文章编号：1000-5773(2005)03-0269-06

平面一维应变电炮加载技术研究*

王桂吉，赵剑衡，唐小松，谭福利，吴 刚，刘海涛，匡学武

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900）

摘要：在分析电炮加载装置放电回路的基础上，探讨了电炮装置的设计原则。根据所提出的设计原则，设计和建立了一门储能 14.4 kJ 的电炮装置。实验测试结果表明，其性能参数诸如回路电感小于 40 nH、放电周期 7 μs、飞片平面度小于 40 ns、初始电流上升陡度达 750 GA/s。与国内外的同类型装置的参数相比较，该电炮装置达到了较高水平，具有较好的性能。在此基础上，提出了获得平面一维应变加载对电炮装置的一般要求。

关键词：电炮；平面一维应变加载；设计原则；性能参数

中图分类号：O521.3 **文献标识码**：A

1 引 言

电炮是一种强脉冲电流快速加热金属箔片导致其汽化，爆炸驱动热压在箔片上的聚酯膜薄飞片高速飞行的实验装置，是一种实验室短脉冲高压激波发生器，是炸药起爆特性、材料动力学性能研究领域中的一种重要加载装置。与气炮、爆药等加载手段相比，有其独特的优点：一是通过调节飞片的速度和厚度大小来实现在靶目标中产生的压力幅值和脉宽调节；二是飞片的面积，即直径大小可在大范围内调节（通常 1～20 mm），加之飞片的厚度通常在 20～250 μm 范围内变化，因此它是一种理想的平面一维应变加载装置；三是在研究炸药的起爆特性中，与楔形试验产生的持续脉冲或炸药或气炮驱动金属板产生的长脉冲相比，电炮聚酯薄膜飞片的冲击阻抗比炸药的冲击阻抗小，撞击产生的短脉冲冲击波在炸药中反射一次就减为零[1]；四是它能产生较高应变率即高加载率，其应变率范围通常在 10^4～10^6 s^{-1}，这是传统的气炮加载、炸药驱动加载、Hopkinson 杆加载等[2]手段所无法达到的。

由此可见，电炮作为一种冲击波加载装置具有相当的优势。但由于该装置涉及到高功率脉冲技术、光学诊断技术，因此电炮加载技术的发展与这些技术的发展息息相关。国内电炮技术起步于 20 世纪 70 年代末[3]，可以说是紧跟美国的步伐[4]，但由于当时受高功率脉冲技术、光学诊断技术等相关技术的制约，国内关于这项技术的发展进步不大，曾一度被中断。随着国内基础工艺及其相关技术的发展和提高，意识到这种加载技术的潜力，又开始了电炮加载技术的研究和应用。本工作探讨了电炮装置的设计原则及其影响因素，并结合实验测试结果，提出了获得一维平面应变加载的电炮装置的一般要求。

2 工作原理

电炮的基本工作原理是[5]：沉积在一个基底或“飞片”上的爆炸桥箔吸收高压大电流的高功率脉冲源瞬间释放的电脉冲能量，迅速发生相转变，由固体→液体→气体→等离子体，金属蒸汽和产生的高温等离子体骤然膨胀，产生极高的压力，推动飞片经带刃口的加速腔剪切一圆形（加速腔直径等于或小于金属箔工作面尺寸）或长条形（加速腔直径大于金属箔工作面尺寸）飞片，飞片在其中加速一定距离后达到最大速度或 90％以上最大速度，然后撞击靶目标（炸药或其它材料）。

* **收稿日期**：2004-03-01；**修回日期**：2004-06-03

基金项目：国防预研基金

作者简介：王桂吉（1977—），男，博士研究生，主要研究方向为爆炸力学和材料动力学. E-mail：wangguiji@126.com

图 1 和图 2 分别是电炮爆炸金属箔与飞片能量耦合装置图和电炮装置的结构示意图。爆炸金属箔通过扁平传输线与电容器的正负极相联接，图中金属箔中的颈缩段为工作区域，是回路中电阻最大的区域，吸收电容器(组)放出的绝大部分能量。聚酯薄膜飞片热压在金属箔的上面，金属箔紧密置于致密光滑的绝缘基底上。

