

金属爆炸加工的原理与实践

〔美〕 A.A. 埃拉兹 著

张铁生 梁宜强 谭 渤 译

国防工业出版社

74029

金属爆炸加工的原理与实践

〔美〕A.A.埃拉兹 著

张铁生、梁宜强、谭 渤 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系作者根据高能成形丹佛研究中心和丹佛大学的研究成果以及历次国际高能成形会议的文献进行综合整理而成。全书共分十一章：金属爆炸加工；能量传递机理；封头的爆炸成形；比例模型在爆炸成形中的应用；圆环的胀形；爆炸成形模具；爆炸冲孔；爆炸成形设备的分析与设计；炸药；爆炸焊接；爆炸成形对材料性能的影响。

本书可作为从事工艺研究和工厂工艺人员的参考书，也可作为高等院校工艺课程的教学参考书。

PRINCIPLES AND PRACTICE OF ~~EXPLOSIVE METALWORKING~~

A. A. Ezra

Industrial Newspapers Limited 2273

*

金属爆炸加工的原理与实践

张铁生、梁立强、~~陈一勳~~译

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 10⁸/₈ 264 千字

1981年4月第一版 1981年4月第一次印刷 印数：0,001—4,800册

统一书号：15034·2140 定价：1.30元

译 者 的 话

金属爆炸加工是以炸药和火药为能源的金属加工方法，是近二十年来迅速发展起来的新工艺。它不但是常规金属加工方法的补充手段，而且在某些方面它具有常规加工方法所没有的优点，所以它在国防、宇航、化工机械等工业部门得到广泛的应用。目前，金属爆炸加工技术的研究工作已从应用进入到理论分析。有些项目，如爆炸拉深工艺等已进入成熟的应用阶段。

本书系 A. A. 埃拉兹博士根据高能成形 丹佛 (Dever) 研究中心和丹弗大学的研究成果以及历次国际高能成形 (HERF) 会议的文献进行综合整理而成。作者综述了一九七三年以前国际高能加工技术的研究工作的发展全貌，是对国际爆炸加工技术概括得比较全面的一本书。本书的主要特点是理论和实践并重，通过理论分析导出计算公式，再经实验方法（或小批量部件生产）验证和修正。所以本书的内容比较全面，并切合工程实际，书中的公式和曲线图表很适合于进行初步估算。对于需要进行深入研究的读者，可以从书中列出的参考文献中得到大量的资料。

本书在翻译出版过程中，曾得到中国科学院力学所郑哲敏教授、钢铁研究院李继欣工程师、哈尔滨工业大学李硕本教授的热情帮助，在此向他们表示衷心地感谢。

由于译者水平有限，译文中难免有不少错误和不当之处，诚恳希望广大读者给予批评指正。

译 者

于北京

目 录

第一章 金属高能加工概述	1
1.1 金属爆炸加工	2
1.2 其它高能成形法	27
参考文献	34
第二章 能量传递机理	37
2.1 几何法	39
2.2 能量法	45
2.3 冲量法	51
2.4 水下平面冲击波与可动无限平板的相互作用	54
2.5 变形圆板与水下冲击波的相互作用	57
2.6 水下爆炸的二次加载阶段	61
2.7 水头的作用	65
2.8 气泡室对爆炸能量传递的影响	68
参考文献	69
第三章 封头的爆炸成形	80
3.1 变形的应变能	80
3.2 爆炸成形圆平板料时吊高距对应变分布的影响	83
3.3 爆炸成形封头所需炸药能和总的变形应变能的估算	86
3.4 最大容许拉深深度	99
3.5 多炮爆炸成形	102
3.6 坯料失稳而拉偏(即不均匀拉深)	105
3.7 法兰皱	113
3.8 可成形的条件	117
参考文献	121
第四章 比例模型在爆炸成形中的应用	123
4.1 模型律和相似准则的理论	123
4.2 爆炸成形模型律、相似准则和相似常数的导出	127

4.3 爆炸成形模型律和相似准则的小结	132
参考文献	134
第五章 圆环的爆炸胀形	135
5.1 传递到圆环上的爆炸能量	136
5.2 圆环胀形的应变能	137
5.3 回弹	138
参考文献	140
第六章 爆炸成形模具	141
6.1 圆筒形爆炸成形模	141
6.2 爆炸成形封头类零件的模具	147
参考文献	158
第七章 爆炸冲孔	159
7.1 炸药量的估算	160
7.2 实验验证	162
7.3 爆炸冲孔模的分析和设计	167
7.4 平板的爆炸冲孔	172
参考文献	173
第八章 爆炸成形设备的分析与设计	174
8.1 水井	175
8.2 必要设备	178
8.3 附近设备	181
8.4 安全	182
8.5 土质支撑的圆筒井壁内爆炸加载及充水特性分析	184
8.6 井壁的特征	187
参考文献	194
第九章 炸药	195
9.1 炸药的性能和能量的释放	195
9.2 用于金属成形时炸药的选择	198
9.3 金属成形的炸药准备	200
9.4 雷管	203
9.5 炸药的处理	204
参考文献	210

第十章 爆炸焊接	211
10.1 爆炸焊接过程的理论	212
10.2 爆炸焊接工艺参数的选择	223
10.3 关于爆炸焊接工艺的限制条件	239
10.4 爆炸焊接的性能	243
10.5 应用	253
参考文献	267
第十一章 爆炸成形对材料性能的影响	275
11.1 微观结构	276
11.2 强度性能	286
11.3 抗断裂性能	308
11.4 疲劳特性	311
11.5 应力腐蚀破裂	314
11.6 热响应	319
11.7 结论	320
参考文献	321

