

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.170



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



BTRC 和 BRRC 加固混凝土梁的 抗冲击性能试验研究

吕杨¹, 张煜², 吴学乾¹, 王大永², 张永权¹, 张学杰^{1,3}

(1. 天津城建大学 天津市土木结构保护加固重点实验室, 天津 300384; 2. 中铁一局集团天津建设工程有限公司, 天津 300250; 3. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350)

摘要:采用落锤冲击试验机开展普通钢筋混凝土梁、玄武岩纤维网增强混凝土(BTRC)和玄武岩纤维筋(BRRC)加固梁的抗冲击性能试验研究,其中,采用未加固钢筋混凝土梁1根、不同面积BTRC和BRRC加固的钢筋混凝土梁各2根。通过分析失效破坏过程、冲击力时程曲线、支座反力时程曲线、位移时程曲线、冲击力-挠度曲线以及支座反力-挠度曲线,对BTRC和BRRC加固钢筋混凝土梁的抗冲击性能进行研究。结果表明,BTRC和BRRC加固层能有效提高试验梁的抗冲击承载力,减小试验梁的最大变形和残余变形;加固方式和配筋率/配网率对试验梁的最大变形和残余变形影响不明显;加固层中纤维网断裂和纤维筋锚固端脱粘会消耗锤头部分动能,使得加固梁的整体变形耗能占比低于普通钢筋混凝土梁。

关键词:玄武岩纤维网;玄武岩纤维筋;钢筋混凝土梁;落锤冲击;加固

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2023)01-0025-10

Anti-explosion and protection of engineering structures

LV Yang¹, ZHANG Yu², WU Xueqian¹, WANG Dayong², ZHANG Yongquan¹,
ZHANG Xuejie^{1,3}

(1. Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, P. R. China; 2. Tianjin Construction Engineering Co., Ltd. of China Railway First Engineering Group, Tianjin 300250, P. R. China; 3. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry Education, Tianjin University, Tianjin 300456, P. R. China)

Abstract: Drop hammer test was carried out on five reinforced concrete (RC) beams which include one as-built RC beam, two reinforced with basalt fiber rebar (BRRC) and two reinforced basalt textile (BTRC) by using drop hammer impact testing machine. The damage process, impact force time-history curve, reaction force

收稿日期: 2021-04-17

基金项目: 天津市教委科研计划(20140909)

作者简介: 吕杨(1984-),男,博士,教授,主要从事结构工程与防灾减灾研究, E-mail: lvyangtju@163.com。

张学杰(通信作者),男,博士, E-mail: xuejie_zhang@tju.edu.cn。

Received: 2021-04-17

Foundation item: Scientific Research Projects of Tianjin Municipal Education Commission (No. 20140909)

Author brief: LV Yang (1984-), PhD, professor, main research interests: structural engineering and disaster prevention and reduction, E-mail: lvyangtju@163.com.

ZHANG Xuejie (corresponding author), PhD, E-mail: xuejie_zhang@tju.edu.cn.

time-history curve, deformation time-history curve, impact force-deformation curve and reaction force-deformation curve were analyzed to study the impact characteristics of the RC beams reinforced with BTRC or BRRC. Results indicate that BTRC and BRRC can significantly increase the impact load-carrying capacity, thus decreasing the peak deformation and residual deformation of the beams. The reinforcement layouts and FRP amount have marginal influence on the deformation of the beams. Part of the kinematic energy of the drop hammer can be dissipated due to the fracture of fiber net or debonding of anchor end of fiber reinforcement, resulting in lower internal energy of the reinforced beams in comparison with that of the as-built RC beam.

Keywords: basalt textile; basalt rebar; reinforced concrete beam; drop hammer impact; reinforcement

车船撞击、燃油气爆炸等事故频发,而现有混凝土结构在设计时很少考虑冲击荷载的作用,造成部分重要建筑结构抗冲击和抗倒塌性能不足。已有研究表明,纤维增强复合材料加固技术能显著提升混凝土结构的抗冲击性能。针对梁类构件的静力加固方法主要有弯曲和剪切两类,相应的加固技术已出版了设计规范或指南^[1-3]。动力荷载作用下钢筋混凝土梁采用FRP的加固技术主要集中在试验研究阶段。学者们开展了大量落锤冲击试验,如Cho等^[4]完成了7根采用碳纤维(CFRP)和钢纤维加固钢筋混凝土梁的落锤冲击试验,结果表明,加固后的试验梁弯曲承载力显著提高。Kantar等^[5]完成了10根弯曲加固梁的落锤冲击试验,结果表明,CFRP加固方法可以防止梁发生断裂破坏,CFRP加固高强度混凝土梁比CFRP加固普通混凝土梁具有更强的能量吸收性能。Goldston等^[6]采用玻璃纤维增强复合材料(GFRP)加固钢筋混凝土梁,并对加固后的梁进行落锤冲击试验,结果表明,GFRP筋加固梁的抗冲击力主要由惯性力控制,在落锤冲击作用下,加固梁发生明显的剪切破坏。Pham等^[7]开展了13根CFRP加固钢筋混凝土梁的落锤冲击试验,将梁底部处理成一定的曲面,进而有效缓解了U型条带的应力集中。王兴国等^[8]采用外贴芳纶纤维增强复合材料(AFRP)加固钢筋混凝土梁,落锤冲击试验结果表明,采用AFRP加固会发生端部剥离和跨中断裂。廖维张等^[9]采用高强钢绞线网-聚合物改性水泥砂浆加固钢筋混凝土梁并开展了落锤冲击试验。此外,部分学者也开展了表层嵌贴FRP筋加固钢筋混凝土梁的静态抗弯承载力研究。杨勇等^[10-11]分别研究了表层嵌贴CFRP筋加固钢筋混凝土简支梁和悬臂梁的受力性能,试验结果表明,表层嵌贴CFRP筋可以有效提高钢筋混凝土梁的受弯承载力。夏立鹏等^[12]采用CFRP、BFRP、GFRP筋材对钢筋混凝土梁进行表层嵌贴加固并开展了

