

GFRP 增强圆钢管在低速冲击荷载作用下的应变率效应

武启剑^{1,2}, 支旭东^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090;
2. 哈尔滨工业大学土木工程防灾减灾工信部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:讨论了玻璃纤维/环氧树脂复合材料 (Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP) 增强 Q235 圆钢管在低速冲击荷载作用下的应变率效应。通过轴压试验和轴向低速冲击试验获得了试件在准静态和低速冲击状态下的力学响应 (轴向荷载及轴向位移), 为后续仿真工作提供了依据。编写了可以考虑初始失效、损伤演化及应变率效应的 GFRP 材料子程序 (VUMAT), 并基于 ABAQUS 对构件的轴压及轴向冲击过程进行了仿真再现。通过仿真将不考虑应变率效应、只考虑钢管应变率效应、只考虑 GFRP 应变率效应、考虑钢管及 GFRP 应变率效应 4 种情况下的结果进行了对比分析。

关键词:应变率效应; 钢管; 玻璃纤维/环氧树脂复合材料; 低速冲击试验; 有限元模拟

中图分类号:O383.3; TU398.9

文献标识码:A

建筑结构在施工和服役期间, 除受到自重、风等常规荷载的作用外, 还有可能遭遇冲击、碰撞等偶然低速冲击荷载的作用, 而降低建筑结构在此类荷载作用下连续倒塌风险的一个有效措施就是增强结构构件的承载能力和耗能能力。纤维增强树脂复合材料 (FRP) 具有较高的比强度及比吸能 (材料的强度及吸能与其表观密度之比), 同时具有良好的环境耐受能力^[1], 采用 FRP 增强钢结构中常用的建筑圆钢管可以很好地综合两种材料的特点, 使复合而成的构件在具有较高承载能力和耗能能力的同时具有较轻的质量和较好的环境耐受能力, 因此在土木工程领域具有良好的应用前景。

近年来, 国内外学者针对 FRP 增强金属构件在低速冲击、碰撞等荷载作用下的响应开展了大量研究。Zhi 等^[2]针对高强 GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) 增强 Q235B 圆钢管构件在轴向低速冲击荷载作用下的响应进行了试验及仿真研究, 分析了 GFRP 壁厚、钢管壁厚、冲击速度、试件长度等因素对试件极限承载能力和耗能能力的影响; Batuwitige 等^[3]采用 CFRP 材料增强了方钢管构件, 并针对其轴向抗冲击性能开展研究, 发现 CFRP 材料对增强方钢管构件的轴向耗能能力有很好的效果; Alam 等^[4]提出了 CFRP 增强钢管的侧向冲击仿真方法, 发现 CFRP 材料可以显著限制钢管构件的塑性位移发展; 李洋等^[5]研究了横向冲击荷载作用下 GFRP-钢组合悬臂梁的响应, 发现包裹 2.7 mm 厚 GFRP 能有效地降低钢管的冲击作用; Kadhim 等^[6-7]针对 CFRP 增强钢管构件在侧向冲击荷载作用下的响应展开了试验研究, 讨论了加载速率对试件性能的影响, 发现 CFRP 的增强效果在较高加载速率下更为明显。

此外, 随着对冲击等偶然荷载的研究成为热点, 材料的动态力学行为也引起了广泛关注。金属材料对应变率效应较为敏感, 一般采用 J-C 模型^[8]或 Z-A 模型^[9]进行模拟, 其中 J-C 模型由于可以同时考虑应变率效应、温度效应及应力三轴度而被后续学者广泛应用及改进^[10-12]。对于 FRP 材料, 由于其力

* 收稿日期: 2018-10-16; 修回日期: 2018-11-06

基金项目: 国家自然科学基金 (51478144)

作者简介: 武启剑 (1991—), 男, 博士研究生, 主要从事从事大跨空间结构研究. E-mail: 951064631@qq.com

通信作者: 支旭东 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事大跨空间结构研究. E-mail: zhixudong@hit.edu.cn

学性能较为复杂,目前关于其在低速冲击荷载作用下损伤演化的研究多基于 Hashin 准则^[13]或 Puck 准则^[14]展开,忽略了应变率效应的影响^[15-16]。

本研究首先通过轴压试验及轴向低速冲击试验的结果对比,分析了 GFRP 增强建筑圆钢管构件的应变率效应敏感性;随后通过仿真的方法,将不考虑应变率效应、只考虑钢管应变率效应、只考虑 GFRP 应变率效应以及考虑钢管及 GFRP 应变率效应 4 种情况下的结果进行对比分析。

1 试验方案及结果分析

缠绕成型具有生产效率高、产品性能好的优点,同时对于 GFRP 增强圆钢管构件,其内部钢管可以直接充当芯模而不需要脱模,适合土木领域的大规模应用。因此,本研究采用此种成型工艺进行了试件的加工,且 GFRP 采用性价比较高的 S2-1200 玻璃纤维增强 E-51 环氧树脂,钢管采用应用较广泛的 Q235B 直缝圆焊管。试件的符号说明及实物图如图 1 所示,其中 D 为钢管外径, t 为壁厚, θ 和 n 为 GFRP 缠绕角度和层数, t_c 为 GFRP 层厚度, L 为试件长度, v 为冲击速度。为对比分析构件在准静态及低速冲击情况下的应变率效应,针对设计尺寸如表 1 所示的构件,分别开展了轴压试验和低速冲击试验。相较准静态轴压试验,冲击试验的数据采集更为困难,试件的响应更为剧烈,故为验证试验方案的可重复性,对于试件 D-58-1.5-30-3.0 开展了 3 组重复试验。

