

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.060



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



玄武岩纤维橡胶混凝土的抗冲磨性能

李双喜, 魏昆仑, 姜春萌

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要:为提高混凝土的抗冲磨性能,研究粒状、针状、粉状橡胶对混凝土抗冲磨性能的影响,在粒状橡胶混凝土基础上掺入玄武岩纤维,研究纤维橡胶复合时混凝土的抗冲磨性能,结合SEM观察微观形貌,并分析其抗冲磨增强机理,运用分形维数表征混凝土磨损过程的形貌变化情况,并讨论分形维数与磨损程度的关系。结果表明:掺入15%的粒状、针状与粉状橡胶时,混凝土的抗冲磨强度分别提高了140.24%、157.96%、83.88%;当玄武岩纤维掺量为0.1%时,粒状橡胶混凝土抗冲磨强度提高了11.63%,纤维和橡胶能在不同层面上发挥作用,共同增强抗冲磨性能;混凝土磨损程度可用分形维数表征,随着时间的增加,混凝土磨损越严重,分形维数越大,得到了分形维数与质量损失率和体积损失率的关系,并建立了曲线方程。

关键词:玄武岩纤维;橡胶混凝土;抗冲磨性能;分形维数

中图分类号:TU528.572 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)06-0175-08

Abrasion resistance of basalt fiber rubber concrete

LI Shuangxi, WEI Kunlun, JIANG Chunmeng

(College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, P. R. China)

Abstract: In order to improve the abrasion resistance of concrete, the effects of granular, acicular and powdered rubbers on the abrasion performance of concrete were studied. Based on granular rubber concrete, basalt fiber was added to study the abrasion performance of concrete when fiber-rubber composite was used. The microstructure was observed by SEM and the abrasion enhancement mechanism was analyzed. The fractal dimension was used to characterize the morphology change of concrete abrasion process, and the relationship between fractal dimension and abrasion degree was discussed. The results show that when 15% of granular rubber, acicular rubber and powdered rubber are added respectively, the abrasion resistance of concrete increases by 140.24%, 157.96% and 83.88%. When the basalt fiber content is 0.1%, the abrasion resistance of granular rubber concrete increases by 11.63%. Fiber and rubber can play a role at different levels and jointly enhance the abrasion resistance. The degree of concrete abrasion can be characterized by the fractal dimension. With the increase of time, the more serious the concrete abrasion is, the larger the fractal dimension is. The relationship between fractal dimension and mass loss rate and volume loss rate is obtained, and the curve equation is established.

Keywords: basalt fiber; rubber concrete; abrasion resistance; fractal dimension

收稿日期:2022-03-28

基金项目:新疆自然科学基金(2019D01A46)

作者简介:李双喜(1978-),男,副教授,主要从事水工高性能混凝土材料研究,E-mail:xjlsx123@126.com.

Received: 2022-03-28

Foundation item: Natural Science Foundation of Xinjiang (No. 2019D01A46)

Author brief: LI Shuangxi (1978-), associate professor, main research interest: high performance hydraulic concrete materials, E-mail: xjlsx123@126.com.

含砂、石水流会对混凝土过流面造成冲磨破坏,进而缩短水工建筑物的服役寿命,因此,提高混凝土的抗冲磨性能具有重要意义。已有研究表明,通过减小水胶比^[1]、掺纳米二氧化硅、硅粉等途径^[2-3],能够优化水泥石的结构,提高水泥石与骨料的黏结强度,或者使用较高硬度且耐磨的骨料^[4-6],以此延缓冲磨破坏的进程。近年来,研究中发现废旧轮胎具有极佳的韧性和耐磨性,将其破碎掺入混凝土中能有效提高混凝土抗冲磨性能^[7-9]。另外,将纤维掺入混凝土中也可以提高抗冲磨性能,如钢纤维、PVA、玄武岩纤维混凝土等^[10-11],这些研究中主要关注橡胶粒径与掺量、纤维掺量的影响,而对不同形状橡胶对抗冲磨性能影响的研究却鲜有报道,对于纤维橡胶复合时混凝土的抗冲磨性能也鲜有报道。

目前,对混凝土磨损过程中形貌变化关注较少。混凝土作为一种非均质材料,在磨损过程中,其表面会呈现出凹凸不平的形貌,这种复杂表面很难用经典几何参数进行表征,近年来快速发展的分形理论为复杂表面磨损过程的表征提供了新思路。已有学者将分形理论用于表征硫酸侵蚀混凝土的表面形貌^[12],以及对混凝土表面粗糙度进行评价等方面^[13],而是否可用分形维数对混凝土磨损过程的形貌进行表征需要进一步研究。

