

高压电极爆炸成形法

张 芮

(中科院力学所)

张铁生

(航空航天部二院)

摘要 本文介绍一种效率较高, 方法独特的无模成形球形容器的方法, 并将此方法直接应用于我国第一台3兆伏高频辐照设备的关键部件——高压电极的制造工艺上。

关键词 金属爆炸成形 球形容器 高压电极

1. 工程背景简介

高压电极, 又名高压帽, 它是工业辐照用的高频、高压加速器中关键部件之一, 是我国第一台参考国外设备, 自行研制出的高级尖端科研设备。该加速器的最高直流电压可达3兆伏, 将电子束流加速产生工业用辐射。其应用的直接背景是提高我国工业用电缆, 尤其是海底通讯电缆的使用寿命。普通电缆的绝缘保护层经过辐照处理后, 将改变其原有的化学组份, 具有耐高压、耐磨损和抗腐蚀等优点, 从而达到延长使用寿命的目的。除此之外, 辐照还在医疗消毒, 食品保鲜和农业品种改良等方面也有极其广泛的应用。此项技术逐渐为人们所认识和掌握, 其用途日趋发展和扩大。

2. 产品结构及精度要求

高压电极的结构形状如图1所示: 它是由一个精度很高的半球 ($R460 \pm 0.2$) 与一个半椭圆形截面的圆环组合而成。整体光洁度为 0.2 , 材质为1Cr18Ni9Ti不锈钢, 其化学组份

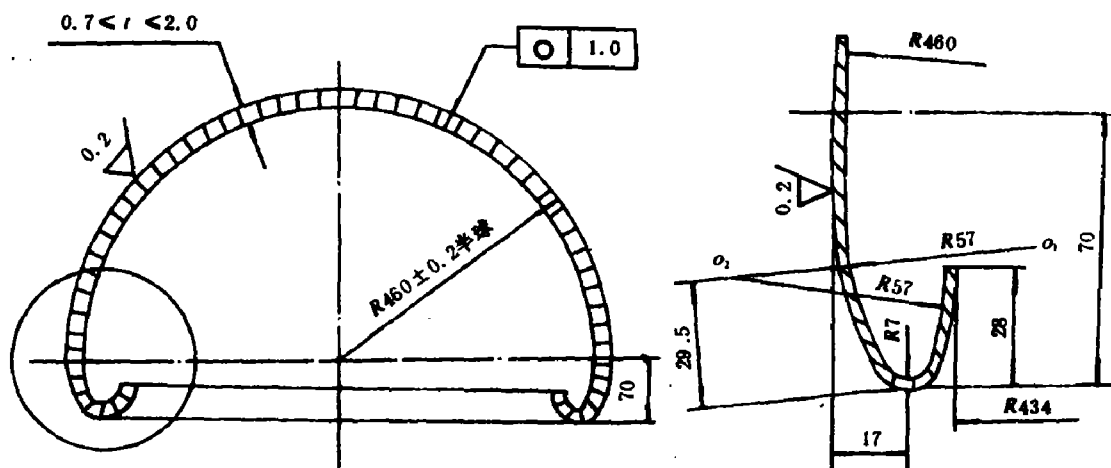


图1 产品结构及其局部示意图

Fig.1 Structure of the product and its local schematic diagram

1990年6月9日收到原稿。

如表 1 所示。

表 1
Table 1

化学成份	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	其 它
%	<0.12	0.80	<2.00	<0.030	<0.035	17.0~19.0	8.0~11.0	-	Ti>5×(C-0.02)≈0.8

对于精度高、单件生产，且研制费用低的部件来说，采用常规压力加工无疑将面临极大的困难。工艺上不论是采用强旋或普通压力机成形，工装模具费用将是昂贵的。而且，要保证产品有 $0.2\sqrt{\mu}$ 的光洁度，所有凹模内表面就必须有足够的光洁度。而对于这样两个复杂的凹模来讲，要保证其内表面的光洁度，只有采用特种铸造工艺才能实现，这对于单件或小批量生产，将是很不经济的。况且半椭圆形截面圆环的成形，采用一般的加工工艺技术本身就已经存在着巨大的困难。基于上述考虑，采用无模成形球形容器新工艺，并结合传统的贴模成形工艺来完成此项任务。

3. 工艺方案及结构计算

通过仔细研究后，制定的工艺流程如下：

任务论证→结构计算及图纸设计
 ↓
 下料、滚制、组焊
 准备模具、检测样板
 →整球及半椭圆形截面圆环成形→等离子切割出半球
 →半球与圆环组焊→修补缺陷及整体抛光→成品

