

Z型Q345冷弯钢构件率相关本构模型下的动态冲击失稳研究

李佰树, 李发超, 吴梦景, 朱 珏*

(宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要:以Z型Q345薄壁冷弯钢构件为研究对象, 首先测试了试验钢在 $10^{-4} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 应变率内的材料力学属性, 并拟合得到了由Johnson-Cook本构模型表述的材料本构参数, 同时对拉伸断裂的试件断口做了微观形貌分析. 接着, 在落锤装置上对Z型冷弯钢构件做不同速度的轴向冲击试验, 研究构件受到冲击的动态失稳变形情况. 然后, 通过ABAQUS软件建立了可以反映锤头冲击构件过程的仿真模型, 考虑应变率效应和初始缺陷等因素, 分析了构件主要部位端部质点的位移和速度变化情况以及应力波传播效应的影响. 结果表明: 薄壁冷弯钢构件受到外部冲击作用会产生动态屈曲, 随着冲击载荷增大, 发展为明显的塑性变形. 应力波的传播效应对动态屈曲模态的阶跃起着关键的作用.

关键词:冷弯钢; 动态冲击; Johnson-Cook模型; 应变率; 有限元仿真

中图分类号: O347.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132(2020)06-0045-08

冷弯薄壁钢构件因其轻质高强等特点被广泛地使用在建筑结构、交通设施及军事工程等领域. 相较于静力状态下钢构件的失稳破坏来说, 在遭受外部动态载荷作用时其失稳破坏形式与机理有很大差异, 主要与冷弯钢材的应变率效应和构件中的应力波传播效应等密切相关. 不同于热轧钢的失效形式, 冷弯钢构件有整体屈曲、局部屈曲和畸变屈曲等主要屈曲形式^[1]. 相比于准静态加载时材料的力学性能, 强载荷下的动态力学问题必须要考虑应变率效应^[2]. 对于如Z型等常见薄壁开口冷弯钢构件的抗冲击性能, 研究其在不同轴向冲击速度下的动态屈曲模式和残余变形是直接而有效的方式.

目前国内外学者对薄壁结构在动态冲击下的失效问题已有不同程度的探索. 1996年, Budiansky等^[3]提出板壳结构在承受微幅波动的脉冲时, 构件的挠曲会有所增加从而发生动态屈曲, 但是却保守地没有将构件屈曲后的极限承载力考虑进去. 2007年, Kubiak^[4]研究了薄壁构件在一定时长脉冲

下整体与局部交互动态失稳的边界脉冲幅值, 然而其不同工况条件下需要进行修正, 没有被广泛采用. 近年来, 有部分学者发现, 板柱结构端部受到动态冲击时, 其动态屈曲也受到应力波传播的影响^[5], 这也让构件动态失稳研究变得更加复杂.

冷弯薄壁钢构件在动态冲击下的屈曲失效, 要考虑冷弯钢材料的应变率效应、应力波传播效应和初始缺陷等诸多因素. 本文通过Q345冷弯钢构件轴向冲击试验与有限元仿真分析结合来综合考虑这些因素对冷弯钢构件动态失稳和屈服变形的影响.

1 材料率相关拉伸试验

为了研究不同应变率下Q345冷弯钢的力学性能与微观形貌变形机理, 并且为后续的仿真分析提供较为准确的本构参数, 对钢材料进行 $10^{-4} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的拉伸试验^[6]. 为了避免尺寸因素的影响^[7], 准静态与动态拉伸试样均按照室温

收稿日期: 2020-04-01.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11972203, 11572162); 浙江省自然科学基金(LY13A020007).

第一作者: 李佰树(1991-), 男, 安徽宿州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冷弯钢冲击. E-mail: teamoy@163.com

*通信作者: 朱珏(1979-), 女, 浙江金华人, 博士/教授, 主要研究方向: 冷弯钢结构. E-mail: zhujiue@nbu.edu.cn

拉伸试验方法的国标^[8]规定设计. 试样形状尺寸如图 1 所示, 其中拉伸段平行长度 $L_c=40$ mm, 标距 $L_0=20$ mm, 试样厚度 1.2 mm. 拉伸试样从已经折弯成 Z 型钢构件的腹板上沿轧制方向切取加工而成.

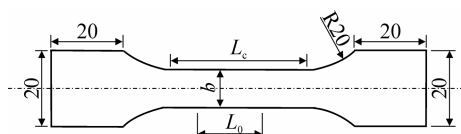


图 1 Q345 冷弯钢材料拉伸试样(mm)

在 MTS810 材料试验机上对试样进行 $10^{-4} \sim 1$ s^{-1} 应变率的准静态和低应变率拉伸试验, 试样在不同应变率下的应力—应变曲线如图 2 所示. 从图中可以看出在 $10^{-4} \sim 10^{-2} s^{-1}$ 应变率区间(准静态)试样任一应变所对应的应力水平相近, 说明准静态时材料的应变率效应不明显. 而当应变率超过 $10^{-2} s^{-1}$ 时, 材料的屈服强度及强化阶段应变值都有了显著的提高.