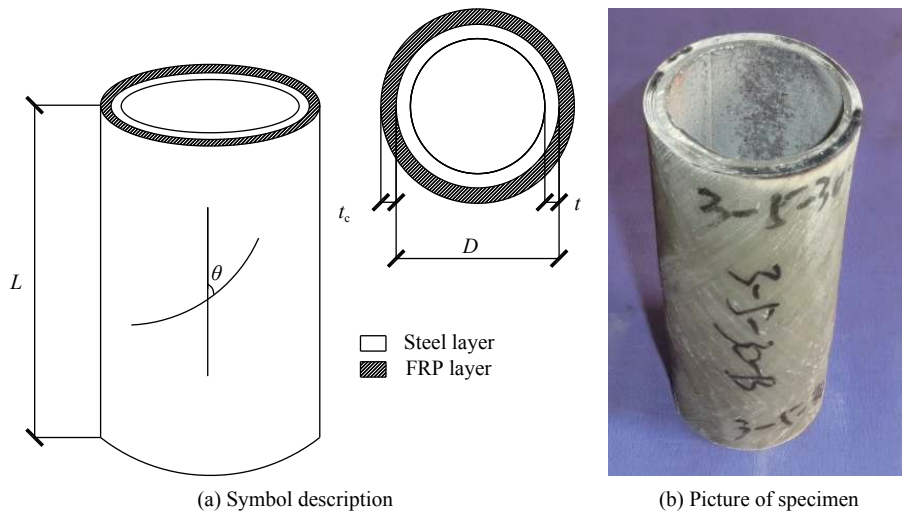


图 1 试件符号说明及实物图

Fig. 1 Symbol description and pictures of specimen

表 1 试件设计尺寸

Table 1 Design size of tested specimens

Specimen	$D \times t / (\text{mm} \times \text{mm})$	$[\theta / (^\circ)]_n$	t_c / mm	L / mm	Type of test	$v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Maximum strain rate/ s^{-1}
S-58-1.5-30	58.0×1.5	$[30/-30]_3$	2.0	100.0	Compression		
S-58-2.0-90	58.0×2.0	$[90]_6$	2.0	100.0	Compression		
D-58-1.5-30-3.0	58.0×1.5	$[30/-30]_3$	2.0	100.0	Impact	3.0	9.5
D-58-1.5-30-4.5	58.0×1.5	$[90]_6$	2.0	100.0	Impact	4.5	21.1
D-58-2.0-90-4.5	58.0×2.0	$[90]_6$	2.0	100.0	Impact	4.5	21.1

1.1 试验方案

轴压试验中,试件的两端采用钢槽配合 α 高强石膏进行嵌固,同时在其下部支座的 4 个角点处布置 4 个竖向位移计(LVDT),用来测量其轴向压缩量。试验的加载过程通过 30 t 液压千斤顶配合反力系统

实现,加载装置如图 2 所示。轴压试验采用先力控制后位移控制的方式进行加载,加载工艺流程如下:(1)荷载达到峰值之前,力加载速度为 5 kN/min;(2)荷载达到峰值后,改为位移控制加载,加载速度减为 1 mm/min。

低速冲击试验在哈尔滨工业大学落锤式冲击试验系统上完成,此试验系统可以满足不同冲击质量(400.19~1063.30 kg)及不同冲击高度(0~20.6 m)的试验要求。本研究所进行的低速冲击试验采用的冲击能量为 4052.03 和 1800.90 J,即落锤质量为 400.19 kg,冲击速度分别为 3.0 和 4.5 m/s。试验过程中,试件的底部采用钢槽及 α 高强石膏锚固,其位移及冲击荷载分别采用磁栅线位移测量系统及 60 t 压电式力传感器进行测量,试验装置如图 3 所示。

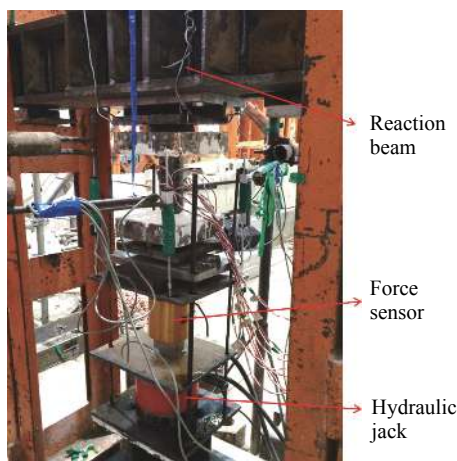


图 2 轴压试验系统

Fig. 2 Compression test system

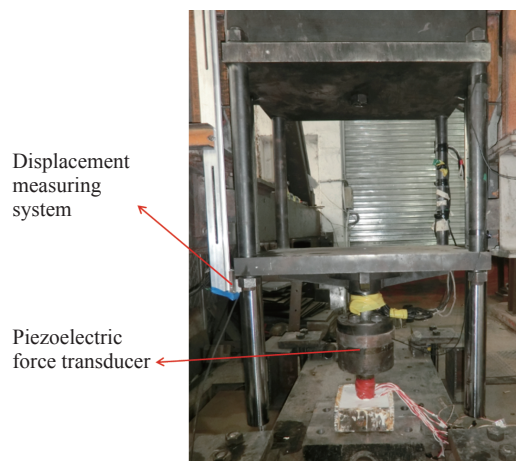


图 3 落锤试验系统

Fig. 3 Drop hammer test system

1.2 试验结果对比分析

试件 D-58-1.5-30-3.0 的 3 组重复试验结果及其平均结果如图 4 所示。考虑到冲击荷载的特性,试验所得曲线存在较大的波动,但整体而言试验结果仍存在良好的可重复性。