1. 在 R460 的整球成形时，先将 $t=2\text{mm}$ 厚的板料下成如图 2 所示的几何尺寸，再将其滚制成锥台，最后组焊成如图 3 所示的封闭容器。成形时，在其上顶盖中心处开一小孔，先注满水，再将炸药放置到封闭容器的几何中心处，炸药引爆后产生的球面冲击波将把容器胀

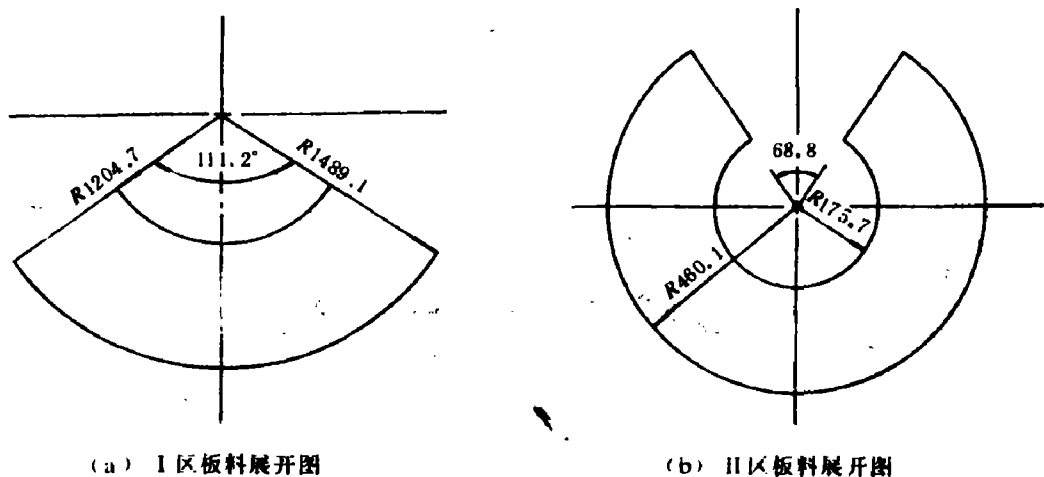
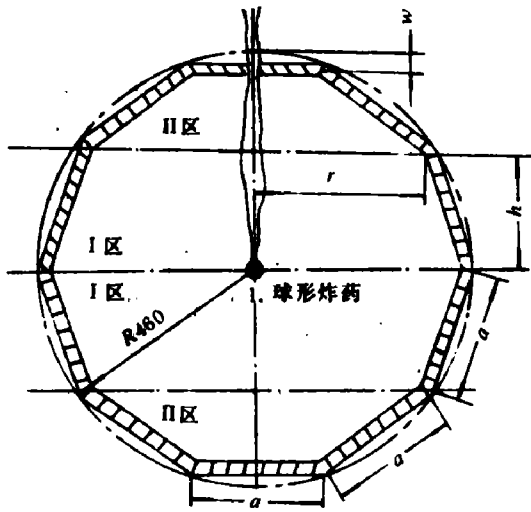


