

DOI:10.11918/202402010

钢纤维表面处理对混凝土减振性能的影响

詹翔宇¹, 曾晓辉¹, 彭杰波¹, 龚楠富², 张宏波², 管吉波³, 龙广成¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 2. 中铁五局集团第六工程有限责任公司, 重庆 400020;
3. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 为了优化混凝土控制振动的能力, 提出了3种通过钢纤维表面改性提高其阻尼从而提升减振性能的方法。将钢纤维使用硅烷偶联剂、乳化沥青、聚氨酯进行表面改性处理, 通过振动激励法、显微扫描电镜探究了钢纤维表面处理对混凝土时域曲线、阻尼比、能量耗散因子和微观形貌的影响, 并分析其影响规律与机理。研究表明: 3种表面处理均可增大钢纤维混凝土的阻尼比, 均在掺量(体积分数)为1%的钢纤维时阻尼比最大; 乳化沥青对钢纤维表面处理试验组减振性能提升最为显著, 当掺量为1%时, 其保持抗压强度为50.5 MPa的同时, 阻尼比提升为对照组的221%; 钢纤维表面乳化沥青层增大了基体对振动能量的消耗, 提高了混凝土的阻尼性能; 钢纤维与基体的界面调制方法决定了减振方式, 其中硅烷偶联剂表面处理钢纤维可增大纤维与基体黏结力, 通过提高纤维与基体的滑移耗能提高振动过程的耗能, 聚氨酯表面处理钢纤维可增大钢纤维和基体界面的形变能力和黏弹性, 从而提升振动传播过程的耗能, 乳化沥青表面处理钢纤维混凝土同时利用这两种方式进行振动过程中的耗能。研究成果提供了一种既满足实际施工中的工作性和强度要求, 又具有优良减振性能的混凝土配合比, 作为一种新型地铁道床材料减振方式, 可为未来的工程实践和研究提供参考。

关键词: 钢纤维混凝土; 减振性能; 阻尼比; 损耗因子; 表面改性

中图分类号: TU528.58

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)07-0108-11

Effect of steel fiber surface treatment on vibration damping performance of concrete

ZHAN Xiangyu¹, ZENG Xiaohui¹, PENG Jiebo¹, GONG Nanfu², ZHANG Hongbo², GUAN Jibo³, LONG Guangcheng¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. China Railway Fifth Bureau Group Sixth Engineering Co., Ltd., Chongqing 400020, China;

3. Shenzhen Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: To optimize the vibration control capability of concrete, this paper proposes several methods to enhance the damping performance of steel fibers through surface modification, thereby improving the vibration reduction effect. Steel fibers were surface-modified using silane coupling agent, emulsified asphalt, and polyurethane. The effects of steel fiber surface treatment on the time-domain curve, damping ratio, energy dissipation factor, and microstructure of concrete were investigated via vibration excitation method and scanning electron microscopy (SEM), and the influencing laws and mechanisms were analyzed. The results show that all three surface treatments can increase the damping ratio of steel fiber-reinforced concrete, with the maximum damping ratio achieved when the steel fiber volume content is 1%. The emulsified asphalt-treated group exhibits the most significant improvement in vibration reduction performance; at a 1% volume content, it maintains a compressive strength of 50.5 MPa while increasing the damping ratio to 221% of the control group. The emulsified asphalt layer on the steel fiber surface enhances the vibration energy dissipation of the matrix, thereby improving the damping performance of concrete. The interface modulation method between steel fibers and the matrix determines the vibration reduction mechanism; silane coupling agent treatment enhances the bonding force between fibers and the matrix, improving energy dissipation during vibration by increasing slip energy consumption at the fiber-matrix interface; polyurethane treatment enhances the deformability and viscoelasticity of the fiber-matrix interface, thereby increasing energy dissipation during vibration propagation; emulsified asphalt treatment achieves energy dissipation through both mechanisms simultaneously. This study provides a concrete mix ratio that meets the workability and strength requirements in practical construction while exhibiting excellent vibration reduction performance. As a new vibration

收稿日期: 2024-02-20; 录用日期: 2024-03-18; 网络首发日期: 2024-07-08

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250708.1143.006>

基金项目: 国家自然科学基金(11790283; 52078490)

作者简介: 詹翔宇(1998—), 男, 硕士研究生; 曾晓辉(1982—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 曾晓辉, zzhzh@126.com

reduction method for subway ballast bed materials, it can serve as a reference for future engineering practices and research.

Keywords: steel fiber reinforced concrete; shock absorption performance; damping ratio; loss factor; surface modification

随着城市人口增多和环保意识的深入人心,地铁出行成为城市人口的主要选择,随着地铁线路和运营频次的增多,其运行产生的振动带来了噪声污染、破坏古建筑和让人产生不适等问题^[1-2]。因此轨道交通结构混凝土减振能力越来越受到重视,减振常用手段是在结构中安装阻尼器,但其存在施工复杂、维护成本大的明显缺点,而且还带来钢轨位移、轮轨系统损伤的复杂问题^[3]。鉴于以上问题,有研究尝试增强混凝土被动吸收振动能量的固有能量,在材料层面提高阻尼性能,提高混凝土的减振能力^[4-9]。

文献[10]研究了在混凝土加入不同形态的木质纤维对阻尼比的影响,掺入4.5%的1~8 mm 团聚体木质纤维的混凝土阻尼比是基准组混凝土阻尼比的143%,这是因为木质纤维是多孔结构,木质纤维混凝土相较于普通混凝土会吸收更多的水,振动过程中混凝土孔隙和木质纤维吸收的水能够吸收振动能量,从而优化了木质纤维混凝土的减振性能。文献[11]研究了不同程度缺陷的椰壳纤维改性混凝土的减振性能变化规律,发现无缺陷椰壳纤维混凝土减振表现与基准组混凝土相差不大;损伤条件下椰壳纤维混凝土的减振性能比未发生损伤提高了200%。文献[12]研究了钢纤维和橡胶协同作用下混凝土的阻尼性能,无论有无钢纤维增强,丁二烯橡胶混凝土都比顺丁橡胶混凝土表现出更明显的黏弹性,而钢纤维的加入可提高在振动下的能量耗散能力,进一步提高了混凝土材料的减振性能,并对其力学性能起到改善作用。

同时学者们普遍认为橡胶、纤维混凝土减振性能的提高主要依靠:具有黏弹性的橡胶颗粒在振动过程中会产生较大的耗能^[13]、各种纤维与基体发生

的摩擦在振动过程中的摩擦耗能^[14]。但研究表明橡胶颗粒会对混凝土的力学性能产生不利影响^[15]。以上改性方式处理的混凝土减振性能相比普通混凝土表现优异,但是这些纤维和橡胶掺入混凝土也会对混凝土力学性能产生较大的不利影响^[16],部分还只在特定条件下才能发挥减振性能,使其不能应用在有一定使用性能要求的地铁轨道场景,而且混凝土中的木纤维和橡胶易燃且会在高温下生成众多有毒气体,破坏生态环境,安全系数低,使用寿命短。