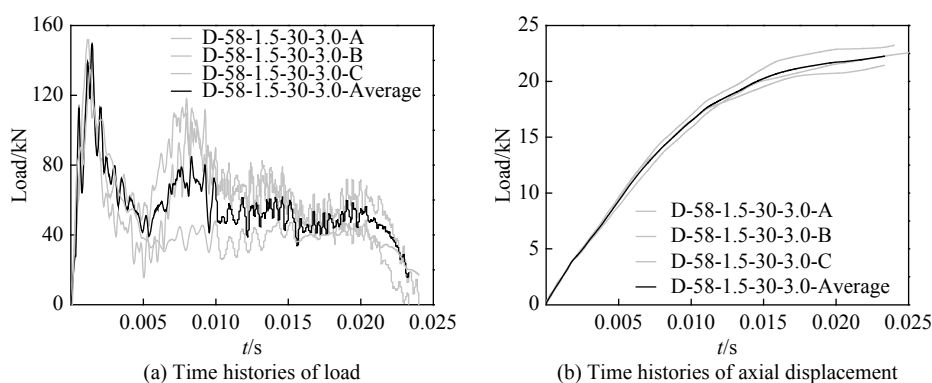


图 4 D-58-1.5-30-3.0 的重复试验结果

Fig. 4 Repeated test results of D-58-1.5-30-3.0

轴压试验与轴向低速冲击试验的结果(荷载-轴向位移曲线)对比如图 5 所示,得到以下结论:(1)在两种荷载作用下,试件的弹性段刚度相差不多,表明在低速冲击范围内,GFRP 增强钢管构件的弹性段刚度对于应变率效应不敏感;(2)随着冲击速度的增加(冲击速度为 3.0 和 4.5 m/s 时对应的最大应变率分别为 9.5、21.1 s^{-1}),GFRP 增强钢管构件的峰值荷载有所增加,且大于承受准静态轴压荷载作用的试件,表明在低速冲击范围内,构件的强度对于应变率效应较为敏感;(3)试件的荷载-位移曲线在低

速冲击荷载作用下具有相似的形状及趋势,仅破坏位移有所增大,表明冲击速度的增加对试件的失效模式影响不大。

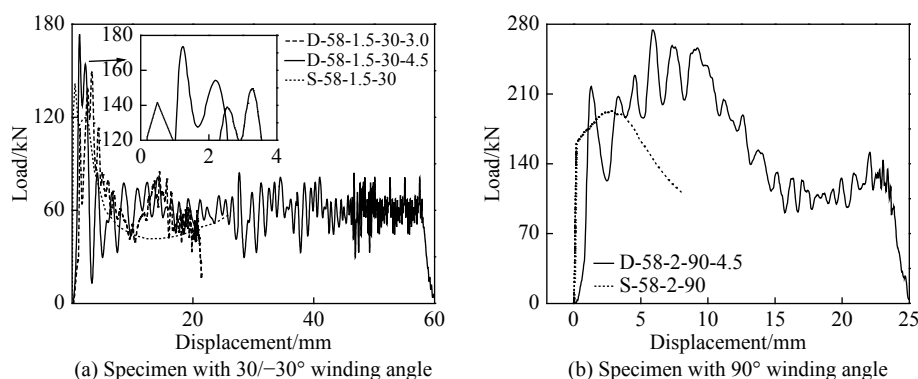


图5 轴压试验及低速冲击试验结果对比

Fig. 5 Comparison of test results between compression test and low-velocity impact test

然而,由于在试验过程中不可避免地存在一些不可控参数,如试件实际几何尺寸与设计几何尺寸的差异、试件初始缺陷的差异以及试件组成材料性能的差异等,故仅通过试验并不能很好地分析应变率效应对试件性能的影响。鉴于上述原因,本研究提出了可考虑钢材及GFRP应变率效应的仿真方法,开展了关于GFRP增强圆钢管构件的应变率效应分析。

2 有限元模拟方法及验证

2.1 有限元模型

在仿真中,试件的各层依次建模,并通过一阶特征值屈曲的形式施加由实测得到的最大初始缺陷,同时为了简化分析,将试件的锚固段简化为刚域,有限元模型如图6所示。对于准静态轴压过程,采用ABAQUS的Explicit(显式)求解器进行拟静力分析,即缓慢地施加外力以消除惯性效应,通常拟静力分析中的加载时间取构件最低阶模态周期的10倍以上^[17],对于本研究试件,加载时间取为0.1 s。此外,为与轴压试验吻合,试件两端采用了固接的边界条件,并在其顶部采用光滑步骤(Smooth Step)以位移的形式施加轴压荷载。对于冲击过程,为与实际试验吻合,试件采用了底部固接顶部自由的边界条件,并建立了与实际落锤相同的模型(如图7所示)对试件模型施加冲击荷载。

