

两端简支 GFRP 管-钢骨混凝土构件 抗侧向冲击性能有限元分析

张海霞,杨帆,鞠士龙,陈欢

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究两端简支 GFRP 管-钢骨混凝土构件的抗侧向冲击性能,为该类构件的工程应用提供参考。**方法** 建立并验证侧向冲击荷载作用下两端简支 GFRP 管-钢骨混凝土构件有限元模型,分析了典型构件在侧向冲击荷载作用下的全过程、破坏形态、应力发展、相互作用力时程曲线和弯矩时程曲线等动态响应;研究了冲击能量、冲击冲量、钢材强度、GFRP 管厚度以及截面含钢率对构件抗冲击性能的影响。**结果** 随着冲击能量及冲量的增大,冲击持时和构件弯曲变形增大;提高钢材强度、GFRP 管厚度可以改善构件的抗冲击性能。**结论** GFRP 管对混凝土有较好的约束作用,构件在侧向冲击荷载作用下整体发生弯曲破坏,内部钢骨塑性变形发展充分,构件抗侧向冲击性能优越。

关键词 GFRP 管;钢骨混凝土;两端简支;抗侧向冲击性能;影响因素

中图分类号 TU391

文献标志码 A

引用格式:张海霞,杨帆,鞠士龙,等. 两端简支 GFRP 管-钢骨混凝土构件抗侧向冲击性能有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):59-69. (ZHANG Haixia, YANG Fan, JU Shilong, et al. Finite element analysis on lateral impact resistance of GFRP tube concrete-encased steel members with simple support at both ends[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2024,40(1):59-69.)

Finite Element Analysis on Lateral Impact Resistance of GFRP Tube Concrete-encased steel Members with Simple Support at Both Ends

ZHANG Haixia, YANG Fan, JU Shilong, CHEN Huan

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang China, 110168)

Abstract: The lateral impact resistance of GFRP tube concrete-encased steel member was studied to provide reference for the application of the members in engineering. The finite element model of GFRP tube concrete-encased steel member with simple support at both ends under lateral impact loading was established. Based on the verified model, the dynamic responses of typical member under lateral impact load, such as the whole process, failure mode, stress development, time history curve of interaction force and bending moment, were analyzed. Furthermore, the influence of impact

收稿日期:2022-12-06

基金项目:国家自然科学基金项目(52278196);国家自然科学基金重点项目(51938009)

作者简介:张海霞(1976—),女,教授,博士,博士研究生导师,主要从事 FRP 组合结构等方面研究。

energy, impact impulse, steel strength, thickness of GFRP tube and steel ratio on the impact resistance behavior of the member were investigated. The results show that the impact force duration time and the bending deformation of the member increase with the increase of the impact energy and impact impulse. The impact resistance performance of the member can be improved by increasing the strength of steel and the thickness of GFRP tubes. GFRP tubes has a good restraint effect on concrete, and the overall bending failure occurs under the lateral impact load. The plastic deformation of the internal steel is fully developed, and the lateral impact resistance of the member is superior.

Key words: GFRP tube; concrete-encased steel; both ends simply supported; lateral impact resistance performance; influence factor

GFRP管-钢骨混凝土组合构件是由GFRP、混凝土和钢材等组成的能够协同工作的一种新型构件,具有承载能力高、耐腐蚀性强、施工便捷等优点,在结构工程领域具有广阔的应用前景^[1-2]。目前,对此种新型构件力学性能的研究主要集中在受压、受弯性能和抗震性能等方面^[3-7]。桁架桥等结构在服役期内不仅要承受静力荷载作用,还会遭受滚石和船只等冲击荷载作用,一旦结构遭受意外作用倒塌,会造成生命和财产的损失。因此,很多学者对FRP组合构件的抗冲击性能进行了研究。Y. Qasrawi等^[8]研究了FRP管混凝土构件在冲击荷载作用下的耗能性能。M. I. Alam等^[9]研究了FRP加固混凝土构件在横向冲击作用下的受力性能和失效模式。支旭东等^[10]研究了GFRP增强钢管构件的轴向抗冲击性能,并分析了其破坏模式。王蕊等^[11]研究了FRP层数对外贴FRP-混凝土-钢组合构件在冲击作用下侧向变形和破坏形态的影响。B. Shan等^[12]进行了FRP混凝土短方柱的轴向冲击试验研究,结果表明,构件在冲击作用下破坏模式受倒角半径的影响较大。翟国良等^[13]分析了FRP管厚度和冲击次数对FRP混凝土构件抗冲击性能的影响。王伟强等^[14]通过数值模拟研究了FRP-混凝土-钢组合柱在横向冲击荷载作用下的动力响应。

基于以上研究,笔者对两端简支GFRP管-钢骨混凝土构件在侧向冲击荷载作用下的力学性能进行数值模拟分析,研究构件的

冲击受力全过程、破坏模式、各组成部分之间的相互作用、能量转换以及动力响应,分析主要因素对构件抗冲击性能的影响。

1 有限元模型

1.1 模型设计

GFRP管-钢骨混凝土构件截面为圆形,外直径为180 mm,径跨比为1/10,外置GFRP管的纤维缠绕角度为45°,构件截面尺寸如图1所示。参照工程实际,确定试验参数。混凝土、钢材和GFRP管的强度均为工程常用值,钢筋选用10、12、14号工字型钢,截面含钢率4%~20%,以《建筑荷载规范》(GB50009—2001)中的中小等级质量为冲击质量^[15],依照Sharma划分的低速冲击范围^[16],冲击块速度为4 m/s、6 m/s和7.5 m/s。以冲击冲量、混凝土强度、钢材强度、GFRP管厚度以及截面含钢率等为参数,共设计13个组合构件模型,如表1所示。