静力加载试验,结果表明,构件的受弯承载力、刚度和抗裂性能均有明显改善。丁亚红等^[13]进行了内嵌CFRP筋加固钢筋混凝土梁的试验并进行了可靠性研究。毕继红等^[14]通过数值模拟,研究了CFRP加固钢筋混凝土梁的受力性能,探讨了增大CFRP筋直径和提高CFRP筋与混凝土的粘接性能对梁受力性能的影响。

纤维网增强复合材料(TRC)是一种有效的梁类构件抗弯加固材料^[15]。Peled^[16]指出,使用TRC加固混凝土结构不仅可有效提高钢筋混凝土构件的承载力和刚度,其精细混凝土基体还可填补构件表面已产生的裂缝,提高结构的耐久性,减少结构表面缺陷。徐世焯等^[17]研究了静载作用下TRC加固钢筋混凝土抗弯构件的界面性能和抗弯性能。荀勇等^[18]以TRC加固层锚固方式和加固层织物层数为变量,研究了TRC加固钢筋混凝土梁的抗弯性能,结果表明,当加固层配网率提高到一定程度后,加固梁承载力由加固层与钢筋混凝土梁间局部粘破坏程度决定。

分析可知,当前采用FRP对钢筋混凝土梁进行受弯加固主要集中在梁底粘贴纤维布的方式,采用纤维筋,特别是玄武岩纤维筋(BRRC)加固钢筋混凝土梁以提升受弯冲击性能的研究还很少;在TRC加固钢筋混凝土结构的研究和应用中主要为静态荷载作用,关于TRC加固钢筋混凝土结构在冲击荷载作用下的力学性能研究较少,采用玄武岩纤维网增强复合材料(BTRC)加固钢筋混凝土梁抗冲击性能的研究还未见报道。为了弥补BTRC和BRRC加固钢筋混凝土抗冲击性能研究方面的空白,笔者开展了普通钢筋混凝土梁、不同面积BTRC和BRRC加固梁的冲击加载试验研究。通过分析构件失效破坏过程、冲击力时程曲线、支座反力时程曲线、位移时程曲线、冲击力-挠度曲线及支座反力-挠度曲线,研究BTRC和BRRC加固钢筋混凝土梁的

破坏机理和不同加固方式对其抗冲击性能的影响;通过控制纤维网和纤维筋使用量,使两种加固方式中FRP使用面积基本相同,进而比较两种加固方式的优劣。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验设计了5根配筋相同的钢筋混凝土适筋梁。其中,不加固的控制梁1根,BTRC加固梁2根,BRRC加固梁2根。试验梁总长1.6 m,净跨1.2 m,截面尺寸150 mm×250 mm,剪跨比2.40,其截面尺寸及配筋详见图1。4根加固梁仅在梁底预留的1100 mm×150 mm×10 mm凹槽内铺设加固层。控制梁和加固梁的混凝土保护层厚度均为25 mm,其中,加固梁有10 mm厚的BTRC和BRRC加固层。为加强BTRC和BRRC加固层与试验梁的粘结性能,对预留的凹槽内表面进行凿毛处理,凿毛厚度约为2.5~3.2 mm。

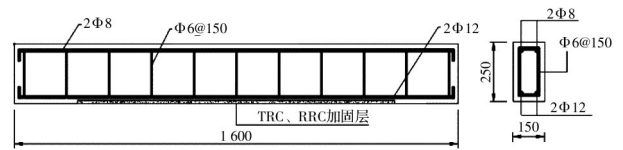


图 1 试件尺寸及配筋图

Fig. 1 Diagram of specimen size and reinforcement

BTRC加固层采用层压法,首先浇筑3 mm厚的底层精细混凝土;随后立刻将玄武岩纤维网覆盖至精细混凝土表面,浇筑4 mm厚的层间精细混凝土,当纤维网为3层时,层间精细混凝土的厚度为2 mm;将第2层纤维网覆盖到层间精细混凝土上表面,最后在在最外层覆盖3 mm的精细混凝土并抹平。

BRRC加固层采用植筋法,首先使用电锤在加固层凹槽两侧打深15 mm、直径10 mm的锚固孔并用高压水枪清孔;随后利用植筋胶将纤维筋与混凝土进行粘接;植筋胶固化后浇筑精细混凝土并抹平,养护28 d。试验梁编号及工况设置见表1。

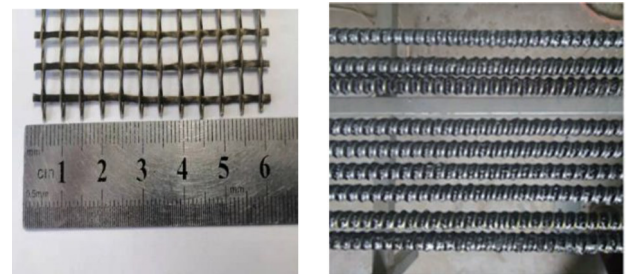
表 1 试验梁基本信息

Table 1 Basic information of test beams

试件编号	加固形式	纤维层/根	FRP面积/mm ²	加固配网筋率/%	实测冲击速度/(m·s ⁻¹)
D0	无	0	0	0	4.35
DT2	纤维网	2	53.52	3.57	4.36
DT3	纤维网	3	80.28	5.36	4.35
DR2	纤维筋	2	56.52	3.77	4.36
DR3	纤维筋	3	84.78	5.65	4.33

1.2 试验材料

纵筋和箍筋均采用HRB400级钢筋,BRRC加固层采用直径为6 mm的玄武岩纤维筋,钢筋和玄武岩筋的力学性能见表2。图2所示为玄武岩纤维网和玄武岩纤维筋,其中,BTRC加固层玄武岩纤维网网格尺寸为5 mm×5 mm,单位面积质量为200 g/m²,经环氧树脂浸渍后用于BTRC加固层,玄武岩纤维网力学性能见表3。