另一方面,钢纤维混凝土是一种力学性能良好、耐热性能好、绿色环保的土木工程材料,大量研究证明混凝土掺入抗拉能力强、与混凝土结合性较好的钢纤维可以使混凝土的力学性能得到提高^[17-19],基于以上已有的研究和不足,本文研究使用硅烷偶联剂、乳化沥青、水性聚氨酯对钢纤维进行表面改性,研究不同钢纤维-基体结合特性对混凝土减振性能的影响,采用瞬态激励法进行了时域曲线试验、阻尼比和损耗因子试验,对比分析了不同钢纤维表面改性混凝土减振性能,通过微观结构观察解析了减振性能影响机理。

1 材料与试验

1.1 试验材料

水泥(C)采用抚顺水泥股份有限公司生产的PI 42.5水泥。粉煤灰(FA)使用湖南湘潭发电厂产出的I级粉煤灰,7 d和28 d活性指数分别为71.5%和77.5%,需水量为95%。矿粉采用S95粒化高炉矿渣(SL)。减水剂(SP)选用减水率为30%的聚羧酸减水剂。水(W)为自来水。细骨料(S)和粗骨料(G)分别为河砂和玄武岩碎石。水泥和粉煤灰、矿粉的物理化学指标见表1。

表1 胶凝组分的化学组成

Tab. 1 Mineral composition of cementitious components

种类	不同化学成分的质量分数/%								表观密度/ 比表面积/ (g·cm ⁻³) (m ² ·kg ⁻¹)	
	氧化硅 (SiO ₂)	氧化铝 (Al ₂ O ₃)	氧化铁 (Fe ₂ O ₃)	氧化钙 (CaO)	氧化镁 (MgO)	氧化硫 (SO ₃)	氧化钾 (K ₂ O)	氧化钠 (Na ₂ O)		
C	20.82	4.40	3.27	63.34	2.88	2.43	0.18	0.16	3.11	351
FA	58.27	23.65	6.28	4.18	1.52	0.33	1.95	1.06	2.20	334
SL	31.00	15.00	0.30	37.40	9.40	2.78	0.48	1.61	2.87	450

表面改性处理试剂:KH-550 偶联剂、乳化沥青、固含量为 32% 的水性聚氨酯。钢纤维(SF)使用镀铜直钢纤维,如图 1(a)所示,其直径为 0.2 mm,长度为 13 mm,抗拉强度为 2 GPa,弹性模量为 210 GPa,密度为 7.8 g/cm³。

1.2 试样制备

其中硅烷表面处理是将钢纤维采用 KH-550 偶联剂进行表面预处理,处理方式为先将钢纤维进行碱处理,再把镀铜直钢纤维浸入体积浓度为 20% 的 NaOH 溶液里 30 min,再使用无水乙醇和超纯水进行洗涤,以除去残余于其表面的 NaOH 溶液,然后将钢纤维浸泡在预先配置好的偶联剂的水解液中,偶

联剂的水解液是按照 KH-550 偶联剂、无水乙醇溶液、去离子水的比例为 1:5:44 混合配制。钢纤维在水解液中的预处理需通过浸泡水解 6 h 完成,之后捞出在干燥箱中的 110 ℃ 的环境中干燥 2 h。

乳化沥青和水性聚氨酯的表面改性是将钢纤维预先加热到 60 ℃ 处理,再快速加入相应的聚合物后进行充分拌合,使钢纤维表面都能附着一层聚合物。其中未改性钢纤维记为 U-SF,如图 1(a)所示。偶联剂改性钢纤维记为 K-SF,如图 1(b)所示。乳化沥青改性钢纤维记为 E-SF,如图 1(c)所示。水性聚氨酯改性钢纤维记为 P-SF,如图 1(d)所示。

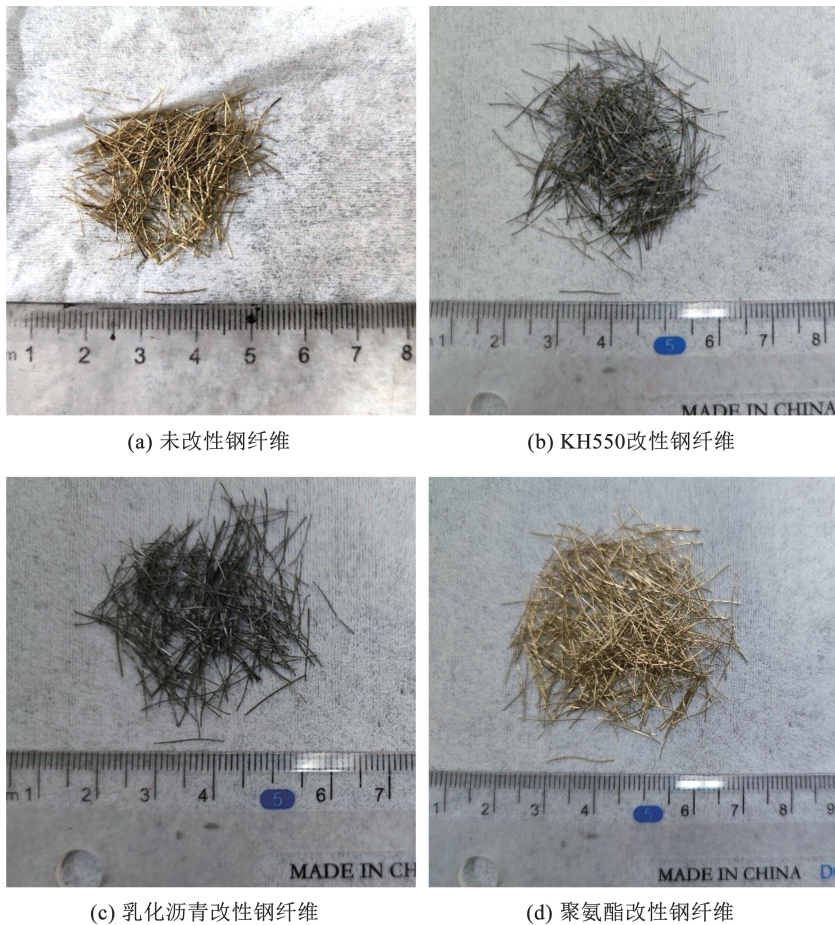


图 1 纤维及其改性后的宏观形貌

Fig. 1 The macroscopic morphology of fibers and their modified counterparts

不同表面改性钢纤维混凝土配合比见表 2, R 为素混凝土组,试件组符号中字母部分代表钢纤维混凝土掺入的钢纤维种类,后面数字百分比代表纤维的体积掺量,配合比设计采用现场施工混凝土配合比,根据预试验和已有文献发现,当钢纤维超过 1.0% 时对混凝土的工作性会产生较大影响^[20],因此配合比只采用了 0.5%、1.0% 来观察纤维掺量的影响。