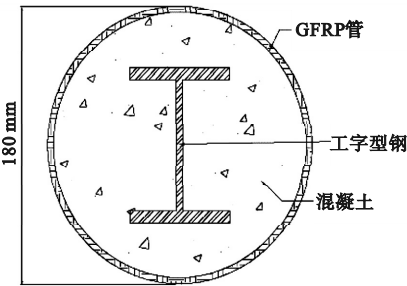


图1 构件截面尺寸

Fig. 1 Section dimension of members

采用刚性冲击块对构件跨中施加冲击荷载,冲击方向为钢骨弱轴方向,冲击块横截面

为 40 mm × 80 mm。采用三维实体单元 C3D8R 作为混凝土与钢骨的单元类型,GFRP 管采用壳单元 S4R,通过多次网格划分验算,在保证计算精度的前提下,各部件网格尺寸为截面直径的 1/12,并对冲击区域网格进行双

倍加密。模型中各接触面之间的法向相互作用均设置为硬接触,冲击块与 GFRP 管法向相互作用摩擦系数为 0,GFRP 管与混凝土、混凝土与钢骨之间切向相互作用摩擦系数为 0.6^[17],有限元分析模型如图 2 所示。

表 1 构件设计参数

Table 1 Parameters information and results of members

模型 编号	冲击质量 m/kg	冲击速度 v/(m·s ⁻¹)	冲击能量 E/kJ	混凝土强 度 f _c /MPa	钢材强度 f _y /MPa	GFRP 管厚 度 t/mm	截面含钢 率 α/%	冲击力峰 值/kN	冲击力平 台值/kN	最大挠度 w/mm
GF-1	500	4.0	4	50	345	4	5.55	330	95	121
GF-2	500	6.0	9	50	345	4	5.55	374	110	86
GF-3	500	7.5	14	50	345	4	5.55	419	125	46
GF-4	1 125	4.0	9	50	345	4	5.55	370	112	97
GF-5	320	7.5	9	50	345	4	5.55	417	109	79
GF-6	500	6.0	9	30	345	4	5.55	312	106	95
GF-7	500	6.0	9	70	345	4	5.55	404	115	74
GF-8	500	6.0	9	50	235	4	5.55	365	98	101
GF-9	500	6.0	9	50	420	4	5.55	376	120	70
GF-10	500	6.0	9	50	345	2	5.55	350	94	98
GF-11	500	6.0	9	50	345	6	5.55	390	123	75
GF-12	500	6.0	9	50	345	4	6.91	446	126	70
GF-13	500	6.0	9	50	345	4	8.35	559	156	58

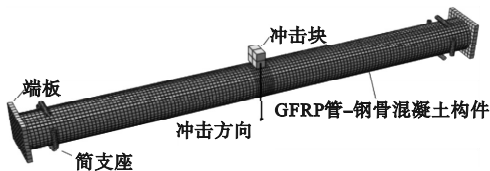


图 2 构件有限分析模型

Fig. 2 Finite element analysis model of the member

1.2 材料属性定义

1.2.1 混凝土本构模型

采用 J. G. Teng 等^[18]提出的 FRP 约束混凝土应力应变模型来定义混凝土的材料属性,其计算公式为

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_{co}}, 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t; \\ f'_{co} + E_2 \varepsilon_2, \rho_k \geq 0.01, \\ \varepsilon_t < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}; \\ f'_{co} - \frac{f'_{co} - f'_{cu}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}} (\varepsilon_c - \varepsilon_{co}), \rho_k < 0.01, \\ \varepsilon_t < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}. \end{cases} \quad (1)$$

式中:σ_c 为混凝土应力,MPa;ε_c、ε_{cu} 分别为混凝土应变、FRP 约束混凝土极限应变;E_c 为混凝土弹性模量,MPa;f'co、f'cu 分别为无约束混凝土强度、FRP 约束下混凝土极限抗压强度,MPa;ρ_k 为混凝土约束刚度比;其余参数取值见文献[18]。

混凝土受压条件下的应变率效应采用文献[19]中给出的公式计算:

$$\frac{f_{cd}}{f_{cs}} = \begin{cases} (\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_s)^{0.014}, \dot{\varepsilon} \leq 30 \text{ s}^{-1}; \\ 0.012 (\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_s)^{1/3}, \dot{\varepsilon} > 30 \text{ s}^{-1}. \end{cases} \quad (2)$$

混凝土受拉条件下的应变率效应采用 M. I. Alam 等^[20]提出的公式计算:

$$\frac{f_{td}}{f_{ts}} = \begin{cases} (\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_s)^{0.018}, \dot{\varepsilon} \leq 10 \text{ s}^{-1}; \\ 0.006 2 (\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_s)^{1/3}, \dot{\varepsilon} > 10 \text{ s}^{-1}. \end{cases} \quad (3)$$

式中:f_{cd}、f_{cs} 分别为混凝土动态、静态抗压强度,MPa;f_{td}、f_{ts} 分别为混凝土动态、静态抗拉强度,MPa;ε̇、ε̇_s 分别为混凝土动态、准静态

应变率,参照文献[21], $\dot{\varepsilon}_s = 1\text{ s}^{-1}$ 。

1.2.2 钢材本构模型

采用韩林海提出的五折线模型^[17]来定义钢骨的材料属性,采用 Cowper-Symonds 模型来考虑低速冲击作用下钢材的应变率效应:

$$\sigma_d/\sigma_s = 1 + (\dot{\varepsilon}/D)^{1/P} \tag{4}$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为钢材应变率; σ_d 、 σ_s 分别为应变率对应的钢材应力和静力作用下的钢材应力,MPa;根据文献[22], $D = 6\,844\text{ s}^{-1}$, $P = 3.91\text{ s}^{-1}$ 。

1.2.3 FRP 材料本构模型

FRP 为线弹性材料,其本构关系模型为

$$\sigma_{frp} = E_{frp} \varepsilon_{frp} \tag{5}$$

式中: σ_{frp} 为 FRP 材料的应力,MPa; E_{frp} 为 FRP 材料的弹性模量,GPa; ε_{frp} 为 FRP 材料应变。

因 FRP 材料应变率效应不明显^[23],故此未考虑 GFRP 管的应变率效应。在 ABAQUS 中将 GFRP 材料属性设置为单向板,并利用 Hashin Damage 模型^[24]定义材料断裂强度。GFRP 管弹性模量为 41.29 GPa,极限抗拉强度为 884.5 MPa。

