

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.01.012

椭圆封头爆炸成形技术的试验研究^{*}

马安鹏 饶国宁 彭金华 唐文龙
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 为了确定爆炸成形的最佳工艺参数,设计了一套小尺寸的爆炸成形试验装置,以 TNT 为能量来源,分别以沙和水为传能介质,1060H24 铝板及 Q235B 钢板作为坯料,进行了封头爆炸成形试验。对比了不同传能介质对成形质量的影响,分析了对比距离 $h/m^{1/3}$ 与成形件中心挠度的关系,以便寻求该条件下的最佳工艺条件。试验结果表明:水的传能效率明显优于沙,对比距离太大或太小都会影响成形效果,试验所得的最佳对比距离约为 $0.26\text{ m/kg}^{1/3}$,在此条件下爆炸成形的椭圆封头表面光洁度良好,无明显缺陷。

[关键词] 爆炸成形 椭圆封头 对比距离 中心挠度

[分类号] TG456.6 TD235.1+1

引言

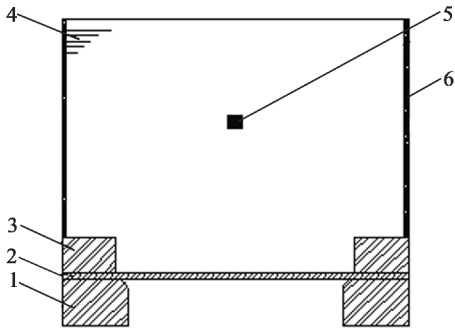
椭圆封头是石油化工领域常用的设备部件,通常对其要求为耐高压、耐腐蚀、使用寿命长,所以封头的材质大多为硬度大、强度高的金属。爆炸成形是一种高能率加工方法,应变速率极高,冲击波对毛坯的作用时间一般不大于 $100\mu\text{s}$,而坯料变形时间约为 1ms ,该方法使用的模具简单,可以加工各种尺寸和各种形状的零件^[1-6],对于一些高强度耐热塑性低的材料,优势更为明显,还可获得较好的表面光洁度。到目前为止,对爆炸成形的研究方法很多^[7-9],有几何法、能量法、冲量法。当前,爆炸成形在椭圆封头制备中的应用较少,主要是通过常规成形手段来制备。为了弥补常规成形的不足,本文主要针对椭圆封头的爆炸成形工艺条件进行了探索,从对比距离对成形质量的影响这一角度出发,进行了小尺寸工件的爆炸成形试验研究。

1 爆炸成形工艺

1.1 爆炸成形条件

爆炸冲击载荷的能量分布是随药包中心的距离变化而变化。爆炸成形工艺分为约束式和自由式。前者通常需要在水井中进行,并且要保证一定的真空度,操作繁琐;后者则相对简单,本实验采用自由式进行试验。试验装置如图 1 所示。

试验中坯料为 1060H24 铝板和 Q235B 钢板(厚度 $\delta < 4\text{mm}$),坯料的尺寸和形状如图 2 所示,单位为 mm。



1 - 无底凹模;2 - 坯料;3 - 压边圈;
4 - 水质(沙质);5 - 炸药;6 - 护筒

图 1 实验装置简图

Fig. 1 Sketch of experimental device

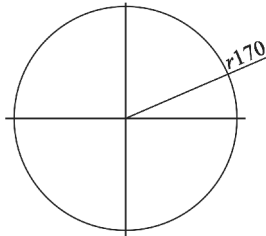


图 2 坯料尺寸与形状图

Fig. 2 Size and shape of plate

1.2 爆炸成形工艺分析

爆炸成形具有其独特的成形机理,因而在成形工艺中主要考虑以下几点:

1)在试验中,坯料表面经过处理,没有明显划痕等缺陷。工件尺寸精度主要靠爆炸压力载荷的分

^{*} 收稿日期: 2012-09-12
作者简介: 马安鹏(1985 ~),男,硕士,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:maanpeng@126.com
通信作者: 饶国宁(1978 ~),男,博士,讲师,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:njraoguoning@163.com

布与模具共同决定。

2) 为了使模具可以重复使用, 模具、压边圈由 45 号优质低碳钢加工而成。试验过程中根据需
要调节压边力的大小, 圆角处涂抹润滑剂以减小坯料
流入凹模的阻力。

3) 传能介质分别采用水和细沙。水的传能效
率要高于沙, 而沙与坯料之间的摩擦则有助于减轻
坯料成形过程中的起皱, 使用前细沙要过筛。

1.3 药量计算

药量的多少决定能量的大小, 因而装药量 m 是
爆炸成形中最关键的因素之一。药量的选取与很多
因素有关, 比如炸高 h 、坯料厚度 δ 、模口直径 D 以及
其它边界条件等。