试件制备方式为先往搅拌机中加入骨料、胶凝材料干拌 5 min,再加入水和减水剂湿拌 5 min,接着在湿拌的同时将钢纤维缓慢均匀地加入搅拌机,搅拌 5 min 后填模。试件尺寸方面制作 6 个 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体用于力学性能试验,制作 3 个 100 mm × 100 mm × 400 mm 尺寸试件用于减振特性试验。

表2 钢纤维混凝土配合比

Tab.2 Mixture proportions of steel fiber reinforced concrete

kg/m³

试件组别	C	FA	SL	SP	W	SF	S	G	
								5 ~ <10 mm	10 ~ 16 mm
R	344	80	106	5.3	186	—	835	324	486
U-SF-0.5%	344	80	106	5.3	186	39.25	835	324	486
U-SF-1.0%	344	80	106	5.3	186	78.50	835	324	486
K-SF-0.5%	344	80	106	5.3	186	39.25	835	324	486
K-SF-1.0%	344	80	106	5.3	186	78.50	835	324	486
E-SF-0.5%	344	80	106	5.3	186	39.25	835	324	486
E-SF-1.0%	344	80	106	5.3	186	78.50	835	324	486
P-SF-0.5%	344	80	106	5.3	186	39.25	835	324	486
P-SF-1.0%	344	80	106	5.3	186	78.50	835	324	486

1.3 减振特性试验

试验通过瞬态激励法评估钢纤维混凝土的动态阻尼特性,试验装置如图2、3所示,数据采集系统为东方所的INV3068多功能信号测试仪,配套使用的系统软件为Coinv DASP动态信号采集分析系统V11,100 g量程的加速度计,对混凝土的减振特性进行测试。加速度计放置在激励点相对位置负责输出加速度,分析仪相连与加速度计采集数据,计算机的振动与噪声分析软件完成数据分析。如图2所示,试样由固定支架固定,激振通过用相近的力对试样进行多次敲击,得到多次结果以供选择。



图2 减振特性研究试验及其设备照片

Fig.2 Research experiment on vibration reduction characteristics and equipment photos

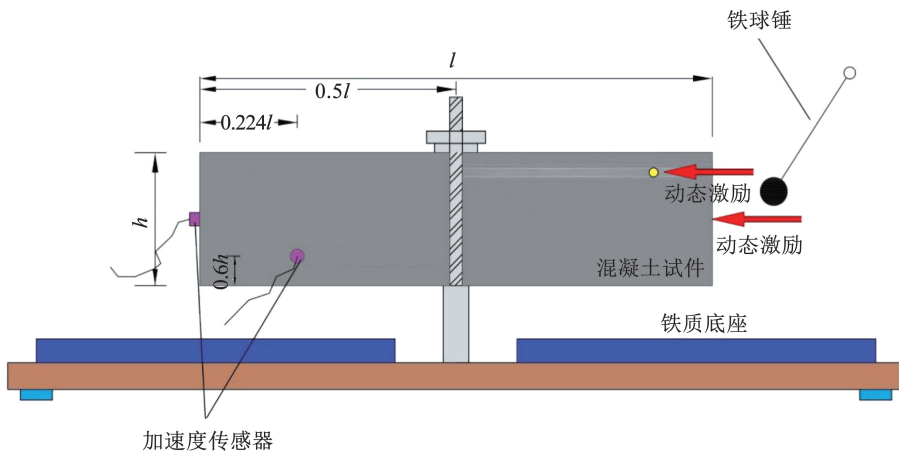


图3 瞬态激励法的减振特性试验示意图

Fig.3 Schematic diagram of vibration reduction characteristics test using transient excitation method

2 试验结果与讨论

2.1 工作性能

表3给出了混凝土工作性随不同纤维含量、不

同纤维改性方式变化规律。前期试验发现,当钢纤维体积掺量超过1%,将对混凝土的工作性能产生显著影响,工作性降低太大,混凝土难以仅在自重作用下密实成型。鉴于此,本试验采用0.5%和1.0%

两个纤维掺量,未掺钢纤维组的素混凝土组作为对照组 R,并通过调整高效减水剂用量来保证混凝土的工作性。由表 3 可以看出,在保持混凝土基准配合比不变的情况下,0.5% 掺量和 1% 掺量的 3 种表面改性钢纤维使混凝土的流动性均有一定程度下降,是因为钢纤维的表面变得粗糙和聚合物的附着均会增大拌合物内部流动阻力。

表 3 混凝土的工作性能
Tab. 3 Concrete's workability

钢纤维体积分数/%	编号	坍落扩展度/mm	T_{50}/s
0	R	645	4.5
0.5	U-SF-0.5%	625	6.5
	K-SF-0.5%	615	7.8
	E-SF-0.5%	610	8.7
1.0	P-SF-0.5%	620	7.1
	U-SF-1.0%	600	10.5
	K-SF-1.0%	590	12.0
	E-SF-1.0%	585	12.9
	P-SF-1.0%	595	11.2

其中掺入偶联剂表面改性钢纤维的新拌混凝土比掺入普通钢纤维的新拌混凝土流动度小,这是因为经过偶联剂处理后钢纤维变得更细,但长度不变,相同体积下钢纤维面积变大,钢纤维总面积增大所

以被包裹要使用到的混凝土浆体变多,因为纤维数目更多,其在拌合时也比基准组混凝土更易出现结团、接触衔接到一块产生网架的情况,这使得混凝土浆体通过间隙的难度变大,使用偶联剂处理也提高了表面的粗糙度^[21],使偶联剂表面改性钢纤维在相互搭接成团时更不容易解开。

2.2 力学性能

试块准静态抗压破坏应力-应变曲线如图 4 所示。由图 4(a)可以看出,随着钢纤维掺量的增加,试块的抗压应力应变曲线呈现向右上方变化的趋势。未掺钢纤维基准组的混凝土试件 28 d 抗压强度为 61.8 MPa,当钢纤维掺量分别为 0.5% 和 1.0% 时,其对应的抗压强度分别为 68.9、80.8 MPa,其提升幅度分别为 11.5% 和 30.7%。对峰值应变而言,当钢纤维掺量分别为 0.5% 和 1.0% 时,其对应的准静态峰值应变提升幅度分别为 16.3% 和 25.5%。

这说明钢纤维的掺入不仅提高了自密实混凝土的强度,同时也显著提高了其变形能力。除此之外,当不同改性纤维的加入,力学性能也发生了不一样的变化,由图 4(b)、4(c)所示,其中偶联剂改性钢纤维的加入对力学的贡献略大于未改性的钢纤维的贡献。乳化沥青和聚氨酯改性钢纤维的加入使混凝土的力学性能变差,其中聚氨酯改性钢纤维降低得最为显著,0.5% 和 1.0% 的聚氨酯钢纤维相对未改性钢纤维组抗压强度分别下降了 62.8% 和 83.78%。