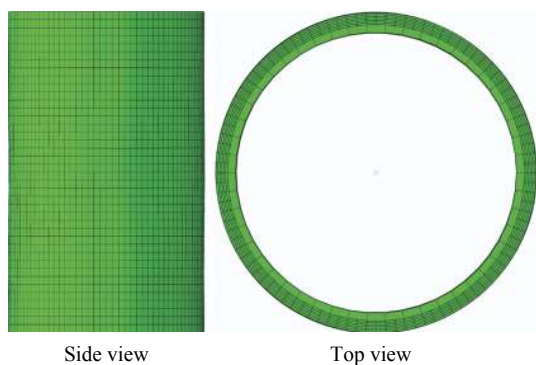


图6 GFRP增强圆钢管有限元模型

Fig. 6 Finite element model of GFRP reinforced circular steel tube

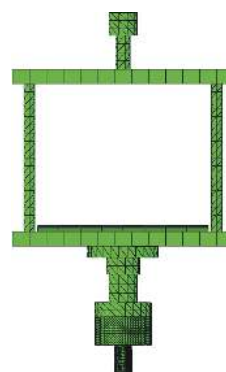


图7 落锤有限元模型

Fig. 7 Finite element model of drop hammer

2.2 材料本构模型

在ABAQUS中,一般采用Isotropic Elasto-Plasticity模型^[17]模拟钢材的准静态力学行为,所需参数通过材性试验获得,如图8所示。在低速冲击仿真中,为讨论钢材的应变率效应,采用J-C模型^[8],即

$$\begin{cases} \sigma = (A + B\varepsilon_{eq}^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \\ \varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)](1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 + D_5 T^*) \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 C 、 m 、 n 及 $D_1 \sim D_5$ 均为材料有关系数, 如表 2、表 3 所示。材性参数均来源于 Zhi 等^[2]的研究。

GFRP 具有正交各向异性的材料特点, 其本构模型较为复杂, 本研究在文献 [2] 提出的关于 GFRP 增强钢管在冲击荷载作用下仿真方法(失效模式及损伤演化法则如表 4 所示, GFRP 材料力学参数如表 5 所示, 各层间界面性能如表 6 所示)的基础上, 引入了 Shokrieh 等^[18]关于 GFRP 应变率效应的模型

$$M(\dot{\varepsilon}) = \alpha + \beta \dot{\varepsilon}^\gamma \quad (2)$$

式中: α 为 GFRP 单向板材性参数, β 及 γ 为应变率效应系数, 如表 7 所示。

表 2 Johnson-Cook 模型参数^[2]

Table 2 Parameters of the Johnson-Cook model^[2]

A/MPa	B/MPa	n	m	T_m/K	T_f/K
272.28	899.7	0.94	0.1515	1795	293

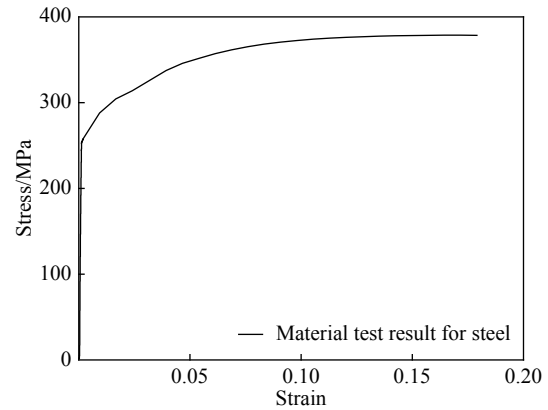


图 8 钢管材性试验结果^[2]

Fig. 8 Material test result for steel tube^[2]

表 3 Johnson-Cook 断裂准则参数^[2]

Table 3 Parameters of the Johnson-Cook fracture criterion^[2]

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
-43.408	44.608	0.016	0.0145	-0.046

表 4 初始失效准则及损伤演化法则^[2]

Table 4 Initial failure criteria and damage evolution laws^[2]

Failure modes	Initial failure criteria	Damage evolution laws
Fiber tensile failure	$F_1^t = \left(\frac{\sigma_1}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_4}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_6}{S_{13}}\right)^2 \geq 1$	$D_1^t = \frac{\varepsilon_1^{ft}}{\varepsilon_1^{ft} - \varepsilon_1^{it}} \left(1 - \frac{\varepsilon_1^{it}}{\varepsilon_1}\right)$
Fiber compression failure	$F_1^c = \left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 \geq 1$	$D_1^c = \frac{\varepsilon_1^{fc}}{\varepsilon_1^{fc} - \varepsilon_1^{ic}} \left(1 - \frac{\varepsilon_1^{ic}}{\varepsilon_1}\right)$
Resin tensile failure	$F_2^t = \left(\frac{\sigma_2}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_4}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_5}{S_{23}}\right)^2 \geq 1$	$D_2^t = \frac{\varepsilon_2^{ft}}{\varepsilon_2^{ft} - \varepsilon_2^{it}} \left(1 - \frac{\varepsilon_2^{it}}{\varepsilon_2}\right)$
Resin compression failure	$F_2^c = \left(\frac{\tau_{nt}(\theta)}{S_{23}^A + \mu_{nt}\sigma_n(\theta)}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{nl}(\theta)}{S_{12} + \mu_{nl}\sigma_n(\theta)}\right)^2 \geq 1$	$D_2^c = \frac{\gamma_r^f}{\gamma_r^f - \gamma_r^i} \left(1 - \frac{\gamma_r^i}{\gamma_r}\right)$
Stretch in-layer delamination	$F_3^t = \left(\frac{\sigma_3}{Z_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_6}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_5}{S_{23}}\right)^2 \geq 1$	$D_3^t = \frac{\varepsilon_3^{ft}}{\varepsilon_3^{ft} - \varepsilon_3^{it}} \left(1 - \frac{\varepsilon_3^{it}}{\varepsilon_3}\right)$
Compression in-layer delamination	$F_3^c = \left(\frac{\sigma_3}{Z_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_6}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_5}{S_{23}}\right)^2 \geq 1$	$D_3^c = \frac{\varepsilon_3^{fc}}{\varepsilon_3^{fc} - \varepsilon_3^{ic}} \left(1 - \frac{\varepsilon_3^{ic}}{\varepsilon_3}\right)$