(a)玄武岩纤维网

(b)玄武岩纤维筋

图 2 玄武岩纤维织物

Fig. 2 Basalt fiber fabric

表 2 钢筋和玄武岩筋的力学性能

Table 2 Mechanical property of steel bars and basalt bars

钢筋类型	直径/mm	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	断裂伸长率/%
受拉纵筋	12	201	487	628	15.6
受压纵筋	8	200	466	605	13.2
箍筋	6	200	452	580	13.2
玄武岩筋	6	42		860	2.1

表 3 玄武岩纤维编织网力学性能

Table 3 Mechanical property of basalt fiber textile

试件类型	截面面积/mm ²	弹性模量/GPa	断裂强度/MPa	断裂应变/%
玄武岩纤维网	4.46	26.32	779.62	2.16

试验梁混凝土立方体抗压强度平均值为 40.01 MPa,加固层精细混凝土平均抗压强度为 50.60 MPa,精细混凝土的配合比为水泥:粉煤灰:硅灰:水:粗砂:细砂:减水剂=1:0.2:0.05:0.42:0.61:1.24:0.018 8。为保证精细混凝土能够顺利通过 5 mm 纤维网格,骨料选用 40 目(0~0.6 mm)和 70 目(0.6~1.2 mm)的人造石英砂,粗砂和细砂按照 2:1 的质量比混合,不添加任何粗骨料。

1.3 试验装置和加载方式

冲击试验采用跨中单次集中加载的方式,边界条件为两端简支,冲击高度为 1 m,锤重 630 kg,采用直径 100 mm 的圆柱形锤头。试验过程中,通过锤头与锤体配重间的力传感器测量冲击力时程,冲击反力通过布置在支座处的力传感器测量。因试验梁跨中区域局部变形较大,位移传感器分别布置在距跨中 0、150、350 mm 处。试验数据采样频率为 10 kHz。试验过程中使用 Photron SA-Z 高速摄像机记录试验梁裂缝发展的过程及破坏形态,摄像机拍摄速度与动态数据采集系统相同,为 10 000 fps,分辨率为 1 024×1 024。各测点布置见图 3。

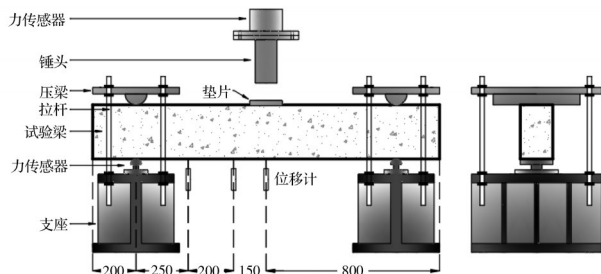


图 3 落锤试验机示意图

Fig. 3 Schematic diagram of drop hammer testing machine

2 试验结果

2.1 破坏过程及破坏形态

2.1.1 试验梁 D0 控制梁 D0 的冲击破坏过程如图 4 所示。在锤梁接触的一刻,混凝土立即开裂,受拉区混凝土随即退出工作;在 1 ms 时,跨中 2 条竖向裂缝长度约为 20 mm;在 3 ms 时,冲击点下方出现 3 条水平细小裂缝;在 6 ms 时,水平裂缝向斜下方发展并与由下向上发展的斜裂缝贯通,新的斜裂缝和竖向裂缝陆续出现;在 8 ms 时,跨中弯曲裂缝和剪跨区的斜裂缝均发展至梁顶,受压区混凝土局部压碎;在 18 ms 时,受压区混凝土被完全压碎,冲击点和受拉区的混凝土碎块开始掉落,试验梁发生

弯曲破坏。此后无新增裂缝产生,已产生的裂缝宽度不断加大,直至 23.3 ms 时,试验梁跨中挠度达到 56.56 mm。此后锤头和试验梁开始向上回弹。

D0 梁破坏时受拉纵筋屈服,受压区混凝土在冲击力和弯矩的共同作用下被压碎,试验梁发生弯曲破坏。裂缝宽度较大,最宽处达到 9.6 mm;裂缝数量较多,斜裂缝已经由支座处贯穿至梁顶,由于配有箍筋,未发生剪切破坏。受拉区混凝土剥离量很大,底部纵筋裸露在外。D0 破坏形态见图 5。

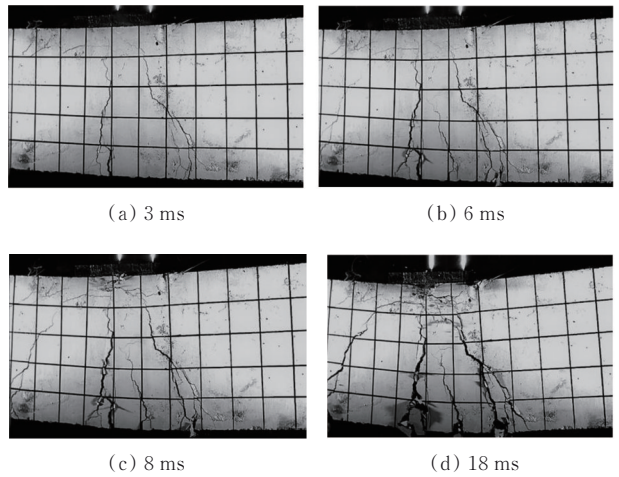


图 4 D0 冲击破坏过程

Fig. 4 Impact damage process of beam D0

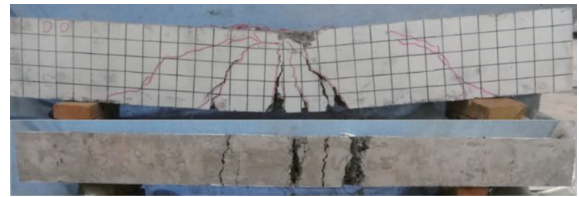


图 5 D0 破坏形态

Fig. 5 Damage mode of beam D0

2.1.2 BTRC 加固梁 加固梁 DT2 的冲击破坏过程如图 6 所示。锤头接触混凝土梁时,BTRC 加固层和混凝土梁都发生开裂;在 1 ms 时,受拉区出现的 3 条竖向弯曲,裂缝长度达 18 mm;此后的 2 ms 内,梁底竖向裂缝继续向上发展,梁顶冲击点处的混凝土局部压碎,混凝土梁裂缝宽度明显大于 BTRC 加固层;在 3.3 ms 时,BTRC 层被拉断;在 6 ms 时,竖向弯曲裂缝贯穿到梁顶,斜裂缝开始出现;在 13 ms 时,跨中又出现了一条新的竖向裂缝,与先前出现的 2 条弯曲裂缝围成锥形;在 18 ms 时,梁顶混凝土被压碎,试验梁发生弯曲破坏。此后无新的裂缝产生,已产生的裂缝宽度逐渐增大,直至 21.0