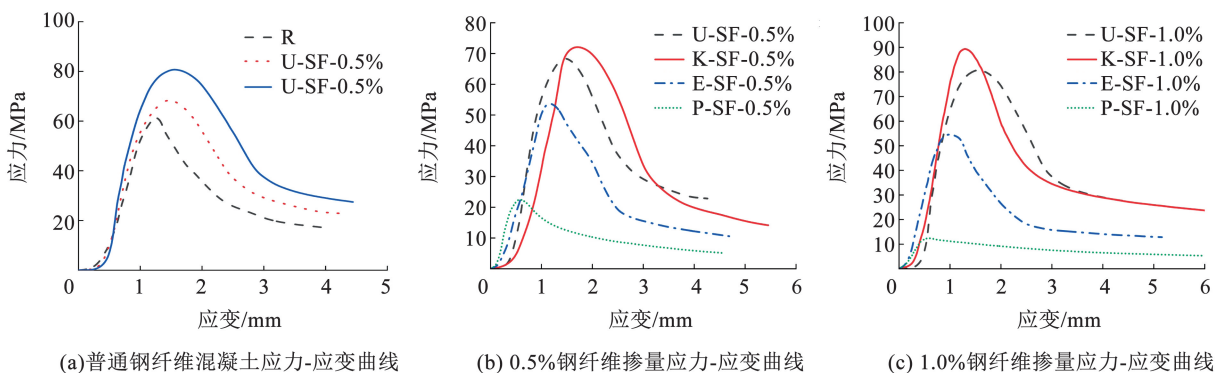


图 4 混凝土应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of concrete

2.3 时域曲线分析

每种不同纤维改性方法配制的混凝土代表性时域曲线如图 5 所示。其中图形的幅度值与曲线信号的剩余能量密切相关,而每组的振幅变化速率在时域曲线中表现出了明显的差异。其中 E-SF-1.0% 组的减振性能最好,在相同的振动峰值下,开始到结

束几乎只用了约 0.012 5 s,其次是 P-SF-1.0% 组,在 0.020 s 内便完成了振动的衰减,这两组衰减速度远大于 U-SF-1.0% 和 K-SF-1.0% 这两组,这些差异表明不同的钢纤维表面处理会产生钢纤维混凝土不同的阻尼特性。

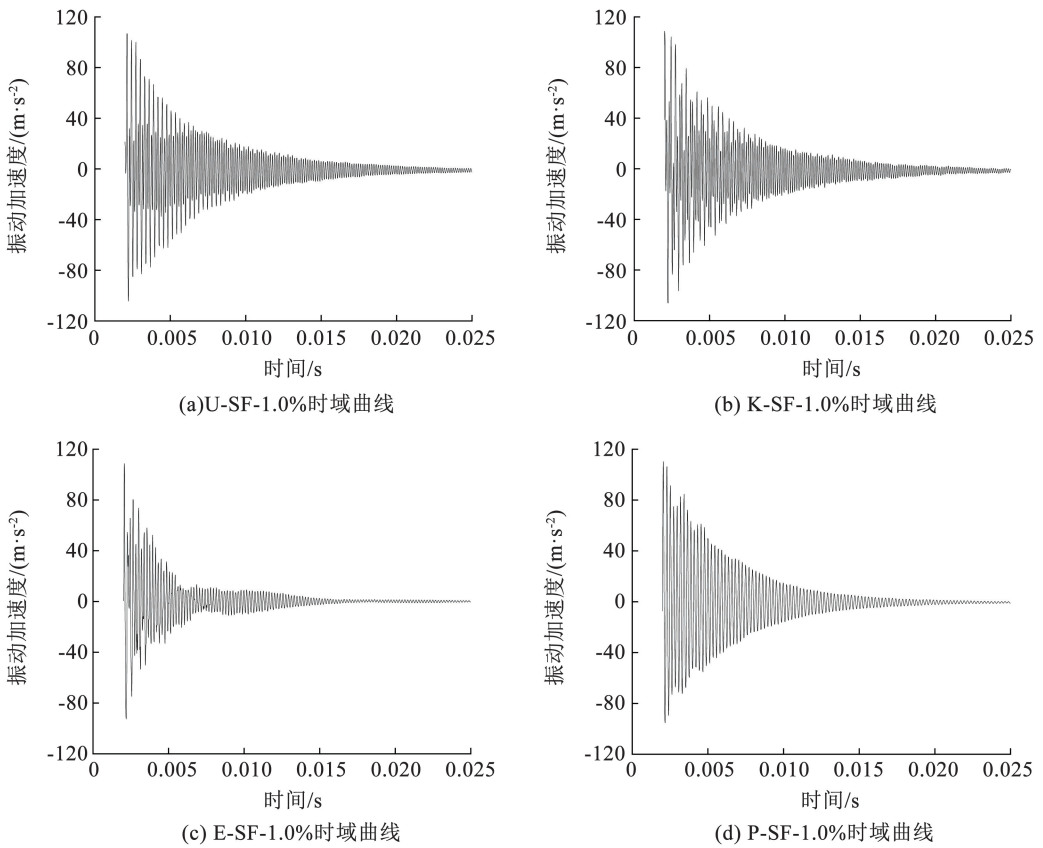


图 5 动态激励下不同改性钢纤维混凝土试件的时域曲线

Fig. 5 Time domain curves of different modified steel fiber reinforced concrete specimens under dynamic excitation

2.4 阻尼比

FFT 快速傅里叶转换处理得到频域曲线如图 6,再根据频域曲线通过半功率带宽法计算阻尼比。阻尼比的计算公式为

$$\xi = (f_2 - f_1) / (2f_0) = \Delta f_w / (2f_0) \quad (1)$$

式中: f_0 为共振频率; A_{max} 为共振峰值幅度; f_1 和 f_2 为对应 $0.707A_{max}$ 的两个频率点; Δf_w 为半功率带宽。

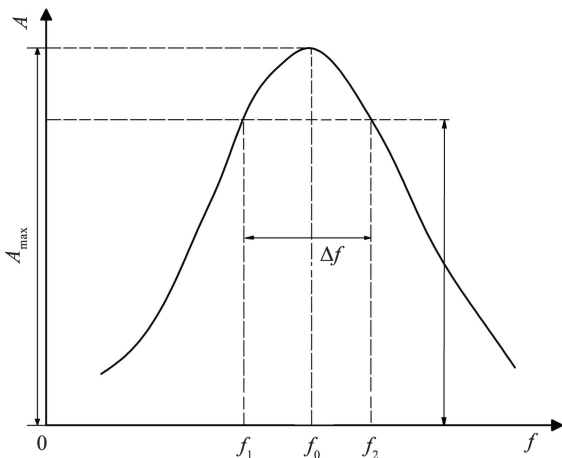


图 6 FFT 快速傅里叶转换处理得到频域代表曲线

Fig. 6 Fast Fourier transform (FFT) processing to obtain frequency domain representative curve