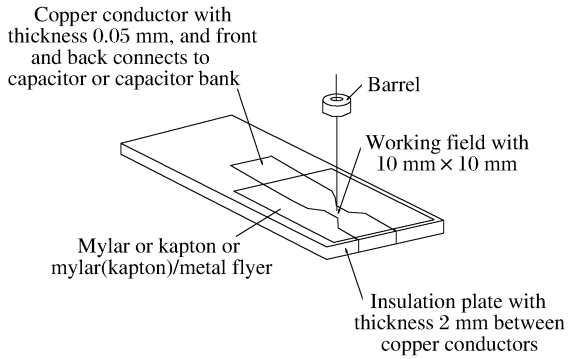


图 1 电炮爆炸金属箔与飞片能量耦合结构图

Fig. 1 Assembly diagram of coupling the energy of the exploding foil to the flyer

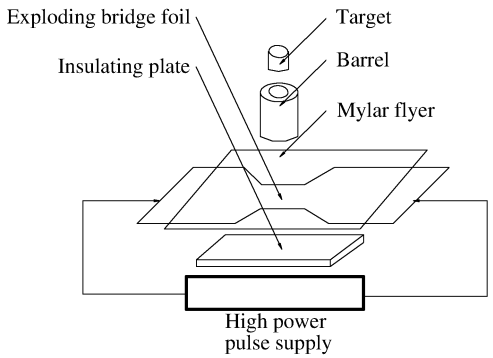


图 2 电炮结构示意图

Fig. 2 Configuration sketch of electric gun

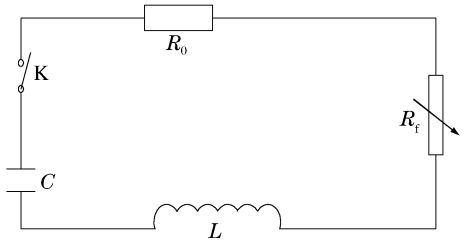


图 3 电炮的 *RCL* 放电回路

Fig. 3 *RCL* discharging circuit of electric gun

3 回路分析

电炮的放电回路是一个典型的 *R-C-L* 回路，如图 3 所示。为获得最大的电流输出，要求其整个回路工作于弱阻尼(Underdamped)模式下。由于在放电过程中，金属桥箔的电阻是动态变化的，且属非线性关系，因此其放电回路参数的精确求解非常困难。其近似求解结果如下[6]

$$I=\frac{CU_0}{\sqrt{LC}}\exp\left(-\frac{Rt}{2L}\right)\sin\frac{t}{\sqrt{LC}} \tag{1}$$

式中：I 为放电电流，C 为储能电容器容值，L 为放电回路电感，R 为放电回路电阻，U_0 为电容器初始充电电压，t 为放电时间。

放电回路的电感、电阻、放电周期等参数值根据利用电流测量线圈(Rogowski Coil)测得的短路放电电流波形(图 4 所示)计算得到。回路基本参数为

$$L=\frac{(t_2-t_1)^2}{C\left\{4\pi^2+\left[\ln(I_1/I_2)\right]^2\right\}} \tag{2}$$

$$R=\frac{2(t_2-t_1)\ln(I_1/I_2)}{C\left\{4\pi^2+\left[\ln(I_1/I_2)\right]^2\right\}} \tag{3}$$

$$T=2\pi\sqrt{LC} \tag{4}$$

$$\left(\mathrm{d}I/\mathrm{d}t\right)_{t=0}=U_0/L \tag{5}$$

(2)式～(5)式中各变量的含义同(1)式中的含义，T 为短路放电周期，I_1、I_2、t_1、t_2 的含义如图 4 所示，$(\mathrm{d}I/\mathrm{d}t)_{t=0}$ 为电流上升初始变化率。