ms, 试验梁跨中位移达到 43.4 mm; 随后试验梁开始回弹, 裂缝的宽度略有收缩。试验结束时, 粘结区域没有出现水平裂缝。

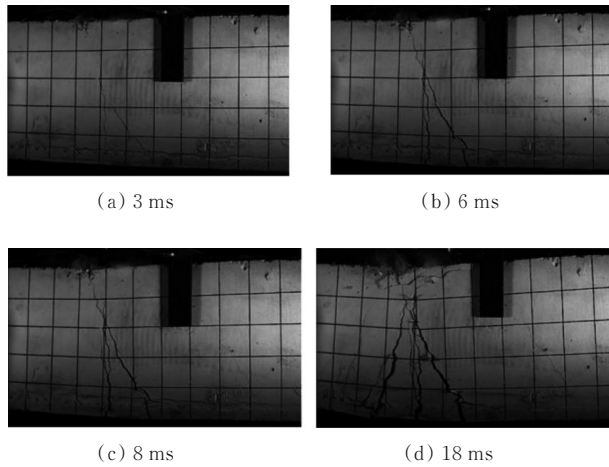


图 6 DT2冲击破坏过程

Fig. 6 Impact damage process of beam DT2

加固梁 DT3 的冲击破坏过程如图 7 所示。锤梁接触的瞬间, 梁体马上产生裂缝, 但 3 层纤维网的 BTRC 加固层尚未开裂; 在 1 ms 时, 梁体已经产生 3 条弯曲裂缝, 其中 2 条裂缝围成了一个高度约 17 mm 的锥形, 此时 BTRC 加固层仍未开裂。在 2.4 ms 时, 跨中位置的 BTRC 加固层开裂并随即断裂; 3 ms 时, 跨中加固层与旧混凝土的粘结性能开始失效, 在界面处出现水平向的裂缝; 在 6 ms 时, 竖向裂缝和斜裂缝贯穿至梁顶, 冲击点附近的混凝土压碎; 在 8 ms 时顶部混凝土被冲碎; 在 18 ms 时, 跨中加固层完全脱粘, 少量剥离的混凝土开始掉落。此后试验梁无新裂缝产生, 已有的裂缝宽度继续增加; 在 23.8 ms 时, 试验梁挠度达到 40.75 mm; 随后试验梁和锤头开始回弹, 部分裂缝开始回缩。

在冲击荷载作用下, BTRC 加固梁的 BTRC 加固层在锤梁接触时开裂, 随后受拉纵筋屈服, 试验梁受压区混凝土在冲击力和弯矩的共同作用下被压碎, 试验梁发生弯曲破坏。破坏时裂缝分布在跨中 300 mm 左右的范围内。因配网率高, DT3 梁底仅有 1 条主裂缝, 宽度为 6.8 mm; 由于配网率低, DT2 梁底有 3 条裂缝, 最宽为 8.6 mm。BTRC 加固梁底部混凝土剥离量小于 D0, 没有大块混凝土掉落, 冲击荷载作用后加固梁的整体性较好。加固层与旧混凝土仅在加固层开裂处出现水平裂缝, 未出现大面积脱粘, 两者界面粘结仍然有效。由此可见, 在冲击荷载作用下, BTRC 加固层对钢筋混凝土

