

低模量聚酯纤维/水泥基复合材料抗冲击性能及损伤机制

高峰 郝洪 吴安利 刘艳晨 李永贵

Impact resistance and damage mechanism of low modulus polyester fiber/cement matrix composites

GAO Feng, HAO Yunhong, WU Anli, LIU Yanchen, LI Yonggui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210118.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄麻纤维/聚酯纤维复合材料的阻燃改性

Flame retarded modification of jute fiber/polyester fiber composites

复合材料学报. 2017, 34(4): 922–931 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160906.001>

玻璃纤维增强塑料薄壁管抗冲击性能的实验研究

Experimental study on impact performance of glass fiber reinforced plastic thin-walled tubes

复合材料学报. 2018, 35(12): 3324–3330 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180209.005>

钢纤维-聚丙烯纤维混杂对再生混凝土抗冲击性能的影响

Effect of steel fiber-polypropylene fiber hybrid addition on impact resistance of recycled aggregate concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1763–1773 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191106.001>

玻璃纤维/环氧乙烯基酯树脂复合材料的层间增韧及其低温下低速冲击性能

Interlaminar toughening of glass fiber/epoxy vinyl ester resin composite and its low-velocity impact properties at low temperature

复合材料学报. 2021, 38(1): 145–154 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200824.003>

橡胶颗粒-钢纤维混杂对碾压混凝土抗冻性及抗冲击性能的影响

Frost resistance and impact properties of roller compacted concrete mixed with rubber particles and steel fibers

复合材料学报. 2018, 35(8): 2199–2207 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170920.002>

相对冲击位置和补片层数对胶接修理CFRP复合材料层合板抗冲击性能的影响

Effect of relative impact location and patch layer number on impact resistance of adhesive repaired CFRP composite laminates

复合材料学报. 2019, 36(5): 1114–1123 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180725.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

低模量聚酯纤维/水泥基复合材料 抗冲击性能及损伤机制



分享本文

高峰^{1,3,4}, 郝负洪^{*1,3,4}, 吴安利^{1,3,4}, 刘艳晨^{3,4,5}, 李永贵²

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 闽江学院 福建省新型功能性纺织纤维及材料重点实验室, 福州 350108;
3. 内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室, 呼和浩特 010051; 4. 内蒙古自治区建筑检测鉴定与安全评估工程技术研究中心,
呼和浩特 010051; 5. 内蒙古工业大学 理学院, 呼和浩特 010051)

摘 要: 研究聚酯纤维长径比、掺量对混凝土抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度、断裂韧性及冲击荷载等力学性能的影响; 运用复合材料理论和纤维间距理论对聚酯纤维/混凝土增韧阻裂机制进行研究, 结合 SEM 观察微观形貌分析纤维长径比与掺量对增韧阻裂机制的影响; 采用正交试验设计方法及激光扫描共聚焦显微镜 (LSCM) 研究冲击高度、试件厚度、长径比及掺量对纤维/混凝土抗冲击性能的影响。结果表明, 长径比为 300 与 600 的聚酯纤维会降低混凝土抗压强度, 低掺量长径比为 150 的聚酯纤维通过提高混凝土致密程度使混凝土抗压强度有所提升; 在抗拉强度方面长径比为 150 的聚酯纤维主要以缺陷形式存在, 长径比为 300 的聚酯纤维对改善混凝土内部拉结作用最显著, 3%(与胶凝材料体积比) 掺量聚酯纤维对提高混凝土抗折强度最显著; 对于混凝土断裂韧性, 长径比为 300 与 600 的聚酯纤维/混凝土断裂韧性提高明显, 通过 SEM 微观形貌发现纤维拉结作用产生的微裂纹会提高混凝土耗能能力, 从而提高混凝土极限荷载与破坏时中心挠度, 长径比为 300 的聚酯纤维/混凝土抗拉强度变化规律与复合材料理论和纤维间距理论分析结果较吻合; 冲击高度为影响冲击荷载大小的主要因素, 纤维长径比较纤维掺量影响较大, 通过 LSCM 三维损伤形貌分析得出长径比为 150 的聚酯纤维对混凝土材料损伤改善效果较显著, 同等掺量下长径比为 150 的聚酯纤维间距较小导致混凝土局部力学性能提高, 从而提高混凝土抗冲击性能。

关键词: 聚酯纤维; 增韧阻裂; 复合材料; Vicker 压头; 抗冲击

中图分类号: TU528.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)11-3838-12

Impact resistance and damage mechanism of low modulus polyester fiber/cement matrix composites

GAO Feng^{1,3,4}, HAO Yunhong^{*1,3,4}, WU Anli^{1,3,4}, LIU Yanchen^{3,4,5}, LI Yonggui²

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Fujian Key Laboratory of Novel Functional Textile Fibers and Materials, Minjiang University, Fuzhou 350108, China; 3. Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics of Inner Mongolia, Hohhot 010051, China; 4. Inner Mongolia Autonomous Region Building Inspection, Appraisal and Safety Assessment Engineering Technology Research Center, Hohhot, 010051, China; 5. School of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: The effects of length to diameter ratio and mixing amount of polyester fiber on the mechanical properties of concrete, such as compressive strength, flexural strength, splitting tensile strength, fracture toughness and

收稿日期: 2020-11-26; 录用日期: 2021-01-04; 网络首发时间: 2021-01-18 19:12:05

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210118.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (11162011; 51468049; 11862022); 福建省新型功能性纺织纤维及材料重点实验室 (闽江学院) 开放基金 (FKLTFFM1907); 内蒙古自治区自然科学基金面上项目 (2018MS05047); 内蒙古高校青年科技英才支持计划 (NJYT-17-A09); 内蒙古自治区博士研究生创新项目 (B20191127Z); 内蒙古自治区科技计划项目-镁基盐粉煤灰泡沫混凝土建筑结构体系关键技术及应用研究

通信作者: 郝负洪, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为区域特殊环境下工程结构和材料耐久性损伤灾变机理及防护关键技术
E-mail: 13947133205@163.com

引用格式: 高峰, 郝负洪, 吴安利, 等. 低模量聚酯纤维/水泥基复合材料抗冲击性能及损伤机制 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(11): 3838-3849.

