

# 方管铝合金梁受子弹撞击时 动力响应的实验研究

赵隆茂 李庆明 杨桂通

(太原工业大学应用力学研究所 太原 030024)

**摘要** 报导了简支、固支方形管状截面铝合金梁在子弹撞击时动力响应的实验研究。实验中,采用电-光位移传感器记录了梁中点的位移-时间、速度-时间和加速度-时间历史曲线。实验结果表明,在子弹动能相同、质量不同时,其变形不同。梁中点最大位移和中点最终位移间有较大的差值,可见采用理想刚塑性模型很难描述这一现象,在分析中,必须考虑弹性效应。同时发现,由于方管局部变形而引起的变形软化效应将减少梁的动力承载能力。

**关键词** 实验研究 方管状梁 子弹撞击

## 1 引言

在过去数十年中,对金属材料梁和框架等结构受到短时强动载荷作用的动力响应进行了大量的研究<sup>[1]</sup>。这些研究工作中的绝大部分仅涉及到实心截面梁和框架等结构,主要研究其整体变形特征。但在许多实际工程应用中,因为薄壁构件有较高的强度重量比而被广泛采用。特别在高速运行的车船和飞行器等要求有较小自重载重比的工程结构中,广泛采用冷压成型的薄壁元件来组成其主要部件。随着交通运输工具运行速度的提高,这些构件经常受到意外的高速撞击<sup>[2]</sup>。研究薄壁构件受强动载荷作用的动力响应有着非常重要的工程背景和理论意义,迄今为止,这方面的研究成果甚少。

Wegener 和 Martin<sup>[3]</sup>在1984年对简支方形管状钢梁在均布冲击载荷作用下的动力响应进行了系统的实验研究,并采用 Griffin<sup>[4]</sup>所编制的 GHLMST 程序进行了数值分析。同时采用 Symonds<sup>[5]</sup>提出的弹塑性近似分析方法进行了简化计算。实验中,采用薄片炸药加载而得到均布载荷,用撞击摆来测得其冲量,得到跨中点挠度-冲量和挠度-速度关系曲线。理论分析中,把梁的变形分为局部变形和整体变形两部分来考虑。局部变形的分析是较实心截面梁复杂的地方,但在实际工程应用中,结构受到集中动载荷的高速撞击远比理想均布载荷更为普遍。本文即对此问题进行了详细的实验研究,为进一步的理论分析提供了依据。

本文从实验方面对薄壁方形截面管状铝合金梁在集中冲击载荷作用下的动力响应进行了研究,实验中用高速圆柱形弹体撞击梁中点,分别对简支和固支梁进行了研究。得到了跨中最终残余位移和速度间的关系及最大位移和速度间的关系,用电-光位移传感器测

得了梁跨中点的位移-时间、速度-时间和加速度-时间历史曲线,发现梁中点最大变形与残余变形间有较大的差值。

## 2 实 验

### 2.1 实验装置

采用  $\phi 14.5\text{mm}$  口径的空气动力枪加载,子弹为滚珠轴承钢平头柱形体,长度分别为 100mm 和 200mm 两种,子弹不直接撞击在梁上,在撞击点加装一长度 26.0mm,  $\phi 14.0\text{mm}$  的半圆柱形的集中质量,质量 28.5g,集中质量和试件形成线接触。子弹撞击在集中质量上,从而给出集中加载条件,子弹速度由气体压力控制,并由枪口处的激光测速系统测得。位移-时间,速度-时间和加速度-时间历史曲线由原西德 ZIMMER 公司制造的 100D 型电-光位移传感器测得,该仪器最大测量范围 50mm,最高频响为 400kHz,由瞬态记录仪存贮波形,微机采集数据存贮供数据处理用,或由  $x-y$  函数记录仪给出图形。实验装置安排如图 1 所示。