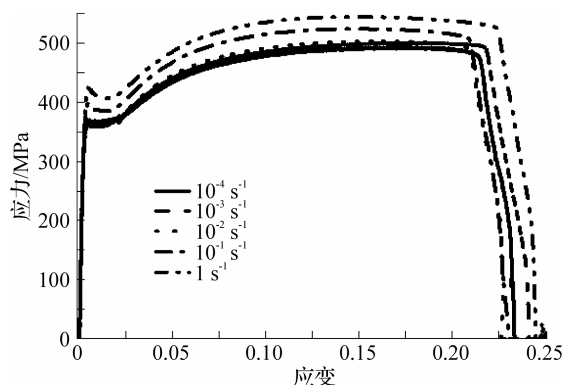
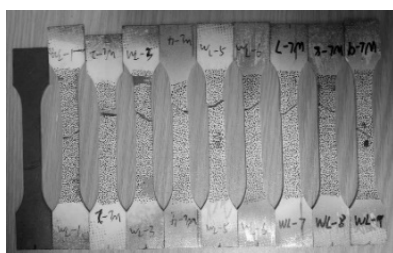


图 2 准静态和低应变率下的应力—应变关系

动态拉伸试验在 HTM-5020 高速拉伸仪上进行, 采用 DIC 非接触式方法测试试件的应变值, 断裂试样及其工程应力—应变曲线如图 3 所示. 随着应变率的增加, 该材料的屈服强度和极限强度明显增大, 同时断裂应变也有增大^[9-10], 具有较强的应变率强化效应.



(a)断裂试样

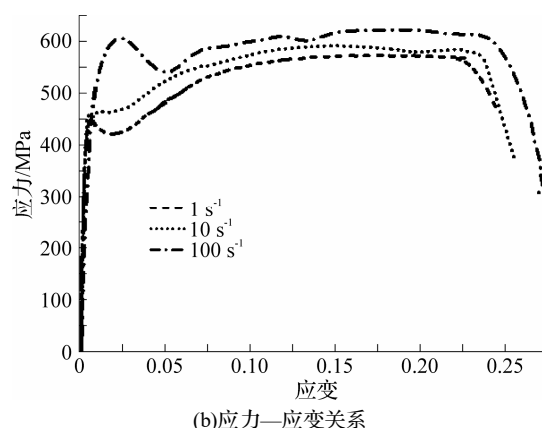


图 3 高速拉伸时的断裂试样和应力—应变关系

通过线切割截取拉伸试样断口处小段材料, 将其放在 SU5000 电镜下观察断口的微观形貌并进行分析. 图 4 为试样拉伸后断口的微观形貌.

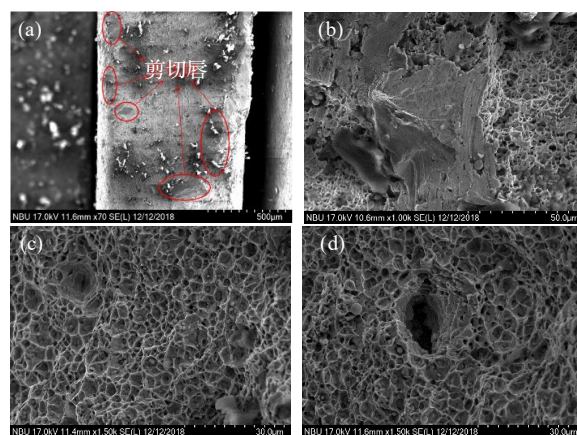


图 4 Q345 钢试样的断口微观形貌

从图 4(a)中可看出矩形截面断口外缘处有若干剪切唇. 图 4(b)为剪切唇位置的放大图, 可以观察到光滑的截切面. 图 4(c)是断口中间部位 1500 倍下的微观形貌, 从中看到分布有较多的韧窝和颗粒状物. 钢材中的杂质与析出颗粒对断口处韧窝的形成有重要的影响^[11]. 图 4(d)为试样断口处的部分氧化杂质或气泡微孔洞. 与原试样相比, 断裂试样明显被拉长, 同时断口位置出现大量的韧窝, 可以判断该试样发生了韧性断裂. 在试样薄壁截面边缘产生了剪切唇, 参照李红英等^[12]的研究, 矩形薄板的断口属于剪切断裂, 拉伸条件下最大切应力的方向和拉应力呈 45° 角.