笔者研究粒状橡胶、针状橡胶、粉状橡胶的抗冲磨性能,在此基础上,通过掺玄武岩纤维分析对橡胶混凝土抗冲磨性能的影响;通过三维数据采集并重建数字模型,计算磨损过程的体积变化情况以及分形维数,并分析了不同橡胶纤维增强混凝土抗冲磨性能的机理,计算了混凝土的体积损失率、质量损失率及分形维数,建立了分形维数与体积损失率和质量损失率的关系式。

表2 混凝土配合比

Table 2 Concrete mix proportion

试验编号	水泥用量/ (kg/m ³)	水用量/ (kg/m ³)	砂用量/ (kg/m ³)	石用量/ (kg/m ³)	橡胶类型和掺量		玄武岩纤维 掺量/%
					类型	掺量/%	
1	482	169	649	1 100	NR		
2	482	169	551.7	1 100	RC	15	
3	482	169	551.7	1 100	RF	15	
4	482	169	551.7	1 100	RP	15	
5	482	169	551.7	1 100	RC	15	0.05
6	482	169	551.7	1 100	RC	15	0.1
7	482	169	551.7	1 100	RC	15	0.15

注:NR代表无橡胶;RC为粒状橡胶;RF为针状橡胶;RP为粉状橡胶。

1.3 试验方法

根据《水工混凝土试验规程》(SL/T 352—2020),进行混凝土立方体抗压、劈裂抗拉试验和抗

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

水泥:新疆天山水泥厂生产的P·O 42.5R普通硅酸盐水泥。细集料:天然砂,细度模数2.6,表观密度为2.65 g/cm³;粗骨料:卵石,5~20 mm连续级配,表观密度为2.67 g/cm³。外加剂:聚羧酸高效减水剂。玄武岩纤维:短切玄武岩纤维,长度12 mm,性能参数见表1。

表1 玄武岩纤维物理参数

Table 1 Physical parameters of basalt fiber

表称直径/ 径/ μm	长度/ mm	比重/ (g/cm ³)	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	断裂伸 长/%
15	12	2.7	2 980	87.2	3.52

橡胶:试验橡胶见图1,粒状橡胶,粒径2~4 mm;针状橡胶,长度为10~25 mm,宽度为1~2 mm;粉状橡胶,粒径0.6~1.2 mm,密度为1.15 g/m³;主要通过机器的剪切力和摩擦力使橡胶呈粒状、针状和粉状,所用橡胶均经过清水清洗,以去除表面杂质。

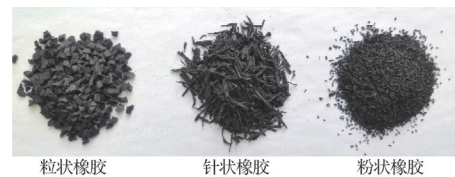


图1 试验橡胶

Fig. 1 Test rubber

1.2 混凝土配合比

试验所用水胶比为0.35,粒状、针状、粉状橡胶分别等体积取代15%的细骨料,减水剂掺量为0.15%,试验配合比见表2。

冲磨试验,抗冲磨试验采用水下钢球法。抗冲磨强度计算式为

$$R_a = \frac{TA}{m_2 - m_1} \quad (1)$$

式中: R_a 为抗冲磨强度, $(\text{h}\cdot\text{m}^2)/\text{kg}$; T 为试验累计时间, h ; A 为试件受冲磨面积, m^2 ; m_1 、 m_2 分别为冲磨前、冲磨后的质量, kg 。

参照《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13:2009),使用自制落锤冲击装置,底座采用刚性水平板,装置示意图见图2。

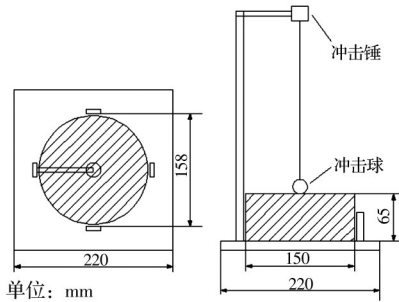


图2 冲击试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of impact test device

试件为直径为150 mm、高为65 mm的圆饼形试件,冲击球直径为63 mm,冲击锤重4.45 kg,冲击锤在450 mm高度自由落下,冲击放置在试件顶面的钢球,冲击锤每次冲击完成提升至预设的凹槽内,保证试件中心、冲击球、冲击锤在同一竖直线上,每完成一次冲击即为一个循环。当试件表面出现第一条裂缝时即为初裂冲击次数 N_1 ,当观察到裂纹贯穿时即为终裂冲击次数 N_2 。

混凝土冲击功计算式为

$$W = mghn \quad (2)$$

式中: W 为冲击功, J ; m 为冲击锤质量, kg ; g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2 ; h 为冲击锤下落高度; n 为冲击次数。