表 5 GFRP 单向板材料性能^[2]

Table 5 Material properties of GFRP unidirectional laminate^[2]

Modulus/GPa	Poisson's ratio	Strength/MPa	Fracture energy/(N·mm)
$E_1=41.29$; $E_2=E_3=4.21$;	$\nu_{12}=\nu_{13}=0.31$;	$X_t=884.5$; $X_c=837.17$; $Y_t=Z_t=37.38$;	$\Gamma_1^t = 28.25$; $\Gamma_1^c = 80.1$;
$G_{12}=G_{13}=3.16$; $G_{23}=3.0$	$\nu_{23}=0.42$	$Y_c=Z_c=145$; $S_{12}=S_{13}=44.765$; $S_{23}=50.88$	$\Gamma_2^t = \Gamma_3^t = 0.36$; $\Gamma_2^c = \Gamma_3^c = 7.24$

表 6 界面性能参数^[2]

Table 6 Parameters of cohesive behavior^[2]

Elastic properties/GPa	Strength/MPa	Fracture toughness/(N·mm ⁻¹)	B-K parameter
$K_{nn}=4210$; $K_{tt}=3160$; $K_{ss}=3160$	$T_n=37.380$; $T_t=44.765$; $T_s=44.765$	$G_n=0.36$; $G_t=1.33$; $G_s=1.33$	$\eta=2.6$

表 7 GFRP 应变率效应模型所需参数

Table 7 Parameters for the model considering the strain rate effect of GFRP

Parameter	α	β	γ	Parameter	α	β	γ
E_{11} /GPa	41.29	1.139	0.276	X_t /MPa	837.17	7.721	0.886
E_{22} /GPa	4.21	0.437	0.262	Y_t /MPa	37.38	13.088	0.131
G_{12} /GPa	3.16	-0.941	0.054	Y_c /MPa	145	0.11	1.278
X_c /MPa	881.5	7.721	0.886	S /MPa	44.756	15.656	0.086

因此得到了可用于模拟 GFRP 6 种初始失效模式(纤维拉伸/压缩失效、树脂拉伸/压缩失效以及层内拉伸/压缩失效)及相应损伤演化,并能考虑 GFRP 应变率效应的 VUMAT 子程序,流程图如图 9 所示。此外,冲击过程中认为落锤保持弹性,其材料性能定义为 $E=217$ GPa, $\mu=0.3$; 落锤与试件之间的接触采用罚刚度方法进行模拟,取平均摩擦系数为 0.3。

2.3 有限元模拟结果验证

轴压试件的边界条件为两端嵌固,而低速冲击试件的边界条件为一端嵌固一端自由,故其破坏模式存在一些差异。以 S-58-1.5-30 及 D-58-2.0-90-4.5 为例,前者在跨中部位发生外部 GFRP 的树脂断裂及内部钢管的叠缩,而后者则在顶部发生了包括钢管叠缩、树脂断裂、纤维断裂及 GFRP 层内分层失效的破坏,这些破坏模式通过本文介绍的有限元模拟方法可以得到很好的仿真,如图 10 所示。此外, S-58-1.5-30 及 D-58-2.0-90-4.5 的仿真及试验荷载-位移曲线对比如图 11 所示,可知有限元模拟结果与试验结果在弹性段及荷载下降段均吻合良好,为后续关于应变率的分析奠定了基础。