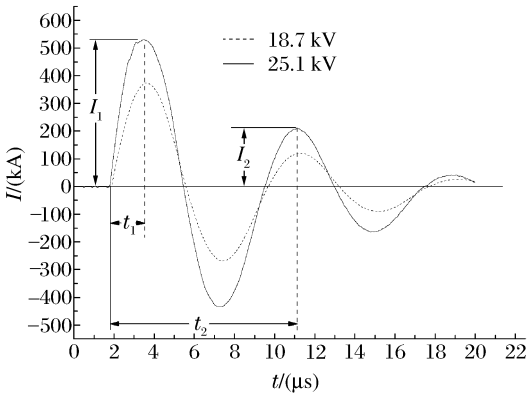


图 4 短路放电电流波形

Fig. 4 Discharging current wave form of short circuit

4 设计原则

作为一种平面一维应变加载装置，首要的基本要求就是飞片撞击靶目标产生的输入激励是一维平面冲击波。这就对飞片撞击靶目标时刻的平面度提

出了非常高的要求,通常要求不大于 50 ns,更高要求是在几纳秒以内。从上面对电炮装置放电回路的分析可以看出,在各参数中,电感 L 左右着各个参数值。围绕上述要求和分析,在进行电炮装置设计时,主要围绕以下原则进行。

4.1　低回路电感

电流上升初始变化率即电流变化陡度$(\mathrm{d}I/\mathrm{d}t)_{t=0}$是决定电炮性能的一个关键因素。桥箔爆炸要求获得瞬间释放的电脉冲能量,通常要求电炮的放电电流在 1 μs 或更短的时间内上升到峰值,否则放电过程中产生的磁压力可能克服桥箔和飞片的惯性,导致爆炸发生前桥箔扭曲变形,从而使得飞片的平面度得不到保证。从(5)式可以看出,减小放电回路电感或增大电容器初始充电电压,可以增大电流上升的初始变化率。

上述也意味着回路短放电周期即电流在很短的时间内上升到峰值,这样也有利于克服磁压力的作用,从而保证飞片的平面度。从(4)式可以知道,放电周期由电容器容值和回路电感决定。缩短放电周期,或减小电容器容值,或降低回路电感,或两者同时减小。因此,低电感、低容值、高充电电压的脉冲储能电容器,是电炮能源系统设计的一种追求。当然,容值的减小并非越小越好,应结合对脉冲电流峰值大小的要求来选择,在一定程度上,在满足使用要求的前提下,尽量使用较低容值的电容器,通过提高电容器的额定充电电压和减少回路的电感来增大放电电流。

4.2　低回路电阻

从电炮的工作原理可以知道,金属桥箔瞬间吸收高电压大电流发生相转变是由于焦耳加热。因此为使能量有效地集中于金属桥箔上,要求回路其它部分的电阻要很小,以减小回路其它电阻能耗。

4.3　选择爆炸性能优良的桥箔材料

金属桥箔材料的不同,在相同条件下,由于爆炸性能的差别,其爆炸时刻、飞片的平面度、飞片获得的速度会有很大的不同。实验[1]发现,比作用 $g=\int_0^{t_\mathrm{B}} J^2(t)\mathrm{d}t$ 是描述爆炸导体现象的关键参量,式中$J(t)$是流经桥箔的电流密度,t_B 是桥箔的爆炸时刻。在相同爆炸电流密度的条件下,爆炸时刻比作用小的材料,其爆炸性能要好。常用的金属桥箔材料有铜和铝,在条件相同的情况下,铝的比作用比铜的要小[7,8],因此其爆炸性能要好,实验和理论估算证明确实如此。图 5 和图 6 分别是实验测量和理论计算的结果。

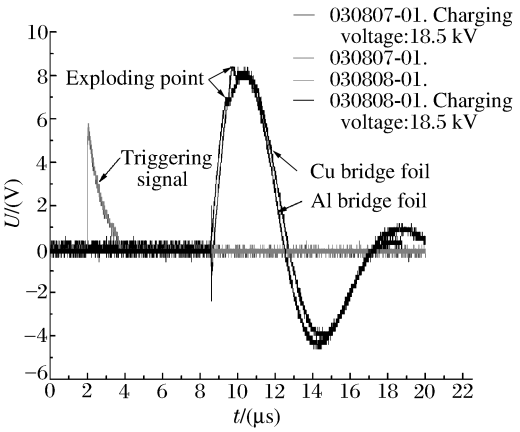


图 5　铜和铝桥箔负载下的放电电流波形

Fig. 5　Discharging current wave form for Cu and Al bridge foil loadings

图 5 表明,在相同条件下,铝桥箔的爆炸时刻比铜桥箔的短,这有利于克服磁压力的作用,从而更好地保证飞片的平面度。图 6 的结果是利用电Gurney公式[9]计算得到的飞片速度随爆炸电流密度变化的关系曲线,从图中可以看出,在相同条件下,利用铝材料做桥箔比利用铜材料做桥箔能获得更高的飞片速度。相比于铜来讲,铝更适用于做桥箔材料。