试件均在标准养护条件下养护至28 d,使用SUPRA 55VP型扫描电子显微镜(SEM)观察橡胶、纤维在混凝土中的微观结构。

2 试验结果与讨论

2.1 力学性能

图3为试验得到的混凝土力学性能。由图3可知,普通混凝土的抗压和劈拉强度分别为62.4、3.83 MPa,分别掺入粒状、针状、粉状橡胶后,其抗压强度和劈拉强度降低明显,这是由于橡胶具有弹性,荷载承受能力较弱,会减小骨料的骨架作用,在持续应力作用下,降低了试件的荷载承受能力。橡胶掺量相同时,不同橡胶形状对力学性能影响存在差异,其中掺粒状橡胶的混凝土抗压和劈拉强度损失最少,为25.5%、16.45%。由于橡胶具有憎水

性,与水泥石的黏结强度较弱,存在薄弱界面^[14],粒状橡胶的数量少于粉状橡胶,而针状橡胶由于形状特殊,会引入连续的薄弱界面,所以表现为掺粒状橡胶的混凝土强度较高。在粒状橡胶混凝土中掺玄武岩纤维,可以看出纤维能够减小因掺橡胶引起的强度损失,当纤维掺量为0.1%时,粒状橡胶混凝土的抗压和劈拉强度提高最大,分别为8.3%、7.19%。这是由于适量的纤维在混凝土中相互搭接,形成类似于钢筋作用的微网状空间体系,在受力后能约束混凝土产生裂纹,处于裂纹间的纤维能够起到搭接作用,缓解裂纹尖端的应力集中,抑制裂纹扩展^[15],以此增强橡胶混凝土的强度。

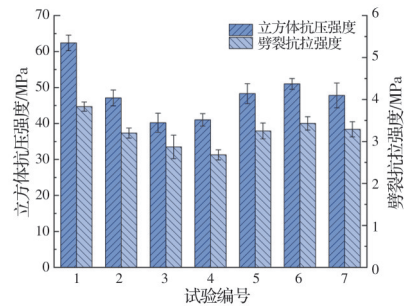


图3 抗压强度与劈裂抗拉强度

Fig. 3 Compressive strength and splitting tensile strength

2.2 抗冲击及抗冲磨性能

高速水流往往会携带大颗粒的推移质泥沙对水工建筑物混凝土造成冲击、磨损破坏,而以水下钢球法评价混凝土的抗冲磨强度时,无法真实模拟大颗粒推移质泥沙对混凝土的冲击作用,所以结合水下钢球法和落锤冲击法综合分析混凝土的抗冲磨性能。图4为混凝土抗冲磨强度及终裂冲击功。由图4可知,普通混凝土的抗冲磨强度为 $9.99 (\text{h}\cdot\text{m}^2)/\text{kg}$,终裂冲击功为864 J,分别掺入粒状、针状与粉状橡胶时,其抗冲磨强度提高了140.24%、157.96%、83.88%,终裂冲击功提高了263.6%、300%、43.2%,由此可知,粒状和针状橡胶对混凝土的抗冲磨和抗冲击性能提升显著。在粒状橡胶混凝土中掺玄武岩纤维,当纤维掺量为0.1%时,其抗冲磨强度提高了11.63%,终裂冲击功提高了78.1%,玄武岩纤维可以增强橡胶混凝土的抗冲磨及抗冲击性能。对比7组试件的抗冲磨与抗冲击性能,其相关性较好,以粒状橡胶混凝土为例,即抗冲磨强度较高的混凝土抗冲击性能也较高。

2.3 抗冲击及抗冲磨机理分析

混凝土冲磨破坏过程中,主要表现为小角度的切削和大角度的冲击导致混凝土表面脆性断裂^[16]。图5为橡胶混凝土抗冲磨机制模型。在表层砂浆被冲磨后逐渐漏出骨料与橡胶,当运动的砂石对混凝

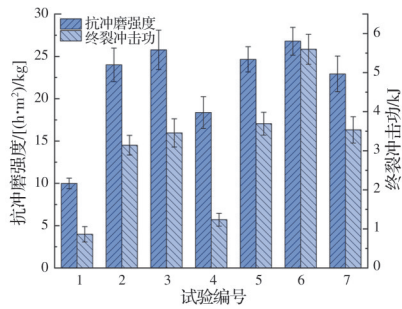


图4 混凝土抗冲磨强度及终裂冲击功

Fig. 4 Abrasion strength and final crack impact energy of concrete

土进行切削、冲击等作用时,裸露的橡胶由于本身具有优良的弹性和耐磨性,在砂石的切削作用下阻碍了切削作用对水泥石和骨料的破坏,同时橡胶通过自身形变吸收回弹释放部分冲击动能,降低作用于混凝土的整体冲击动能,延缓水泥石内部微裂纹