1.3.1 经验估算法

由于试验条件的复杂性, 经验公式很难包含诸
多影响因素和不同的边界条件, 所以估算值可以作
为参照, 实验时根据具体条件进行适当调整。经大
量试验, 得出在水介质中成形的低碳钢封头零件的
药量公式如下^[8]:

$$\frac{Y}{D}=120\left(\frac{m}{D^2\delta}\right)^{0.78}\left(\frac{D}{h}\right)^{0.74}k$$

(1)

式中: Y 为封头顶点挠度; D 为模口直径; m 为炸
药装药质量; δ 为金属板料的厚度; h 为装药中心距板
料表面距离(炸高); k 为不同材料的修正系数; 单位
采用 mm-g。

若采用沙介质, 则上式变为:

$$\frac{Y}{D}=44.2\left(\frac{m}{D^2\delta}\right)^{0.78}\left(\frac{D}{h}\right)^{0.74}k$$

(2)

式中参数意义同式(1)。

1.3.2 功能平衡原理

根据成形坯料克服变形阻力所做的变形功等于
炸药用于爆炸成形的有效能量这一原理来估算药
量。由于材料的力学参数不易获得, 分析时需要进
行适当的简化, 其公式^[10]为:

$$Q=K_1K_2\frac{\sigma s_0\delta_0\varepsilon_0}{q\eta}$$

(3)

式中: Q 为装药质量, kg; σ 为坯料在动载下的屈服
极限(取静载下屈服极限的 2 倍); ε_0 为坯料圆周
方向上的平均应变; δ_0 为坯料初始厚度; s_0 为坯料
初始面积; q 为每千克炸药能量; η 为炸药能量利
用率; K_1 为传压介质系数(水的 K_1 取 1.0); K_2 为工
艺参数, 水井中成形时为 0.8~0.9, 抽真空时取 1.0。

为了综合考虑作用在坯料上的载荷, 本文以对
比距离 $h/m^{1/3}$ 作为一个基本的影响要素, (h 为装
药中心到坯料上表面中心的垂直距离, m 为装药量),

这一参数将两个影响成形质量的最重要的参数很好
地结合在了一起。实验过程中采用 TNT 柱形压装
药, 密度为 1.56g/cm³。为了系统地研究对比距离
对成形质量的影响, 取两种装药量 5 g 和 10 g。

2 实验设计

试验坯料为 1060H24 铝板, 尺寸 Ø340mm ×
1.92mm; Q235B 钢板, 尺寸为 Ø340mm × (1~4)
mm。两种材料的机械物理性能如表 1 所示。
1060H24 铝和 Q235B 钢的成形性、焊接性均很好,
1060H24 铝的切削性比 Q235B 钢差。

表 1 1060H24 铝和 Q235B 钢的机械与物理性能

Tab. 1 Machenical and physical properties of
1060H24 aluminum and Q235B steel

坯料	密度 / (g · cm ⁻³)	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	延伸率 σ_5
1060H24 铝	2.70	120~145	≥35	≥5
Q235B 钢	7.85	375~460	235	≥27

试验的工艺条件如表 2、表 3 所示。

表 2 1060H24 铝板爆炸成形工艺条件

Tab. 2 Explosive forming process conditions of
1060H24 aluminum sheet

工艺序号	炸高/mm	药量/g	传能介质
1	110	5.02	沙
2	110	10.25	沙
3	57	5.00	沙
4	57	10.16	沙
5	42	4.97	沙
6	42	10.57	沙
7	90	4.97	水
8	110	4.97	水
9	130	4.99	水
10	150	5.06	水

表 3 Q235B 钢板爆炸成形工艺条件

Tab. 3 Explosive forming process conditions of
Q235B steel sheet

工艺序号	板厚/mm	炸高/mm	药量/g	传能介质
11	1.65	57	9.86	水
12	2.36	57	10.17	水
13	2.88	57	10.06	水
14	3.64	57	10.25	水

3 试验结果与分析

试验按表 2 和表 3 中的工艺参数进行, 爆炸成
形后的工件除个别出现边缘起皱和拉偏外, 整体而

言,工件成形质量满足要求。模具、压边圈等完好无损,仍可重复使用。

爆炸成形过程中,炸药量 m 和炸高 h 共同决定作用在坯料上载荷的大小,图 3 所示为 1060H24 铝板分别以沙和水作为传能介质进行试验,获得的对比距离 $h/m^{1/3}$ 与工件中心挠度 Y 的关系曲线图。