不同钢纤维混凝土及参照组 R 的阻尼比如图 7 所示。3 种钢纤维的表面处理和提高纤维掺量均能进一步提高钢纤维混凝土的阻尼比。其中 1% 体积掺量乳化沥青表面处理钢纤维的混凝土试件阻尼性能最优异,阻尼比达到 0.956%,与参照组 R 相比,阻尼比增加 121%。

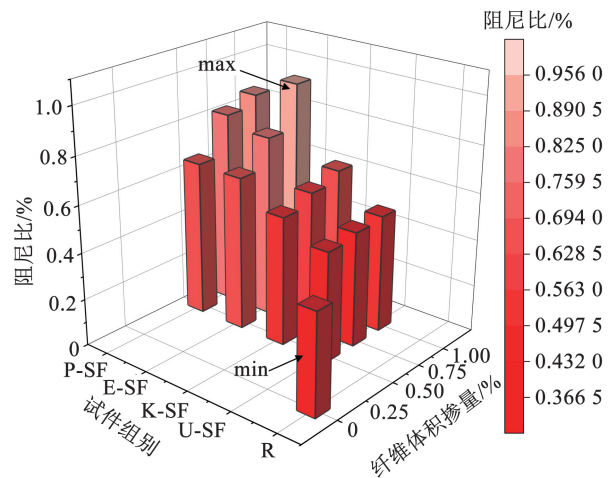


图 7 钢纤维混凝土的阻尼比

Fig. 7 Damping ratio of steel fiber reinforced concrete

其中参照组 R 的阻尼比最低,只有 0.433%,未经改性处理的直钢纤维组的阻尼比为 0.470% 和

0.502%, 偶联剂 KH550 改性的直钢纤维组相对未改性钢纤维组, 0.5% 和 1.0% 的纤维体积掺量的试件阻尼比分别提升了 16%、27%。当乳化沥青表面改性的钢纤维体积掺量从 0.5% 提升到 1.0% 时, 阻尼比由 0.658% 提高到 0.956%, 伴随体积掺量变化, 其阻尼比提升非常明显。聚氨酯改性的两组 P-SF-0.5% 和 P-SF-1.0% 的阻尼比分别为 0.654% 和 0.864%。这说明有无改性的直钢纤维加入均可有效提高混凝土的阻尼比, 且阻尼比随钢纤维的掺量的升高而增大, 其中每组钢纤维体积掺量为 1% 的阻尼比均属于该组的最高值。

2.5 损耗因子

混凝土结构的能量耗散能力是一个关键的性能指标, 与结构的减振性能密切相关, 它被定义为周期内动态力学试验期间耗散的能量与输入能量的比率^[19]。本文通过使用静态下敲击激励的方法, 分析了不同纤维改性对混凝土的损耗因子。正弦曲线力和位移之间的关系如图 8 所示, 损耗因子可以根据相移 ($\tan \delta$) 计算。

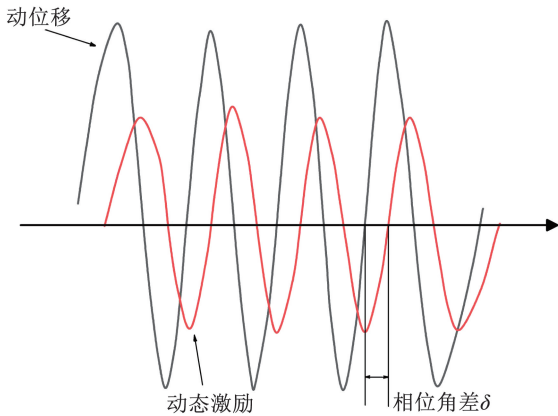


图 8 减振性能指标中损耗因子计算方法

Fig. 8 Calculation principles for loss factor in vibration reduction performance indicators

如图 9 所示, 基准组 R 的损耗因子为 0.008 66, 未改性直钢纤维掺量为 0.5% 和 1.0% 试件的损耗因子分别为 0.009 39 和 0.010 03, 均高于未添加钢纤维的基准组, 且随着掺量增加而变大, 说明直钢纤维加入混凝土可以提高其在振动过程中的能量耗散能力。偶联剂改性的直钢纤维掺量为 0.5% 和 1.0% 的试件损耗因子分别为 0.010 97 和 0.012 78, 表明偶联剂对钢纤维表面改性能够更显著提高钢纤维混凝土的能量耗散性能。乳化沥青改性的直钢纤维组的损耗因子最大, 掺量为 0.5% 和 1% 时分别为 0.013 15 和 0.019 12, 远高出其他 3 组, 这表明乳化沥青表面改性直钢纤维对混凝土的能量耗散能力产

生了非常显著影响, 使其拥有最优异的能量耗散能力。0.5% 和 1.0% 掺量聚氨酯改性的直钢纤维组的损耗因子分别为 0.013 08 和 0.017 27, 聚氨酯改性也可以有效地提高混凝土的能量损耗性能。

偶联剂、乳化沥青和聚氨酯对钢纤维表面改性都提高了钢纤维混凝土对振动能量的耗散性能, 混凝土能够更好地吸收和分散振动能量, 这可以使其具有更加优异的减振性能, 从而提高结构的整体减振性能。