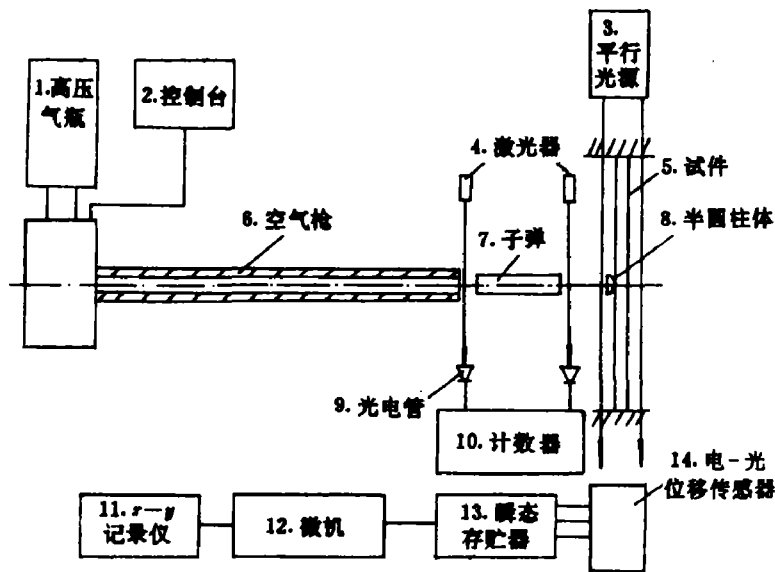


图 1 实验装置安排(试件为侧视图,其余为俯视图)

Fig. 1 Experimental arrangement (the specimen is in vertical view, others are horizontal view)

1. High pressure air; 2. Control; 3. Illuminator; 4. Laser; 5. Specimen; 6. Air gas gun;
7. Projectile; 8. Semi-circular cylinder; 9. Photo-cells; 10. Counter; 11.  $x-y$  record;
12. Computer; 13. Recorder; 14. Electro-optical displacement transducer

### 2.2 试件制备

试件为  $25.4\text{mm} \times 25.4\text{mm}$ , 壁厚  $\delta = 1.4\text{mm}$  的铝合金方管切制而成,跨长  $l = 333\text{mm}$ , 材质为 6063 铝合金,其机械性能由从不同三条方管切制的管单元做静态加载实验来测得,而不是采用标准的板条状试件做拉伸实验而得到的。

取长为 25.4mm 的方管置于万能试验机的下底板上,在上表面的中轴线处采用

$\phi 15\text{mm}$  的柱体加载, 所得屈服载荷被用于计算横向屈服应力。假设横截面被看作正方形框架, 其中部和立柱顶端形成塑性铰而发生塌陷, 各条管子的平均屈服应力列于表 1。

表 1 材料性能

Table 1 Properties of material

编号	平均横向屈服应力 $\sigma_0/\text{kPa}$	平均纵向屈服应力 $\sigma_0/\text{kPa}$	静态屈服弯矩 $M_0/\text{N}\cdot\text{m}$
1	1482	1606	192.6
2	1537	1609	204.8
3	1379	1801	220.7

取跨长  $l=333\text{mm}$  的方管, 放置于简支支座上, 在中心加载直到屈服, 其载荷被用于计算静态屈服弯矩  $M_0$ 。从而由刚塑性假设可计算出纵向屈服应力, 其平均值亦示于表 1。

### 2.3 实验步骤

共完成三组实验, 其中两组为简支, 一组为固支。

为了提供简支支承条件, 试件置于  $\phi 15\text{mm}$  的两组滚子支座上,  $\phi 15\text{mm}$  的滚子可在与中心同直径的圆弧体内转动。为了观察当撞击体具有相同的动能而质量改变时在响应中的效应, 对相同  $l$  简支条件下的梁进行了两组不同子弹质量的撞击实验, 一组采用  $m=235.3\text{g}$  的子弹, 另一组采用  $m=117.7\text{g}$  的子弹, 用空气动力枪发射子弹撞击梁中点, 记录子弹的速度, 并测得梁中点的最终残余变形。

第三组采用如下的方法实现固支条件: 每端采用 4 条  $M12$  的螺栓紧固厚为  $10\text{mm}$  的压板, 从而把试件压夹在支架底座上。为了防止实验中试件的滑动, 压板上加工有锯齿状牙痕, 实验中没有发现试件有大的滑动现象。用  $m=235.3\text{g}$  的子弹去撞击试件的中点, 用电-光位移传感器记录梁中点的位移-时间、速度-时间和加速度-时间历史曲线, 从而得到梁中点最大变形和最终残余变形与子弹速度间的关系。