GAO Feng, HAO Yunhong, WU Anli, et al. Impact resistance and damage mechanism of low modulus polyester fiber/cement matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(11): 3838-3849(in Chinese).

impact load, were studied. The mechanism of toughening and cracking resistance of polyester fiber concrete was studied by composite material theory and fiber spacing theory. The microscopic morphology observed by SEM was used to analyze the influence of fiber length-diameter ratio and content on the mechanism of toughening and cracking resistance. Orthogonal experimental design method and laser scanning confocal microscope (LSCM) were used to study the influence of impact height, specimen thickness, aspect ratio and content on the impact resistance of fiber/concrete. The results show that the polyester fibers with ratio of length to diameter of 300 and ratio of length to diameter of 600 would reduce the compressive strength of concrete, the low content of polyester fibers with ratio of length to diameter of 150 increases the compressive strength of concrete by increasing the density of concrete. In terms of tensile strength, the polyester fibers with ratio of length to diameter of 150 mainly exist in the form of defects, the polyester fibers with ratio of length to diameter of 150 have the most significant effect on improving the concrete internal pulling, the addition of 3% (volume ratio to cementitious materials) polyester fiber is the most significant to improve the flexibility of concrete. For the fracture toughness of concrete, the fracture toughness of polyester fiber/concrete with ratio of length to diameter of 300 and 600 is significantly improved. According to the SEM microscopic morphology, it is found that the micro-cracks generated by fiber pulling action would improve the energy dissipation capacity of concrete, thus increasing the ultimate load and central deflection of concrete during failure, and the variation of tensile strength of polyester fibers with ratio of length to diameter of 300 reinforced concrete is in good agreement with the composite material theory and fiber spacing theory. Impact height is the main factor affecting the impact load, and the fiber length and diameter have greater influence than fiber content. Through LSCM analysis of three-dimensional damage morphology, it is concluded that the damage improvement effect of polyester fibers with ratio of length to diameter of 150 on concrete material is relatively significant, and at the same dosage, the small spacing of polyester fibers with ratio of length to diameter of 150 results in the improvement of local mechanical properties of concrete, thus improving the impact resistance of concrete.

Keywords: polyester fibers; toughening and crack resistance; composite materials; Vicker indenter; impact resistance

混凝土凭借其优良性能在工程建设领域发挥着其他材料无法替代的作用,成为现代工程中最广泛应用的材料,但混凝土材料自身易开裂、韧性差及抗拉强度低等缺点限制了混凝土在某些方面的应用。已有研究表明,在混凝土中加入纤维不仅可以有效改善混凝土易开裂、韧性差及抗拉强度低的问题,还可有效提高混凝土耐久性能和抗冲击性能^[1-5]。目前,国内学者对各类纤维/混凝土的研究取得了很多成果。纤维可分为高模量纤维和低模量纤维,高弹模量纤维/混凝土研究主要集中于钢纤维与碳纤维,高弹模量纤维可显著提高混凝土的抗压强度与抗拉强度,对抗冲击性能也有所提高^[4-8]。低弹模量纤维/混凝土的研究主要集中于聚丙烯纤维,低模量纤维对混凝土抗压强度提高作用较小甚至呈负效应,但对混凝土抗拉强度、断裂能及抗弯韧性有所提升,使混凝土具有延性破坏特征,提高韧性^[9-12]。低模量聚酯(Polyester fibers, PET)纤维多用于沥青混凝土,可显著提高沥青混合料的疲劳寿命^[13-17],但对PET纤维/混凝土的力学性能、增韧阻裂机制及抗冲击性能相关研究较少。PET纤维强度高、延伸度适中、具有较好的化学稳定性,属于纤维中综

合性能较好的纤维,且PET纤维可由回收的塑料垃圾及废旧纺织品进行制备,塑料垃圾的回收再利用具有良好的经济效益和环境效益^[18-20]。因此,研究PET纤维/混凝土的力学性能、增韧阻裂机制及抗冲击性能至关重要。

本文研究PET纤维长径比与掺量对混凝土力学性能、增韧阻裂性能及抗冲击性能的影响,运用复合材料理论和纤维间距理论对增韧阻裂性能进行分析,采用正交实验设计方法对抗冲击性能进行研究。将理论分析结果与试验结果进行对比,分析PET纤维/混凝土力学性能与抗冲击性能变化机制,为PET纤维在混凝土桥隧及防护工程建设方面的应用提供依据。

1 试验概况

1.1 原材料

水泥采用42.5级冀东牌普通硅酸盐水泥;石子采用大青山采石场碎石,最大粒径5 mm;砂子采用细度模数为2.81的级配良好中砂;拌合水采用普通自来水;PET纤维为上海臣启化工科技有限公司生产,长度分别为3 mm、6 mm和12 mm的PET纤维对应长径比为150、300和600。PET

纤维的物理性能参数见表1。

1.2 试件制备

试件制备依据 JGJ55—2011^[21]。配制 C30 普通混凝土作为基准混凝土。纤维在混凝土内部存在状态是由胶凝材料包裹存在的，纤维掺量按照基准混凝土配合比中胶凝材料的体积分数进行添加。根据前期试验结果设计纤维掺量为胶凝材料体积的 1vol%、2vol%、3vol%、4vol%。

考虑到纤维在混凝土内部的结团现象，试件制备过程如下：首先使用自制纤维分散仪将纤维

打散备用；将砂子与水泥混合后干拌 1 min，加入 PET 纤维后快速搅拌 2 min，加水后继续搅拌 2 min，将石子平均分成 3 份分别加入，每次搅拌 1 min，共计 3 min。搅拌均匀后入模并振捣、抹平后放置 24 h 后脱模，脱模后放入标准养护室(温度恒定在 (20±2)℃，湿度不低于 95%)进行养护，测试养护龄期为 28 天时试件各项性能。前期试验发现 PET 纤维对混凝土工作性能影响较大，因此对不同混凝土配合比进行适当调整，试件编号及配合比如表2所示。

表 1 聚酯 (PET) 纤维物理性能参数
Table 1 Physical performance parameters of polyester (PET) fiber

Diameter/mm	Density/(g·cm ⁻³)	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/MPa	Elongation at break/%
2×10 ⁻²	1.36	600	8 000	15

表 2 试件编号及配合比
Table 2 Specimen number and mix ratio

Specimen number	Cement/kg	Fine aggregate/kg	Coarse aggregate/kg	Water/kg	Fiber content/(kg·m ⁻³)
C30	390	645	1 148	218	0
1vol%PET(150)/C30	390	645	1 148	218.0	1.986
2vol%PET(150)/C30	390	645	1 148	219.0	3.972
3vol%PET(150)/C30	390	645	1 148	220.0	5.958
4vol%PET(150)/C30	390	645	1 148	221.0	7.944
1vol%PET(300)/C30	390	645	1 148	222.0	1.986
2vol%PET(300)/C30	390	645	1 148	219.6	3.972
3vol%PET(300)/C30	390	645	1 148	221.2	5.958
4vol%PET(300)/C30	390	645	1 148	222.8	7.944
1vol%PET(600)/C30	390	645	1 148	224.4	1.986
2vol%PET(600)/C30	390	645	1 148	220.6	3.972
3vol%PET(600)/C30	390	645	1 148	223.2	5.958
4vol%PET(600)/C30	390	645	1 148	225.8	7.944

Notes: Use C30 ordinary concrete as reference concrete; In *n*vol%PET(*m*)/C30, PET stands for PET fiber; *n*vol%—Fiber content; *m*—Fiber aspect ratio of 150, 300, 600, respectively.