1.3 有限元模型的验证

根据前述建模方法建立文献[25-26]中的 FRP-钢双层管约束柱(D7-3 试件)和 CFRP-钢管-混凝土组合柱(F1-H 试件)的有限元模型,将模拟结果与试验得到的冲击力时程曲线进行对比,以验证材料本构模型及各部分间相互作用的有效性,如图 3 所示。由图 3 可知,模拟得出的冲击力时程曲线与跨中挠度时程曲线的形状、趋势与试验结果基本吻合。图 3(a)中模拟的试件冲击力峰值、平台值和挠度峰值分别为 149 kN、25 kN 和 92 mm,与试验值 152 kN、29 kN 和 91 mm 相比,误差为 2%、13.8%和 1%。图 3(b)中模拟的试件冲击力第一峰值、第二峰值、第三峰值和挠度峰值分别为 1 188.7 kN、957 kN、323 kN 和 82 mm,与试验值 1 095.8 kN、843 kN、381 kN 和 80 mm 相比,误差分别为 8.5%、13.5%、15.2%和 2.5%。可见,建模过程中选取的材料模型和各部分之间的相互作用设置较为可靠,模拟计算结果与试验结果误差在 20% 以内,可以利用该建模方法对构件的抗侧向冲击性能进行研究。

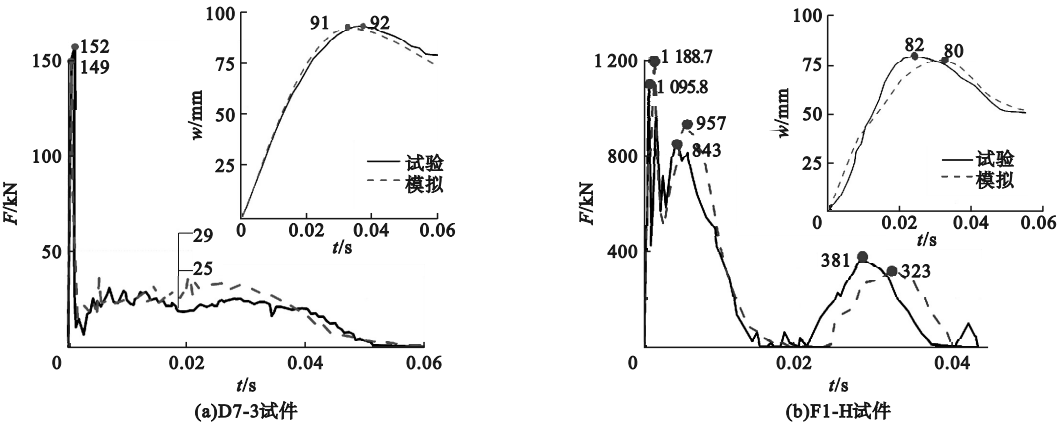


图 3 冲击力时程对比曲线

Fig. 3 Time history curves of impact force

2 典型构件分析

选取表 1 中的 GF-2 构件作为典型构件,深入分析其在侧向冲击荷载作用下的冲击全过程、破坏形态、截面受力状态、截面弯矩发

展及相互作用。

2.1 冲击全过程分析

图 4 为典型构件 GF-2 在冲击荷载作用下的冲击力 F 、跨中挠度 w 、跨中速度 v_g 以及冲击块速度 v_0 的时程曲线。为了便于分析,

对曲线进行无量纲处理。挠度值与速度值相较于冲击力值相差较多,故将挠度时程曲线放大 5 倍、速度时程曲线放大 20 倍。

由图 4 可知,根据构件冲击力时程曲线的特征,选取特征点: *A* 为冲击力峰值点; *B* 为冲击力下降为 0 的点; *C* 为平台段起始点; *D* 为平台段结束点; *E* 为冲击过程结束点。将冲击过程分为峰值段 (*OAB*)、平台段 (*BCD*) 以及卸载段 (*DE*) 3 个阶段。冲击开始后,冲击力迅速上升至峰值 *A* 点,此时冲击力峰值为 374 kN,构件的速度迅速增大,当其大于冲击块速度时,二者出现分离,冲击力迅速降低至 0 (*B* 点)。随后,构件速度下降,当与冲击块速度趋于一致时,二者之间的冲击力再次增大,一同做匀减速运动,冲击力进入平台段。构件的跨中挠度持续增大,而冲击力值相对稳定,保持在 110 kN。当构件速度降为 0 时,平台段结束,跨中挠度达到峰值 186 mm。随后,冲击过程进入卸载段,构件开始回弹,与冲击块逐渐发生脱离,冲击力再次下降,直至构件与冲击块完全脱离,冲击力降为 0 (*E* 点),冲击过程结束。

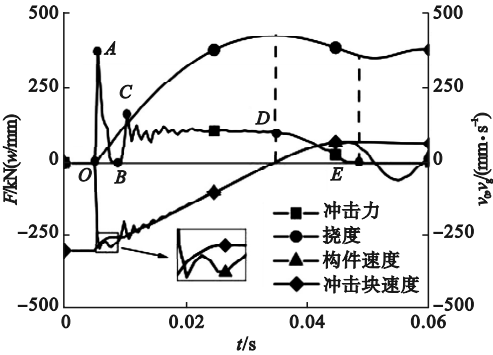


图 4 典型构件 GF-2 在冲击荷载作用下时程曲线

Fig. 4 Time history curves for typical specimen GF-2 under impact force

2.2 破坏形态

图 5 为典型构件 GF-2 在冲击结束时 (*E* 点) 的破坏形态云图。从图 5 (a) 可以看出,在侧向冲击荷载作用下,构件整体发生弯曲变形,变形由冲击位置向两侧发展。从图 5 (b) 和图 5 (c) 可知,由于冲击荷载和弯曲变