### 3 实验结果和讨论

本文共给出了三组实验结果, 分别示于表 2 和表 3。其中  $v_0$  为子弹的初速度、 $w_{of}$  为梁中点的最终位移、 $w_{om}$  为其最大位移、 $w_0$  为其速度, 而  $\ddot{w}_0$  为其加速度。

为了解冲击质量效应的影响, 对跨长  $l=333\text{mm}$  的简支梁进行了两组不同撞击质量的实验。第一组共完成 16 个试件 ( $1^*\sim 16^*$ ) 的实验, 撞击质量  $m=235.3\text{g}$ , 子弹速度在  $7.7\sim 27.5\text{m/s}$  之间, 梁中心的最大残余挠度可达  $24.7\text{mm}$ ; 第二组共完成 10 个试件 ( $17^*\sim 26^*$ ) 的试验, 质量  $m=117.7\text{g}$  冲撞速度在  $13.7\sim 41.9\text{m/s}$  之间, 最大挠度达  $21.5\text{mm}$ 。图 2 给出了最终位移  $w_{of}$  和动能  $E$  间的关系。由图 2 可以看出, 在动能较小时两者无太大差别, 随着动能的增加, 小冲击质量的  $w_{of}$  小于大冲击质量的  $w_{of}$ 。这主要是因为随着动能的提高, 小冲击质量的速度大于大冲击质量的速度, 从而使梁产生较大的应变率, 较小的变形; 再就是速度高时, 撞击点局部塑性变形较大, 而耗散能量亦大, 从而导致  $w_{of}$  比大冲击质量时的小。

表2 实验数据

Table 2 Experimental Data

编号	$v_0/(m/s)$	$\frac{1}{2}mv_0^2/J$	$w_{of}/mm$	编号	$v_0/(m/s)$	$\frac{1}{2}mv_0^2/J$	$w_{of}/mm$
1	11.1	14.5	1.1	14	21.0	51.9	12.1
2	17.0	34.0	5.9	15	25.0	73.5	16.4
3	15.4	27.9	3.8	16	7.7	7.0	1.0
4	17.8	37.3	5.4	17	13.7	11.1	1.0
5	21.6	54.9	15.5	18	25.5	38.3	4.3
6	23.3	63.9	18.1	19	36.2	77.1	11.2
7	27.5	89.0	24.7	20	41.9	103.3	21.5
8	26.3	81.4	23.0	21	21.3	26.7	2.6
9	13.8	22.4	2.7	22	32.4	61.8	10.2
10	23.7	66.2	15.6	23	34.8	71.8	15.5
11	18.2	39.0	6.8	24	35.6	74.6	13.6
12	22.3	58.5	15.8	25	35.6	74.6	13.5
13	20.5	49.4	10.3	26	28.5	47.8	8.1

注:1\*~16\*,简支, $m=235.3g$ ;17\*~26\*,简支, $m=117.7g$ 。

表3 实验数据

Table 3 Experimental Data

编号	$v_0/(m/s)$	$\frac{1}{2}mv_0^2/J$	$w_{of}/mm$	$w_{om}/mm$	编号	$v_0/(m/s)$	$\frac{1}{2}mv_0^2/J$	$w_{of}/mm$	$w_{om}/mm$
27	29.1	99.6	8.3	12.0	35	18.7	41.1	2.8	5.8
28	35.6	149.1	11.9	18.2	36	34.2	137.6	11.7	17.2
29	30.5	109.4	10.2	14.2	37	14.8	25.8	1.6	5.0
30	30.8	111.6	10.6	15.6	38	19.7	45.7	3.8	7.6
31	33.5	132.0	10.3	15.8	39	29.1	99.6	8.4	13.2
32	29.8	104.5	8.9	14.0	40	22.5	59.6	4.7	9.8
33	29.7	103.8	9.3	14.2	41	25.5	76.5	5.4	9.4
34	15.0	26.5	1.8	4.9	42	25.5	76.5	6.5	11.5