图 2 板料下料图

Fig.2. Drawings of unifoiled conical frustum

(a) Region I unifoiled conical frustum. (b) Region II unifoiled conical frustum



照片 1

Photograph 1 Spherical vessel

图 3 封闭容器

Fig.3. Closed container

1. Explosive package.

成球形容器。成形后的球形容器如照片 1 所示。然后用等离子切割机切割出所需要的半球。

2. 半椭圆形圆环的成形工艺如图 4 所示。先将圆形板料放置到凹形模具上，凹模内表

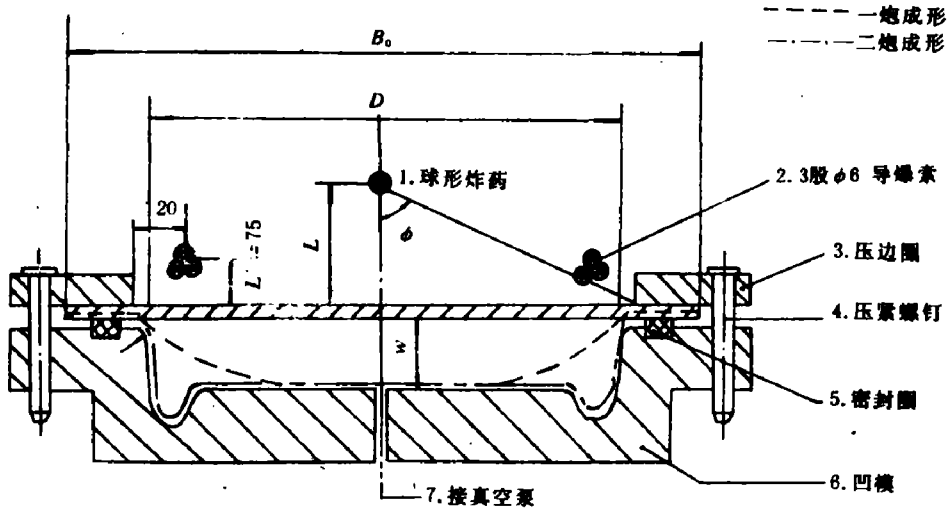


图 4 半椭圆形截面圆环成形示意图

Fig.4. Explosive forming of semi-elliptic ring

- 1. Explosive package.
- 2. $\phi 6$ explosive primacord of three strands.
- 3. Clamp ring.
- 4. Clamp screw.
- 5. Seal ring.
- 6. Explosive forming die.
- 7. To vacuum.

--- The first forming. --- The second forming.

面事先加工成所需要的几何尺寸（参照图1所示局部放大图），模口上有沿圆周方向的一圈橡皮密封条。板料通过压边圈上的压紧螺钉压紧密封条，使模腔内部成密封状态，然后用真空泵通过抽气孔将凹模内部抽成真空状态。成形时考虑到半椭圆形截面圆环形状的复杂性，将采用两炮成形法：即，第一炮先将一定质量的球形炸药放置在距圆板料中心高为 L 处的地方再将模腔内抽成真空状态（ $-740 \sim -750 \text{ mm Hg}$ ），然后将整个模具连同炸药一同浸没在水中。引爆炸药后，先将板料成形至图4中所示的虚线状态。为成形半椭圆形凹陷区域。第二炮采用局部成形法。即在半椭圆形凹陷区域的上方沿整个圆周方向布置一圈导爆索，吊高为 L' 。通过引爆导爆索，可以成形至模具所要求的几何形状。当然，第二炮依然是采用真空状态水下成形法。



照片 II

Photograph II The high-voltage terminal

最后，将成形后的板料从模具内取出，用立式车床加工到需要的几何尺寸，与成形好的半球组焊在一起，整体抛光后即得成品，如照片II所示。

4. 相应力学量及炸药量的计算

在所有成形过程中，对所用炸药量做出准确的计算和估算是十分必要的。否则，炸药量过大会炸坏坯料和模具，造成损失；炸药量不够，就需要采用多炮成形，而所用的材料 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 对炸药产生的冲击波十分敏感，多次成形会使材料产生硬化现象，给加工带来困难。

1. R460 整球成形能量

在球形容器成形时，其变形能可以分成两部分：一部分是上、下盖板的变形能；另一部分是 I、II 区锥台的变形能，对于所有焊缝区，则认为基本上未发生塑性变形（现场直测结果已证明了这一点）。这主要是由于以下三个条件所决定的：第一，角点处的力学边界条件决定了其不易产生较大的径向（ u_r ）和环向（ u_θ ）位移，这点国内已有学者从大型程序计算的

结果中给予了证实：第二，焊接时所有的焊料其机械强度高于一母材，而且由于焊料的堆积，其沿径向的厚度也大于母材，所以与母材相比，不易发生大的塑性变形；第三，炸药引爆后释放出的能量，以爆轰波的形式通过水介质传递，其能量密度传递公式为

$$E_d = c \cdot W^{G+1} / R^G$$

其中 c 、 G 为炸药常数，一般 $G > 2.0$ ； W 为炸药重量； R 为爆轰波传播距离。

由此可知，爆轰波能量传递密度按 $1/R^G$ 形式衰减，由封闭容器的几何形状可知：爆轰波传播到所有焊缝区的距离要比到达相应母板区的距离长，从而使达到焊缝区的能量密度低于母板，使焊缝区不易发生塑性变形。