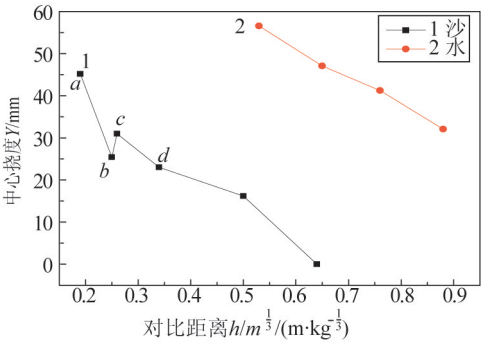


图 3 铝板在不同介质中 $Y-h/m^{1/3}$ 曲线

Fig. 3 $Y-h/m^{1/3}$ curves of aluminum sheet within different media

从图 3 曲线的走势可以看出,随着对比距离的增大,中心挠度整体上趋于减小。相比两条曲线,对比距离相同时,曲线 2 所对应的中心挠度比曲线 1 大的多,说明水的传能效率明显高于沙。从曲线 1 中可以看出,对比距离与挠度值并不是简单的线性单调,而是呈现出有缓有急的态势。 ab 段斜率绝对值较大,随着对比距离的增大,挠度值下降明显。从能量利用率的角度出发,对比距离越小,作用在坯料上的能量载荷越大,同时减小 h ,增大 m 可以实现这种要求。但是,对比距离太小将导致坯料受力太集中,中心变薄严重,甚至破裂,也容易出现拉偏等现象。随着对比距离的增大,所对应的挠度值出现增大的趋势,如 bc 段, c 点过后则又呈现出下降的趋势。对比距离太大时,不仅作用在坯料上的压力载荷不够,还会降低炸药的能源利用率,同样不可取。综合考虑 $h/m^{1/3}$ 在 bd 段取值相对合理, c 点取值约为 $0.26\text{m/kg}^{1/3}$,不同试验条件下的最佳对比距离可能有差异,需要具体试验的验证。

图 4 为 $h/m^{1/3}$ 为 $0.26\text{ m/kg}^{1/3}$ 时,不同厚度的 Q235B 板材爆炸成形工件理论计算与试验所得的 $Y-\delta$ 关系曲线。用药量估算公式(1)估算 Q235B 钢板的中心挠度理论值, k 值取 1。

从图 4 可以看出,两条曲线的落差并不大,最大时约为 7mm ,误差不大于 10% 。从曲线走势可以看出,随着厚度的增加,挠度值明显下降,所以当坯料厚度增加时则需要调整药量。按照能量准则即二四八准则:当坯料厚度增加 1 倍时,药量为原来的 2

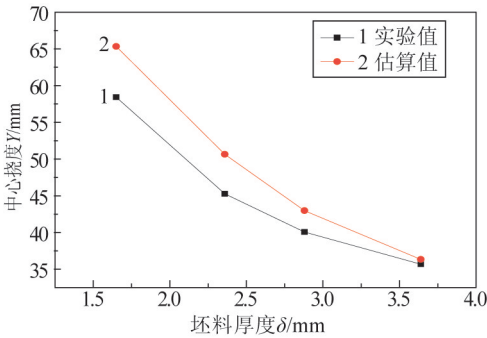


图 4 不同厚度时板料的挠度变化

Fig. 4 Center deflection of plate with different thickness

倍,尺寸增加 1 倍,药量为原来的 4 倍,尺寸与厚度同时增加 1 倍,药量则为原来的 8 倍^[8]。

爆炸成形工件的质量检测结果如表 4 所示,图 5 是爆炸成形加工工件的实物图。

表 4 工件检测试验

Tab. 4 Results of workpiece testing

工艺序号	中心挠度/mm	是否起皱	过渡平滑	总体质量
1	几乎无变形	—	—	—
2	16.19	无	是	成形不足
3	23.01	无	是	成形不足
4	30.96	无	是	良好
5	25.43	无	是	成形不足
6	45.17	轻微	是	满意
7	32.05	无	是	良好
8	41.22	无	是	良好
9	47.09	轻微	是	满意
10	56.55	轻微	是	满意
11	58.42	轻微	是	基本满意
12	45.26	无	是	良好
13	40.07	无	是	良好
14	35.69	无	是	良好