1.3 试验方法

依据 GB/T50081—2019^[22] 及 ASTM C1018 标准^[23] 使用 1 000 kN 微机控制电液伺服压力试验机上进行立方体抗压强度、轴心抗压强度、抗折强度及劈裂抗拉强度的力学性能试验，利用压力机自带的荷载传感器采集试验力数据，使用江苏东华测试技术股份有限公司生产的 DH-5929 动态信号测试分析系统采集试件中心位移变化，通过中心挠度与试验力变化研究纤维/混凝土韧性。

根据力学性能试验结果选择性能较优试件设计正交试验研究 PET 纤维/混凝土的抗冲击性能，使用 Vickers 压头进行冲击试验。将冲击荷载(控制冲击高度)、试件厚度、纤维长径比与纤维掺量

作为正交试验的四个影响因素，冲击荷载设定 6 个水平，试件厚度、纤维长径比与纤维掺量分别设定 3 个水平，选用 L18(6¹×3⁶) 的正交表，且不考虑各因素之间的交互作用，研究各因素的影响规律，具体正交试验因素及水平情况如表3所示。

2 结果与分析

2.1 PET 纤维/混凝土基本力学性能

2.1.1 抗压强度

抗压强度是混凝土主要性能之一，不同混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度均有特定换算关系，图1为不同变量混凝土立方体抗压强度与轴心抗压强度。可知：PET(600)/C30 试件抗压强度随

表 3 正交试验因素及水平情况

Table 3 Orthogonal test factors and levels

Factor level	Impact height/cm	Specimen thickness/cm	Ratio of length to diameter	Fiber content/vol%
1	40	1	150	2
2	38	3	300	3
3	36	5	600	4
4	34	-	-	-
5	32	-	-	-
6	30	-	-	-

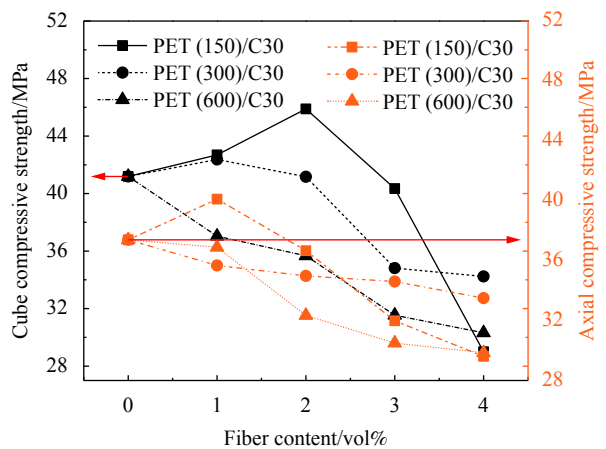


图 1 PET 纤维/混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度

Fig. 1 Axial compressive strength and cubic compressive strength of PET fiber/cement concrete

掺量增加表现出逐渐降低的趋势，4vol%PET(600)/C30 试件轴心抗压强度较 C30 试件降低 21.34%，4vol%PET(600)/C30 试件立方体抗压强度较 C30 混凝土降低 26.39%；PET(150)/C30 与 PET(300)/C30 试件抗压强度随掺量增加表现出先增加后降低的趋势，长径比为 150 的 PET 纤维/混凝土立方体抗压强度在 2vol% 纤维掺量时达到最大值，较 C30 试件提高 11.41%，轴心抗压强度在 1vol%PET(150)/C30 时达到最大值，较 C30 试件提高 7.69%；分析其原因，PET(600)/C30 纤维在混凝土内部结团现象较严重，混凝土内部缺陷较多导致抗压强度降低，掺量越大结团现象越显著，且纤维拉结作用对增强混凝土抗压强度作用较小；PET(150)/C30 与 PET(300)/C30 纤维在低掺量情况下结团现象并不明显，混凝土内部缺陷较少使混凝土抗压强度上升，高掺量情况下纤维结团现象较显著，缺陷使混凝土抗压强度降低。

2.1.2 劈裂抗拉强度与抗折强度

纤维会对混凝土裂缝发展具有一定的约束作用，劈裂抗拉强度试验与抗折强度试验均可以反映纤维/混凝土的抗拉强度，相同混凝土抗折强度

与劈裂抗拉强度之间存在一定的关系，劈裂抗拉强度略小于抗折强度^[24]。不同长径比与掺量纤维对混凝土裂缝发展的约束作用不同，图 2 为不同变量纤维/混凝土抗折强度与劈裂抗拉强度。为便于观察纤维存在状态，选择 C30、PET(150)/C30、PET(300)/C30 与 PET(600)/C30 在 4vol% 掺量时断面细观图，见图 3 所示。

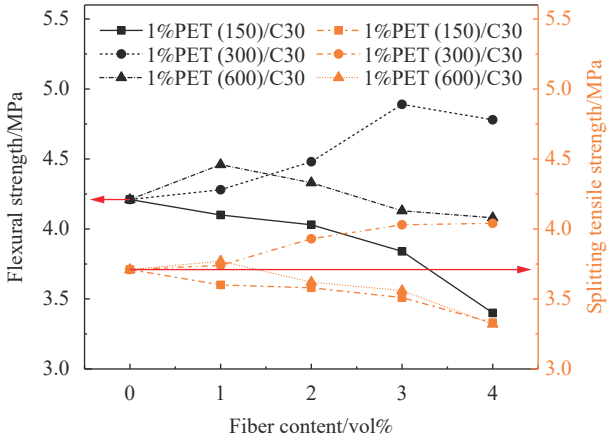


图 2 PET 纤维/混凝土抗折强度与劈裂抗拉强度

Fig. 2 Flexural strength and split tensile strength of PET fiber/cement concrete

由图 2 可知，PET(150)/C30 加入混凝土中会降低其抗折强度与劈裂抗拉强度，纤维掺量增加 1vol% 抗折强度与劈裂抗拉强度分别平均降低 4.81% 和 2.56%，在纤维掺量超过 3% 时均呈现迅速下降趋势；PET(300)/C30 与 PET(600)/C30 在低掺量时会提高混凝土的抗折强度与劈裂抗拉强度，随掺量提高均出现缓慢下降趋势，抗折强度最大分别为 1vol%PET(600)/C30 和 3vol%PET(300)/C30 试件，较 C30 试件分别提高 5.94% 和 16.15%，劈裂抗拉强度最大分别为 1vol%PET(600)/C30 和 4vol%PET(300)/C30 试件，较 C30 试件分别提高 1.62% 和 8.89%。分析主要原因为 C30 试件破坏形式为脆性破坏，达到极限荷载时发生突然破坏，见图 3(a)，C30 试件断裂截面细观图中无任何牵连作用；PET(150) 纤维在断裂面处均为拔出失效，



图3 PET 纤维/混凝土断面细观图
Fig. 3 PET fiber/concrete cross-section micrograph

见图 3(b)，PET(150) 纤维在混凝土内部的拉结作用较小，大量 PET(150)/C30 对抗折强度与劈裂抗拉强度均呈现出副作用，PET(150)/C30 更多以缺陷形式出现；PET(600) 纤维在掺量较低时结团现象并不明显，可显著提高混凝土的抗折强度与劈裂抗拉强度，PET(600) 纤维掺量较高时在混凝土内部易出现结团现象，见图 3(c)，拉结作用与结团现象复合作用使抗拉强度与劈裂抗拉强度出现先升高然后缓慢下降的趋势；PET(300) 纤维在混凝土内部具有一定的拉结作用，见图 3(d)，断裂面处 PET(300) 纤维主要为拔出失效，高掺量情况

下 PET(300) 纤维结团现象并不显著导致掺量越高拉结作用越明显，拉结作用与纤维结团复合作用导致 PET(300)/C30 试件抗折强度与劈裂抗拉强度随掺量提高不断增强，在纤维掺量超过 3vol% 时出现略微下降的趋势。

