土的冲击压缩试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(1):139-144.
GUO Yongchang, LIU Feng, CHEN Guixuan, et al. Experimental study on impact compression of rubber concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(1):139-144. (in Chinese)
- [19] CYR M, TRINH M, HUSSON B, et al. Effect of cement type on metakaolin efficiency [J]. *Cement and Concrete Research*, 2014, 64:63-72.