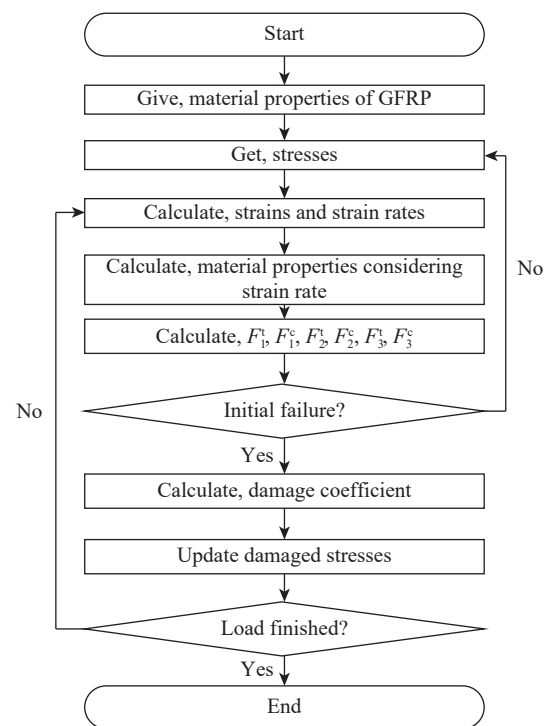


图 9 VUMAT 子程序算法

Fig. 9 Computational algorithm of the VUMAT subroutine

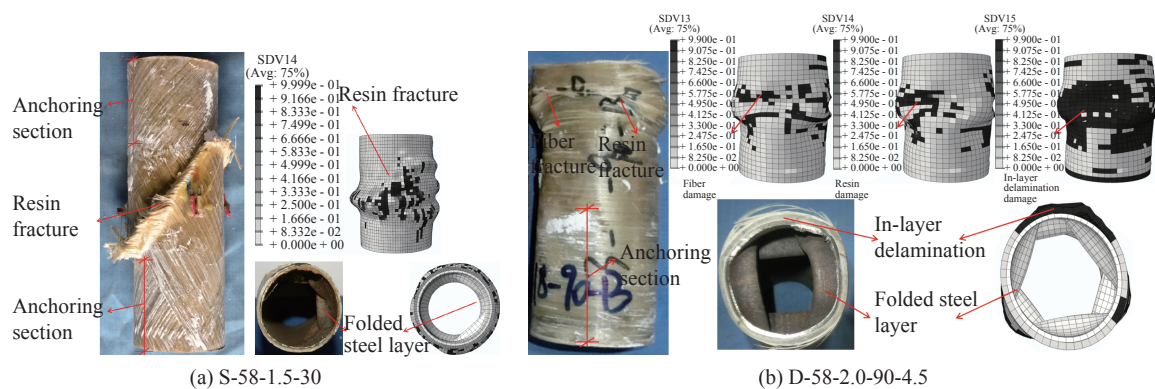


图 10 仿真与试验试件损伤模式对比

Fig. 10 Comparison between simulation and measured damage modes

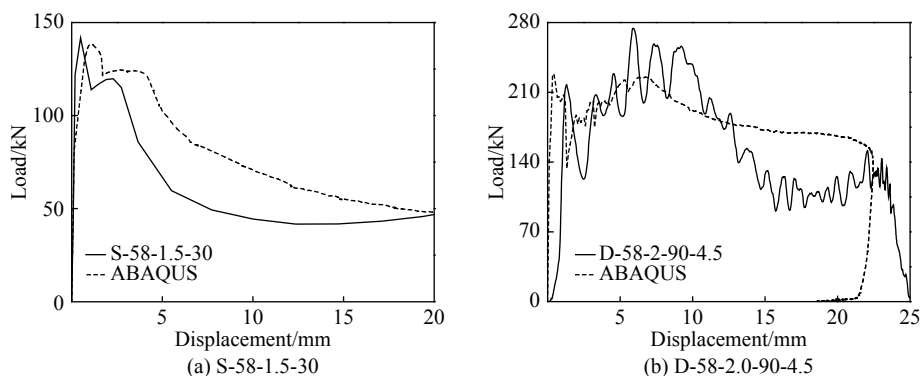


图 11 仿真及试验荷载-位移曲线对比

Fig. 11 Compared load-displacement curves between simulation and low-velocity impact test

3 应变率效应分析

由 Zhi 等^[2]的研究结果可知,对于发生叠缩式破坏的 GFRP 增强圆钢管试件,缠绕角度为 90° 时具有较好的耗能能力,故针对缠绕角度为 90° 的试件展开应变率效应分析。图 12 所示为试件 D-58-2.0-90-4.5 在不同情况下的仿真结果对比,包括考虑钢管及 GFRP 应变率效应、仅考虑钢管应变率效应、仅考虑 GFRP 应变率效应以及不考虑应变率效应 4 种情况。通过对比得到如下结论:(1)考虑应变率效应后试件的承载能力(如图 12(a)所示)及耗能能力(相同轴向位移下消耗的能量,如图 12(b)所示)均有所提高,故在低速冲击荷载作用下,试件的应变率效应不应忽略;(2)同时考虑 GFRP 及钢管应变率效应时的结果最大,但比仅考虑钢管应变率效应时的结果提升不多,由此可知在低速冲击范围内,钢管的应变率效应对于构件的影响更为显著。