4.4　合适的飞片材料

飞片材料应是绝缘材料,且有一定的硬度和韧性,这样不至于导致飞片被加速腔刃口切割时受到破坏,以便保持较好的完整性。通常适合做飞片的材料有聚酰亚胺膜(Kapton)和聚脂薄膜(Mylar)。

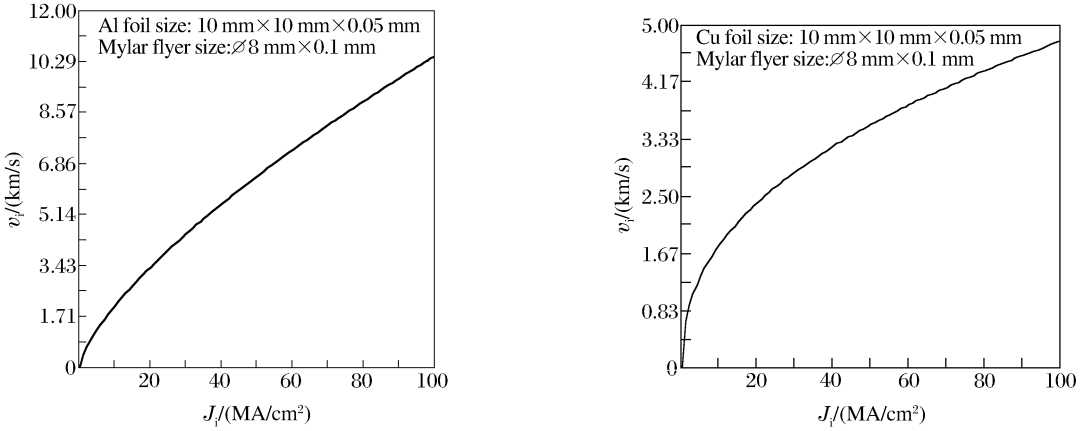
4.5　合适的桥箔厚度与飞片厚度比

模拟金属箔与飞片之间的能量转换的电格尼公式为[5]

$$v_\mathrm{f}=\sqrt{KJ_\mathrm{B}^n}\left(\frac{m}{m_\mathrm{C}}+1\right)^{-1/2}=\sqrt{KJ_\mathrm{B}^n}\left(\frac{\rho_\mathrm{f}h_\mathrm{f}}{\rho_\mathrm{m}h_\mathrm{m}}+1\right)^{-1/2} \tag{6}$$

式中：v_f 为飞片的终态速度，K、n 为经验常数，J_B 为爆炸电流密度，m 为飞片单位面积质量，m_C 为桥箔单位面积质量，ρ_f、ρ_m 分别为飞片和金属桥箔的密度，h_f、h_m 分别为飞片和金属桥箔的厚度。

据(6)式可以知道，在飞片和桥箔材料确定的情况下，两者的厚度之比影响着飞片的终态速度。飞片与桥箔的厚度之比越小，飞片获得的终态速度越高。但事实上，该值并非越小越好，应该考虑飞片在桥箔爆炸初始时刻的状态以及飞行过程中平面度的保持问题。通常，该比值为 2～5 较为合适，最佳值可通过实验来加以确定。



(a) Al bridge foil (b) Cu bridge foil

图 6 利用电 Gurney 公式估算的飞片速度随爆炸电流密度变化曲线关系

Fig. 6 Curves of flyer velocity varying with exploding current densities estimated by electrical Gurney formula

4.6 合适的加速腔长度

加速腔的作用除用于切割飞片外，还用于飞片的加速和飞行姿态的调整和稳定，因此其长短应合适。若太长将导致飞片减速和稳定性的破坏；若太短则飞片还没有加速到最大速度，且其稳定性也得不到保证。实验结果表明，对于产生一维平面波的电炮装置而言，加速腔的长度依赖于装置充电电压的变化，通常在 3～6 mm 之间选取。值的提出的是，(6)式中的 K、n 值依赖于加速腔的长度，特定的加速腔长度，有特定的 K 值，具体值通过实验用统计的方法求取。但对于 1～5 mm 长的加速腔，n 值为常数，当然依桥箔材料而不同。