2 Q345 材料本构模型的拟合

Johnson-Cook 模型是被广泛认可的材料应变

率相关动态本构关系, 有利于描述后续冲击有限元模型的应变率相关材料属性. 本文选取 Johnson-Cook 模型拟合 Q345 冷弯钢的本构关系, 其表达式如下:

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_{eq}^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_{eq}^*) (1 - T^{*m}),$$

式中: A 为屈服强度; B 和 n 为应变强化参数; C 为应变率影响系数; σ_{eq} 为等效应力; ε_{eq} 为等效应变; $\dot{\varepsilon}_{eq}^*$ 为等效塑性应变率. $\dot{\varepsilon}_{eq}^* = \dot{\varepsilon}_{eq} / \dot{\varepsilon}_0$, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率. 由黄西成等^[13]确定参考应变率数值的研究, 取 $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ 作为动态冲击数值模拟时本构拟合的参考应变率. T^* 在室温时为 0^[14], 表达式可简化为:

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_{eq}^n).$$

图 5 是 1 s^{-1} 应变率下的应力—应变关系曲线, 从线弹性阶段可以得到其弹性模量为 196 GPa, 而泊松比取值 0.3. A 取参考应变率下拉伸屈服时的工程应力值, 这里有 $\sigma_{eq} = \sigma_y = A = 406.8 \text{ MPa}$. B 和 n 的数值是在真实的应力应变下拟合计算得到的, 将其按下式转换成真实应力应变: $\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon)$, $\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon)$, 如图 6 所示.

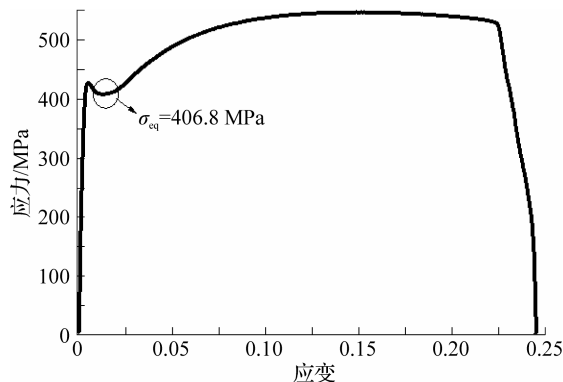


图 5 1 s^{-1} 应变率的工程应力—应变关系

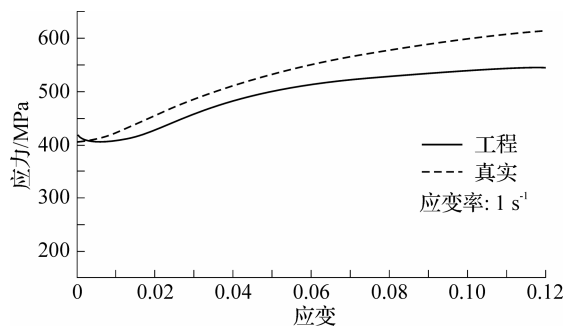


图 6 塑性阶段的工程和真实应力—应变关系

通常 B 和 n 由材料出现屈服到发生断裂前的整个拉伸过程来标定, 然而试验中很难准确获得极

限应力后的材料真实应力—应变关系, 所以这里由极限应力前的塑性阶段来计算 B 和 n 的值, 如图 7 所示, 能够得到 $B = 1\,028.8 \text{ MPa}$, $n = 0.72$. 通过拟合 Q345 材料不同应变率与屈服应力的曲线就有 $C = 0.04$, 如图 8 所示. 表 1 为 Q345 冷弯钢材料的 Johnson-Cook 本构模型相关参数.

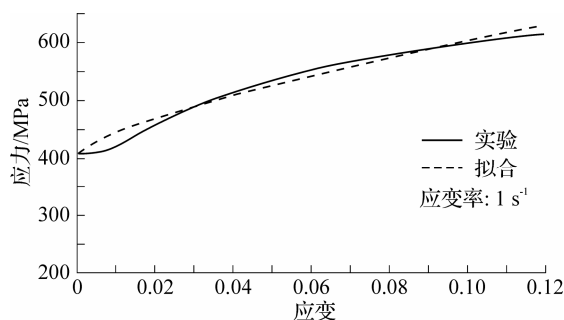


图 7 塑性状态下关系曲线的拟合

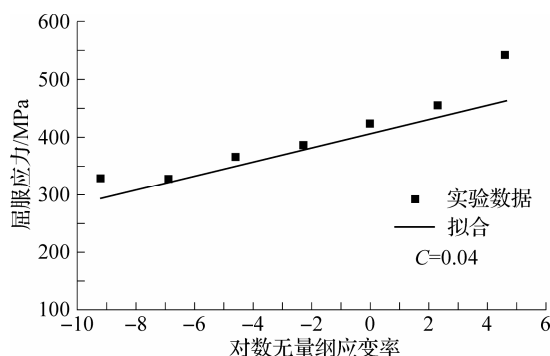


图 8 系列应变率对应的屈服应力的拟合

表 1 Q345 冷弯钢的 Johnson-Cook 模型的属性参数

A/MPa	B/MPa	n	C
406.8	1 028.8	0.72	0.04

3 Z 型钢轴向冲击试验及仿真分析

3.1 轴向冲击试验

本文主要利用图 9(a)所示的大型落锤装置对图 9(b) Z 型冷弯薄壁钢构件进行了 $2 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度下的轴向冲击试验. 表 2 为 50 kg 落锤冲击高度、速度、能量之间的对应关系. Z 型冷弯薄壁钢构件腹板高度 h 和翼缘宽度 b 分别为 80 和 70 mm, 卷边长 d 为 10 mm, 厚度 t 为 1.2 mm, 试件长度 L 为 48 mm. 试样腹板底部由高 55 mm、宽 50 mm 的磁力座固定在试验平台上. 通过高速摄像机记录撞击前后锤头和腹板上部散斑的变化, 利用 DIC 技术得到锤头速度变化和腹板顶端位移过程.