形的共同作用,使得冲击部位的 GFRP 管材料基体出现受压损伤破坏。由于弯曲变形作用,冲击侧对面 GFRP 管材料基体发生拉伸损伤破坏,并且破坏趋势由中部向两侧发展;同时可以看出,在冲击位置边缘附近, GFRP 管材料基体发生了拉伸损伤破坏,这是由于在冲击荷载作用下,构件在冲击位置处发生局部凹陷造成的。从图 5 (d) 可以看出,在冲击荷载的作用下跨中混凝土冲击侧受压,底部对面侧的混凝土受拉,且破坏时达到了混凝土极限拉应变,塑性应变主要集中在构件跨中的冲击面对侧。从图 5 (e) 可以看出,在冲击荷载作用下钢骨跨中达到屈服应变,屈服区域由下翼缘发展至腹板中部。

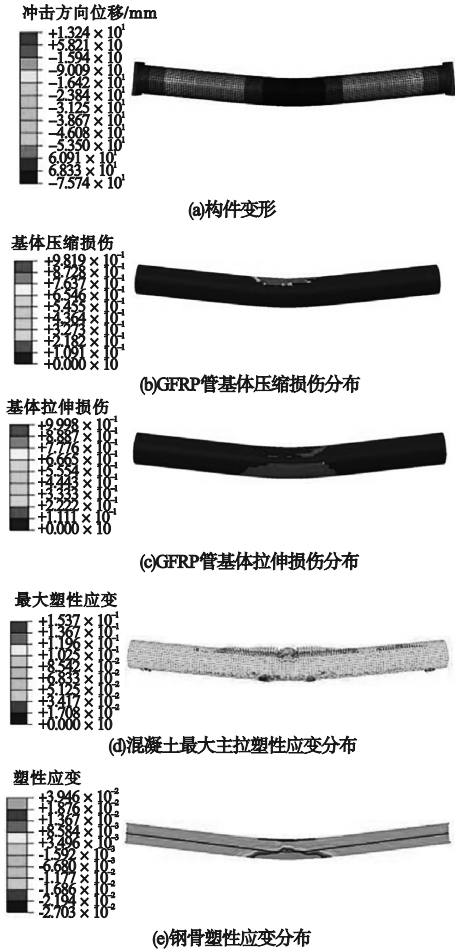


图 5 典型构件破坏形态

Fig. 5 The failure modes of typical member

综上所述,在侧向冲击荷载作用下,构件在跨中形成塑性铰,各组成材料的变形发展

较为充分。

2.3 应力应变发展

图6为构件跨中截面上GFRP管各点纵向应变时程曲线。可以看出,截面上点1、2前期处于受压状态,后期逐渐转化为受拉状态;截面点3、4、5在整个冲击过程中处于受拉状态。在冲击峰值段,GFRP管各点处的应变迅速增大,之后随着冲击力的减弱,各点处应变呈下降趋势。进入平台阶段后,各点的应变随着变形的增大而迅速增大,在平台阶段前期和后期,截面上点1、2和点4、5处的应变均出现了下降趋势,这是由于GFRP管与混凝土界面间出现了滑移。在卸载段,随着构件挠度的回弹,点1、2进入受拉状态;点4、5应变逐渐减小。在冲击过程中,GFRP管点5处的应变最大;点3应变在平台阶段达到最大之后,基本保持不变。

图7为跨中截面上钢骨各点的纵向应力-应变曲线。可以看出,钢骨的上翼缘受压,下翼缘至腹板中部受拉,下翼缘最大拉应变为 4.06×10^{-2} ,上翼缘最大压应变为 7.53×10^{-3} ,钢骨截面最大拉应变约为压应变的4倍。以截面上点9为例,在冲击过程开始后应力迅速增大,在峰值阶段已达到钢材屈服强度;在平台段,随着应变的增大,应力增大不明显。在卸载段,随着构件挠度的回弹该处应力出现反转。在整个冲击过程中,钢骨截面上