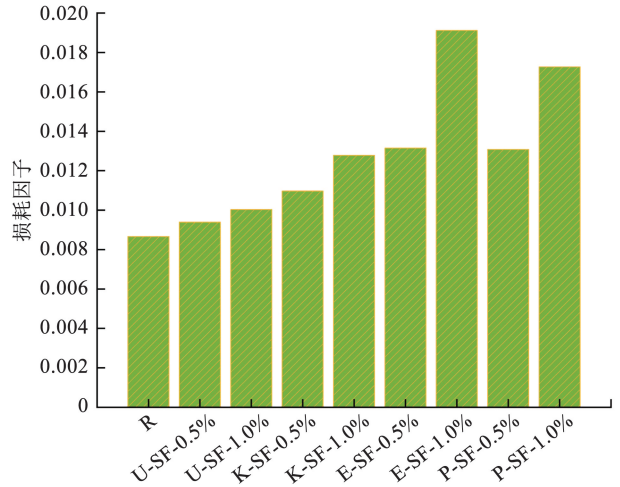


图 9 表面处理钢纤维混凝土的损耗因子

Fig. 9 The loss factor of surface modified steel fiber reinforced concrete

3 阻尼性能增强机制

3.1 钢纤维表面微观形貌分析

利用显微电镜观察不同纤维经过改性处理后的样貌如图 10 所示, 对比可以看出, 经过 KH550 改性的直钢纤维表面明显变得更加粗糙, 钢纤维提高混凝土力学性能主要靠钢纤维与基体的界面黏结效果发挥作用^[22], 因此偶联剂改性钢纤维混凝土表现出较好的力学性能。如图 10(c)、10(d) 所示, 乳化沥青和聚氨酯改性过后, 钢纤维表面成功附着了一层膜状聚合物, 而聚合物 - 钢纤维两者的弱界面很容易在微小力下发生滑移和脱离, 使钢纤维在基体中无法正常发挥联结整体、增强力学性能的作用, 因此混凝土力学性能表现与钢纤维与基体的接触面积相关, 其中乳化沥青、聚氨酯与钢纤维的结合情况不同, 乳化沥青与钢纤维的只在部分区域发生结合, 这使得钢纤维与混凝土基体之间有了一定的结合面; 而聚氨酯改性后, 整个钢纤维表面几乎都附着了一层较厚的聚氨酯膜, 钢纤维与基体的结合面积很小, 同时也导致了更多的缺陷, 使聚氨酯改性钢纤维混凝土的力学性能表现出较大不足。

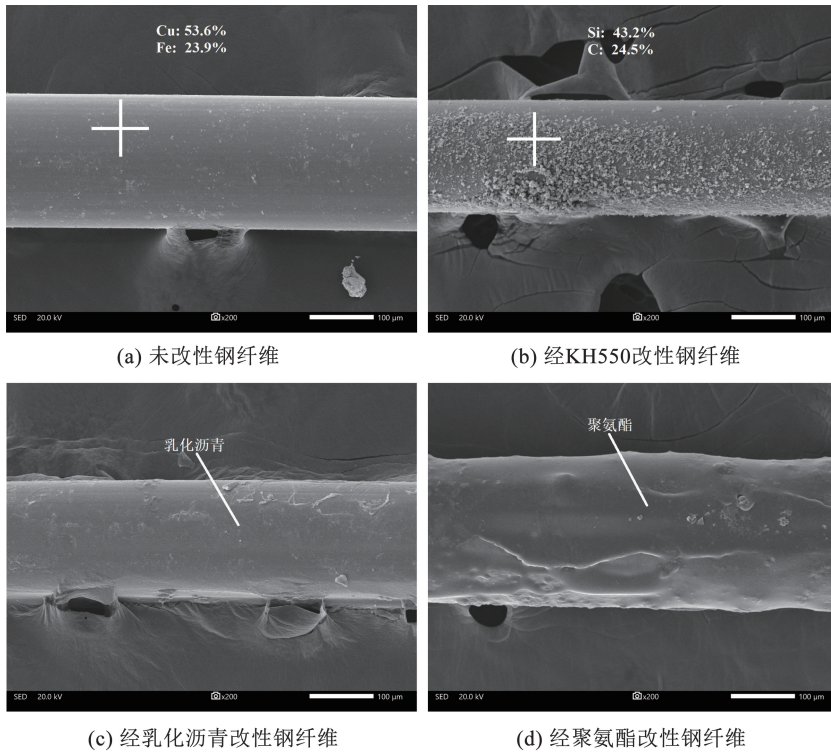


图 10 钢纤维改性处理后的微观样貌

Fig. 10 Microscopic appearance of steel fiber modified treatment

要探明钢纤维表面处理对钢纤维与混凝土基体界面黏结效果的增益,利用了能谱仪(EDS)对纤维表面组成元素进行定性及定量分析。图 10(a)为未表面处理钢纤维微观形态电镜图及其表面元素成分,图 10(b)为 KH550 表面处理钢纤维微观形态电镜图。从对钢纤维表面 EDS 的元素检测结果可知,普通镀铜直钢纤维的表面的主要是 Cu、Fe 两种元素。用硅烷偶联剂对钢纤维表面进行处理后,主要是 Si 和 C 两种元素,其中 Si 占比从无增加到 43.2%,Si 元素来自偶联剂,这说明钢纤维表面已经附着了一层硅烷膜。由于钢纤维和混凝土的成分区别,纤维表面顺着纤维长度方向与基体具有界面黏结力^[23],纤维端部的高剪应力易导致界面剪切脱黏而产生滑移,振动导致界面分子的滑移运动要克服阻力,需要一定的时间,形变往往滞后于应力的变化,而这种滞后的形变运动意味着要克服很大的阻力,消耗部分能量,由此材料阻尼性能得到提升。

如图 10(a)所示,没有经过表面处理的钢纤维表面相对光滑,表面有些许纤维生产时产生的较浅划痕和条纹。钢纤维经过表面处理之后,如图 10(b)所示,钢纤维表面附带一些颗粒状的硅烷膜,变得明显粗糙,表面变得更加粗糙能够大幅度增大钢纤维表面与基体之间滑移耗能,因此使混凝土界面黏结性能得到提升。对比两者的阻尼试验结果,钢纤维

与基体界面黏结效果更好的 KH550 改性方法可以增大振动过程中耗能能力,阻尼比增大效果较未表面改性钢纤维混凝土更加显著。聚合物表面改性钢纤维优异的阻尼性能主要得益于聚合物材料独特的黏弹性和形变能力,使其具有较大的内耗^[24],提升了混凝土的黏滞性阻尼。当应力通过聚合物材料时易发生损耗或衰减,从而增大了阻尼比^[25]。

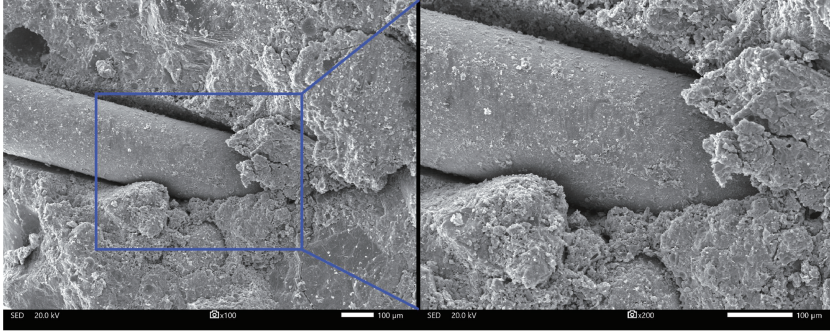
3.2 界面过渡区微观形貌分析

为了了解不同钢纤维改性方式对钢纤维-基体界面过渡区及钢纤维周边基体的影响,利用 SEM 对界面过渡区观察,不同钢纤维与混凝土基体的微观界面及局部放大的 SEM 图像如图 11 所示。