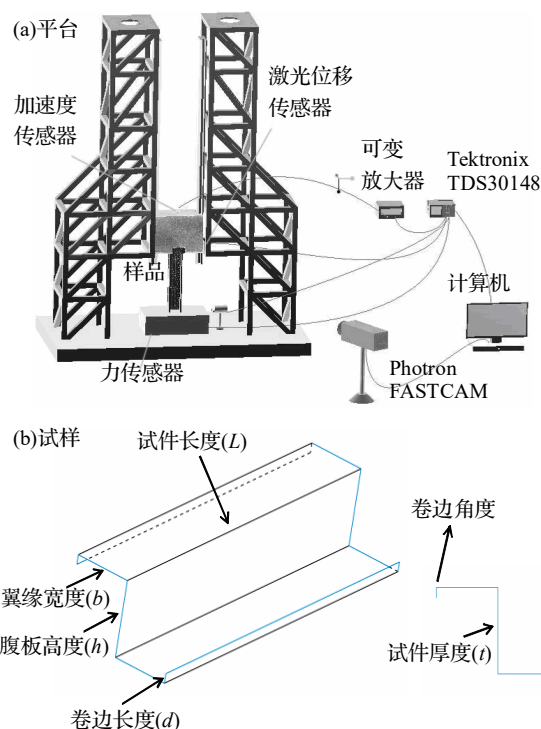


图9 大型落锤冲击平台和Z型冷弯钢试样

表2 锤头下落高度、加载速度和对应能量值的关系

下落高度/m	加载速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	能量值/J	下落高度/m	加载速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	能量值/J
0.20	2	100	2.45	7	1 225
0.45	3	225	3.20	8	1 600
0.80	4	400	4.05	9	2 025
1.25	5	625	5.00	10	2 500
1.80	6	900			

如图10所示,不同速度冲击下构件的残余变形基本都发生在顶端.在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度下构件没有明显的变形,冲击能量还不能对构件造成破坏;在 $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时构件顶端发生了明显的局部屈曲变形;而在 $5\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度冲击下构件顶端发生了折叠屈曲变形.随着冲击速度增大,折叠屈曲变形越明显.在 $9\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度冲击下,构件出现局部屈曲和畸变屈曲的相关屈曲以及屈曲与撕裂的耦合破坏.

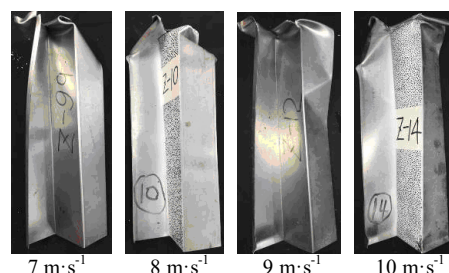
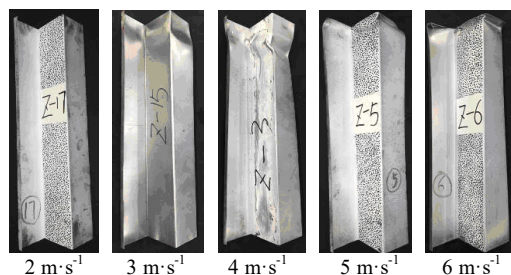


图10 系列冲击速度下冷弯钢构件的残余变形

图11是锤头撞击过程中速度的变化情况.锤头冲击构件的瞬间其速度迅速降低,而随着冲击速度的增大,锤头速度减小到0的用时也在增加,表明构件受压缩的轴向位移更大.反射波传回接触面时锤头发生反弹, $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 冲击下锤头反弹的速度较大,而速度超过 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时没有较明显的反弹现象.结合构件的残余变形分析,高速冲击下的构件发生了明显的折叠变形,说明构件受到冲击后吸收了能量,将动能转化为塑性变形和内能.而在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的冲击作用还不足以使构件发生较明显的塑性变形,所以构件出现了明显的反弹,反弹速度接近于冲击速度.