从能量上考虑，封闭容器胀形成球形容器的变形能等于炸药释放出的能量，在考虑到爆轰波能量在水中传递的影响后，总体的能量守恒方程为

$$U_i = \eta \cdot E_{\text{炸药}} \quad (1)$$

其中 $U_i = 2 \times (U_{\text{壳}} + U_l + U_n)$

η 为炸药在封闭水球中的能量传递系数。一般取 $\eta = 55\%$ [1]。

在计算变形能时采用工程上常用的 Mises 屈服准则及材料幂强化本构模型 [2]。

Mises 屈服准则：

$$\sigma_i = \sigma_0$$

材料的幂强化本构：

$$\sigma_i = k \varepsilon_i^n$$

材料的变形能密度：

$$du = \sigma_i d\varepsilon_i$$

其中 $\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$ 为等效应变

$$u = \int \sigma_i d\varepsilon_i = \int k \varepsilon_i^n d\varepsilon_i = \frac{k}{n+1} \varepsilon_i^{n+1} \quad (2)$$

在液压胀形工艺过程中，各区板料均胀形成为一球形曲面，利用拉普拉斯方程 [3]：

$$\frac{p}{t} - \frac{\sigma_r}{R_r} - \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} = 0$$

式中： σ_r 、 σ_θ 为沿经线和纬线方向的主应力。

取 $R_r = R_\theta = R$

$$\sigma_r = \sigma_\theta = p \cdot R / 2t$$

对于应变有 $\varepsilon_r = \varepsilon_\theta$

由体积不可压缩性：

$$\varepsilon_r + \varepsilon_r + \varepsilon_z = 0$$

则

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = -(1/2)\varepsilon_z$$

式中： ε_z 为沿板厚方向应变。

所以等效应变公式可以写为： $\varepsilon_i = |\varepsilon_z|$

由于

$$\varepsilon_z = \int_{l_0}^l \frac{dt}{t} = \ln \frac{l}{l_0} < 0 \quad (l_0 > l)$$

$$\text{则} \quad \varepsilon_i = -\varepsilon_r \quad (3)$$

由几何性质可知：上、下盖板的变形能密度为：

$$u_{\text{盖}} = \frac{k}{n+1} \left\{ \ln \left[1 + 4 \left(\frac{W}{a} \right)^2 \right] \right\}^{n+1} \quad (4)$$

I 区锥台的变形能密度为

$$u_I = -\frac{k}{n+1} \left\{ \ln \left[\frac{a(R+r)}{2Rh} \right] \right\}^{n+1} \quad (5)$$

II 区锥台的变形能密度为：

$$u_{II} = -\frac{k}{n+1} \left\{ \ln \frac{a(r+(a/2))}{2R(R-h-W)} \right\}^{n+1} \quad (6)$$

得到相应各区的应变能密度后，由积分式

$$U = \iiint_V u dV \quad (7)$$

即可求出各区的变形能。

考虑炸药引爆后释放出的能量，我们有如下关系式

$$E_{\text{炸药}} = m \cdot e \quad (8)$$

其中：\$m\$ 为炸药质量；\$e\$ 为炸药比能量。

将 (8) 式代入 (1) 式，并结合 (4)~(7) 式即可求出胀形时所需的炸药量。具体计算结果如表 2 所示。

表 2
Table 2

名称 数值	\$n\$	\$\frac{k}{\text{kg/cm}^2}\$	\$\frac{2 \times u_{\text{盖}}}{(\text{kg} \cdot \text{cm})}\$	\$\frac{2 \times u_I}{(\text{kg} \cdot \text{cm})}\$	\$\frac{2 \times u_{II}}{(\text{kg} \cdot \text{cm})}\$	\$\eta/\%\$	\$\frac{e}{(\text{kg} \cdot \text{m/g})}\$	雷管	m/g
	0.29	\$1.125 \times 10^4\$	\$1.88 \times 10^4\$	\$5.44 \times 10^3\$	\$1.81 \times 10^3\$	55	527	\$8^{\circ}\$电雷管一支	21

注：一个 \$8^{\circ}\$ 电雷管相当于 4.5 克所用炸药。

2. 半椭圆形截面圆环的成形

成形工艺如图 4 所示。在成形过程中，边缘板料（俗称法兰）在被拉入模腔的同时，也会有减薄变形，故整个板料的变形能应由两部分组成，即

$$U_r = U_D + U_f \quad (9)$$

其中：\$U_D\$ 为直径为 \$D\$ 的板料的变形能；\$U_f\$ 为法兰的变形能。

其中：

$$U_D = \iiint_V u_D dV \quad (10)$$

$$u_D = \frac{k}{n+1} \left\{ \ln \left[1 + 4 \left(\frac{\omega^*}{D} \right)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