各点的最大应力均已经达到钢材的屈服强度345 MPa,跨中位置钢骨塑性变形发展充分。

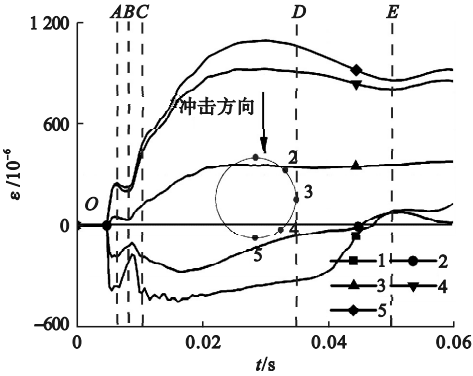


图6 GFRP管纵向应变时程曲线

Fig. 6 Time history curves of GFRP tube strain

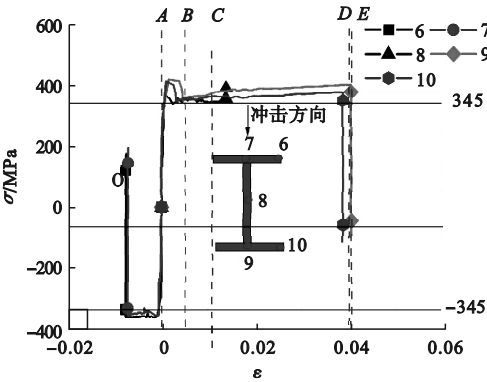


图7 钢骨纵向应力-应变曲线

Fig. 7 Longitudinal stress-strain curve of I-steel

图8为跨中截面混凝土纵向应力云图,各时刻编号同图4。

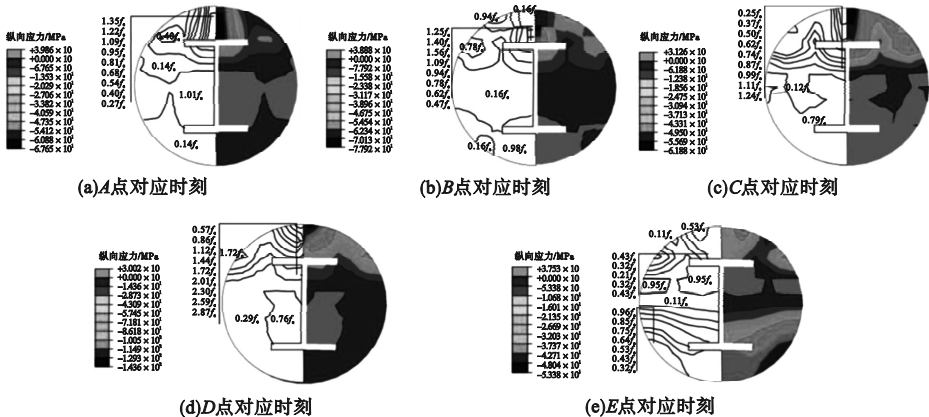


图8 混凝土纵向应力发展

Fig. 8 The longitudinal stress development of concrete

在 A 点对应时刻,截面顶部形成受压的高应力区,应力值约为 $1.35 f_c$;截面中部混凝土由于弯曲变形而受拉,拉应力约为 $1.01 f_t$;截面底部混凝土由于 GFRP 管的约束和钢骨下翼缘挤压的共同作用而出现部分受压区。在 B 点对应时刻,受压区发展至截面下部,对应 GFRP 管截面上点 4 位置处的混凝土由于 GFRP 管的约束作用而受压(见图 6)。在 C 点对应时刻,随着冲击力再次增大,截面顶部的压应力增至 $1.24 f_c$,受拉区域扩大,由截面下部发展至截面中部,最大拉应力为 $0.79 f_t$;对应 GFRP 跨中截面点 3 位置处的混凝土受 GFRP 管约束作用而出现小部分受压(见图 6)。在 D 点对应时刻,截面顶部的压应力持续增加,达到 $2.87 f_c$ 。钢骨下翼缘至腹板中部的区域混凝土受拉,而其余部分混凝土受压,这是由于在平台段,构件变形发展快速,受 GFRP 管与钢骨下翼缘的共同约束所致。在 E 点对应时刻,冲击块与构件脱离,截面除钢骨上翼缘与腹板相交区域的混凝土受拉外,其余部分受压,这是由于构件挠度回弹,截面应力反转所致;同时,由于截面冲击侧混凝土拉应力不足以抵消在平台段所产生的较高压应力,使得钢骨上翼缘顶部混凝土仍然受压。

2.4 相互作用

图 9 为跨中截面 GFRP 管不同点与混凝土之间的法向接触应力 σ_c 时程曲线,各点位置同图 6。可以看出,点 1 处的接触应力时程曲线与冲击力时程曲线具有相同的趋势。在 A 点对应时刻,点 3、5 位置的接触应力分别增至 0.2 MPa、0.5 MPa,此阶段 GFRP 管在点 3 点、5 位置对混凝土有一定的约束作用。在平台段,随着构件变形的发展,点 3、5 处的接触应力持续增加,点 2、4 处的接触应力开始增大;直至冲击平台段结束时,除点 1 外,截面底部点 5 处接触应力最大,约为 2.2 MPa,在此阶段 GFRP 管截面各点对混凝土均有着约束作用。在下降段,随着构件变形回弹,点 5 的接触应力开始降低。

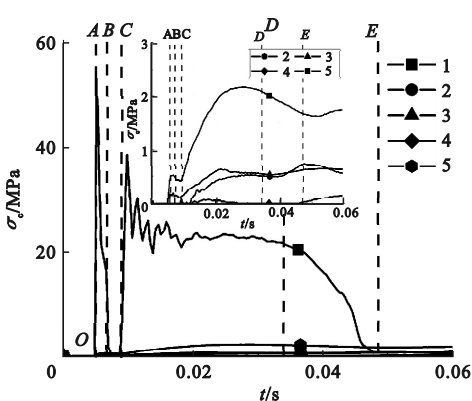


图 9 GFRP 管与混凝土法向接触应力时程曲线
Fig. 9 Time history curves of contact stress between GFRP tube and concrete

图 10 为构件跨中截面钢骨与混凝土之间相互作用力 σ_c 的时程曲线,各点位置见图 7。

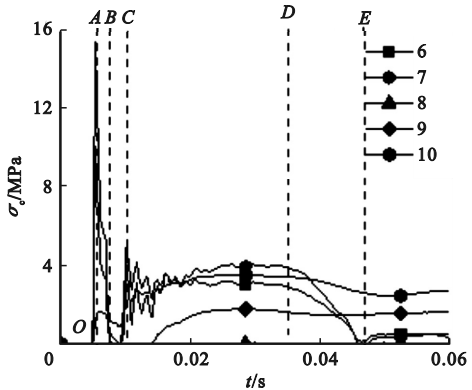


图 10 钢骨与混凝土接触应力 σ_c 时程曲线
Fig. 10 Time history curves of contact stress between I-steel and concrete

由图 10 可以看出,由于钢骨上翼缘距离冲击位置较近,使得点 6、7 处的接触应力曲线与冲击力的时程曲线具有相似趋势。在冲击峰值段,钢骨上翼缘点 6、7 接触应力出现峰值点,分别为 15.4 MPa 和 10.3 MPa,同时由于混凝土在冲击作用下对钢骨下翼缘两端产生挤压,使得点 10 接触应力有所上升。在冲击平台段,上翼缘点 6、7 接触应力受冲击力变化影响进入平台段,两点接触应力均保持在 3.5 MPa 左右,在此阶段,随着构件弯曲变形持续发展钢骨下翼缘对底部混凝土的挤压作用增大,点 9、10 接触应力随之增大。在冲击下降段,随着冲击力的减弱,点 6、7 处