4.7 安全原则

电炮装置使用的能源是高功率脉冲电源，回路当中具有高电压大电流，因此为保护人员和仪器的安全，该装置中需采用单点接地以及二级放电措施，即接地保护开关的办法。

5 一种电炮装置结构

图 7 是我们设计的一种电炮装置，其能量转换技术使用的是雷管爆炸开关，这种开关结构有利于减少回路的电感，但会引起工作效率的相对下降。该装置的基本参数值见表 1。

表 1 电炮参数对比表

Table 1 Comparison of electric gun parameters

Ref.	C/(μF)	U_0/(kV)	E/(kJ)	R/(mΩ)	L/(nH)	T/(μs)	$(dI/dt)_{t=0}$/(GA/s)
This work	31.8	30	14.4	＜20	38	7.0	750
XU Xing-Hai[3]	36	10	1.8	4	42	7.72	238
Weingart[9]	56	40	44.8	22	40	9.4	1000

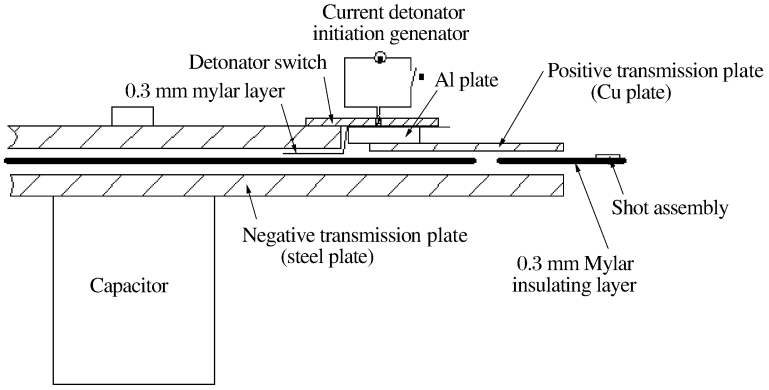


图 7　电炮装置示意图

Fig. 7　Diagram of an electric gun

从表 1 可以看出,我们设计的电炮装置,其参数指标已经达到了国内外同类装置的水平,部分指标甚至超过了他们,从这个角度讲,该装置的设计是成功的。该装置具有结构紧凑、易操作的特点。基于平行板传输原理的装置有利于放电回路电感的减小,进而有利于缩短放电周期和增加放电电流峰值。

当然,作为一种平面一维应变加载装置,我们更关心飞片撞击靶目标时刻的平面度问题。表 2 是利用光纤探针技术测量得到的本装置的飞片平面度结果[10],探针为十字形分布,间距 1 mm。

表中探针高度的差异是由探针安装工艺造成的,考虑这种差异,分析得到飞片的平面度小于40 ns,是符合实际情况的。

表 2　飞片碰撞探针时间

Table 2　The impacting time of flyer

Parameter	No. of probes								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Highness of probes/(mm)	1.043	1.079	1.042	0.902	1.005	0.954	0.846	1.020	1.024
Time to probes/(μs)	0.672 1	0.664 1	0.644 9	0.683 3	0.644 0	0.660 7	0.687 9	0.663 9	0.652 7

6　产生平面一维应变的要求

飞片撞击靶目标产生一维平面应变应是平面应力波和一维轴向应变的结合,因此对飞片的平面度和尺寸大小有较高的要求。平面度要求是保证产生平面应力波的前提条件,而飞片直径大小是产生一维轴向应变的前提。对于电炮装置,由于其 Mylar 膜飞片平面度受到电磁力和切割飞片时边沿的滞后效应等因素的影响,做到理想的一维平面很难,因此,通常情况下,对飞片撞击靶目标产生一维平面应变做以下要求,以便更接近一维应变波的条件:

(1) 飞片撞击靶目标时刻的平面度不大于 50 ns,更高要求是在 5 ns 以内;

(2) 为防止侧向稀疏的影响,飞片的直径应不小于 6 mm。

对飞片直径的要求,一是考虑边沿滞后效应的影响,二是考虑防止侧向稀疏波对撞击产生的应力波的影响,保证一维效应。结合稀疏波在 Mylar 膜飞片中的传播速度,我们认为,保证一维效应,飞片的直径不能小于 6 mm。小于该值,就需要考虑二维效应的影响了。