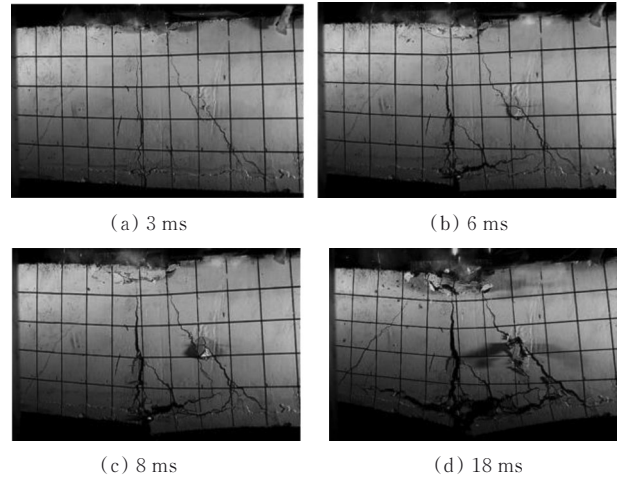


图 7 DT3冲击破坏过程

Fig. 7 Impact damage process of beam DT3

梁裂缝的发展起到了良好的抑制作用。BTRC 加固梁破坏形态见图 8。

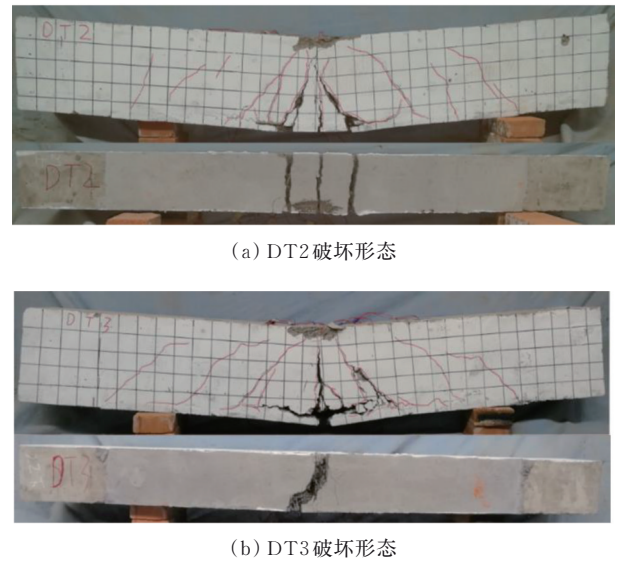


图 8 BTRC 加固试验梁破坏形态

Fig. 8 Damage mode of the BTRC reinforced beams

2.1.3 BRRC 加固梁 加固梁 DR2 的冲击破坏过程如图 9 所示。在锤头接触试验梁的瞬间, 加固层和 RC 梁同时开裂; 在 1 ms 时, 试验梁已经产生的 3 条裂缝中, 2 条 45° 斜裂缝形成了一个高度约 15 mm 的锥形。在 3 ms 时, 锥形内新产生了 2 条弯曲裂缝, 斜裂缝继续向冲击点发展。随后的 2 ms 内, 裂缝的宽度迅速增加; 到 8 ms 时, 冲击点处混凝土局部压碎; 在 11 ms 时, 纤维筋脱粘, 加固层精细混凝土开始剥离, 之后无新裂缝产生, 已有的裂缝继续向冲击点延伸, 宽度不断增加; 在 18 ms 时, 混凝土

梁受压区被压碎,加固层精细混凝土开始大面积剥离;随后试验梁裂缝宽度和挠度不断增加,直至 22.6 ms 时,跨中挠度达到 43.76 mm。锤梁开始回弹,裂缝开始回缩。

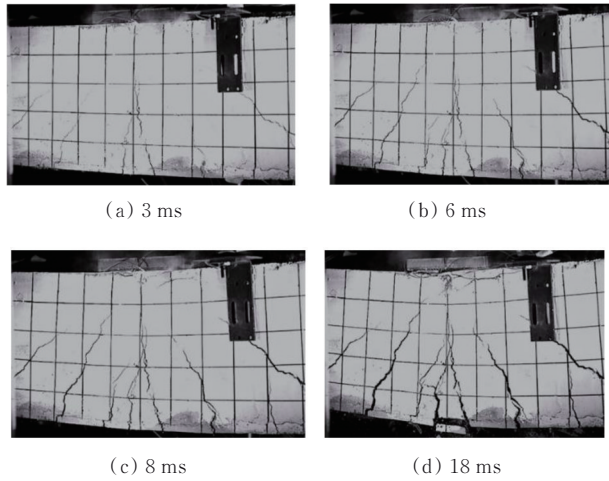


图 9 DR2 冲击破坏过程

Fig. 9 Impact damage process of beam DR2

加固梁 DR3 的冲击破坏过程如图 10 所示。锤头和试验梁接触的瞬间,加固层和试验梁同时开裂;在 1 ms 时,试验梁已经产生的 3 条裂缝中有 2 条 45° 的斜裂缝形成了一个高度约 22 mm 的锥形。在 3 ms 时,跨中新出现了一条竖向裂缝,其余裂缝继续向冲击点发展;在 6 ms 时,竖向裂缝和弯曲裂缝均贯穿到梁顶,此后无新的裂缝产生,已有裂缝的宽度不断增加;2 ms 后,冲击点附近的混凝土开裂;在 13 ms 时,玄武岩筋脱粘,加固层精细混凝土剥离;在 18 ms 时,试验梁受压区混凝土被压碎,跨中位置旧混凝土随着精细混凝土一起掉落;在 22.6 ms 时,跨中挠度达到 43.74 mm;试验梁和锤头开始向上运动,裂缝开始回缩。

在冲击荷载的作用下,BRRC 加固梁在与锤梁接触时,受拉区混凝土和加固层精细混凝土立即退出工作,随后底部受拉纵筋屈服、纤维筋脱粘,底部精细混凝土保护层剥离,受压区混凝土在冲击力和弯矩的共同作用下被压碎,试验梁发生弯曲破坏。BRRC 加固梁破坏时裂缝宽度比控制梁小,但大于 BTRC 加固梁。DR2 仅在跨中锥形区域内存在裂缝,锥形区域外无剪切裂缝产生,其最大缝宽为 6.6 mm。跨中加固层精细混凝土几乎全部剥离,粘结性能完全失效。在所有加固梁中,DR3 破坏最为严重。梁底的普通混凝土和加固层精细混凝土大量剥离,支座处产生的斜裂缝已贯穿至梁顶,由于配

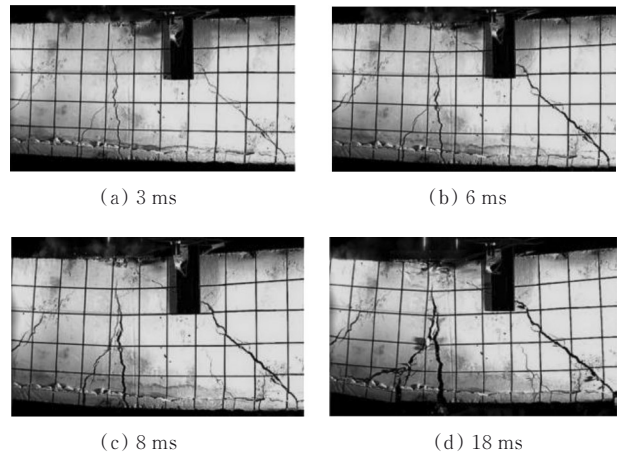


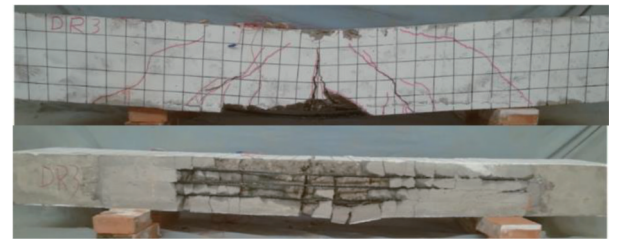
图 10 DR3 破坏过程

Fig. 10 Impact damage process of beam DR3

有箍筋,未发生剪切破坏。由于底部大块混凝土剥离,最大缝宽已无法统计。在冲击荷载作用下,BRRC 加固梁中加固层精细混凝土和玄武岩筋的粘结性能全部失效。由此可见,在冲击荷载作用下,试验梁与加固层间、纤维筋与精细混凝土保护层间的粘结性能要求更高。BRRC 加固梁破坏形态见图 11。