注:固支, $m=235.3g$ 。

由图3可看出,简支梁变形集中在梁的中心,形成一塑性铰区,而其左右 $l/2$ 仅作刚体运动,可采用刚粘塑性近似分析来描述塑性变形阶段的响应。但梁中点的塑性变形区有着较为复杂的形式,当速度 $v_0$ 较小时,上下板出现向里凹陷,特别是上板形成较大的凹陷,而两侧腹板形成向外凸出的变形。在横截面中线以上,变形相似于受轴向压力方管屈曲的变形形态。随着冲击速度的提高,变形增大,侧板和顶板相交处形成较大的约束,限制了顶板和侧板的变形。当速度达到一定值时,拐角处应力超过破坏极限应力而开裂,上板和两侧板分别以薄板失稳的形式形成皱折,强度迅速下降形成较大的位移,出现变形软化现象,变形过程涉及到响应和破坏的耦合问题。

本文还提供了一组固支梁的实验数据,共完成16个试件(27\*~42\*)的试验。子弹质量 $m=235.3g$ , $l=333mm$ ,实验速度在15.0~35.6m/s之间, $w_{om}$ 最大值可达18.2mm, $w_{of}$

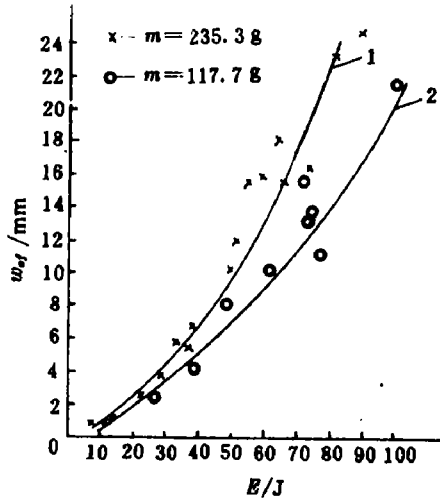
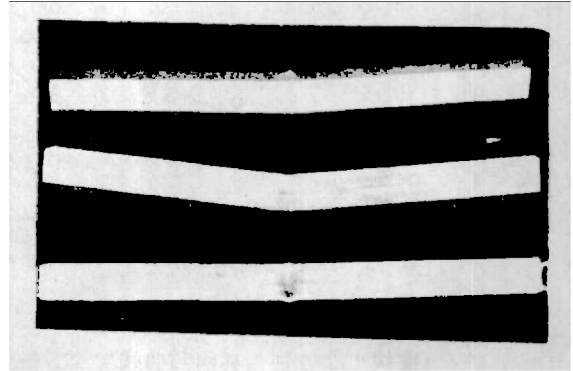
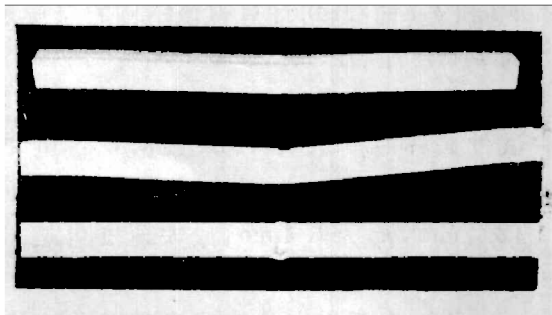


图2 简支梁中点位移随动能变化  
(曲线1,2分别为其回归曲线)

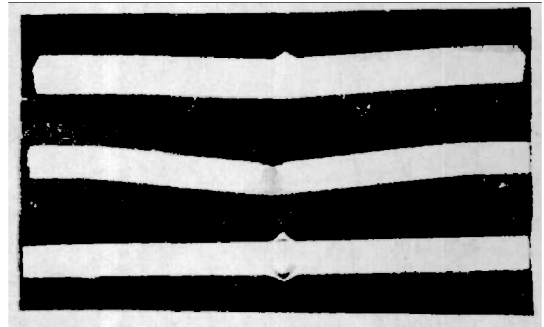
Fig. 2  $w_{mf}$  versus  $mv_0^2/2$



(a) 简支梁,  $v_0=23.7\text{m/s}$   
(a) Simply supported beam



(b) 固支梁,  $v_0=29.7\text{m/s}$   
(b) Clamped beam



(c) 固支梁,  $v_0=35.6\text{m/s}$   
(c) Clamped beam

图3 试件的变形形态(依次为仰视,侧视和俯视图)