的接触应力开始下降,直至冲击过程结束,而点9、10处仍保持较高应力水平,这是由于构件挠度的回弹,使得钢骨下翼缘与混凝土之间的相互作用力较大。

2.5 截面弯矩发展

图11为构件跨中截面弯矩和构件各组分担的弯矩时程曲线。从图11可以看出,在冲击峰值阶段,随着冲击力的发展,跨中截面弯矩迅速达到峰值,约为32 kN·m,随后截面弯矩降低。在此阶段,截面各部分的弯矩迅速增大,由于钢材纵向应力水平最高,其承担弯矩约占截面整体弯矩的53.9%。在平台段,钢骨的弯矩因其材料屈服而基本保持不变;GFRP管截面弯矩增至20 kN·m,由于冲击对侧出现损伤,使得GFRP管截面弯矩开始下降;混凝土截面弯矩值随着变形的发展而持续增大。截面整体弯矩在此阶段达到峰值53.4 kN·m。在D点对应时刻,GFRP管、混凝土与钢骨分别占整体截面弯矩的28.5%、34.2%和37.3%。在下降段,构件跨中截面弯矩逐渐降低,直至E点对应时刻冲击过程结束,钢骨与混凝土截面应力出现反转,两者承担的截面弯矩为负值。

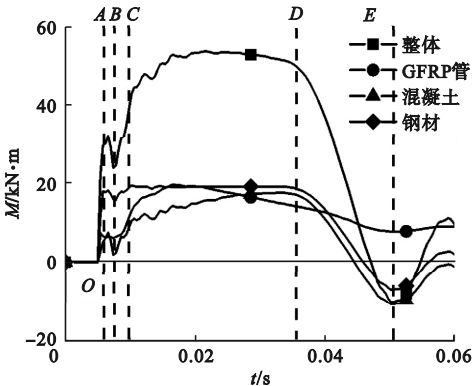


图11 构件跨中截面及各部分弯矩时程曲线

Fig. 11 Time history curves of mid-span bending moment of the member

3 参数分析

3.1 冲击能量

图12为保持冲击块质量不变情况下通过改变冲击块速度来改变冲击能量得到构件冲击力和挠度时程曲线。从图12中可以看出,随着冲击能量Q由4kJ提升至14 kJ,冲击力峰值、平台值、持时以及最大挠度分别提高了27%、31%、26%和163%。随着冲击能量增大,构件消耗冲击能量而产生的变形随之增大,消耗能量所需时间亦随之延长。

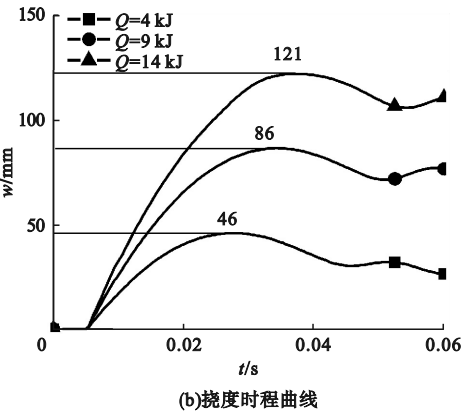
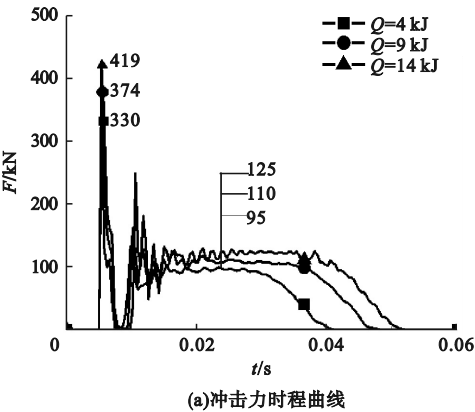


图12 不同能量对构件抗冲击性能影响

Fig. 12 Influences of different energy on impact resistance of member

3.2 冲击冲量

图13为冲击能量不变条件下仅改变冲击冲量得到的构件冲击力和跨中挠度时程曲线。由图13可知,冲击冲量的改变对冲击力

峰值、冲击持时以及挠度影响较大。当冲量由2 400 N·s增至4 500 N·s时,冲击力峰值降低了11.3%,冲击持时和最大挠度分别减小了125%和23%,冲击力平台值随着冲量