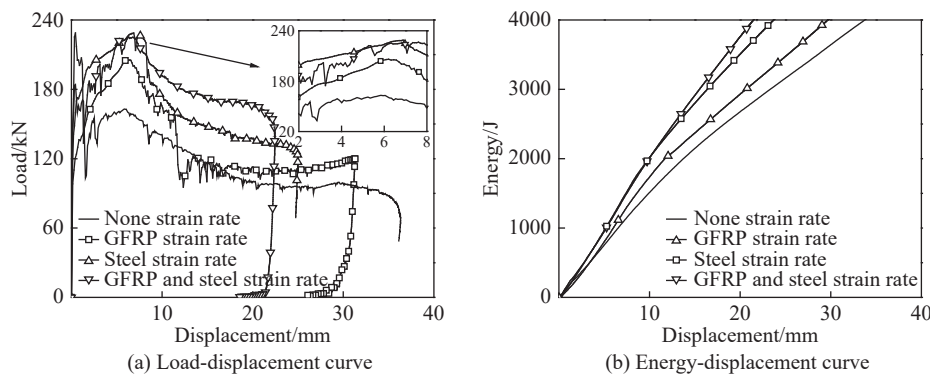


图 12 D-58-2.0-90-4.5 在不同情况下的仿真结果

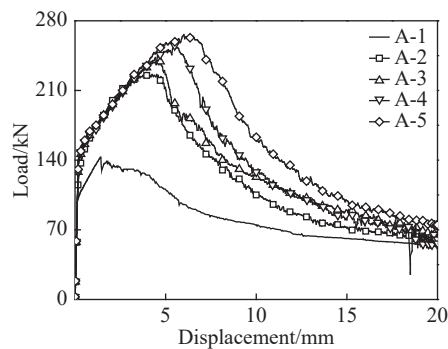
Fig. 12 Simulated results of D-58-2.0-90-4.5 with different situations

为进一步讨论低速冲击范围内,应变率效应对 GFRP 增强圆钢管试件性能的影响,针对恒定速率加载过程开展了一系列有限元模拟研究,试件设计参数及加载工况如表 8 所示。对比试件 A-1~试件 A-5 的仿真结果(图 13)可以得到如下结论:(1)试件在准静态及动态轴压荷载作用下具有相似的荷载-位移曲线形式,说明材料应变率效应对试件破坏模式的影响不大;(2)除准静态过程外,其余试件的荷载上升段随加载速率的增大变化不大,但峰值荷载明显增大,说明材料应变率效应与试件极限强度有正相关的关系,但对试件刚度影响不大;(3)随着加载速率增大,试件的耗能能力明显增大。此外,通过不同的钢管及 GFRP 壁厚试件结果的对比(图 14)可知,在低速冲击范围内,钢管壁厚较大试件的峰值荷载及耗能能力随着加载速率增大具有更明显的增大效果,表明相对 GFRP 而言,钢管的应变率效应更为明显。

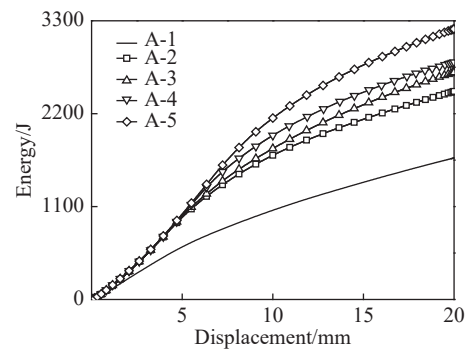
表 8 仿真试件设计

Table 8 Design of simulated specimens

Specimen	D/mm	t/mm	$[\theta/(\circ)]_n$	t_c/mm	L/mm	Displacement/mm	Loading speed/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
A-1	58.0	2.0	$[90]_6$	2.0	100	20.0	Quasi-static
A-2	58.0	2.0	$[90]_6$	2.0	100	20.0	2.0
A-3	58.0	2.0	$[90]_6$	2.0	100	20.0	4.0
A-4	58.0	2.0	$[90]_6$	2.0	100	20.0	6.0
A-5	58.0	2.0	$[90]_6$	2.0	100	20.0	8.0
B-1	58.0	2.0	$[90]_6$	3.0	100	20.0	Quasi-static
B-2	58.0	2.0	$[90]_6$	3.0	100	20.0	2.0
B-3	58.0	2.0	$[90]_6$	3.0	100	20.0	4.0
B-4	58.0	2.0	$[90]_6$	3.0	100	20.0	6.0
B-5	58.0	2.0	$[90]_6$	3.0	100	20.0	8.0
C-1	58.0	3.0	$[90]_6$	2.0	100	20.0	Quasi-static
C-2	58.0	3.0	$[90]_6$	2.0	100	20.0	2.0
C-3	58.0	3.0	$[90]_6$	2.0	100	20.0	4.0
C-4	58.0	3.0	$[90]_6$	2.0	100	20.0	6.0
C-5	58.0	3.0	$[90]_6$	2.0	100	20.0	8.0