的产生和发展,从而表现出优异的抗冲磨性能如图5(a)所示。当橡胶掺量相同时,粒状和针状橡胶混凝土表现出较好的抗冲磨性能,而粉状橡胶提升最小,这是由于橡胶与基体结合面存在薄弱界面,橡胶裸露时,每一个粉状橡胶与水泥石的黏结面积较小,同时数量众多,薄弱界面也更多,砂石通过不同的角度冲磨混凝土表层,容易脱落,表现出较低的抗冲磨性能;针状橡胶由于自身宽度和粒状橡胶接近,其吸能能力优于粉状橡胶,另外针状橡胶具有一定长度,在混凝土中呈乱向分布,当混凝土磨损到一定程度时,部分与磨损面平行分布的针状橡胶会因冲磨作用而脱落,与磨损面呈一定角度分布的针状橡胶随着磨损程度加深,裸露部分能够覆盖在混凝土表面,减小了砂浆骨料的实际磨损面积,剩余部分黏结在混凝土中不易脱落,如图5(b)所示,故表现出较好的抗冲磨性能。

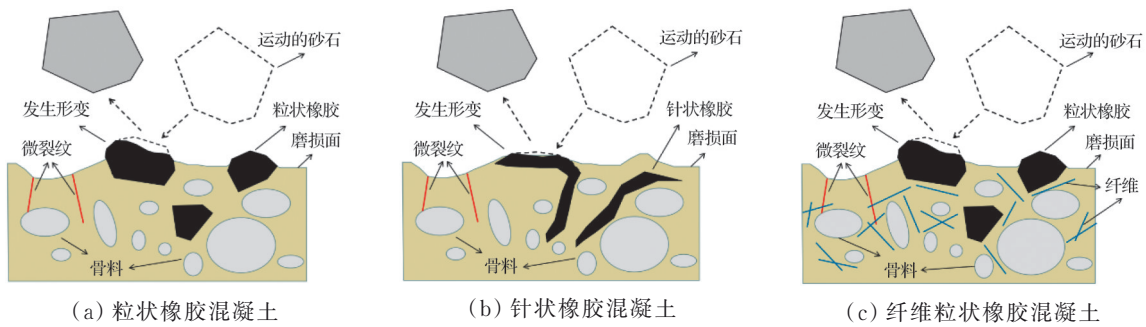


图5 橡胶混凝土抗冲磨机制模型

Fig. 5 Abrasion mechanism model of rubber concrete

粒状橡胶混凝土中掺入玄武岩纤维时,掺量较少对混凝土性能提高并不明显,过多会出现团聚分散不均匀等现象,导致性能降低。纤维与水泥基体间应力传递主要依靠纤维与水泥石的化学胶接力和物理摩擦力来实现增韧阻裂作用,因此,纤维与水泥石间的界面结合度是纤维在混凝土中应力传递的关键^[17]。因纤维掺量为0.1%时橡胶混凝土综合性能最佳,故作为SEM对象,结果见图6。由图6(a)、(b)、(c)可知,橡胶与基体结合面存在界面区,而适当掺量的纤维在橡胶混凝土中分散较好,玄武岩纤维为天然岩石纤维,主要成分为硅酸盐,与水化产物成分接近,在水化过程中,与水泥石黏结情况较好^[18],可以看出纤维与水泥石之间无明显界面区,因此,保障了混凝土受力时纤维在其中的应力传递作用。此外可以发现,纤维呈三维乱向分布,能在混凝土内部构成空间网络,增强整体受力传递性能。在冲磨作用下,部分分布于裂纹间的纤维则通过与基体间的黏结力和摩擦力可将部分冲击荷载传递至裂纹两侧的基体上,同时消耗部分动能用

于自身材料的拉拔变形破坏,进而阻止裂纹的进一步扩展,如图6(d)所示,此外,纤维还能牵制部分碎块从基体中脱落,橡胶能通过自身压缩吸收回弹并释放部分动能,减弱作用于基体的动能,如图5(c),此时纤维能够与橡胶共同发挥作用以增强混凝土的抗冲磨性能。

2.4 磨损面形貌特征分析

2.4.1 三维形貌测量

试验采用简化的三维形貌扫描测量系统^[19],以此确定混凝土冲磨过程的形貌变化情况,见图7。

通过以试件为中心建立笛卡尔坐标系(X、Y、Z),使Z轴与试件垂直,使用深度计取代位移传感器,所使用的深度计垂直方向测量范围为120 mm,精度为0.01 mm,此深度计可以在Y轴支架上移动,通过移动支架X轴和Y轴上的深度计来测量混凝土表面的磨损变化。鉴于试验精度和测量工作量,本次试验在X、Y方向每隔5 mm取一个测量点,在此基础上计算了试件的磨损体积和分形维数,并绘制三维形貌特征。