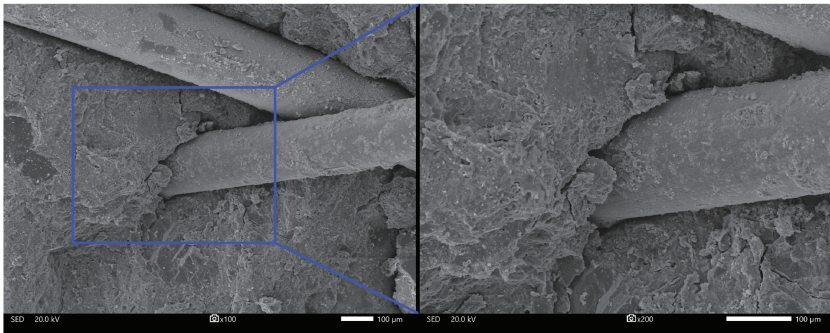
由于钢纤维表面的疏水性,在图 11(a)的界面过渡区可以观察到松散的微观结构,而这种情况并没有出现在图 11(b)钢纤维的周围,这是因为 KH550 硅烷偶联剂表面改性后钢纤维表面结合了亲水性氨基(-NH₂),使钢纤维表面变得具有亲水性,从而可以使钢纤维周围获得更多的游离水,借助硅烷偶联剂本身性质促进钢纤维周围的水化,通过这种方式,强化了钢纤维和混凝土基体之间的结合性,形成了钢纤维-混凝土基体的致密界面过渡区。从图中还可以看出未表面改性钢纤维表面只有少部分混凝土基体的残余,这少量的混凝土残留是由于基体与钢纤维之间夹持力导致的,而 KH550 硅烷偶

联剂表面改性钢纤维表面残余了大量的混凝土基体,表面更深的纵向划痕也说明基体与钢纤维之间的夹持力更大,这也一方面证实了通过这种表面改性方式可以提高钢纤维与混凝土基体的结合性。正因为钢纤维-基体结合性能的提高,因此 KH550 硅

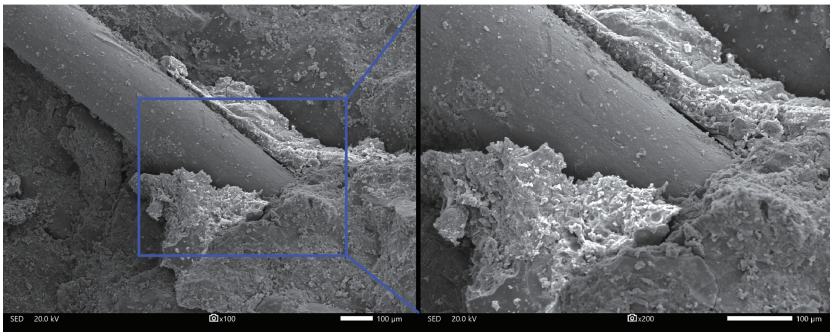
烷偶联剂表面改性钢纤维可以更好地发挥连接作用,在受到应力时纤维能充分发挥协同作用,从而提高了力学性能,其次在振动过程在,这种紧密结合的界面相比未改性钢纤维同样可以与基体产生更多的界面摩擦耗能从而获得良好的减振效果。



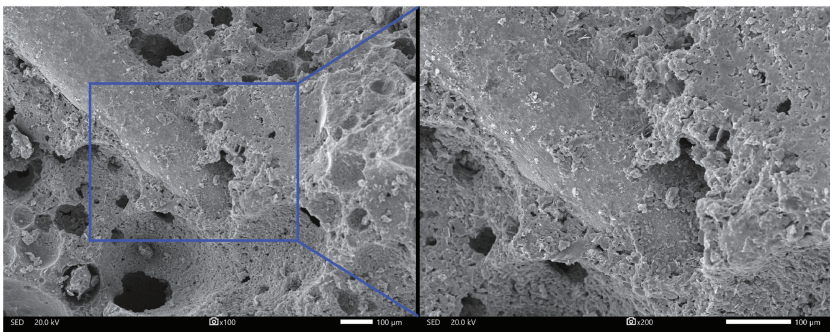
(a) 未改性钢纤维混凝土界面过渡区的微观形貌



(b) 偶联剂表面改性钢纤维混凝土界面过渡区的微观形貌



(c) 乳化沥青表面改性钢纤维混凝土界面过渡区的微观形貌



(d) 聚氨酯表面改性钢纤维混凝土界面过渡区的微观形貌

图 11 钢纤维混凝土界面过渡区的微观形貌

Fig. 11 Microscopic morphology of the transition zone at the interface of steel fiber reinforced concrete

其次,在图 11(c)中观察到乳化沥青表面改性钢纤维与基体的界面过渡区的钢纤维部分表面较为光滑,部分区域也存在类似未改性钢纤维表面的划痕,这说明了乳化沥青表面改性处理可以有效地保留一定钢纤维与基体黏结的同时还存在部分在钢纤维与基体之间,这可以提高基体整体变形能力和引入更多界面,从而使钢纤维混凝土获得优异的减振性能同时还具备一定的力学性能。

最后在图 11(d)中可以发现,聚氨酯表面改性钢纤维会给钢纤维混凝土特别是钢纤维与基体的界面过渡区带来大量封闭式的气泡孔隙,这是因为水性聚氨酯亲水性较好,在水中的聚氨酯颗粒可以吸收游离水并均匀分散保持分散状态,从而极大弱化了钢纤维附近的基体水化程度,随着水化结束,大量留在孔隙中的水性聚氨酯微颗粒水分得到蒸发,留下了大量包围在钢纤维附近的孔隙,这些孔隙的成为了结构缺陷,其次钢纤维与基体之间的聚氨酯层隔绝了钢纤维与基体的接触,结合面非常小,无法在力学试验中发挥作用,从而使聚氨酯表面改性钢纤维混凝土的力学性能非常糟糕,但聚氨酯层和大量孔隙缺陷的引入也极大增大了在振动中的耗能,从而使其具备不错的减振性能。

4 结 论

本文采集了振动激励下混凝土的时域曲线,将曲线进行傅里叶变换和计算后得到不同表面改性处理钢纤维混凝土阻尼比,并从微观分析探讨了其阻尼增强机制。主要研究结论如下:

1) 钢纤维掺入到混凝土可以增大混凝土的阻尼性能,对纤维表面进行改性处理后阻尼性能会进一步提高,1% 钢纤维的掺量的效果要高于 0.5% 掺量的,乳化沥青表面改性方法最优,钢纤维 1% 体积掺量下,乳化沥青改性钢纤维混凝土的减振性能表现优异,阻尼比和损耗因子分别为 0.956%、0.080 3,分别高出素混凝土 122%、118%,高出未表面改性钢纤维混凝土 94%、81%。