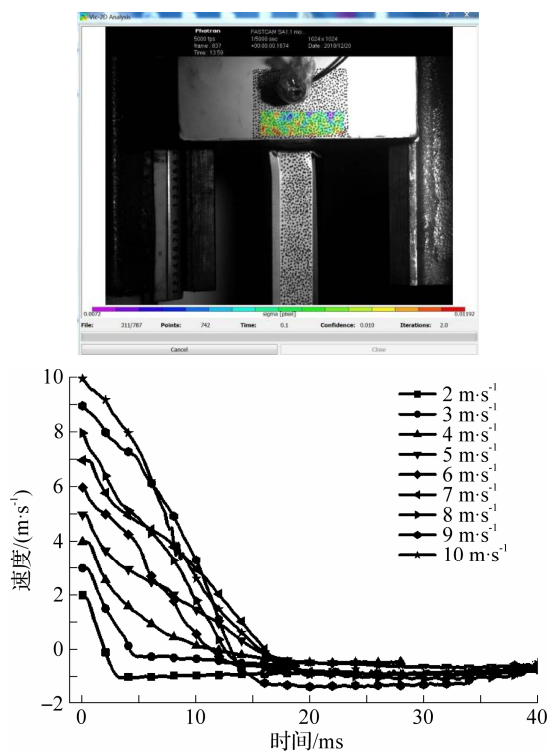


图11 散斑分析与锤头速度变化曲线

3.2 轴向冲击下Z型冷弯钢构件的仿真

通过数值仿真的方法能够直接高效地模拟分

析冲击过程中构件实时的应力状态与屈曲变形情况, 图 12 所示为对 Z 型冷弯钢构件的落锤冲击试验进行有限元建模. 考虑到动态冲击时冷弯钢材料的应变率效应, 在 ABAQUS 中采用材料试验拟合的 Johnson-Cook 模型来描述该材料本构属性. 落锤冲击面等效为刚性平面, 将其质量定义在平面中心点, 使冷弯钢构件能够被理想轴压.

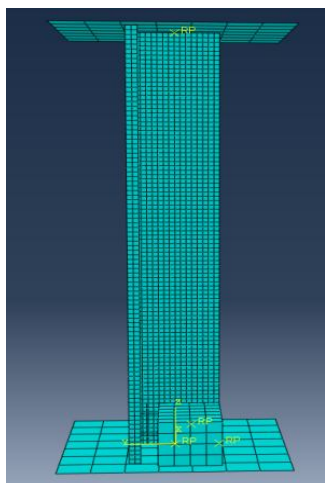


图 12 构件有限元仿真模型

薄壁结构的轴压分析需要考虑初始缺陷对构件发生屈曲变形的影响. 参考张旭等^[15-16]对冷弯钢构件屈曲变形发生模态的研究, 首先计算构件静态轴压时前 5 阶的屈曲模态和特征值^[17], 然后得到各个特征值倒数在其倒数之和中的比例, 并将其作为缺陷因子, 见表 3.

表 3 各屈曲模态对应的特征值与缺陷因子

模态	特征值	特征值倒数	缺陷因子
1 阶	662.99	0.001 51	0.212
2 阶	680.35	0.001 46	0.204
3 阶	690.47	0.001 44	0.202
4 阶	730.84	0.001 36	0.191
5 阶	731.52	0.001 36	0.191

3.3 动态冲击仿真结果分析

图 13 为有限元仿真和试验中构件在不同冲击速度下的残余变形对比. 从中可以看出仿真的构件残余变形及不同速度下腹板、翼缘等部位的变形与落锤冲击试验中的残余变形较为接近. 利用有限元模型分析不同冲击速度下构件腹板、翼缘和卷边受撞击端部质点纵向位移和速度的变化情况, 同时也对构件中应力波的传播过程进行研究. 由

此分析出 Z 型冷弯钢构件在不同速度下动力失稳的发展过程.