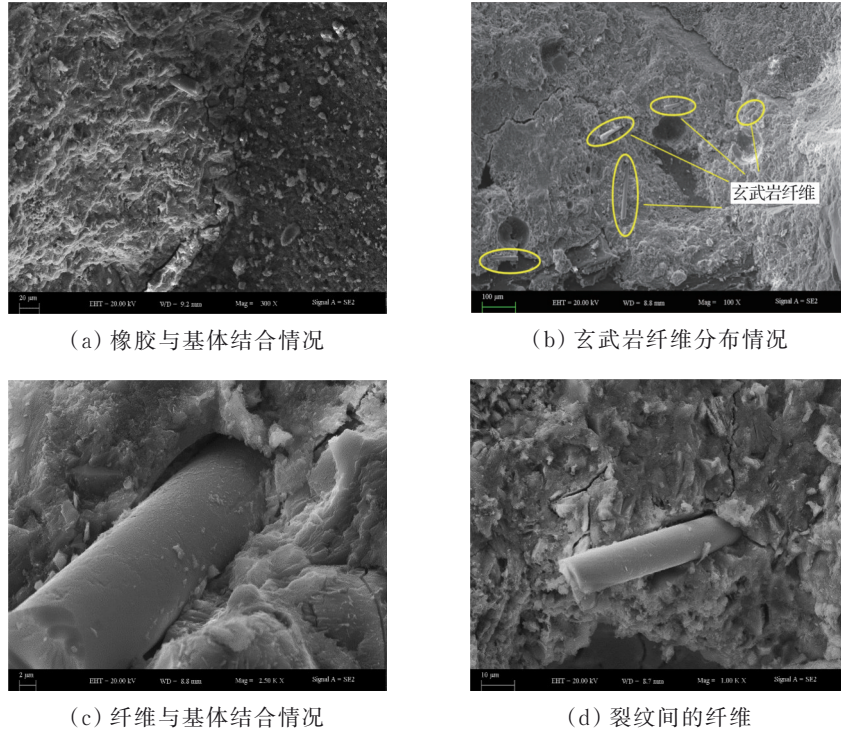


图 6 纤维橡胶混凝土 SEM 图

Fig. 6 SEM images of fiber rubber concrete

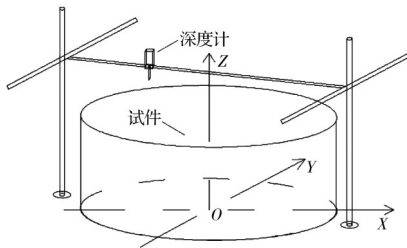


图 7 三维数据测量简图

Fig. 7 Diagram of 3D data measurement

2.4.2 磨损面分形维数

试验采用较直接且可靠的立方体覆盖法计算混凝土冲磨表面分形维数^[20],示意图见图 8。立方体覆盖法计算冲磨表面分形维数的原理为:在磨损面的投影面平面 XOY 上取边长为 δ 的正方形网格,每个正方形网格的 4 个角点分别对应磨损面上的 4 个高度值,分别为 $h(i, j), h(i+1, j), h(i, j+1),$

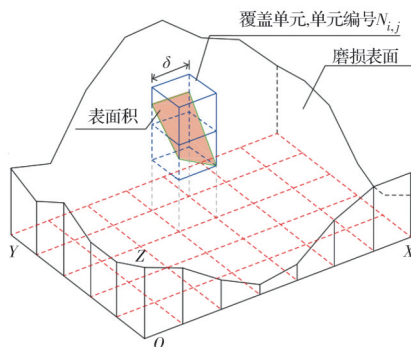


图 8 立方体覆盖法示意图^[21]

Fig. 8 Schematic diagram of cube covering method

$h(i+1, j+1)$ (其中 $i \geq 1, j \leq n-1, n$ 为每条边的测量点数),然后用边长为 δ 的立方体对冲磨面进行覆盖,计算覆盖冲磨面所需 $\delta \times \delta$ 的立方体个数 $N_{i,j}$,其计算式为

$$N_{i,j} = \text{int} \{ \delta^{-1} [\max(h(i, j), h(i, j+1), h(i+1, j), h(i+1, j+1)) - \min(h(i, j), h(i, j+1), h(i+1, j), h(i+1, j+1))] + 1 \} \quad (3)$$

式中: int 为取整函数,覆盖整个冲磨面所需立方体总个数 $N(\delta)$ 为

$$N(\delta) = \sum_{i,j=1}^{n-1} N_{i,j} \quad (4)$$

取不同的 δ 值对冲磨面进行覆盖,并计算所需总立方体个数 $N(\delta)$ 。若冲磨表面具有分形性质,按照分形理论,立方体总个数 $N(\delta)$ 与取值尺度 δ 之间存在关系式为: $N(\delta) \sim \delta^{-D}$,其中 D 为冲磨面的分形维数。当观测尺度取值 δ 大于一定值时,其不会表现分形性质,所以 δ 取值越小,越能很好地覆盖并接近真实的冲磨平面。