2.2 PET 纤维/混凝土断裂韧性

2.2.1 断裂韧性结果分析

伺服压力机和动态应变采集仪对混凝土抗折强度试验采集试验力与中心挠度，对数据进行处理可得到试验力-中心挠度曲线，可对不同混凝土韧性进行评价，图 4~图 6 为不同 PET 纤维/混凝土

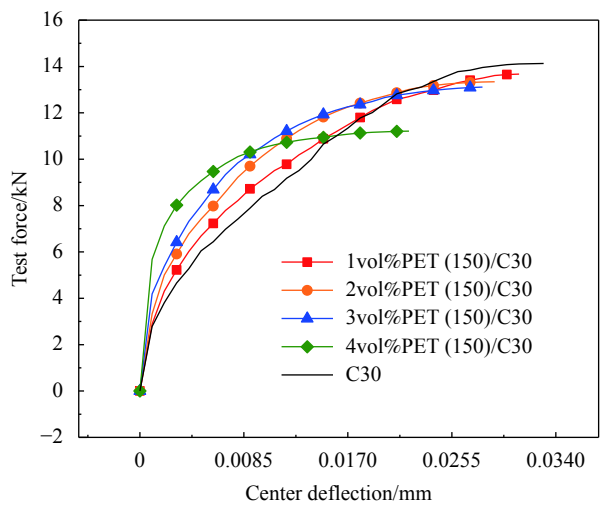


图4 PET(150)/C30 试件试验力-中心挠度变化曲线

Fig. 4 Test force-center deflection curve of PET(150)/C30 specimen

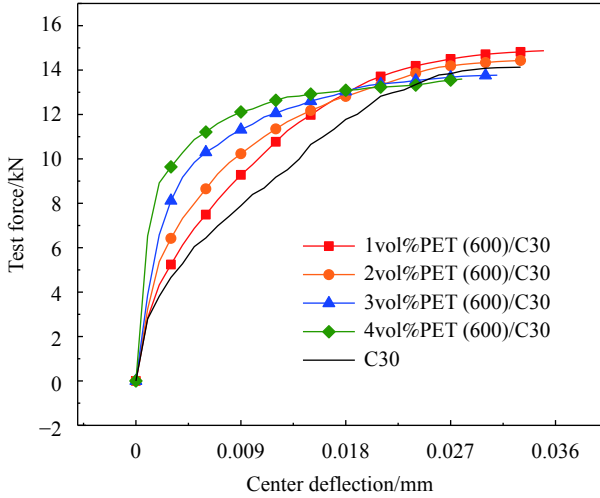


图5 PET(600)/C30 试件试验力-中心挠度变化曲线

Fig. 5 Test force-center deflection curve of PET(600)/C30 specimen

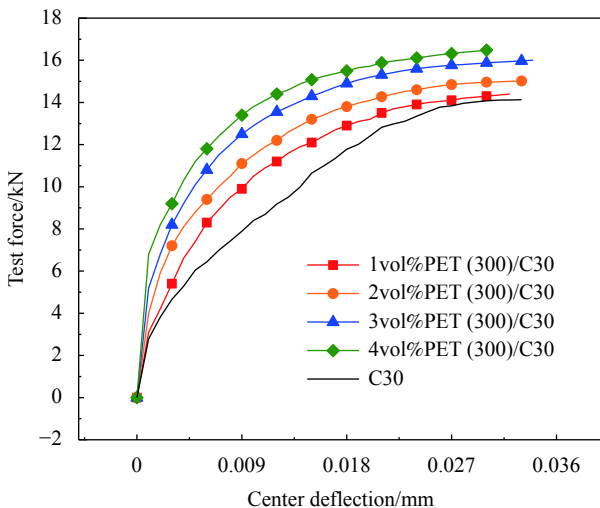


图6 PET(300)/C30 试件试验力-中心挠度变化曲线

Fig. 6 Test force-center deflection curve of PET(300)/C30 specimen

土试验力-中心挠度的变化曲线。

由图4可知，PET(150)/C30较C30试件相比降低了其破坏时的极限荷载与中心挠度；相同试验力情况下PET纤维/混凝土中心挠度较小，即PET纤维提高了混凝土抗变形能力。PET(150)试件破坏时对应极限荷载的大小情况为：C30>1vol%PET(150)/C30>2vol%PET(150)/C30>3vol%PET(150)/C30>4vol%PET(150)/C30，4vol%PET(150)/C30试件在破坏时中心挠度仅为0.022 mm，试验力继续增加时中心挠度会发生不同变化，加载前期抗变形能力4vol%PET(150)/C30>3vol%PET(150)/C30>2vol%PET(150)/C30>1vol%PET(150)/C30>C30，随试验力增加抗变形能力会发生不同变化，试验力超过11.03 kN时4vol%PET(150)/C30试件抗变形能力低于C30试件。分析其原因：PET(150)/C30试件在临近破坏荷载时多为拔出破坏，在临近极限荷载时拉结作用较小，大量短切纤维在混凝土内部更多为缺陷形式存在，不会提高混凝土破坏时的极限荷载与中心挠度；加载过程中内部纤维未产生滑移或滑移阶段仍会具备一定的拉结作用，可提高混凝土抗变形能力。

由图5可知，PET(600)/C30试件极限荷载与中心挠度与纤维掺量有关，低掺量会提高混凝土极限荷载与中心位移，1vol%PET(600)/C30试件较C30试件极限荷载与中心位移分别提高4.97%和5.71%，纤维掺量超过2vol%时对混凝土极限荷载与中心位移呈现副作用，4%PET(600)/C30试件较C30试件极限荷载与中心位移分别降低3.90%与17.86%；在试验过程中混凝土抗变形能力仍会随着纤维掺量的提高而增加，低试验力时4vol%PET(600)/C30试件抗变形能力最大，在试验力超过13.22 kN时，1vol%PET(600)/C30试件抗变形能力最大。分析主要原因为PET(600)/C30试件内部纤维拉结作用较大，随着掺量增加纤维结团现象越为严重，导致高掺量纤维/混凝土极限荷载与中心挠度低于C30试件；在加载前期，纤维对混凝土内部拉结作用占据主要作用，在接近极限荷载时纤维发生滑移或断裂，内部纤维结团的缺陷占据主要作用导致试验力继续增加时抗变形能力相对降低。

由图6可知，PET(300)/C30试件随掺量增加时混凝土极限荷载不断增加，破坏时中心挠度呈现先升高再降低的趋势，4vol%PET(300)/C30试件

极限荷载较 C30 试件提高 16.63%，3vol%PET(300)/C30 试件较 C30 试件破坏时中心挠度提高 2.94%；混凝土抗变形能力大小关系为：4vol%PET(300)/C30>3vol% PET(300)/C30>2vol%PET(300)/C30>1vol%PET (300)/C30>C30，在加载过程中混凝土抗变形能力大小关系并不会发生变化；这主要是由于 PET(300)/C30 试件内部拉结作用较 PET(150)/C30 更强，结团现象较 PET(600)/C30 试件相比并不显著，结团现象会降低 PET(300)/C30 试件破坏时中心挠度，并不会降低极限荷载；抗变形能力由纤维拉结作用决定，结团现象作为缺陷仅影响混凝土破坏时中心挠度。