(a) DR2 破坏形态



(b) DR3 破坏形态

图 11 BRRC 加固梁破坏形态

Fig. 11 Damage mode of the BRRC reinforced beams

由前述分析可知,各试验梁均发生弯曲破坏,裂缝主要集中在跨中区域,以冲击点为中心呈放射状分布。BRRC 加固梁底部混凝土大量剥落,底部纵筋已完全裸露在外。除 DR2 外,各试验梁在锥形区域外还对称分布着 45° 斜裂缝,裂缝宽度较小。梁

顶冲击点附近的混凝土被压碎,但剥离量很小,混凝土仍能保持原状。BTRC加固梁在加固层断裂处存在因界面粘结性能失效引起的水平裂缝,梁体裂缝数量、宽度和底部混凝土剥离程度均小于D0和BRRC加固梁。

在与锤头接触的一瞬间,所有试验梁受拉区混凝土即开裂,随后梁底裂缝迅速向上发展,中性轴快速上移,梁顶混凝土在冲击力和弯矩的共同作用下被压碎。DT3加固层开裂时间最晚,在冲击荷载作用到2.4 ms后才开裂,加固层断裂前DT3的裂缝宽度得到了有效限制。在冲击力的主波峰时段内,试验梁仅在跨中区域出现裂缝,随后由跨中向支座端出现新的斜裂缝。当试验梁达到最大挠度后,梁和锤头开始回弹,此后裂缝宽度略有收缩。各试验梁的混凝土剥离量相差很大,由大到小为:DR3>D0>DR2>DT2>DT3。

2.2 冲击力和支座反力时程曲线

在落锤冲击试验中,冲击力和支座反力的时程曲线分别通过锤头顶部和试验梁底部的力传感器获得,图12给出了各试验梁前50 ms的冲击力和支座反力时程曲线,其中,支座反力为两支座力传感器之和。从图12可知,各试验梁具有相似的冲击力与支座反力时程曲线。冲击力时程曲线由若干正弦半波组成,主波峰持续时间短、峰值大,随后的次波峰值逐渐减小,持续时间长。冲击力在锤梁接触的0.4 ms后即达到了主波峰的峰值,此时试验梁刚刚开始变形,试验梁变形的速度约等于落锤向下运动的速度。在随后的0.6 ms内,试验梁在冲击力作用下向下加速变形,锤头在冲击反力作用下减速下降,锤梁第1次分离,冲击力下降为零。随后试验梁在支座反力作用下减速向下变形,锤头在自重作用下重新向下做自由落体运动,随即锤梁发生第2次冲击,并出现了第2个冲击力波峰。当试验梁和锤头的速度再次达到一致时,锤头的冲击力第2次降低为零,第2个波峰的峰值力约为第1个峰值力的30%~47%,随后锤梁发生多次碰撞。当试验梁达到最大位移后,试验梁和锤头开始加速一起向上反弹,冲击荷载作用约40 ms后,锤梁彻底分离,冲击力和支座反力下降为零。

由于应力波的传播效应,各试验梁的支座反力均迟于冲击力,延迟时间约为0.5~0.7 ms,支座到冲击点的水平距离为0.6 m,近似得到应力波传播

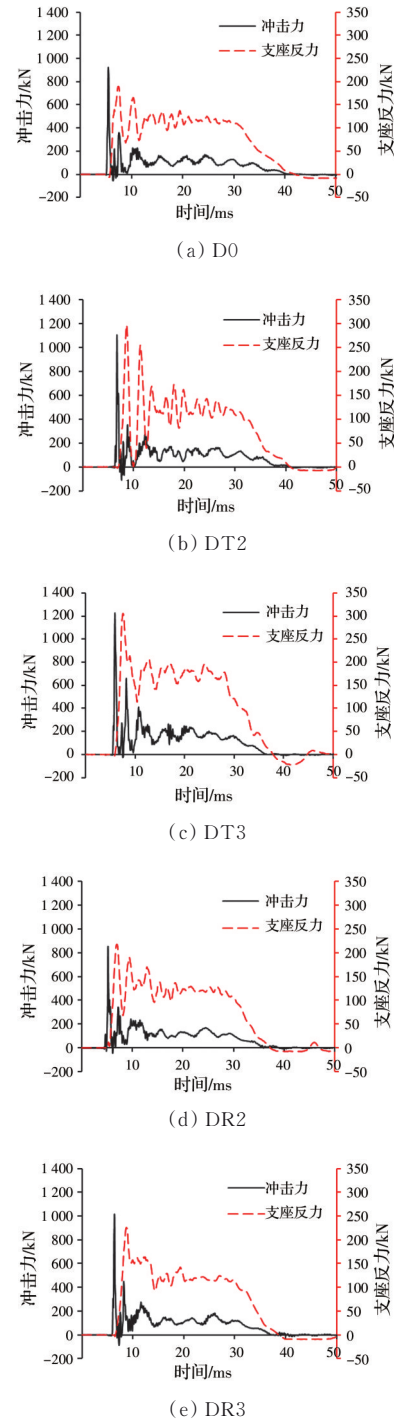


图 12 试验梁冲击力和支座反力时程曲线

Fig. 12 Impact force and reaction force time-history curves for beams

速度为1 000 m/s。Pham等^[7]、Isaac^[19]及赵灵雨^[20]实测的剪切波速分别为916、750、1 163 m/s,理论波速约为3 605 m/s,笔者的实测值与已有测试结果相近,但远小于理论值。其原因主要是锤梁接触的瞬间混凝土即产生了裂缝和损伤,降低了应力波的传播速度。