2) 经硅烷偶联剂表面处理后,钢纤维混凝土的力学性能提升了 10.49%,但乳化沥青、聚氨酯表面改性后使对应钢纤维混凝土的力学性能分别下降 31.35%、83.78%。硅烷偶联剂、乳化沥青、聚氨酯表面改性钢纤维均钢纤维混凝土的工作性下降,1% 掺量钢纤维混凝土坍落扩展度分别减小 10、15、5 cm, T_{50} 时间分别增加 1.5、2.4、0.7 s。

3) 钢纤维掺入混凝土后通过与基体的滑移运动克服阻力可以消耗振动能量,附着在钢纤维表面的聚合物具有较大的黏弹性和形变能力,使其具有较大的内耗,提升了表面改性钢纤维混凝土的黏滞性阻尼。

4) 乳化沥青和聚氨酯表面改性钢纤维混凝土减振性能明显优于普通钢纤维混凝土,其中乳化沥青表面改性钢纤维混凝土力学性能是聚氨酯表面改性钢纤维的 4.3 倍,且阻尼比高出 10.6%,因此综合评价来说,乳化沥青表面改性钢纤维更适合有减振需求的实际工程应用和进一步的学术研究。

参考文献

- [1] 于泰平. 地铁减振简析[J]. 城市建设理论研究, 2014(9): 2095
YU Taiping. Analysis of subway vibration reduction[J]. Research on Urban Construction Theory, 2014(9): 2095. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2104.2014.09.0084
- [2] 蒲前华, 韦凯, 贺天龙, 等. 地铁车辆段轨枕垫与道砟垫组合减振效果研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(23): 20
PU Qianhua, WEI Kai, HE Tianlong, et al. Research on combined vibration-reduction effect of sleeper pads and ballast pads in metro depot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(23): 20. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.23.003
- [3] 陈俊豪, 曾晓辉, 谢友均, 等. 橡胶自密实混凝土填充层结构的减振性能[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(4): 353
CHEN Junhao, ZENG Xiaohui, XIE Youjun, et al. Vibration reduction performance of rubber self compacting concrete filled layer structure[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(4): 353
- [4] BEDI R, SHARMA R. Damping studies on fibre-reinforced epoxy polymer concrete using taguchi design of experiments [J]. International Journal of Materials Engineering Innovation, 2015, 6(1): 42. DOI:10.1504/IJMATEI.2015.069799
- [5] WANG T, ZHANG J, ZHANG Y. Forming process and damping properties of carbon fiber-reinforced polymer concrete[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2014, 33(1): 93. DOI:10.1177/0731684413510753
- [6] 柯茹. 钢纤维混凝土机床基础件的设计与制造[D]. 广州: 广东工业大学, 2019
KE Ru. Design and manufacturing of steel fiber reinforced concrete machine tool foundations[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019
- [7] CHI L, LU S, YAO Y. Damping additives used in cement-matrix composites: a review [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 164: 26. DOI:10.1016/j.compositesb.2018.11.057
- [8] PRIESTLEY M J N, GRANT D N. Viscous damping in seismic design and analysis[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005, 9(SI2): 229. DOI:10.1142/S1363246905002365
- [9] 张文华, 吕毓静, 刘鹏宇. EPS 混凝土研究进展综述[J]. 材料导报, 2019, 33(13): 2214

- ZHANG Wenhua, LÜ Yujing, LIU Pengyu. A review of research progress on EPS concrete[J]. *Material Guide*, 2019, 33(13): 2214
- [10] NEITHALATH N, WEISS J, OLEK J. Acoustic performance and damping behavior of cellulose-cement composites[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2004, 26(4): 359. DOI:10.1016/S0958-9465(3)00020-9
- [11] ALI M, LIU A, SOU H, et al. Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete[J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 30: 814. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.068
- [12] POPOV I, LEVCHEV A. Experimental investigation of internal friction in rubber concrete and fiber-reinforced rubber concrete[J]. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2021(4): 53. DOI:10.36622/VSTU.2021.52.4.005
- [13] BALA A, GUPTA S. Thermal resistivity, sound absorption and vibration damping of concrete composite doped with waste tire rubber; a review[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 299: 123939. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.123939
- [14] LIU Y, HE H, FAN H. Damping, wave attenuation and damage of local-resonance-based metaconcrete slabs; experimental investigation[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134461. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.134461
- [15] JIN H, TIAN Q, LI Z, et al. Ability of vibration control using rubberized concrete for tunnel invert-filling[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 317: 125932. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.125932
- [16] 郭寅川, 刘逸伟, 申爱琴, 等. 玻璃纤维水泥稳定碎石收缩及柔化抗裂性能研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2023, 44(5): 114
- GUO Yinchuan, LIU Yiwei, SHEN Aiqin, et al. Research on shrinkage and softening crack resistance of glass fiber cement stabilized macadam[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2023, 44(5): 114
- [17] ZHANG J, LIU X, WU Z, et al. Fracture properties of steel fiber reinforced concrete: size effect study via mesoscale modelling approach[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 260: 108193. DOI:10.1016/j.engfracmech.2021.108193
- [18] ZHANG J, WU Z, YU H, et al. Mesoscopic modeling approach and application for steel fiber reinforced concrete under dynamic loading; a review[J]. *Engineering*, 2022, 16: 220. DOI:10.1016/j.eng.2022.01.011
- [19] LI Zongze, ZHU Haitang, ZHEN Xuanjiao, et al. Effects of steel fiber on the flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with BFRP rebars under repeated loading[J]. *Composite Structures*, 2021, 270(1): 114072. DOI:10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.114072.
- [20] MEMON M A, MEMON N A, MEMON B A, et al. Workability and mechanical behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete with supplementary cementitious materials[J]. *Composite Interfaces*, 2023, 30(7): 729. DOI:10.3390/ma15093137
- [21] 杜爽. 钢纤维表面改性对 UHPC 力学与耐久性能的影响[D]. 济南: 济南大学, 2023
- DU Shuang. The effect of surface modification of steel fibers on the mechanical and durability properties of UHPC[D]. Jinan: Jinan University, 2023
- [22] THOMAS J, RAMASWAMY A. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19(5): 385. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(385)
- [23] 徐平, 崔剑. 钢纤维聚合物混凝土高阻尼性及其在机床制造业中的应用[J]. *机床与液压*, 2004(4): 103
- XU Ping, CUI Jian. High damping properties of steel fiber polymer concrete and its application in machine tool manufacturing industry[J]. *Machine Tool and Hydraulic*, 2004(4): 103
- [24] 陈俊豪, 谢友均, 曾晓辉, 等. 板式轨道充填层自密实混凝土阻尼性能研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(14): 211
- CHEN Junhao, XIE Youjun, ZENG Xiaohui, et al. Research on the damping performance of self compacting concrete with slab track filling layer[J]. *Vibration and Shock*, 2023, 42(14): 211
- [25] NAMBIAR E K, RAMAMURTHY K. Air-void characterisation of foam concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(2): 221. DOI:10.1016/j.cemconres.2006.10.009