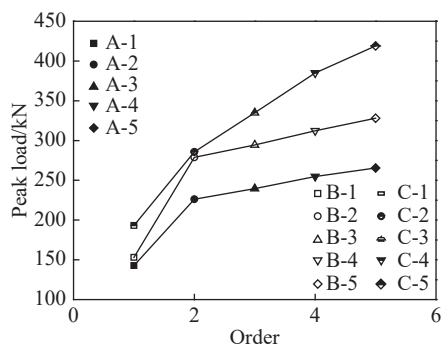
(a) Load-displacement curve



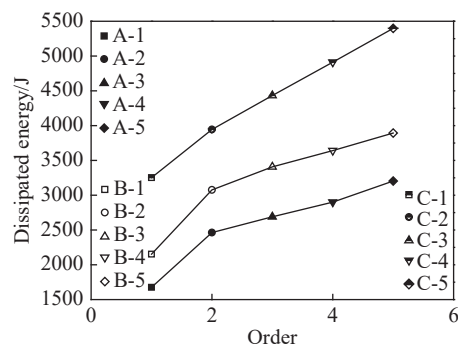
(b) Energy-displacement curve

图 13 试件 A-1~A-5 的仿真结果

Fig. 13 Simulated results of A-1-A-5



(a) Peak load



(b) Dissipated energy

图 14 仿真结果对比

Fig. 14 Comparison of simulated result

4 结 论

通过试验结果对比可知, 由于应变率效应的影响, 在低速冲击荷载作用下, GFRP 增强圆钢管构件的强度较承受准静态轴压荷载的构件有明显提升。介绍了一种可以考虑 GFRP 及钢材应变率效应的有限元仿真方法, 并通过数值模拟对比分析了考虑钢管及 GFRP 应变率效应、仅考虑钢管应变率效应、仅考虑 GFRP 应变率效应以及不考虑应变率效应 4 种情况下试件的性能, 得到在低速冲击荷载作用下, 试件应变率效应不应忽略, 且相较 GFRP 而言, 钢管的应变率效应对于构件的影响更为明显。最后, 通过一组仿真研究进一步讨论了应变率效应对构件的影响, 得出结论: (1) 材料应变率效应对试件破坏模式影响不大; (2) 材料应变率效应与试件极限强度有正相关的关系, 但对试件刚度影响不大; (3) 随着加载速率增大, 试件的耗能能力明显增大。

参考文献:

- [1] 岳清瑞, 杨勇新. 纤维增强复合材料加固结构耐久性研究综述 [J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 8–15.
YUE Q R, YANG Y X. Introduction to durability of concrete strengthened with fiber reinforced polymers [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(6): 8–15.
- [2] 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.
- [3] BATUWITAGE C, FAWZIA S, THAMBIRATNAM D, et al. Impact behaviour of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) strengthened square hollow steel tubes: a numerical simulation [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 131: 245–257.
- [4] ALAM M I, FAWZIA S. Numerical studies on CFRP strengthened steel columns under transverse impact [J]. Composite Structures, 2015, 120: 428–441.
- [5] 李洋, 王俊, 刘伟庆. 纤维复合材料-钢组合柱侧向冲击试验和有限元仿真分析 [J]. 钢结构, 2017, 32(2): 21–26.
LI Y, WANG J, LIU W Q. Experimental study and FE simulation of the anti-impact performance of GFRP-steel column subjected to transverse impact [J]. Steel Construction, 2017, 32(2): 21–26.
- [6] KADHIM M M A, WU Z J, LEE S C. Loading rate effects on CFRP strengthened steel square hollow sections under lateral impact [J]. Engineering Structures, 2018, 171: 874–882.
- [7] KADHIM M M A, WU Z J, LEE S C. Experimental study of CFRP strengthened steel columns subject to lateral impact loads [J]. Composite Structures, 2018, 185: 94–104.
- [8] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large Strains, high strain rates and high temperatures [C]//Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics. The Hague, Netherlands, 1983: 1–7.
- [9] ZERILLI F J, ARMSTRONG R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations [J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61(5): 1816–1825.
- [10] LIN L, FAN F, ZHI X D. Dynamic constitutive relation and fracture model of Q235A steel [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 274: 463–466.
- [11] ZHANG D N, SHANGGUAN Q Q, XIE C J, et al. A modified Johnson-Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 619: 186–194.
- [12] TAN J Q, ZHAN M, LIU S, et al. A modified Johnson-Cook model for tensile flow behaviors of 7050-T7451 aluminum alloy at high strain rates [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 631: 214–219.
- [13] HASHIN Z. Failure criterion for unidirectional fiber composite [J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47: 329–334.
- [14] PUCK A, SCHURMANN H. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models [J]. Composites Science and Technology, 2001, 62: 1633–1662.
- [15] SINGH H, NAMALA K K, MAHAJAN P. A damage evolution study of E-glass/epoxy composite under low velocity impact [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 76: 235–248.
- [16] LIAO B B, LIU P F. Finite element analysis of dynamic progressive failure of plastic composite laminates under low velocity impact [J]. Composite Structures, 2017, 159: 567–578.
- [17] Dassault Systèmes Simulia Corp. ABAQUS 6.11 user's manual [Z]. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2011.

- [18] SHOKRIEH M M, KARAMNEJAD A. Investigation of strain rate effects on the dynamic response of a glass/epoxy composite plate under blast loading by using the finite difference method [J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2014, 50(3): 295–310.

Strain Rate Effect of GFRP-Reinforced Circular Steel Tube under Low-Velocity Impact

WU Qijian^{1,2}, ZHI Xudong^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;*

2. *Key Laboratory of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters of the Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China*)

Abstract: This paper discussed the strain rate effect of glass fiber/epoxy resin composite (GFRP)-reinforced Q235 circular steel tube under low-velocity impact load. Firstly, the responses (axial load and displacement) of GFRP-reinforced steel tube under quasi-static and low-velocity impact load were obtained through axial compression tests and low-velocity impact tests respectively, which provided gist for the subsequent simulation. Secondly, a VUMAT subroutine considered initial failure modes, damage evolution and strain rate effect of GFRP was introduced; then the axial compression and low-velocity impact processes were simulated. Finally, the results under 4 situations (ignoring strain rate effect, considering the strain rate effect of steel tube, considering the strain rate effect of GFRP and considering the strain rate effect of both steel tube and GFRP) was compared using simulation.

Keywords: strain rate effect; steel tube; glass fiber/epoxy resin composite; low-velocity impact test; finite element simulation