2.4.3 磨损体积

通过采集的三维数据,计算不同时间段内混凝土磨损的体积,计算式为^[22]

$$V = \iint_s [Z_0 - Z(X, Y)] ds = \iint_s \Delta z ds = \sum_{n=1}^N \Delta z(x_n, y_n) \Delta S_n \quad (5)$$

式中: ΔZ 为每个测量点的磨损深度; ΔS_n 为水平表

面的面积微元; N 为整个冲磨面的测量总点数, 计算结果列于表 3。

表 3 混凝土质量损失率和体积损失率

Table 3 Mass loss rate and volume loss rate of concrete

试验编号	质量损失率 $M/\%$						体积损失率 $V/\%$					
	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h
1	1.01	2.06	2.97	3.92	4.78	5.63	0.94	1.80	2.71	3.62	4.41	5.21
2	0.65	1.05	1.45	1.80	2.12	2.44	0.77	1.29	1.91	2.32	2.71	2.98
3	0.50	0.88	1.25	1.55	1.86	2.18	0.92	1.29	1.67	1.91	2.15	2.59
4	0.68	1.14	1.57	2.09	2.62	3.16	0.87	1.35	1.69	2.11	2.52	2.93
5	0.68	1.07	1.44	1.76	2.08	2.37	0.86	1.27	1.65	2.01	2.35	2.69
6	0.65	0.99	1.32	1.63	1.90	2.15	0.82	1.15	1.52	1.79	2.06	2.39
7	0.68	1.16	1.60	1.92	2.25	2.59	1.15	1.51	2.03	2.65	3.11	3.57

2.4.4 分形维数结果及分析

根据磨损面分形维数计算方法计算相关参数。表 4 为普通混凝土磨损 48 h 的计算结果, 图 9 为该试件在双对数坐标系中 δ 与 $N(\delta)$ 的线性回归公式, 其中, 斜率为所求的分形维数 D , 采用该方法可求得试验所有试件不同时间内的分形维数 D , 试验的分形维数计算结果列于表 5。将测量数据进行数字模型构造, 如图 10。

表 4 普通混凝土立方体覆盖法 δ 与 $N(\delta)$ 结果

Table 4 Ordinary concrete cube covering method δ and $N(\delta)$ result

δ	$N(\delta)$
0.1	10 276 456
0.15	4 387 324
0.25	1 803 347
0.5	459 103
1.0	72 621
2.5	11 744
5.0	2 940

混凝土作为一种非均质材料, 磨损面往往会呈现出差异性, 导致各组混凝土的分形维数计算结果不同。由表 5 可知, 混凝土磨损过程中分形维数在不断增大, 分形维数与时间呈正相关, 随着时间的增加而增大, 分形维数没有趋于稳定的趋势, 而抗

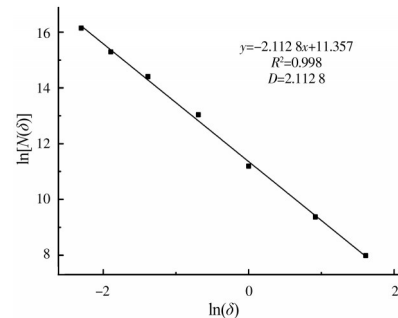


图 9 磨损面测量尺度与总个数关系

Fig. 9 Relationship between abrasion surface measurement scale and total number

表 5 混凝土磨损过程的分形维数 D

Table 5 Fractal dimension D of concrete abrasion process

试验编号	分形维数 D					
	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h
1	2.112 4	2.112 8	2.117 2	2.120 8	2.127 4	2.130 2
2	2.082 4	2.088 0	2.093 1	2.096 3	2.098 5	2.100 8
3	2.079 8	2.084 3	2.087 7	2.093 1	2.094 3	2.095 6
4	2.083 1	2.090 4	2.093 4	2.095 9	2.098 1	2.100 1
5	2.078 6	2.081 2	2.086 3	2.089 2	2.092 3	2.093 9
6	2.081 2	2.085 5	2.088 8	2.091 6	2.093 7	2.095 1
7	2.084 7	2.087 0	2.092 3	2.096 9	2.099 5	2.100 8