\$\omega^*\$ 称为有效拉伸深度，其表达式为^[4]

$$\omega^* = \omega - r \left(1 - \cos \frac{|u_A|}{r} \right) \quad (12)$$

$|u_A|$ 为法兰边缘拉入量; r 为模口圆角。

$$|u_A| = \frac{B_0}{2D_0} (B_0 - B)^{[4]} \quad (13)$$

$$\frac{B_0 - B}{D_0} = \frac{B_0}{D_0} \left[1 - \sqrt{1 - 4 \left(\frac{\omega}{B_0} \right)^2} \right]^{[4]} \quad (14)$$

其中: B_0 为板料直径; D_0 为模口外圆直径。

$$D_0 = D + 2r \quad (15)$$

将 (11)~(15) 代入 (10) 式, 即可求出 U_D 。法兰变形能:

$$U_f = \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{3} \right)^{n+1} \frac{k}{n(n+1)} t_0 \left[\left(\frac{B_0 - B}{2} \right) B_0 \right]^{n+1} \left[\left(\frac{D_0}{2} \right)^{-2n} - \left(\frac{B_0}{2} \right)^{-2n} \right] \quad (16)$$

将 U_D , U_f 代入 (9) 式, 即可求出 U_r 。

再由方程 (1), (9) 即可求出炸药量 m 。但此时的能量传递系数 η 与前面的概念不同此时应用水下拉伸成形时的能量传递系数, 即:

$$\eta = \frac{1}{2} \eta_1 (1 - \cos \phi)$$

$$\frac{1}{\eta_1} = 4.23 - 3.7 \left(\frac{L}{D} \right) \quad \frac{L}{D} < 0.5$$

ϕ 为药包与板料中心线所构成的立体角。所有计算结果如表 3 所示。

表 3
Table 3

名称 数值	L/mm	D/mm	B_0/mm	ω^*/mm	r/mm	$\phi/(\circ)$
	150	920	1100	57	12	72
名称 数值	$\eta/\%$	$\frac{U_D}{(\text{kg}\cdot\text{cm})}$	$\frac{U_f}{(\text{kg}\cdot\text{cm})}$	$\frac{e}{(\text{kg}\cdot\text{m/g})}$	雷管	m/g
	9.6	5.25×10^4	7.69×10^4	527	8° 电雷一支	7.5'

• 考虑到实际变形量要比理论计算值大, 故成形时所用药量实为 15 克。

如前所述, 在一炮成形后, 还应采用二炮局部成形法使板料完全贴模。在经过第一炮成形后, 材料的力学性质和几何尺寸都发生了较大变化, 此时再精确计算材料的变形能已变得相当困难, 只有根据以往的工程经验来确定导爆索的用量。事实证明: 采用 3 股 $\phi 6$ 导爆索在距模口 20 mm、吊高为 75 mm 处成形达到了使板料完全贴模的目的。且板料和模具均未发生破裂和损伤。

5. 结束语

采用无模成形球形容器爆炸加工、并结合传统的贴模成形工艺, 通过准确、合理的分析计算, 用两个多月的时间就攻克了技术难题。研制费用比其它常规方法减少了 70% 以上, 为国家节约了大量资金。该产品现已通过中科院高能物理所的科研鉴定, 目前整个辐照设备正在组装调试, 并可望在近期内通过国家技术鉴定。

参加本文研制工作的还有内蒙古工学院马万珍、贺 钦、郭常吉; 高能物理所朱正宜等同志, 在此对上述同志的工作深切致意。

参 考 文 献

- [1] 郑哲敏等, 球壳的变形计算和能量准则, 中科院力学所研究报告, (1964)。
- [2] 严宗达, 塑性力学, 天津大学出版社, 第一版, 1988年8月, 14。
- [3] 梁炳文, 胡世光, 板料成形塑性理论, 机械工业出版社, 北京, 第一版, 1987年12月, 38。
- [4] Ezra.A.A., Principles and Practice of Explosive Metalworking. Vol I. University of Denver. Denver. Colorado.U.S.A.

MANUFACTURE OF HIGH-VOLTAGE TERMINAL BY EXPLOSIVE METHOD

Zhang Rui

(Institute of Mechanics, Academy Sinica)

Zhang Tiesheng

(No.2 Research Institute of Aero-Space Ministry)

ABSTRACT · This paper presents a new developed method of manufacturing spherical vessel based on the technology of non-die explosive forming. By using this method, the High-Voltage Terminal, which is a key component of the 3MV High-Frequency Irradiation equipment was first produced in P.R.China.

KEY WORDS explosive metalworking, spherical vessel, high-voltage terminal.