2.3 冲击力-跨中挠度曲线和支座反力-跨中挠度曲线

各试验梁的冲击力-跨中挠度曲线和支座反力-跨中挠度曲线如图 13 所示。由图 13 可知,冲击力达到峰值时,跨中挠度约等于 0;第 1 次冲击力后,试验梁的变形仍很小,试验梁通过惯性效应抵抗落锤的冲击力并向下加速运动,此时应力波尚未传递至支座处,对试验梁的整体变形影响很小。控制梁 D0 的跨中峰值挠度和残余挠度最大,分别达到 56.56、50.23 mm;各加固梁的峰值挠度均在 43 mm 左右,残余挠度均在 37 mm 左右。各试验梁挠度的弹性恢复均在 6 mm 左右,说明控制梁和加固梁弹性恢复变形相近。

为了去除试验梁惯性力的影响,采用构件整体变形耗能,即支座反力-跨中挠度曲线与坐标轴所

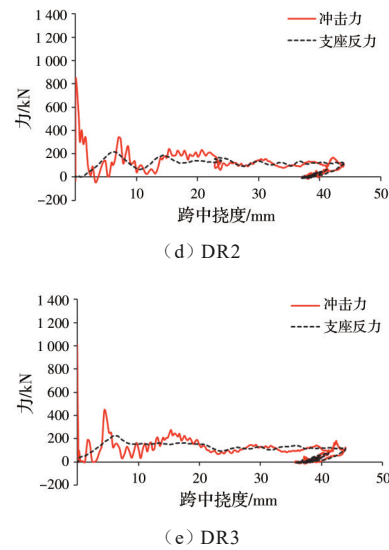
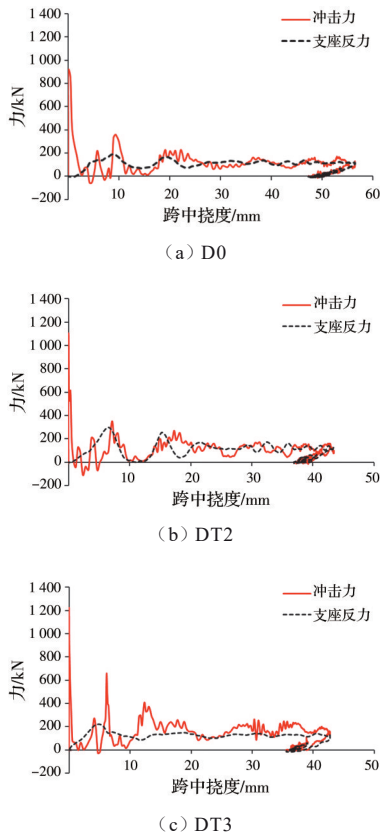


图 13 力-跨中挠度曲线

Fig. 13 Force-midspan deflection for beams D0, DT2, DT3, DR2 and DR3

围面积来评估梁的抗冲击性能^[21]。如表 4 所示,梁 D0、DT2、DT3、DR2 以及 DR3 变形能分别为 5.72、4.79、5.08、5.11、5.33 kJ,落锤冲击动能约为 5.96 kJ,锤头动能转化为梁整体变形内能的转化率分别为 95.96%、80.04%、85.29%、85.37% 和 90.25%。控制梁的整体变形耗能优于加固梁,主要原因是加固梁的抗弯刚度较大,梁的整体变形小;同时,加固层纤维网的断裂和纤维筋粘结失效也消耗了部分能量,裂缝越多,加固层撕裂越大,其对应的试验梁变形能的转化率越低。

2.4 响应最大值

各试件在冲击荷载作用下的冲击力、支座反力、跨中最大挠度、残余挠度和耗能见表 4。从表 4 可以看出,加固方式和配网率/配筋率对加固梁的跨中最大挠度和残余挠度无显著影响,加固梁的跨中最大挠度和残余挠度较控制梁减小了 24%。与控制梁相比,DT2、DT3 加固梁的冲击力分别增加 20.3% 和 33.4%,支座反力分别增加 56.77% 和

表 4 冲击荷载作用下试验梁最大响应

Table 4 Peak responses of the beams under impact loading

试件编号	冲击力/kN	支座反力/kN	跨中最大挠度/mm	残余挠度/mm	整体耗能/kJ	破坏形态
D0	916.74	189.79	56.43	49.24	5.72	弯曲破坏
DT2	1102.72	297.54	43.40	38.07	4.79	BTRC 层断裂
DT3	1222.97	305.60	42.72	36.68	5.08	BTRC 层断裂
DR2	936.46	218.01	43.80	37.61	5.11	玄武岩筋脱粘
DR3	1007.62	225.76	43.79	37.51	5.33	玄武岩筋脱粘

61.4%;DR2和DR3加固梁的冲击力分别增加2.2%和9.9%,支座反力分别增加14.9%和19.0%。通过对比分析可以看出,加固方式相同,试验梁的抗冲击承载力和整体耗能随配筋率或配网率的提高而增大;BTRC加固配网率与BTRC加固配筋率相同时,BTRC加固梁的抗冲击承载力和耗能能力优于BTRC加固梁。整体来讲,在冲击荷载作用下,BTRC加固梁的力学性能优于BTRC加固梁。

3 结论

进行了5根钢筋混凝土梁的落锤冲击试验,其中,普通钢筋混凝土梁1根、玄武岩纤维网和玄武岩筋加固的钢筋混凝土梁各2根,通过分析试验梁破坏形态、冲击力、支座反力以及梁变形等数据,得出以下结论:

1)在冲击荷载作用下,试验梁均发生弯曲破坏,BTRC和BTRC加固能显著增强钢筋混凝土梁的抗冲击承载力。混凝土表面凿毛处理可保证BTRC加固层与混凝土梁之间的粘结性能,进而有效限制裂缝宽度发展和混凝土剥落。采用BTRC加固时,玄武岩纤维筋全部脱粘,无法有效抑制混凝土裂缝宽度发展和剥离破坏。

2)冲击力的主波峰持续时间很短,对梁的整体变形影响很小;加固方式相同时,冲击力峰值随配网率/配筋率的增大而增大;BTRC加固配网率与BTRC加固配筋率相同时,BTRC加固梁的抗冲击承载力和耗能能力优于BTRC加固梁。

3)试验梁跨中位移和支座反力均滞后于冲击力,三者出现的先后顺序为:冲击力、跨中位移和支座反力。

4)加固层可以有效提高试验梁的抗冲击性能,减小试验梁的峰值挠度和残余挠度;BTRC和BTRC两种加固方式对试验梁的峰值挠度和残余挠度影响很小。

5)加固梁的变形耗能占比低于控制梁,加固层中纤维网断裂和纤维筋锚固端脱粘消耗了锤头部分动能,减小了试验梁的变形耗能。

参考文献

[1] 混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
Design code for strengthening concrete structure:GB 50367-2013[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2013.(in Chinese)

[2] 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范:GB 50608—2010[S].北京:中国计划出版社,2011.
Technical code for infrastructure application of FRP composites:GB 50608-2010[S].Beijing:China Planning Press,2011.(in Chinese)

[3] Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures:Committee A.440.2R-17[M].American Concrete Institute,2017.