Fig. 3 The deformation feature of specimens

(They are upturned views, side views and horizontal views in turn)

最大值达 11.9mm,用电-光位移传感器测得其  $w_0-t$ 、 $w_0-t$  及  $\dot{w}_0-t$  曲线,由此而得到  $w_{om}$  和  $w_{of}$  的值,数据列于表3。由图4可见,  $w_{om}$  和  $w_{of}$  间有较大的差值。

图5给出试件33#的  $w_0-t$  曲线,  $w_{om}=14.2\text{mm}$ 、 $w_{of}=9.3\text{mm}$ ,回弹值达 4.9mm,而不是像通常所采用的弹塑性变形模型,梁首先发生弹性变形。当  $M \geq M_0$  时,发生塑性变形,然后在最终残余变形附近作弹性振动,逐渐衰减,最终停止运动。如此大的回弹,主要是由于在变形较大时,轴向膜力引起轴向的弹性变形,变形虽很小,但存贮了较大的弹性势能。当梁变形到最大位置停止运动时,弹性膜力产生较大的反向拉力而使梁产生较大的回弹,此种现象在文献[6]中也有过类似的报导,这就提醒人们,在采用弹塑性模型近似分析时,必须考虑这一因素才可描述梁可能出现的最大位移和回弹现象。由图3(b)和3(c)可以看出,梁中点的局部变形也同简支梁相似,主要是各板侧向失稳屈曲而形成局部塑性区,同时,在每个固支根部也形成相似的局部变形,形成两个塑性铰,在塑性变形阶段,

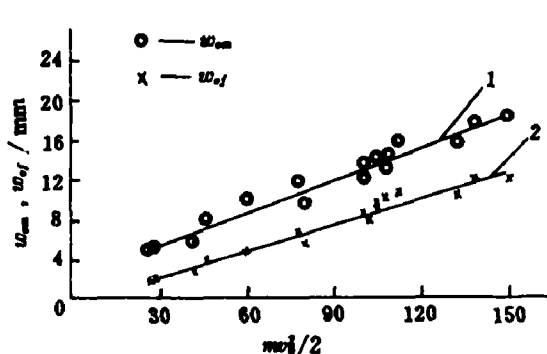


图4 固支梁中点  $w_{om}$ 、 $w_{of}$  随动能的变化  
(曲线1,2分别为其回归曲线)

Fig. 4  $w_{om}$ 、 $w_{of}$  versus  $mv_i^2/2$

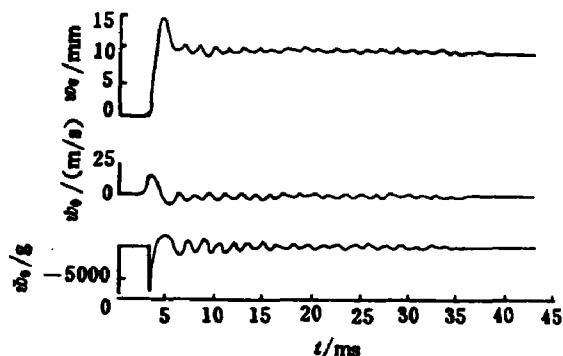


图5  $w_0-t$ 、 $w_0\dot{-}t$  和  $w_0\ddot{-}t$  曲线  
(固支, 试件 33\*)

Fig. 5  $w_0-t$ 、 $w_0\dot{-}t$  and  $w_0\ddot{-}t$  history  
(clamped, specimen 33\*)

采用三铰模型分析是可行的,由图4也可看出,也存在有变形软化现象。图5中还给出了  $w_0-t$  和  $w_0\dot{-}t$  曲线,可计算得该结构的自振频率为 310Hz 左右。

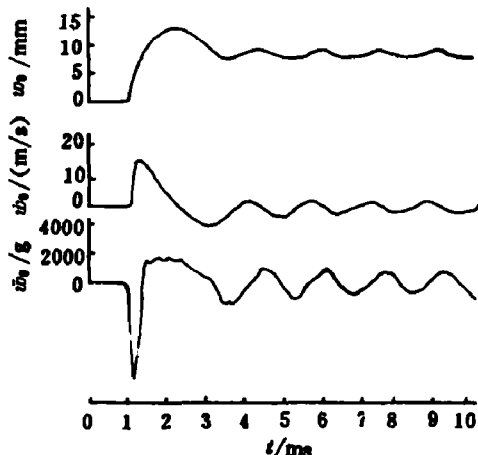


图6  $w_0-t$ 、 $w_0\dot{-}t$  和  $w_0\ddot{-}t$  曲线(固支, 试件 39\*)