图 5 成形工件实物图

Fig. 5 Shape of formed workpiece

从图 5 中可以看出工件的表面光洁度很好,曲面平滑过渡。部分工件的法兰部分有轻微的起皱,可以通过减小压边部分的面积和调节压边力的方法

使起皱消除。

4 结论

1) 分别用沙与水作为传能介质,进行了 1060H24 铝板的爆炸成形试验,工件成形质量好。对比距离 $h/m^{1/3}$ 太小,作用在坯料上的载荷太集中,中心变薄严重,且容易拉偏; $h/m^{1/3}$ 太大时,作用在坯料上的载荷太小,成形深度难以满足,同时炸药利用率太低。只有当 $h/m^{1/3}$ 取最佳值时,则可很好地满足成形需求。试验中得到的最佳对比距离约为 $0.26 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。

2) 取 $h/m^{1/3}$ 为 $0.26 \text{ m/kg}^{1/3}$,以水为传压介质,Q235B 钢板为坯料,进行了改变厚度的试验。结果表明,工件的实际中心挠度与经验公式估算的值接近,说明这一工艺参数的选择是合理的。

3) 试验是基于小尺寸工件的爆炸成形研究,可为下一步实际生产大尺寸的工件提供参考。

参 考 文 献

- [1] Tong Z, Li Z, Cheng B, et al. Precision control of explosive forming for metallic decorating sphere[J]. Journal of Material Processing Technology, 2008, 203 (1-3): 449-453.
- [2] 包七十三, 佟铮, 成博, 等. 飞行平台罩爆炸拉深实验研究及数值模拟[J]. 锻压技术, 2007, 32(6): 95-98.
Bao Qishisan, Tong Zheng, Cheng Bo, et al. Experimental research and FEM simulation on explosive deep drawing forming process of flying terrace cover[J]. Forging and Stamping Technology, 2007, 32(6): 95-98.
- [3] 卜令涛, 朱顺官. 爆炸成形技术在零件加工中的应用[J]. 爆破器材, 1999, 28(5): 22-24.
Bu Lingtao, Zhu Shunguan. Application of Explosive

swaging to work-piece processing[J]. Explosive Material, 1999, 28(5): 22-24.

- [4] Mynors D J, Zhang B. Applications and capabilities of explosive forming[J]. Journal of Material Processing Technology, 2002, 125-126: 1-25.
- [5] 蔺于龙, 佟铮, 马万珍, 等. 环形槽散热板爆炸成形的实验研究[J]. 锻压技术, 2006, 31(6): 60-63.
Lin Yulong, Tong Zheng, Ma Wanzhen, et al. Experimental research on explosion forming of heating panel with annular recess[J]. Forming and Stamping Technology, 2006, 31(6): 60-63.
- [6] 邓汉祥, 袁文豪. 大尺寸薄壁旋转体零件爆炸成形[J]. 爆破器材, 1996, 25(6): 20-23.
Deng Hanxiang, Yuan Wenhao. Explosive forming of large scale rotating parts with thin wall[J]. Explosive Material, 1996, 25(6): 20-23.
- [7] Mousavi Akbari S A A, Riahi M, Parast Hagh A. Experimental and numerical analysis of explosive free forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188: 512-516.
- [8] 郑哲敏, 杨振声, 赵士达, 等. 爆炸加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 54-70.
Zheng Zhemin, Yang Zhensheng, Zhao Shida, et al. Explosive processing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981: 54-70.
- [9] He Fengman, Tong Zheng, Wang Ning. Explosive forming of thin-wall semi-spherical parts[J]. Materials Letters, 2000, 45(2): 133-137.
- [10] 龙维祺. 特种爆破技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 14.
Long Weiqi. Special blasting technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993: 14.

Experimental Research on Explosion Forming Process of Elliptical Head

MA Anpeng, RAO Guoning, PENG Jinhua, TANG Wenlong

School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] To confirm the optimized parameters for the explosion forming process of elliptical head, a set up of experimental device was designed. The explosion forming processes were conducted using TNT as the energy resource, sand and water as the energy transition medium, thin plates of 1060H24 aluminum alloy and Q235B steel as the blanks. The contrast of forming qualities as the results of different energy transition medium usage and the examination on the relationship between the contrast distance ($h/m^{1/3}$) and the center deflection of the head can provide a way of finding out the most appropriate processing parameters. The experimental results indicated that the efficiency of water was much better than sand in energy transition. Whether the value of $h/m^{1/3}$ is too high or low, it will all affect the explosion forming quality of head. To achieve a high forming quality, the value of contrast distance was determined as about $0.26 \text{ m/kg}^{1/3}$, under which a smooth surface with no obvious defects can be obtained.

[KEY WORDS] explosion forming, elliptical head, contrast distance, center deflection