冲磨强度用于表征混凝土的抗冲磨性能, 其性能最终是由一个具体数值表示, 所以并不能将变化中的分形维数用于表征与抗冲磨强度间的关系。其原

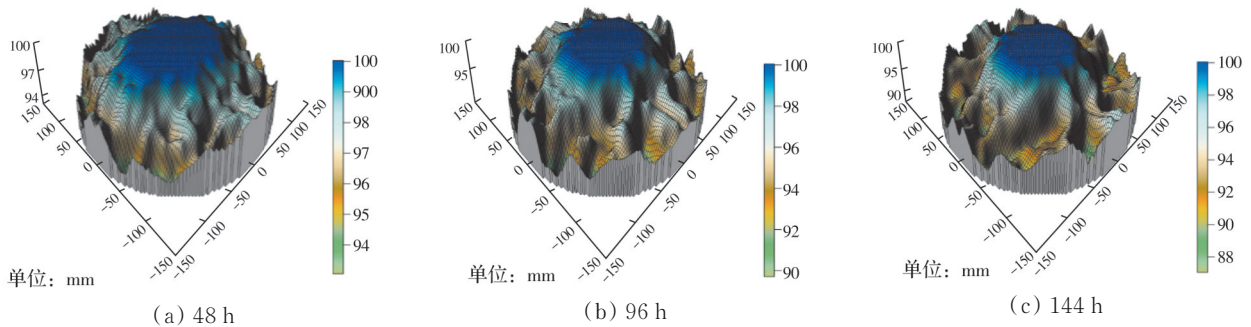


图 10 磨损面三维图像

Fig. 10 Three dimensional image of abrasion surface

因是,随着磨损过程的进行,原本光滑的混凝土表层开始变得凹凸不平,磨损时间越长,试件的磨损面积越大,粗糙表面越多,磨损深度越深,导致混凝土的分形维数也在逐渐增大,图 10 为普通混凝土磨损 48、96、144 h 表面的变化情况,由逐渐变大的分形维数可知,分形维数越大,混凝土磨损越严重。

混凝土磨损过程中,试件的质量损失或者体积损失都会引起混凝土形貌的改变,分形维数作为一种表面形貌变化情况的表征参数,将其与质量损失率、体积损失率进行曲线拟合并得到关系式,见图 11,由图 11 可知,分形维数与质量损失率、体积损失率存在较好的相关性,随着分形维数的增大,混凝土的质量损失率、体积损失率都在逐渐增大,说明分形维数可用于表征混凝土的磨损情况。

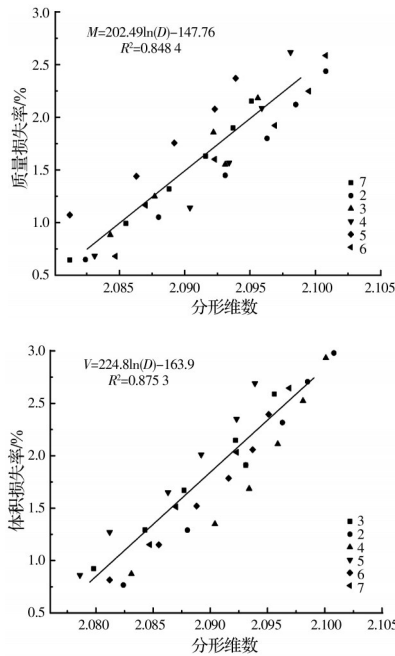


图 11 分形维数与质量损失率和体积损失率的关系

Fig. 11 Relationship between fractal dimension and mass loss rate and volume loss rate

通过对试验数据拟合得出试验条件下分形维数 D 与掺橡胶、纤维的混凝土质量损失率 M 、体积损失率 V 的关系式,见式(6)、式(7)。

$$V = 224.8 \ln(D) - 163.9, \quad R^2 = 0.8753 \quad (6)$$

$$M = 202.49 \ln(D) - 147.76, \quad R^2 = 0.8484 \quad (7)$$

当实际工程中判断混凝土磨损情况时,由于无法确定混凝土的质量损失或者体积损失时,可通过分形维数按式(6)、式(7)推断出质量损失率和体积损失率,快速判断出混凝土的磨损情况。

3 结论

1)橡胶形貌对抗冲磨性能影响较大,在普通混

凝土中掺 15% 橡胶,粒状橡胶与针状橡胶表现出较好的抗冲磨性能,提升率达到 140.24%、157.96%,而粉状橡胶相对提升较小,为 83.88%,说明对于抗冲磨混凝土,掺粒状橡胶或者针状橡胶较为合适;适量的玄武岩纤维能再次提高橡胶混凝土的抗冲磨性能,当纤维掺量为 0.1% 时,橡胶混凝土的抗冲磨强度提高了 11.63%,橡胶和纤维能够共同发挥作用,在不同层面上提高抗冲磨性能。

2)分形维数可以表征混凝土磨损过程表面变化情况,发现分形维数与磨损时间呈正相关,随着磨损过程的进行,混凝土磨损面粗糙程度加重,分形维数逐渐增大,分形维数越大,混凝土磨损越严重;分形维数与体积损失率和质量损失率存在较好的相关性,并建立了曲线方程,可以通过分形维数推断混凝土的质量损失率或体积损失率。

参考文献

[1] LIU Y W, YEN T, HSU T H. Abrasion erosion of concrete by water-borne sand [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(10): 1814-1820.