7　结　论

电炮装置作为一种平面一维应变加载技术有其独特的优势,其影响因素甚多,设计时应围绕减小回路电感和确保飞片平面度的原则,综合考虑桥箔材料、飞片材料、飞片与桥箔厚度比值、加速腔长度等对电炮性能的影响。

电炮加载技术在含能材料、金属材料、复合材料等的动力学研究中有广泛的应用。

References:

[1] Chau H H, Dittbenner G, Hofer W W, et al. Electric Gun: A Versatile Tool for High-Pressure Shock Wave Research [J]. Rev Sci Instrum, 1980, 51(12): 1676－1681.

[2] Tang Z P. Basis of Shock Phase Transformation [M]. Hefei: University of Science and Technology of China, 1992. 33. (in Chinese)
唐志平. 冲击相变基础 [M]. 合肥: 中国科学技术大学, 1992. 33.

[3] Xu X H, Chen S N, Gao S S, et al. The Motion of Thin Flyer Propelled by Electrical Exploding Foil [A]. Sym of Detonation Study [C]. Mianyang: Institute of Fluid Physics, CAEP, 1998, 3: 268－272. (in Chinese)
徐兴海, 陈素年, 高顺受, 等. 电爆炸金属箔推动下的薄飞片运动 [A]. 爆轰研究论文集 [C]. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1998, 3: 268－272.

[4] Keller D V, Penning R J. Exploding Foils—The Production of Plane Shock Waves and the Acceleration of Thin Plates [A]. Chase W G, Moore H K. Exploding Wires [C]. New York: Plenum Press, 1962, 2: 263.

[5] Tucker T J, Stanton P L. Electrical Gurney Energy: A New Concept of Modeling Energy Transference from Electrically Exploded Conductors [R]. SAND-74-0244, 1975.

[6] Voreck W E, Velicky R W. Exploding Foil Shock Sensitivity Test [A]. Short J M. 7th International Symposium on Detonation [C]. Annapelis, Maryland, 1981. 924－929.

[7] Dong Y B, Li X W, Dong W S. Finite Elements Computation of Metallic Foil Exploding Heated by Electricity [A]. Sym of Detonation Study [C]. Mianyang: Institute of Fluid Physics, CAEP, 1998, 3: 22－30. (in Chinese)
董玉斌, 李献文, 董维申. 电加热金属箔爆炸的有限元法计算 [A]. 爆轰研究论文集 [C]. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1998, 3: 22－30.

[8] Ouyang D H. Parameters of Electrical Exploding of Cu Foil and Cu Gridding [A]. Sym of Detonation Study [C]. Mianyang: Institute of Fluid Physics, CAEP, 1998, 3: 276－280. (in Chinese)
欧阳登焕. 铜箔和铜网格的电爆炸参数 [A]. 爆轰研究论文集 [C]. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1998, 3: 276－280.

[9] Weingart R C, Chau H H, Goosman D R, et al. The Electric Gun: A New Tool for Ultrahigh-Pressure Research [R]. UCRL-52752, 1979.

[10] ZHAO J H. Study on Electric Gun and Its Applications [R]. Mianyang: Institute of Fluid Physics, CAEP, 2003. (in Chinese)
赵剑衡. 电炮加载装置研究及应用 [R]. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 2003.

Study on the Technique of Electric Gun Loading for One Dimensionally Planar Strain

WANG Gui-Ji, ZHAO Jian-Heng, TANG Xiao-Song, TAN Fu-Li,
WU Gang, LIU Hai-Tao, KUANG Xue-Wu

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The designing principles are discussed based on the analyses of discharging circuit of electric gun. According to those, an electric gun with the energy of 14.4 kJ is designed and established. The measuring results show that the parameters of the electric gun, for example, the inductance is less than 40 nH, the discharging period is 7 μs, the flatness of the flyer is less than 40 ns, and the rising ratio of the initial current is to 750 GA/s. Compared with the same type of devices at home and abroad, the electric gun is high level and with good performances. Based on the above discussions and analyses, the common requirements are presented for electric gun in order to attain the one dimensionally planar strain.

Key words: electric gun; one dimensionally planar loading; designing principle; parameters of performance