[4] CHO S H, MIN K H, KIM Y J, et al. Impact resistance evaluation of RC beams strengthened with carbon FRP sheet and steel fiber[J].Journal of the Korea Concrete Institute,2010,22(5):719-725.

[5] KANTAR E, ANIL O. Low velocity impact behavior of concrete beam strengthened with CFRP strip[J].Steel & Composite Structures,2012,12(3):207-230.

[6] GOLDSTON M, REMENNIKOV A, SHEIKH M N. Experimental investigation of the behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading[J].Engineering Structures,2016,113:220-232.

[7] PHAM T M, HAO H. Impact behavior of FRP-strengthened RC beams without stirrups[J].Journal of Composites for Construction,2016,20(4):04016011.

[8] 王兴国,朱坤佳,栗桥祐介.外粘AFRP布加固RC梁冲击试验分析[J].铁道学报,2015,37(4):111-115.
WANG X G, ZHU K J, KURIHASHI Y. Impact damage test of RC beams strengthened with externally bonded AFRP sheet[J].Journal of the China Railway Society,2015,37(4):111-115.(in Chinese)

[9] 廖维张,李森,王波,等.高强钢绞线网-聚合物改性水泥砂浆加固RC梁的抗冲击性能模拟分析[J].振动与冲击,2017,36(6):63-74.
LIAO W Z, LI M, WANG B, et al. Numerical simulation of impact behavior of RC beams strengthened with high strength steel wire mesh and polymer mortar[J].Journal of Vibration and Shock,2017,36(6):63-74.(in Chinese)

[10] 杨勇,谢标云,周丕健.表层嵌贴碳纤维筋加固钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2010,31(Sup2):243-248.
YANG Y, XIE B Y, ZHOU P J. Experimental study on mechanical behavior of reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted CFRP rods[J].Journal of Building Structures,2010,31(Sup2):243-248.(in Chinese)

[11] 杨勇,谢标云,聂建国,等.表层嵌贴碳纤维筋加固钢筋混凝土梁受力性能试验研究[J].工程力学,2009,26(3):106-112.

- YANG Y, XIE B Y, NIE J G, et al. Experiment study on mechanical behavior of reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted (NSM) CFRP rods [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(3): 106-112. (in Chinese)
- [12] 夏立鹏, 郑愚, 蒋良圣, 等. 表层嵌贴FRP筋材加固钢筋混凝土梁受力性能研究[J]. *建筑结构*, 2017, 47(21): 90-95.
- XIA L P, ZHENG Y, JIANG L S, et al. Study of mechanical behavior of reinforced concrete beams strengthened with NSM FRP bars [J]. *Building Structure*, 2017, 47(21): 90-95. (in Chinese)
- [13] 丁亚红, 郝慧敏. 内嵌碳纤维筋加固钢筋混凝土梁可靠性研究[J]. *工业建筑*, 2012, 42(11): 140-144.
- DING Y H, HAO H M. Reliability analysis of RC concrete beams strengthened with NSM CFRP tendons [J]. *Industrial Construction*, 2012, 42(11): 140-144. (in Chinese)
- [14] 毕继红, 杨申, 关键, 等. 碳纤维筋加固钢筋混凝土梁基本力学性能的三维非线性分析[J]. *建筑结构*, 2015, 45(16): 101-106.
- BI J H, YANG S, GUAN J, et al. Three-dimensional nonlinear analysis of basic mechanical properties of reinforced concrete beams strengthened by carbon fiber reinforced polymer bars [J]. *Building Structure*, 2015, 45(16): 101-106. (in Chinese)
- [15] 艾珊霞, 尹世平, 徐世焯. 纤维编织网增强混凝土的研究进展及应用[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(1): 27-40.
- AI S X, YIN S P, XU S L. A review on the development of research and application of textile reinforced concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(1): 27-40. (in Chinese)
- [16] PELED A. Confinement of damaged and nondamaged structural concrete with FRP and TRC Sleeves [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2007, 11(5): 514-522.
- [17] 徐世焯, 尹世平, 蔡新华. 纤维编织网增强混凝土加固钢筋混凝土梁受弯性能研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(4): 23-34.
- XU S L, YIN S P, CAI X H. Investigation on the flexural behavior of reinforced concrete beam strengthened with textile-reinforced concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(4): 23-34. (in Chinese)
- [18] 荀勇, 支正东, 张勤. 织物增强混凝土薄板加固钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(3): 70-76.
- XUN Y, ZHI Z D, ZHANG Q. Experimental research on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with textile reinforced concrete sheets [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(3): 70-76. (in Chinese)
- [19] ISAAC P M. Effects of extreme impulsive loads on RC structures with a view to strengthening [D]. Bath: University of Bath, 2014.
- [20] 赵灵雨. 冲击荷载下CFRP加固无腹筋混凝土梁动态抗剪性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- ZHAO L Y. Experimental study on impact behavior of RC beams without stirrups strengthened with CFRP sheets under shear load [D]. Changsha: Hunan University, 2015. (in Chinese)
- [21] KISHI N, NATSUOKA K G. Experimental study on ultimate strength of flexural-failure type RC beam under impact loading [C]//Transaction of 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Washington DC, 2001: 1525-1532.

(编辑 黄廷)