的增大略有上升。在冲击能量不变的情况下,冲击冲量随冲击块质量的增大而增大,冲

击块的惯性也随之增大,使得构件抵抗冲击作用时间延长,变形随之增大。

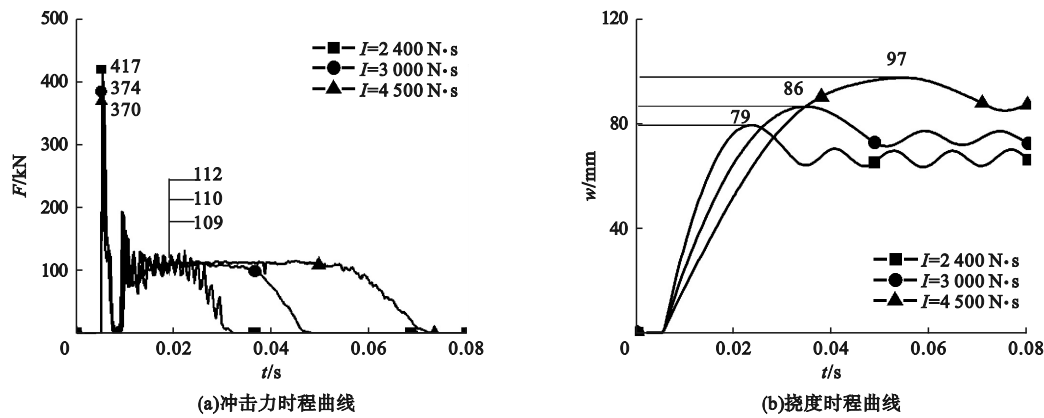


图 13 不同冲量对构件抗冲击性能影响

Fig. 13 Influences of different impulse on impact resistance of member

3.3 钢材强度

图 14 为改变钢材强度得到的构件冲击力和挠度时程曲线。由图 14 可以看出,随着钢材强度由 235 MPa 增至 420 MPa,冲击力

峰值和平台值分别提升了 2.4% 和 26%,最大挠度和持时降低了 26% 和 11%。可见,随着钢材强度的提高,构件截面的抗弯强度增大,构件的抗冲击性能提升。

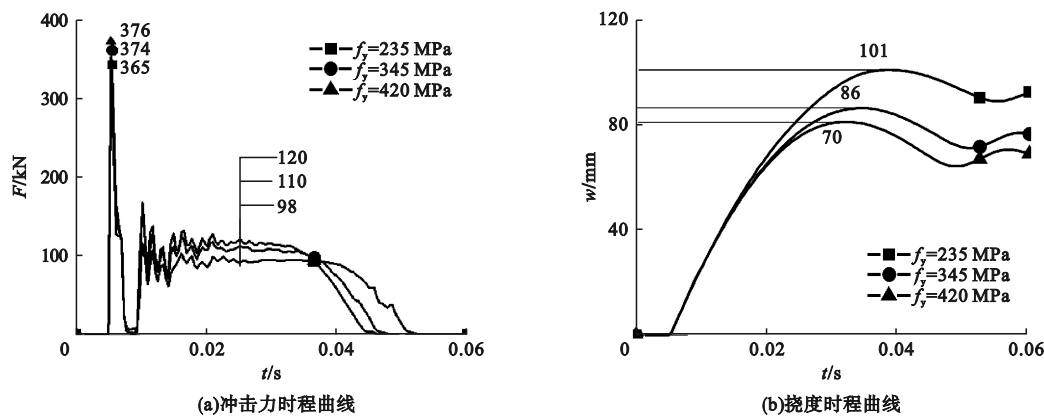


图 14 钢材强度对构件抗冲击性能影响

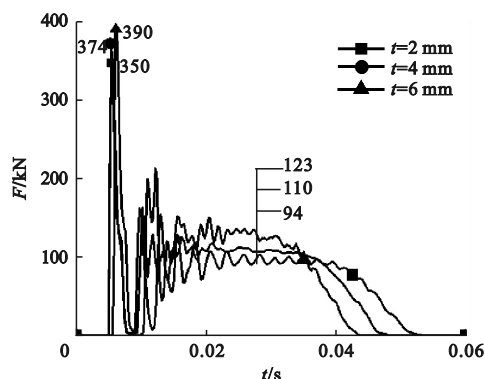
Fig. 14 Influences of steel strength on impact resistance of members

3.4 GFRP 管厚度

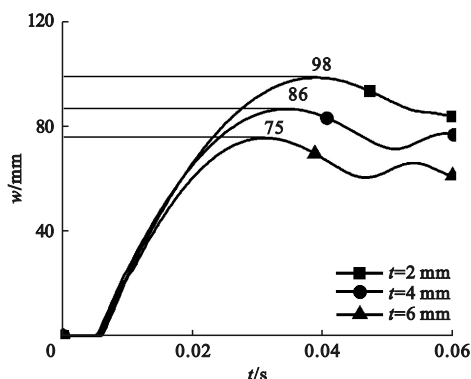
图 15 为改变 GFRP 管厚度得到的构件冲击力和挠度时程曲线。由图 15 可以看出,随着 GFRP 管厚度由 2 mm 增至 6 mm,冲击力峰值和平台值分别提升了 11.4% 和 30.8%,最大挠度和持时分别降低了 30.6% 和 18.5%。可见,随着 GFRP 管厚度的增加,构件的抗冲击性能提高。

3.5 截面含钢率

图 16 为改变截面含钢率得到的构件冲击力和挠度时程曲线。由图 16 可以看出,随着截面含钢率由 5.55% 增至 8.35%,冲击力峰值和平台值分别提升了 49.5% 和 41.8%,最大挠度和持时降低了 32% 和 24.2%。可见,随着截面含钢率的提高,截面的抗弯强度增大,构件的抗冲击性能提高。



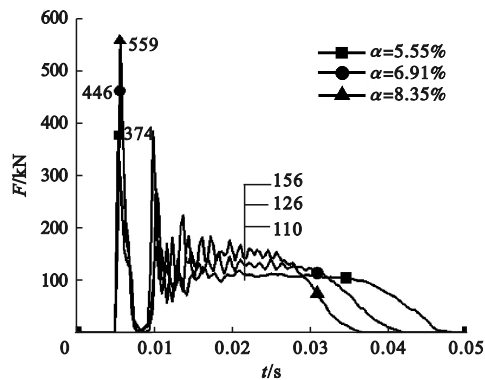
(a)冲击力时程曲线



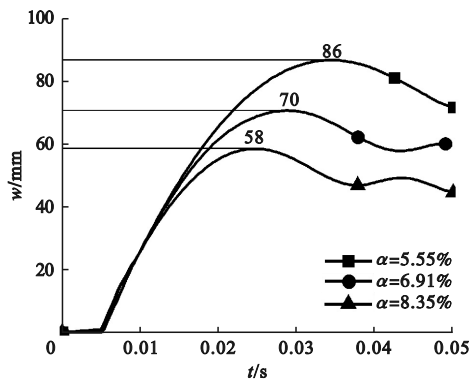
(b)挠度时程曲线

图 15 GFRP 管厚度对构件抗冲击性能影响

Fig. 15 Influences of GFRP tube thickness on impact resistance of members



(a)冲击力时程曲线



(b)挠度时程曲线

图 16 含钢率对构件抗冲击性能影响

Fig. 16 Influences of steel ratio on impact resistance of members

4 结 论

(1) 在冲击荷载作用下,两端简支 GFRP 管-钢骨混凝土构件主要在冲击部位发生较大弯曲变形;混凝土、GFRP 管及钢材的应力水平较高,变形发展较为充分,三者能够协同工作,GFRP 管对混凝土有着良好的约束作用,钢筋对混凝土起到支撑作用。

(2) 冲击过程按冲击力特征点可分为峰值段、平台段和卸载段 3 个阶段;在冲击峰值段,钢筋承担大部分冲击荷载;在平台段,构件变形持续发展,GFRP 管对混凝土的约束作用逐渐增强,混凝土承担荷载逐渐增大,GFRP 管分担的荷载在平台段前期逐渐增大,后期略有下降;在卸载段,构件冲击力下降,挠度回弹,直至冲击过程结束。