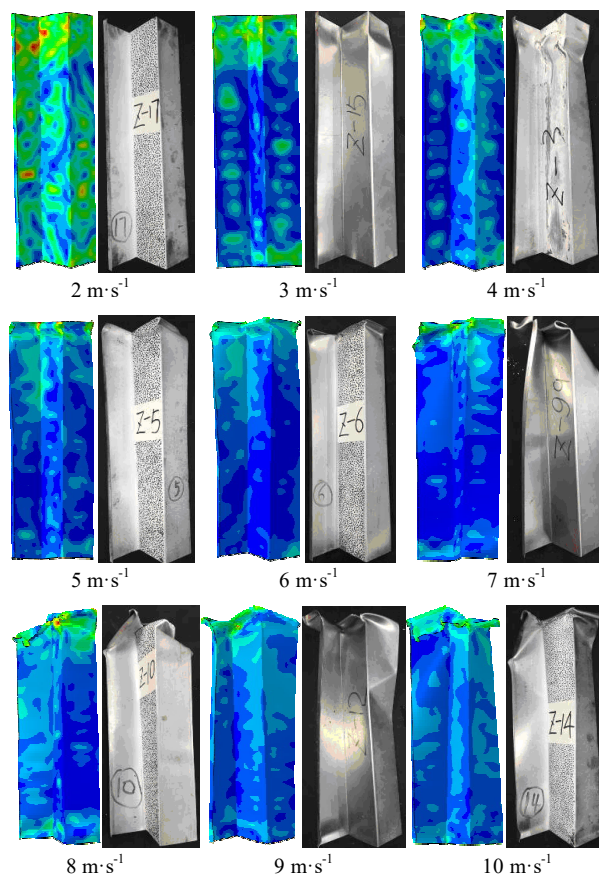
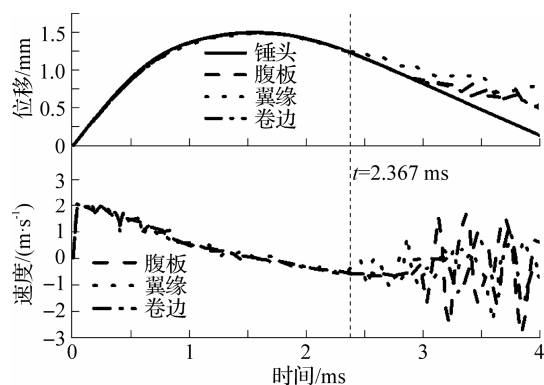
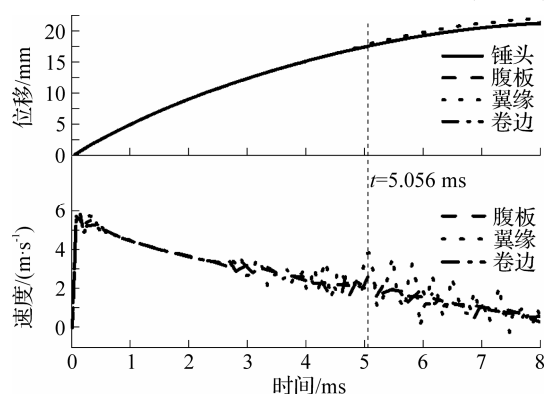
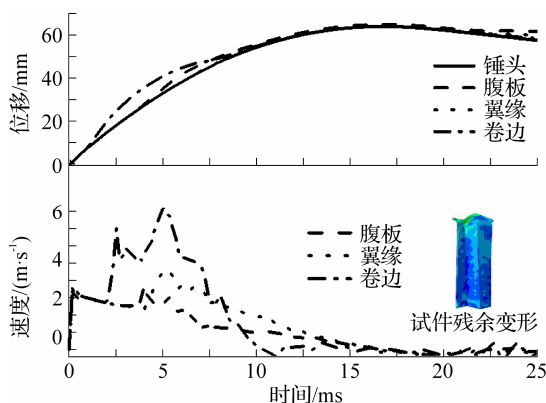


图 13 系列冲击速度下试验与仿真残余变形

通过有限元软件提取 2、6 和 9 m/s³ 种冲击速度下构件腹板、翼缘与卷边受撞击端部质点的位移和速度变化曲线, 如图 14~16 所示. 2 和 6 m/s³ 加载速度下翼缘部分首先与锤头脱离(图 14 中 $t=2.367$ ms 与图 15 中 $t=5.056$ ms 时分离), 分析出此时翼缘受到腹板的约束会最先失去作用, 这不同于张旭^[15]得到的 C 型冷弯钢构件动态冲击下卷边位置先分离的情况. 9 m/s³ 加载速度时构件卷边首先开始从锤头分离, 并随着速度的增加有明显的波动, 表明在卷边受到翼缘的约束在较高加载速度下会有所减弱. 同时发现在中、低加载速度时, 随着加载速度的提高翼缘与锤头分离时间也在增大, 而在 9 m/s³ 时其对应的脱离时间却在减小. 由此得知: 当构件受到较高速冲击时会出现较明显的塑性变形, 卷边受到翼缘的约束作用有所减弱, 这就是构件受冲击端从锤头分离的时间减小的重要原因.

图 14 构件冲击端质点位移和速度变化曲线($2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)图 15 构件冲击端质点位移和速度变化曲线($6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)图 16 构件冲击端质点位移和速度变化曲线($9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

研究应力波的传播过程在构件受冲击时动态屈曲失稳的影响,从构件冲击端开始每隔 100 mm 在腹板中心线方向提取各点的位移变化曲线,如图 17 所示.构件受到冲击时端部质点率先出现纵向位移,随后每 0.02 ms 左右中心线上的下一个质点也将出现位移,直至 0.096 ms 时应力波传播到构件底端并出现反射现象.从图 17 观察到在 480 mm 位置的质点约 0.1 ms 处出现微幅的位移,这是由于底端受到磁力座的约束作用,导致其出现微小的移动.参考应力波的相关知识^[18]可知,当产生的反

射波传播到构件受冲击端时会出现拉伸波,导致构件端部从落锤冲击底面分离开.