混凝土断裂韧性可由试验力-中心挠度曲线与挠度轴所包围的面积进行表征^[23]。图 7 为不同变量混凝土断裂韧性变化曲线。可知，PET(150)/C30 试件断裂韧性随掺量增加不断降低，4vol%PET(150)/C30 试件断裂韧性最低，较 C30 试件降低 56.72%；PET(300)/C30 试件断裂韧性随掺量增加表现出先升高后降低的趋势，3vol%PET(300)/C30 试件断裂韧性最大较 C30 试件提高 34.18%。PET(600)/C30 试件断裂韧性随掺量增加呈现出先升高后降低的趋势，1vol%PET(600)/C30 断裂韧性最大较 C30 试件提高 19.09%，4vol%PET(600)/C30 试件断裂韧性已低于 C30 试件。分析其原因，PET(150)/C30 试件内部拉结作用较低，对混凝土断裂韧性呈现副作用，PET(150)纤维对工作性能的改善并不能提高混凝土的断裂韧性；PET(300)/C30 试件内部拉结作用较强，可明显提高混凝土的断裂韧性，高

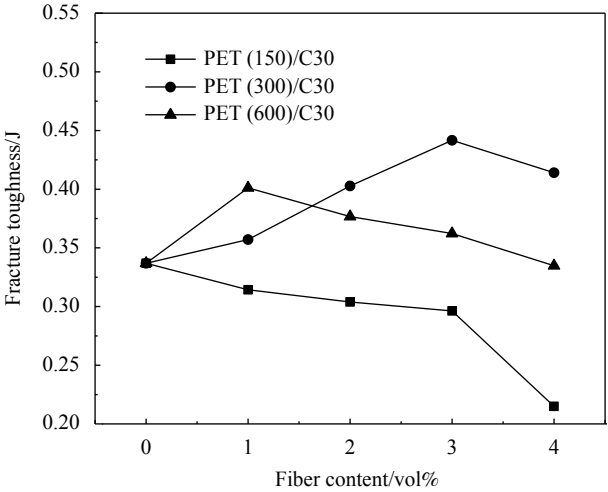


图 7 PET 纤维/混凝土断裂韧性变化曲线

Fig. 7 PET fiber/concrete fracture toughness change curves

掺量 PET(300) 纤维出现结团现象，断裂中心挠度降低也会影响混凝土的断裂韧性。PET(600)/C30 试件内部拉结作用较强，但结团现象较严重，1vol%PET(600)/C30 的拉结作用便在与结团缺陷的复合作用中占据主导，断裂韧性开始下降。

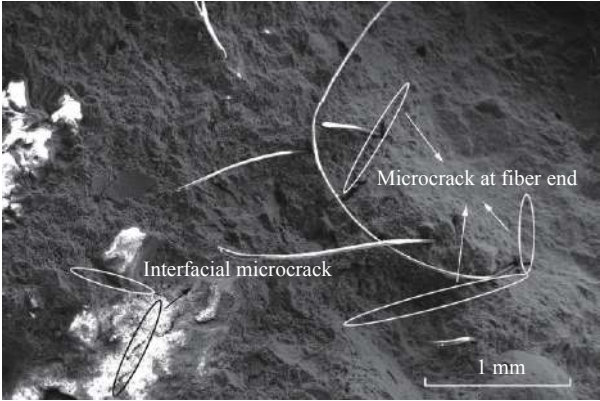
2.2.2 SEM 微观形貌

PET 纤维增强混凝土为物理增强作用，不会发生化学反应。图 8(a) 为 C30 试件断裂面微裂纹分布，图 8(b)3vol%PET(300)/C30 试件断裂面微裂纹分布。

由图 8(a) 与图 8(b) 对比可知，C30 断裂面较平整，断裂面中骨料界面占比较大，骨料界面较显著，断裂截面处微裂纹较少，且主要分布在骨料界面处；3vol%PET(300)/C30 试件断裂面平整度较差，断裂面中骨料界面占比较小，骨料界面并不显著，断裂面处微裂纹分布较多，且在纤维端部出现大量微裂纹。主要是混凝土通常可看为由骨料、水泥基体及水泥基体-骨料界面组成的三相



(a) C30



(b) 3vol%PET (300)/C30

图 8 PET 纤维/混凝土断裂面微观形貌 SEM 图像
Fig. 8 SEM images of fracture surface micro morphologies of PET fiber/concrete

复合材料, 相比水泥基体和骨料强度而言, 水泥基体-骨料界面的强度较小成为混凝土内部的薄弱区域; C30 试件内部界面区域多为缺陷存在, 混凝土内部无纤维拉结作用破坏形式为脆性破坏, 断裂面处裂纹较少, 断裂韧性较差。3vol%PET(300)/C30 试件内部具有纤维拉结作用, 在受到荷载作用时纤维拉结作用会缓解裂缝尖端的应力集中, 混凝土内部产生较多微裂纹, 使骨料界面不易直接断裂, 纤维拉结使界面处桥联部分水泥基体, 从而提高混凝土的抗拉强度与断裂韧性。

2.3 PET 纤维/混凝土阻裂增韧机制

2.3.1 复合材料理论

复合材料理论将纤维混凝土看作两相复合材料。在下列条件下, 将纤维增强系统看做纤维强化体系, 进行纤维/混凝土的理论研究^[25-26]: (1) 纤维连续均匀平行排列, 并与受力方向一致; (2) 纤维与基体粘结完好, 即两者产生相同的应变, 无相对滑动。(3) 纤维与基体呈弹性变形, 横向应变相等。

混凝土中加入纤维可以减小混凝土内部的应力集中作用, 纤维拉结作用可以提高混凝土抗拉强度与带裂缝工作能力。

在纤维/混凝土基体开裂前的近似弹性变形范围内, 纤维/混凝土的应力为

$$\sigma = \sigma_c (1 - V_f) + \eta_l \sigma_f V_f \tag{1}$$

若假定纤维与混凝土的平均粘结应力为 τ , 纤维直径为 d_f , 纤维长度为 l_f , 则纤维的应力为

$$\sigma_f = \eta_l \tau \frac{l_f}{d_f} \tag{2}$$

将式(2)代入式(1)得到纤维/混凝土抗拉强度的计算公式为

$$\sigma = \sigma_c \left(1 - V_f + \eta_l \tau \frac{l_f}{d_f} V_f \right) \tag{3}$$

本试验中纤维物理性能参数见表1, 纤维在混凝土中均为三维乱向分布, 同种纤维有效粘结长度系数为定值。不同混凝土抗拉强度如表4所示。

由表4可知理论分析结果为: 相同纤维掺量情况下, 混凝土抗拉强度均会随着纤维长径比增大逐渐增大; 相同长径比情况下, 混凝土抗拉强度均会随纤维掺量增大逐渐增大。据图2不同变量混凝土抗拉强度试验结果显示, 1vol%纤维掺量混凝土抗拉强度变化与理论计算变化趋势相同, 当纤维掺量超过 2vol% 时, 抗拉强度随长径比增