Fig. 6  $w_0-t$ 、 $w_0\dot{-}t$  and  $w_0\ddot{-}t$  history  
(clamped specimen 39\*)

为了解其变形初始阶段的细节,对 39\* 试件采样时间取为 10 $\mu$ s,数据总容量 1024 点,共记录了 10ms 左右的变形过程, $w_{om}$  可达 13.2mm,  $w_{of}$  为 8.4mm,最大速度可达 17.1 m/s,最大加速度为 6779g,如图6所示。

从以上三组实验数据的图表可以看到,每组实验中都有一定的离散,这主要是由于厂家提供的型材几何尺寸和材质性能不够均匀一致所引起的。表1中也反映出这一点。第3根管材的各向异性远大于第1、2根管材,但从同一管材上切取全部试件是很难做到的。

## 4 结论

通过三组实验可观察到,在塑性变形阶段,薄壁筒支梁跨中点形成塑性铰,在  $l/2$  左右梁以刚体运动来完成其结构变形,而固支梁则以三铰的形式来完成。由于涉及到薄壁件的屈曲、响应和破坏耦合等问题,其铰处的局部变形较实心结构复杂得多,这给理论分析带来较大的困难。当变形较大时,结构出现变形软化现象,使用薄壁件时应特别注意这一点。同时也可看到,在撞击速度高时,相同动能而不同撞击质量可产生不相同的变形。通过对固支梁变形  $w_0-t$  曲线的分析可以发现, $w_{om}$  远大于  $w_{of}$ ,存在有较大的回弹现象,在建

立理论分析模型时必须加以考虑,在变形较大时,轴向弹性变形效应对整体变形有非常重要的影响,采用刚塑性模型分析则有较大的缺陷。

### 参 考 文 献

- 1 Jones N. Shock Vib. Digest, 1975, 7: 89~105
- 2 Jones N, T Wierzicki (Editors). Structural Crashworthiness. Butterworth Press, 1985.
- 3 Wegener R B, Mertin J B. Int J Mech Sci, 1985, 27(112): 55~69
- 4 Griffin P D. The Analysis of Rigid-Viscoplastic Plane Structures Subjected To Large Impulsive Loading; Ph D Thesis University of Capetown, 1982.
- 5 Symonds P S. Elastic-Plastic Deflections due to Pulse Loading, In: Hart G, ed. Proc and Specialty Conf. Dynamic Response of Structures; Experimentation, Observation, Prediction and Control ASCE, New York, 1980, 887~901
- 6 Li Qingming, Zhao Longmao, Yang Guitong. Int J Impact Engng, 1991, 11(3): 341~348

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HOLLOW ALUMINIUM -ALLOY BEAMS OF SQUARE TUBE SUBJECTED TO PROJECTILE IMPACT AT THE MID-SPAN

Zhao Longmao, Li Qingming, Yang Guitong

(*Institute of Applied Mechanics, Taiqian University of Technology, Taiqian, Shanxi, 030024*)

**ABSTRACT** The dynamic behaviours of both simply supported and fully clamped hollow beams with square cross-section, which are made from aluminium-alloy, are investigated experimentally when subjected to a projectile impact at their mid-span. The relationships between  $w_0-t$ ,  $w_0-t$  and  $\ddot{w}_0-t$  are obtained by using the electro-optical displacement transducer. It is shown that the permanent deflection of mid-span is different when the mass of projectile is different although the input kinetic energy is the same. Great difference between  $w_{on}$  and  $w_{of}$  exists, therefore, the effects of elasticity should be considered in the analyses. Furthermore, the strain soften effects due to the local deformation of the square tube will decrease the capability of the square tube to resist transverse dynamic loadings.

**KEY WORDS** experimental investigation, beams of square tube section, projectile impact