[2] ARDALAN R B, JAMSHIDI N, ARABAMERI H, et al. Enhancing the permeability and abrasion resistance of concrete using colloidal nano-SiO₂ oxide and spraying nanosilicon practices [J]. Construction and Building Materials, 2017, 146: 128-135.

[3] 王磊,何真,杨华全,等.硅粉增强混凝土抗冲磨性能的微观机理[J].水利学报,2013,44(1):111-118.

WANG L, HE Z, YANG H Q, et al. Study on the microstructural mechanism to improve the abrasion resistance of concrete by adding silica fume [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1): 111-118. (in Chinese)

[4] HE Z, CHEN X R, CAI X H. Influence and mechanism of micro/nano-mineral admixtures on the abrasion resistance of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 91-98.

[5] KILIÇ A, ATIŞ C D, TEYMEN A, et al. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(4): 290-296.

[6] 何真,陈晓润,蔡新华.微切削模式下岩石骨料的耐磨性能及影响因素试验研究[J].水力发电学报,2017,36(6):86-93.

HE Z, CHEN X R, CAI X H. Wear resistance of rock aggregate against micro-cutting and its relation to rock properties [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(6): 86-93. (in Chinese)

[7] THOMAS B S, CHANDRA GUPTA R. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113: 86-92.

- [8] 袁群, 李晓旭, 冯凌云, 等. 橡胶混凝土抗冲磨性能试验研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(7): 124-130.
YUAN Q, LI X X, FENG L Y, et al. Abrasion resistance of rubberized concrete [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(7): 124-130. (in Chinese)
- [9] THOMAS B S, KUMAR S, MEHRA P, et al. Abrasion resistance of sustainable green concrete containing waste tire rubber particles [J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 906-909.
- [10] ISMAIL M K, HASSAN A A A, LACHEMI M. Effect of fiber type on impact and abrasion resistance of engineered cementitious composites [J]. ACI Materials Journal, 2018, 115: 957-968.
- [11] KABAY N. Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber [J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 95-101.
- [12] 肖杰, 屈文俊, 朱鹏. 混凝土硫酸腐蚀表面形貌的分形维数表征[J]. 材料导报, 2016, 30(2): 130-134, 154.
XIAO J, QU W J, ZHU P. Surface topography of concrete after sulfuric acid corrosion characterized by fractal dimension [J]. Materials Review, 2016, 30(2): 130-134, 154. (in Chinese)
- [13] 陈志祥, 李富民, 方渝钰, 等. 混凝土表面粗糙度评价指标的相关性研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(12): 193-199.
CHEN Z X, LI F M, FANG Y Y, et al. Study on dependencies among evaluation indexes for concrete surface roughness [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(12): 193-199. (in Chinese)
- [14] 冯凌云, 袁群, 马莹, 等. 橡胶混凝土力学性能的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(7): 115-118.
FENG L Y, YUAN Q, MA Y, et al. Experimental study on mechanical property of rubber concrete [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(7): 115-118. (in Chinese)
- [15] LIANG C F, LIU T J, XIAO J Z, et al. The damping property of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 102: 834-842.
- [16] 尹延国, 胡献国, 崔德密. 水工混凝土冲击磨损行为与机理研究[J]. 水力发电学报, 2001, 20(4): 57-64.
YIN Y G, HU X G, CUI D M. Wear behaviors and mechanism of hydraulic concrete impacted by water jet with sand [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2001, 20(4): 57-64. (in Chinese)
- [17] 刘加平, 汤金辉, 韩方玉. 现代混凝土增韧防裂原理及应用[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10): 47-54, 63.
LIU J P, TANG J H, HAN F Y. Toughening and crack prevention of modern concrete: mechanisms and applications [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(10): 47-54, 63. (in Chinese)
- [18] 侯敏, 陶燕, 陶忠, 等. 关于玄武岩纤维混凝土的增强机理研究[J]. 混凝土, 2020(2): 67-71, 75.
HOU M, TAO Y, TAO Z, et al. Study on the reinforcement mechanism of basalt fiber concrete enhancement mechanism [J]. Concrete, 2020(2): 67-71, 75. (in Chinese)
- [19] YANG J, RONG G, HOU D, et al. Experimental study on peak shear strength criterion for rock joints [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(3): 821-835.
- [20] 周宏伟, 谢和平, KWASNIEWSKIMA. 粗糙表面分维计算的立方体覆盖法[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(6): 455-459.
ZHOU H W, XIE H P, KWASNIEWSKIMA. Fractal dimension of rough surface estimated by the cubic covering method [J]. Tribology, 2000, 20(6): 455-459. (in Chinese)
- [21] ZHOU H W, XIE H. Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock [J]. Surface Review and Letters, 2003, 10(5): 751-762.
- [22] JIANG C M, JIANG L H, CHEN C, et al. Evaluation and prediction on the hydraulic abrasion performance of high belite cement-based concrete [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(6): 2175-2185.

(编辑 胡玲)