加呈现先升高后降低的趋势, 不同于复合材料理论; PET(150)/C30 试件随掺量增加抗拉强度逐渐减小, PET(300)/C30、PET(600)/C30 随掺量增加均表现出先升高后降低的发展趋势, 均不符合复合材料理论; 分析其原因, 1vol% 掺量各类纤维分散完全时纤维拉结作用显著, 但纤维掺量在 2vol% 及以上时, PET(600)/C30 结团现象导致抗拉强度减小; PET(150)/C30 拉结作用较小, 在受力情况下易产生滑移, PET(300)/C30 与 PET(600)/C30 纤维随掺量增加出现不同程度的结团现象, 导致 PET(300)/C30 与 PET(600)/C30 抗拉强度出现下降趋势。

表4 PET 纤维/混凝土试样计算结果

Table 4 Calculation results of different PET fiber/concrete samples

Specimen number	Fiber content/(kg·m ⁻³)	Tensile strength
1vol%PET(150)/C30	1.986	$\sigma = 5.155 + 0.219\eta_l \tau$
2vol%PET(150)/C30	3.972	$\sigma = 5.148 + 0.438\eta_l \tau$
3vol%PET(150)/C30	5.958	$\sigma = 5.140 + 0.657\eta_l \tau$
4vol%PET(150)/C30	7.944	$\sigma = 5.132 + 0.876\eta_l \tau$
1vol%PET(300)/C30	1.986	$\sigma = 5.155 + 0.438\eta_l \tau$
2vol%PET(300)/C30	3.972	$\sigma = 5.148 + 0.876\eta_l \tau$
3vol%PET(300)/C30	5.958	$\sigma = 5.140 + 1.314\eta_l \tau$
4vol%PET(300)/C30	7.944	$\sigma = 5.132 + 1.752\eta_l \tau$
1vol%PET(600)/C30	1.986	$\sigma = 5.155 + 0.876\eta_l \tau$
2vol%PET(600)/C30	3.972	$\sigma = 5.148 + 1.752\eta_l \tau$
3vol%PET(600)/C30	5.958	$\sigma = 5.140 + 2.628\eta_l \tau$
4vol%PET(600)/C30	7.944	$\sigma = 5.132 + 3.504\eta_l \tau$

Notes: σ —Tensile strength; η_l —Effective bond length coefficient; τ —Average bond stress.

2.3.2 纤维间距理论

纤维间距理论又称为纤维阻裂理论, 是 1963 年由 Romualdi 等^[27]提出的。纤维间距理论认为, 在混凝土内部存在固有缺陷, 如预提高强度, 须尽可能减少缺陷程度, 提高材料的韧性, 即抗变形能力, 降低混凝土体内裂缝端部的应力集中系数。

在拉力作用下, 在裂缝的纤维周围将产生粘结力 τ , 纤维对裂缝的扩展起约束作用, 此时裂缝尖端产生一个与基体裂缝尖端相反的应力强度因子, 总应力强度因子降低为

$$K_T = K_0 - K_f \leq K_{IC} \tag{4}$$

式中: K_0 为复合材料实际应力强度因子; K_0 、 K_f 为外力作用下无纤维时的应力强度因子、因纤维掺入产生的相反的应力强度因子; K_{IC} 为纤维/混凝土临界应力强度因子。

当 $K_T \geq K_{IC}$ 时, 材料发生断裂破坏, 根据这一

理论，提出纤维间距 s 对混凝土抗拉强度有显著影响的观点：

$$\sigma = \frac{K_{IC}}{Y \sqrt{a}} = \frac{0.84 K_{IC}}{Y \sqrt{s}} = \frac{K}{\sqrt{s}} \tag{5}$$

式中： Y 为与裂缝形状有关的常数； K 为与 K_{IC} 、 Y 有关的常数； s 为定向纤维平均间距。

Romualdi 等^[27]认为钢纤维混凝土的强度只能由纤维的平均间距控制，并将其用于均匀分布的乱向短纤维增强混凝土中，且经过试验表明，纤维混凝土的初裂应力与纤维间距的平方根成反比， K 大小由纤维种类确定。

对于平行排列的纤维，垂直于纤维方向上单位面积的平均间距可近似用下式表示：

$$s = \frac{1}{\sqrt{n}} \tag{6}$$

对于一维情形：

$$s_{1.0} = \sqrt{\frac{A_f}{V_f}} = \sqrt{\frac{\frac{\pi}{4} d_f^2}{V_f}} = 0.886 \frac{d_f}{V_f} \tag{7}$$

对于二维情形：

$$s_{2.0} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} s_{1.0} = 1.11 \frac{d_f}{\sqrt{V_f}} \tag{8}$$

对于三维情形：

$$s_{3.0} = 1.38 \frac{d_f}{\sqrt{V_f}} \tag{9}$$

式中： d_f 为纤维直径， V_f 为纤维在纤维/混凝土中的体积掺量。

纤维间距 s 与纤维方向有效系数有关，本文试验均为三维乱向分布，纤维方向系数相同。由式(9)可知，当 d_f 一定， V_f 越高， s 则相应减小，对内部拉结作用越强；PET(300)/C30 与 PET(600)/C30 纤维在低掺量情况下抗拉强度变化符合纤维间距理论，高掺量情况下纤维容易出现结团现象致使拉结作用成为次要因素；PET(150)/C30 试件

抗拉强度随纤维掺量增加抗拉强度呈减小趋势，与纤维间距理论分析结果不符。其原因主要为 PET(300) 与 PET(600) 纤维在高掺量下的结团现象不能保证纤维分散均匀；纤维间距理论假设单根纤维与混凝土基体之间具有充分的粘结力，避免纤维产生滑移或拔出，PET(150)/C30 试件断裂截面处纤维多为拔出破坏。

2.4 PET 纤维/混凝土抗冲击性能试验

2.4.1 结果与分析

不同混凝土受到冲击荷载作用时，冲击荷载主要由冲击高度 H 、试件厚度 S 、纤维长径比 (L_f/d_f) 及纤维掺量 T 四个因素决定。各个因素对应极差大小不同，极差变化反映各因素水平变化对冲击荷载的影响，各因素对应极差越大，对冲击荷载的影响越大，以冲击荷载为衡量指标，选取每个因素中 K 值最大者为最优水平，极差最大的影响因素为影响冲击荷载的主要因素。表 5 为不同变量纤维/混凝土承受冲击荷载极差分析。可知，四个因素对冲击荷载影响的极差 R 值大小关系为 $R_H > R_S > R_{L_f/d_f} > R_T$ ，对冲击荷载影响的主次顺序为冲击高度、试件厚度、纤维长径比、纤维掺量，影响冲击荷载大小的主要因素为冲击高度 H ，PET 纤维掺量 T 对冲击荷载影响最小。冲击荷载随冲击高度降低不断减小；随试件厚度增加表现出先升高后降低的趋势；随纤维长径比提高呈先降低后升高的趋势；随纤维掺量不断增加表现出不断升高的趋势。这主要是由于冲击高度不同直接导致 Vickers 压头冲击能量的不同，导致冲击高度对冲击荷载大小影响最大；试件厚度不同会影响冲击瞬间试件吸收能量的多少，试件厚度较小时试件可能会产生震动，应力波扩散速度较快导致冲击荷载较小，当试件厚度较大时，试件受冲击荷载作用时较易发生变形，导致冲击荷载减小；PET(150)/C30 试件内纤维数量较多纤维间距较小，