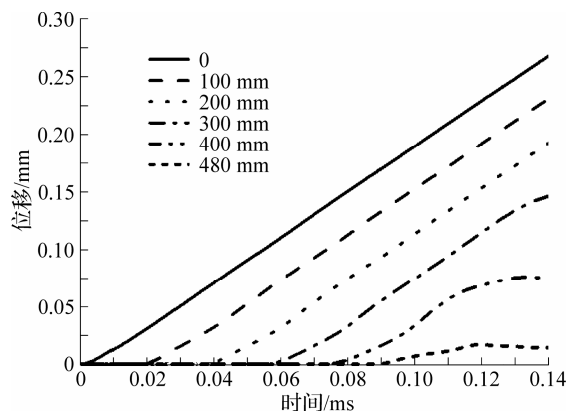


图 17 应力波在构件动态冲击下的传播

根据构件各质点的速度变化曲线,在同一时间坐标下考虑冲击载荷的变化情况,如图 18~20 所示. $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 加载速度时构件的冲击载荷出现了接近阶梯式的上升现象(图 18(b)),同时对应的质点速度变化曲线也发生了一定幅度的波动,而冲击载荷出现平台位置并没有达到构件的动态屈服应力值.通过图 14 观察到,在出现平台的时间段,构件的腹板等部位端部均没有从锤头脱离,考虑到构件未出现明显的残余变形,可以推断出曲线平台并非构件的屈服变形导致的.经过构件的多阶模态分析,可以得到静力条件下各阶屈服应力值,见表 4. $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时腹板端部质点的前两个平台区应力为 68.6 、 193.7 MPa ,其中后者接近于第 3 阶的屈曲应力值,因此推断曲线平台区是由于构件在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 加载速度下出现了动态屈曲的阶跃.还可以观察到 6 和 $9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 情况下曲线在到达峰值前有一段很小的平台区,对应的质点速度有所波动,而构件端部尚未与锤分离.分析其残余变形可知,在此情况下构件发生了短时的动力失稳(小平台)后很快就进入了屈服状态.两种冲击速度下的失稳平台应力分别为 203.7 和 258.4 MPa ,对应第 5 阶和第 12 阶模态的应力值.失稳的应力随着加载速度的增加而增大,可见构件并不总是出现 1 阶屈曲变形,而是可能随着冲击速度的改变出现高阶的动态屈曲形式.冷弯钢构件由自身较明显的塑性变形吸收落锤的冲击能量.综合上面的分析可以看出应力波的传播效应对薄壁冷弯钢构件的动态屈曲失稳起着关键的作用.

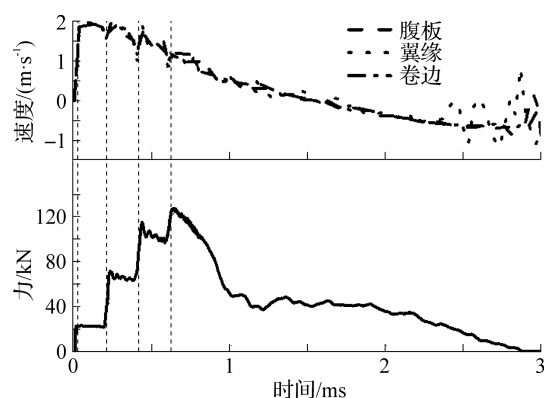
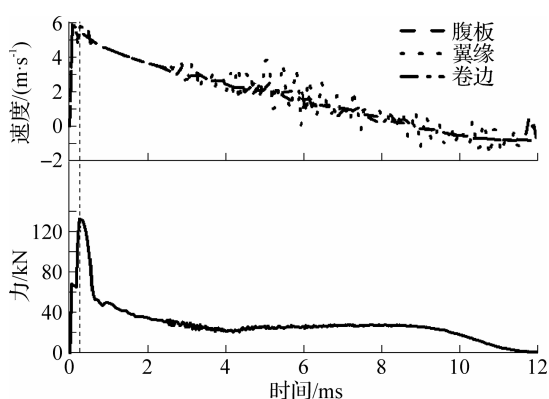
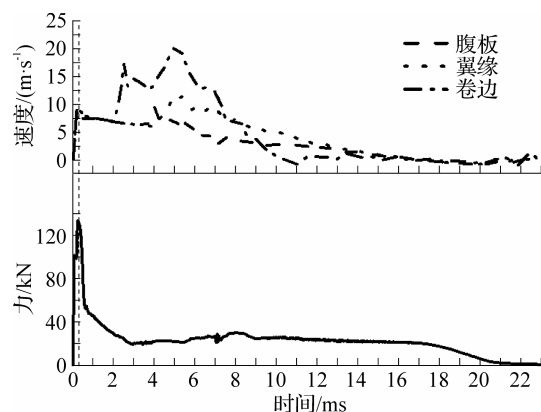
图 18 构件冲击端质点速度和冲击力变化曲线($2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)图 19 构件冲击端质点速度和冲击力变化曲线($6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)图 20 构件冲击端质点速度和冲击力变化曲线($9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

表 4 Z 型冷弯钢构件前 12 阶模态屈曲应力值

模态	应力/MPa	模态	应力/MPa	模态	应力/MPa
1 阶	186.2	5 阶	206.3	9 阶	245.1
2 阶	186.4	6 阶	222.1	10 阶	253.3
3 阶	194.0	7 阶	223.7	11 阶	253.5
4 阶	196.2	8 阶	242.6	12 阶	260.7

4 结论

针对薄壁冷弯钢构件在动态载荷下的失稳破

坏, 本文通过对 Z 型 Q345 薄壁冷弯钢构件的多组不同速度的轴向冲击试验, 并结合有限元仿真模拟, 综合考虑分析了率相关强化效应、初始缺陷和应力波传播等多种因素下的屈曲失稳破坏形式, 进一步推动了薄壁冷弯钢构件在建筑结构等动态载荷情况下安全性的深入研究。