(3) 随着冲击能量、冲击冲量的增大,冲击持时和平台值随之增大,构件产生的变形也随之增大。

(4) 提高钢材强度、GFRP 管厚度和含钢率,可以降低构件在冲击荷载作用下的弯曲变形,增强构件的抗冲击性能。

参考文献

- [1] 滕锦光. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京:中国工业出版社,2005.
(TENG Jingguang. FRP reinforced concrete structure [M]. Beijing:China Building Industry Press,2005.)
- [2] 陶忠,于清. 新型组合结构柱[M]. 北京:科学出版社,2006.
(TAO Zhong, YU Qing. New combination structure column [M]. Beijing:Science Press,2006.)
- [3] 杨文伟,李顺涛,杨霞,等. GFRP 管约束钢骨混凝土组合短柱轴压试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(2):229-238.
(YANG Wenwei, LI Shuntao, YANG Xia, et al. Experimental study on axial compression

- of steel-encased concrete filled GFRP tubular short column [J]. Journal of Shengyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(2): 229 – 238.)
- [4] HUANG L, YU T, ZHANG S S. FRP-Confined concrete-encased cross-shaped steel columns; effects of key parameters [J]. Composite structures, 2021, 272(4): 114252.
- [5] 张海霞, 鞠士龙, 王思晴. GFRP 管-钢骨混凝土组合纯弯构件的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增刊2): 348 – 357. (ZHANG Haixia, Jü Shilong, WANG Siqing. Experimental study on seismic performance of steel-encased concrete filled GFRP tubes pure bending member [J]. Journal of building structures, 2021, 42(S2): 348 – 357.)
- [6] ZHANG H X, JU S L, CHEN H. Seismic performance of GFRP tube concrete-encased steel composite columns under axial compression [J]. Journal of constructional steel research, 2023, 200: 107641.
- [7] REN F, LIANG Y, HO J, et al. Behaviour of FRP tube-concrete-encased steel composite columns [J]. Composite structures, 2020, 241: 112139.
- [8] QASRAWI Y, HEFFERNAN P, FAM A. Dynamic behaviour of concrete filled FRP tubes subjected to impact loading [J]. Engineering structures, 2015, 100: 212 – 225.
- [9] ALAM M I, FAWZIA S, ZHAO X L. Numerical investigation of CFRP strengthened full scale CFST columns subjected to vehicular impact [J]. Engineering structures, 2016, 126: 292 – 310.
- [10] ZHI X D, WU Q J, WANG C. Experimental and numerical study of GFRP-reinforced steel tube under axial impact loads [J]. International journal of impact engineering, 2018, 122: 23 – 37.
- [11] WANG R, HAN L H, ZHONG T. Behavior of FRP-concrete-steel double skin tubular members under lateral impact; Experimental study [J]. Thin-walled structures, 2015, 95: 363 – 373.
- [12] SHAN B, ZHANG Y T, MONTI G, et al. Axial impact behavior of FRP-confined concrete stub columns with square and circular cross section [J]. Journal of composites for construction, 2020, 24(3): 1 – 16.
- [13] ZHAI G L, LU P, WANG H B, et al. Energy dissipation analysis of FRP concrete steel tube under multiple impact [J]. International journal of frontiers in sociology, 2021, 3(17): 127 – 134.
- [14] WANG W Q, WU C Q, YU Y, et al. Dynamic responses of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular column (DSTC) under lateral impact [J]. Structures, 2021, 32: 1115 – 1144.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构设计荷载规范: 第 10 部分 偶然荷载: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures-part 10: accident load: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.)
- [16] SHARMA H, HURLEBAUS S, GARDONI P. Performance-based response evaluation of RC columns subjected to vehicle impact [J]. International journal of impact engineering, 2012, 43: 52 – 62.
- [17] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2016. (HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures: theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.)
- [18] TENG J G, JIANG T, LAM L, et al. Refinement of a design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. Journal of composites for construction, 2009, 13(4): 269 – 278.
- [19] ALAM M I, FAWZIA S, ZHAO X L. Numerical investigation of CFRP strengthened full scale CFST columns subjected to vehicular impact [J]. Engineering structures, 2016, 126: 292 – 310.
- [20] ALAM M I, FAWZIA S, ZHAO X L, et al. Performance and dynamic behavior of FRP strengthened CFST members subjected to lateral impact [J]. Engineering structures, 2017 (147): 160 – 176.
- [21] 李幅昌, 刘璐, 杨志坚. 内置 CFRP 型材方钢管混凝土构件抗侧向冲击性能有限元分析 [J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(1): 41 – 52. (LI Guochang, LIU Lu, YANG Zhijian. Finite element analysis on the lateral impact behavior of concrete-filled square steel tube with CFRP profiles [J]. Progress in steel building structures, 2022, 24(1): 41 – 52.)
- [22] ABRAMOWICZ W, JONES N. Dynamic axial crushing of square tubes [J]. International journal of impact engineering, 1984, 2(2): 179 – 208.
- [23] 周元鑫, 江大志, 夏源明. 碳纤维静、动态加载下拉伸力学性能的试验研究 [J]. 材料科学与工艺, 2000, 8(1): 12 – 15. (ZHOU Yuanxin, JIANG Dazhi, XIA Yuanming. Static and dynamic tensile behavior of carbon fiber [J]. Material science and technology, 2000, 8(1): 12 – 15.)
- [24] TSAI S W, WU E D. A general theory of strength for anisotropic materials [J]. Journal of composite materials, 1971, 5(1): 58 – 80.
- [25] CHEN Z, WANG J. Responses of concrete-filled FRP tubular and concrete-filled FRP-steel double skin tubular columns under horizontal impact [J]. Thin-walled structures, 2020, 155: 106941.
- [26] 刘烨. CFRP-混凝土-钢管组合柱低速侧向撞击性能的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017. (LIU Ye. Dynamic behavior of CFRP-concrete-steel composite column under low velocity lateral impact load [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.)