表 5 PET 纤维/混凝土承受冲击荷载极差分析

Table 5 Analysis of extreme difference of PET fiber/concrete under impact load

Factor	Impact height H	Specimen thickness S	Ratio of length to diameter L_f/d_f	Fiber content T
$K1/kN$	5 880.10	3 199.51	4 180.04	3 816.96
$K2/kN$	4 649.30	4 386.32	3 637.98	3 911.55
$K3/kN$	4 017.02	4 027.79	3 795.59	3 885.11
$K4/kN$	3 163.89	-	-	-
$K5/kN$	2 812.53	-	-	-
$K6/kN$	2 704.39	-	-	-
R	3 175.71	1 186.81	542.06	94.59

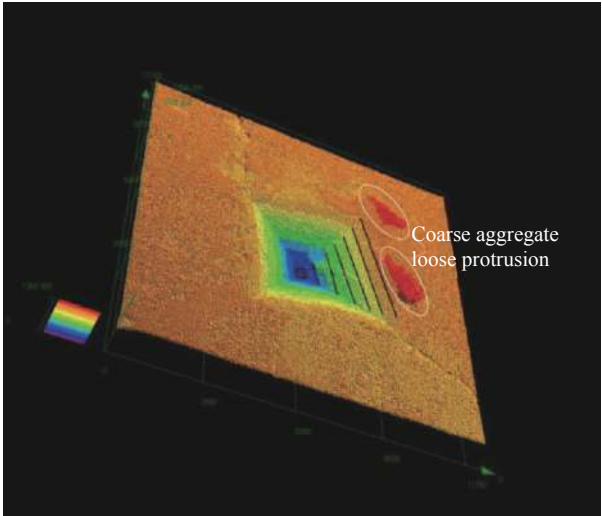
Notes: Ki —Sum of the corresponding test results when the level number on any column is i ($i=1-6$); R —Range.

冲击试验对混凝土破坏为局部破坏, PET(150) 纤维可有效发挥拉结作用, PET(300)/C30 与 PET(600)/C30 试件内部纤维间距相对较小, PET(600)/C30 较 PET(300)/C30 试件内部拉结作用大导致冲击荷载出现小幅度上升; 纤维掺量越大局部力学性能越好, 4vol% 掺量时结团现象较严重导致局部力学性能降低; 即 PET 纤维/混凝土冲击荷载最优组合为: H1S2L1T3, 即冲击高度为 34 cm, 试件厚度为 30 mm, 纤维长径比为 150, 纤维掺量为 4vol%。

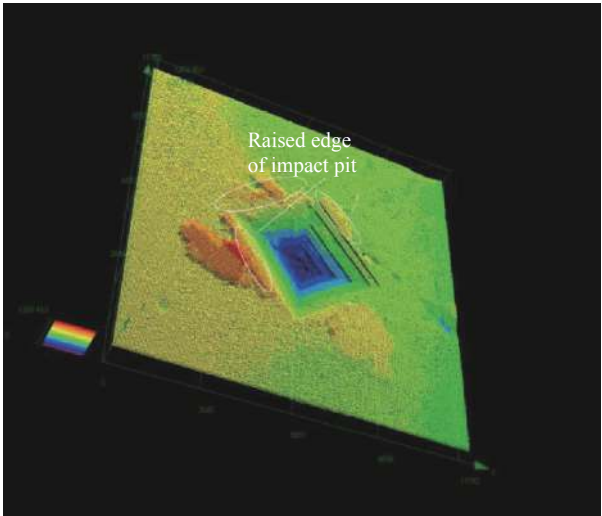
2.4.2 LSCM 微观形貌

不同 PET 纤维/混凝土的抗冲击性能与冲击损伤形貌不同, L18(6¹×3⁶) 的正交设计试验最具代表性的损伤形貌分别为第 6 组与第 12 组, 其变量为冲击高度 H 与纤维长径比 L_f/d_f , 第 6 组冲击高度 H 与纤维长径比 L_f/d_f 分别为 38 cm 和 150, 第 12 组冲击高度 H 与纤维长径比 L_f/d_f 分别为 34 cm 和 600, 试件厚度 S 与纤维掺量 T 均为 30 mm 和 3%。图 9(a) 为第 6 组 PET 纤维/混凝土冲击损伤三维形貌, 图 9(b) 为第 12 组 PET 纤维/混凝土冲击损伤三维形貌。

由图 9(a) 与图 9(b) 损伤三维形貌对比可知, 第 6 组 PET 纤维/混凝土受冲击荷载后, 冲击坑深度为 1 231.2 μm , 无冲击唇现象, 附近区域出现石子隆起上升现象; 第 12 组混凝土受冲击荷载后, 冲击坑深度为 755.4 μm , 较第 6 组冲击坑深度降低 38.6%, 出现冲击唇现象, 即冲击坑边界处水泥基体会出现松动隆起。分析其主要原因, 冲击高度为影响冲击荷载大小的主要因素, 在试件厚度相同时较大冲击荷载会使冲击坑深度加大, 冲击荷载使试件内部产生冲击波, 较大冲击波在传播过程中会导致附近区域石子界面发生破坏; 冲击荷载对冲击坑附近区域影响较大, PET(150)/C30 较 PET(300)/C30 试件宏观抗拉性能较差, 即长径比为 150 的 PET 纤维/混凝土较长径比为 300 的 PET 纤维/混凝土抗拉强度小, 但同等掺量情况下 PET(150)/C30 试件内部纤维的数量较多, 混凝土内部纤维间距较小, 对混凝土冲击坑周围细观断裂性能提高较明显, 使冲击荷载对混凝土造成的剥落损伤明显降低; 较低冲击高度会使冲击坑深度降低, PET(300)/C30 试件内部纤维拉结作用较大, 但同等掺量情况下 PET(300)/C30 试件内部纤维数量较少, 冲击坑周围影响区域纤维间距较大, 对增强混凝土细观抗裂性能作用较小, 导致冲击



(a) Three-dimensional morphology of impact damage of group 6 concrete



(b) Three-dimensional morphology of impact damage of group 12 concrete

图 9 PET 纤维/混凝土冲击损伤三维形貌

Fig. 9 Three-dimensional morphologies of PET fiber/concrete after impact damage

荷载对混凝土造成剥落损伤较严重。

3 结论

(1) 聚酯 (PET) 纤维长径比为 300 与 600 的试件抗压强度较基准混凝土均呈现降低趋势。长径比为 150 的 PET 纤维较短可提高混凝土内部致密程度使抗压强度有所提高, 在 2vol% (与胶凝材料体积分数) 掺量时立方体抗压强度达到最大值, 较基准试件提高 11.41%, 掺量继续增加时长径比为 150 的 PET 纤维将会以内部缺陷形式出现, 对抗压强度呈现副作用。

(2) 在抗拉强度方面长径比为 150 的试件较基

准试件大幅度降度。长径比为 300 的 PET 纤维在混凝土内部拉结作用更显著, 可有效提高混凝土抗拉强度, 3vol% 掺量时抗折强度较基准试件改善最显著可达 16.15%, 掺量继续增加出现的结团现象会导致抗拉强度迅速降低。