(1)对 Q345 冷弯钢材料进行了从准静态到中高应变率下的拉伸试验, 获得了 $10^{-4} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 范围内的应力—应变曲线, 可以看到该材料在动态加载下的应变率强化效应十分明显。通过选取并拟合 Johnson-Cook 本构模型, 得到材料的率相关动态本构模型。

(2)落锤低速冲击时腹板对翼缘的约束作用率先失效, 而当速度过大时 Z 型冷弯钢构件会发生较大的塑性变形, 其翼缘对卷边的约束作用随之减小, 这是顶端质点与锤头脱离时间减小的主要原因。

(3)根据冷弯钢构件质点速度时程曲线在相同时间坐标轴下对冲击力变化过程的分析, 发现构件在低速冲击下尚未发生明显残余变形时, 冲击力及速度时程曲线均出现了多个平台区, 也即出现了多个动态屈曲阶跃现象。

(4)在更高速度的冲击下, 冷弯钢构件出现短暂的动态失稳便很快达到屈服状态。随着冲击速度的提高, 直接出现高阶屈曲模态, 构件屈服后的残余变形也显示高阶屈曲的变形特性。

参考文献:

- [1] Lau S C W, Hancock G J. Distortional buckling formulas for channel columns[J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(5):1063-1078.
- [2] 王礼立, 胡时胜, 杨黎明, 等. 材料动力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2017.
- [3] Hutchinson J W, Budiansky B. Dynamic buckling estimates[J]. AIAA Journal, 1966, 4(3):525-530.
- [4] Kubiak T. Criteria of dynamic buckling estimation of thin-walled structures[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(10/11):888-892.
- [5] Vaughn D G, Canning J M, Hutchinson J W. Coupled plastic wave propagation and column buckling[J]. Journal of Applied Mechanics, 2005, 72(1):139-146.
- [6] 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.
- [7] Xiao B, Xu L, Zhao L, et al. Tensile mechanical properties, constitutive equations, and fracture mechanisms of a novel 9% chromium tempered martensitic steel at elevated temperatures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 690:104-119.
- [8] GB/T228-2002. 金属材料-室温拉伸实验方法[S].
- [9] Sun M, Packer J A. High strain rate behaviour of cold-formed rectangular hollow sections[J]. Engineering Structures, 2014, 62/63:181-192.
- [10] 于文静, 史健勇, 赵金城. Q345 钢材动态力学性能研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(3):28-30.
- [11] 徐梅. 高屈服强度 TWIP 钢动态变形及其构件压溃吸能行为的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [12] 李红英. 金属拉伸试样的断口分析[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2011, 27(1):76-79.
- [13] 黄西成, 胡文军. Johnson-Cook 本构参数的确定方法[C]. 第六届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集, 长沙, 2010:313-320.
- [14] 林莉, 支旭东, 范锋, 等. Q235B 钢 Johnson-Cook 模型参数的确定[J]. 振动与冲击, 2014, 33(9):153-158; 172.
- [15] 张旭. 轴向冲击下 C 型冷弯薄壁钢构件的屈曲失稳研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2017.
- [16] 张旭, 孙国军, 黄栩浩, 等. 轴向冲击下 C 型冷弯卷边槽钢构件的动力响应[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(4):841-846.
- [17] Wang A W, Tian W Y. Characteristic-value analysis for plastic dynamic buckling of columns under elastoplastic compression waves[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2003, 38(5):615-628.
- [18] 王礼立. 应力波基础[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005.

Dynamic impact instability of Z-shaped Q345 cold-formed steel members under rate-dependent constitutive model

LI Baishu, LI Fachao, WU Mengjing, ZHU Jue*

(Key Laboratory of Impact and Safety Engineering of Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Z-shaped Q345 cold-formed steel members were chosen as the research object. Firstly, the mechanical constitutive properties of the experimental steel in the range of strain rates $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ were obtained, and the material parameters expressed by the Johnson-Cook constitutive model were also obtained by fitting. At the same time, the micro-morphology of the fracture of the tensile specimens was analyzed. Then, the axial impact tests of the Z-shaped cold-formed steel members at different speeds of drop hammer were carried out to study the dynamic instability and deformation of the members under impact. Next, the finite element models that can reflect the impact processes of the drop hammer tests were established by ABAQUS software, whereby the factors such as strain rate effects and initial defects were taken into account. The displacement and velocity changes of the particles at the end of the main part of the component and the influence of the stress wave propagation effect were analyzed. The results showed that dynamic buckling occurred in the thin-walled cold-formed steel members when subjected to external impact, and obvious plastic deformation developed with the increase of the impact loads. The propagation effect of stress waves played a key role in the phase step of dynamic buckling models.

Key words: cold-formed steel; dynamic impact; Johnson-Cook model; strain rate; finite element simulation

(责任编辑 韩超)