(3) 对于混凝土断裂韧性, 长径比为 150 的 PET 纤维较基准试件断裂韧性有所降低, 长径比为 300 的 PET 纤维与长径比为 600 的 PET 纤维/混凝土断裂韧性提高明显, 长径比为 300 的 PET 纤维在 3vol% 掺量时较基准试件改善最明显可达 34.18%, 通过微观形貌发现纤维拉结作用产生的微裂纹会提高混凝土耗能能力, 从而提高混凝土极限荷载与破坏时中心挠度, 长径比为 300 的 PET 纤维/混凝土抗拉强度变化规律与复合材料理论和纤维间距理论分析结果较吻合。

(4) 冲击高度为影响冲击荷载大小的主要因素, 纤维掺量对混凝土冲击荷载影响最小, 纤维长径比次之, 通过激光扫描共聚焦显微镜 (LSCM) 三维损伤形貌分析得出长径比为 150 的 PET 纤维对混凝土材料损伤改善效果较显著, 从而提高混凝土抗冲击性能, 同等掺量情况长径比为 300 与长径比为 600 的 PET 纤维/混凝土内部纤维间距较大, 对混凝土局部力学性能改善效果较长径比为 150 的 PET 纤维相差较大。

参考文献:

- [1] 杨娟, 朋改非, 税国双. 再生钢纤维增韧超高性能混凝土的力学性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1949-1956.
YANG Juan, PENG Gaifei, SHUI Guoshuang. The mechanical properties of ultra-high performance concrete toughened by recycled steel fiber[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(8): 1949-1956(in Chinese).
- [2] 邓宗才, 陈海龙. 集束型玻璃纤维混凝土轴拉、弯曲和断裂性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(5): 993-999.
DENG Zongcai, CHEN Hailong. Axial tension, bending and fracture properties of clustered glass fiber concrete[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(5): 993-999(in Chinese).
- [3] LI L, GAO D Y, LI Z L, et al. Effect of high temperature on morphologies of fibers and mechanical properties of multi-scale fiber reinforced cement-based composites[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261: 120487.
- [4] AL-HADITHI A I, NOAMAN A T, MOSLEH W K. Mechanical properties and impact behavior of PET fiber reinforced self-compacting concrete (SCC)[J]. Composite Structures, 2019, 224: 111021.
- [5] NARAGANTI S R, PANNEM R, PUTTA J. Impact resistance of hybrid fibre reinforced concrete containing sisal fibres[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2019, 10(2): 297-305.
- [6] ALSHAIKH I, BAKAR B H, AKIL H M, et al. Impact resistance of plain and rubberized concrete containing steel and polypropylene hybrid fiber[J]. Materials Today Communications, 2020, 25: 101640.
- [7] GHASEMI M, GHASEMI M R, MOUSAVI S R. Studying the fracture parameters and size effect of steel fiber-reinforced self-compacting concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 201: 447-460.
- [8] 马恺泽, 刘亮, 刘超, 等. 高强混合钢纤维混凝土的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 261-265.
MA Kaize, LIU Liang, LIU Chao, et al. The mechanical properties of high-strength steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(2): 261-265(in Chinese).
- [9] SAFIUDDIN M D, YAKHLAF M, SOUDKI K A. Soudki, Key mechanical properties and microstructure of carbon fibre reinforced self-consolidating concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 164: 477-488.
- [10] 梁宁慧, 钟杨, 刘新荣. 多尺寸聚丙烯纤维混凝土抗弯韧性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(10): 2783-2789.
LIANG Ninghui, ZHONG Yang, LIU Xinrong. Experimental study on flexural toughness of multi-size polypropylene fiber concrete[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2017, 48(10): 2783-2789(in Chinese).
- [11] DING Yining, WANG Qingxuan, PACHECO-TORGAL F, et al. Hybrid effect of basalt fiber textile and macro polypropylene fiber on flexural load-bearing capacity and toughness of two-way concrete slabs[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261: 119881.
- [12] 罗洪林, 杨鼎宜, 周兴宇等. 不同长径比聚丙烯纤维增强混凝土的力学特性[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1935-1948.
LUO Honglin, YANG Dingyi, ZHOU Xingyu, et al. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete with different length-to-diameter ratios[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(8): 1935-1948(in Chinese).
- [13] 高丹盈, 赵亮平, 冯虎, 等. 钢纤维混凝土弯曲韧性及其评价方法[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 783-789.
GAO Danying, ZHAO Liangping, FENG Hu, et al. Bending toughness of steel fiber concrete and its evaluation method[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 783-789(in Chinese).
- [14] LIU Gaojie, BAI Erlei, XU Jinyu, et al. Dynamic compressive mechanical properties of carbon fiber-reinforced poly-

mer concrete with different polymer-cement ratios at high strain rates[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261(7): 119995.

[15] 安静. 聚酯纤维改性沥青混合料路用性能研究[J]. 公路工程, 2015, 40(6): 247-251.

AN Jing. Study on road performance of polyester fiber modified asphalt mixture[J]. Highway Engineering, 2015, 40(6): 247-251(in Chinese).

[16] HONG R B, WU J R, CAI H B. Low-temperature crack resistance of coal gangue powder and polyester fibre asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117678.

[17] BUI N K, SATOMI T, TAKAHASHI H. Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study[J]. Waste Management, 2018, 78(1): 79-93.

[18] 魏艳红, 刘新金, 谢春萍, 等. 几种差别化聚酯纤维的结构与性能[J]. 纺织学报, 2019, 40(11): 13-19.

WEI Yanhong, LIU Xinjin, XIE Chunping, et al. Structure and properties of several differentiated polyester fibers[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(11): 13-19(in Chinese).

[19] ANTHONY R. Bunsell, handbook of properties of textile and technical fibres (Second edition)[M]. Sawston: Woodhead Publishing, 2018.

[20] PEREIRA E L, LUIS D O J A, FINEZA A G. Optimization of mechanical properties in concrete reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149(15): 837-848.

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design specification for ordinary concrete mix ratio: JGJ 55—2011[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011(in Chinese).

[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of physical and mechanical properties of concrete: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019(in Chinese).

[23] ASTM. Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete(using beam with third-point loading): ASTM C 1018[S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials Press, 1997: 544 -551.

[24] 杜任远, 陈宝春, 沈秀将. 不同方法测试的超高性能混凝土抗拉强度[J]. 材料导报, 2016, 30(S2): 483-486, 520.

DU Renyuan, CHEN Baochun, SHEN Xiujiang. Ultra-high performance concrete tensile strength tested by different methods[J]. Materials Guide, 2016, 30(S2): 483-486, 520(in Chinese).

[25] 黄承逵. 纤维混凝土结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

HUANG Chengkui. Fiber-reinforced concrete structure[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004(in Chinese).

[26] 李艺, 赵文. 混杂纤维混凝土阻裂增韧及耐久性能[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

LI Yi, ZHAO Wen. Crack resistance and toughness and durability of hybrid fiber concrete[M]. Beijing: Science Press, 2012(in Chinese).

[27] ROMUALDI J P, BATSON G B. Mechanics of crack arrest in concrete[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1963, 89(3): 147-168.