第一章 金属高能加工概述

1.0 引言

金属高能加工有几种形式，它们的共同特点是在大约几毫秒的短促时间内，将能量由化学能源，电能源或其它机械能源，传递到被加工金属板料上去。已经研究的高能成形法有以下几种：

A. 爆炸金属加工

- a. 板及薄板的爆炸成形
- b. 爆炸胀形及管子的缩颈
- c. 爆炸冲孔及剪切
- d. 爆炸压痕
- e. 爆炸硬化
- f. 爆炸焊接
- g. 爆炸粉末压实

B. 爆炸性气体成形

C. 液电成形

D. 电磁成形或磁动力成形

E. 水锤成形或电磁液压成形

其中，板及薄板的爆炸成形、爆炸压痕、管胀形、爆炸硬化、爆炸焊接、液电成形和电磁成形都已用于生产，其余工艺过程的工业价值尚待研究探索。

高能成形具有多种用途，而且适用于很多种类的金属。铝合金、碳钢、合金钢、不锈钢、钛合金和难熔金属零件，均可用这些方法成形。

每种高能成形法，都有它各自独特的优点，而其中哪一种为最佳应用尚待判断和进行经济性分析。然而正逐步积累经验来帮

助人们去鉴别对于某一具体应用,应如何正确选择最佳成形工艺,从而逐渐消除推测。

1.1 金属爆炸加工

1.1.1 定义

金属爆炸加工是利用化学能的炸药,在爆炸时释放的短时间的剧烈的能量作为能源的爆炸金属加工。

爆炸和爆燃两种炸药都可采用,但目前采用爆炸炸药较为普遍。使用高能炸药时在装药附近可高达 $3 \sim 4$ 百万磅/英寸²的压强(爆压)。因此,接触爆炸法适用于诸如爆炸焊接或复合、金属粉末压实、切割、压痕等这一类要求高压强的金属爆炸加工。为了成形板及薄板、管等,高能炸药通常置于离开板料一定距离处。要在诸如水等的传能介质中去炸。由此所产生的冲击波压强不是百万磅/英寸²,而是十万磅/英寸²数量级,以此来成形所需形状的零件。

萨维特(Savitt)⁽¹⁾和韦兰(Wely)⁽²⁾已经发现若采用低速炸药,则成形时可以将炸药直接放在板料上,韦兰观察到如采用炸药爆速为每秒500英尺的低速接触爆炸,则成形性能可获得改善,从而可预料到接触爆炸传能效率亦有所改善。将来低速炸药用于金属爆炸成形工艺中可能消除接触与非接触式(即有吊高)爆炸成形之间的差别。

1.1.2 历史

人们对用炸药来成形金属零件这一工艺过程的认识,已有将近百年历史。

关于这种工艺的最早专利之一,是在制造自行车构架中胀形管件(1898年9月23日)的英国21840号专利。美国(1909年11月9日)有爆炸成形金属板料的第939702号专利。在第二次世界大战前,法国人采用爆炸成形做大炮防护板,美国在1950年,密苏里州,马斯伦地方(Marcelene)的模尔公司(Moore

Company) 开始采用爆炸成形做蒙乃尔白铜 (Monel) 叶片毂, 而后又采用这种方法, 小批生产了大叶片轮毂。

在五十年代中期, 因为巨大的宇航工业对新金属加工方法的要求, 给爆炸成形一个巨大的推动。1960 年美国政府有关部门中已有不少于 80 个单位计划同时进行爆炸成形加工。由于成形“土星”宇航火箭助推器上直径为 33 英尺的球形封头的巨大瓜瓣的需要, 北美航空公司用爆炸成形法正常生产了 2014 铝合金巨大瓜瓣零件。另外, 航空通用动力公司在大量生产的基础上, 制造了厚度为 0.125 英寸, 直径为 54 英寸 AMS6434 高强度钢封头。

尽管有这些成功, 但是由于控制爆炸成形的参数方面基础知识不足, 曾产生了许多次没有公开的, 但又是有意失败的试验。其中几项较大的失败, 如: 爆炸成形 2219-T 37 的铝合金零件及直径为 33 英尺的瓜瓣件封头, 未能达到组装公差。这种高屈服强度的合金, 在浅拉伸时出现了过分回弹, 在预定时间和经费内, 未能实现全尺寸的工艺过程试探工作。曾经企图采取冰模爆炸直径为十英尺的高强度钢封头, 但是没有坚持到完全成功。原因是在预定时间和经费内, 用全尺寸模具试验不能把整个工艺过程全部研究出来。在这项工作结尾时, 从模拟试验证明, 这项工艺方法是可行的, 然而, 全尺寸模具试验未能进行到底。

直到六十年代初期, 美国才开始清楚地认识到, 爆炸成形需要有牢固的科学基础, 而且对于基础工艺过程, 开始给以愈来愈多的重视。随着这种研究重点的变化, 开始出现许多大规模的成功应用: 作为美国空军导弹改进计划, 爆炸成形了直径为十英尺的 2014-0 铝封头; 直径为 5 英尺的 2014-0 铝封头投入批量生产; 爆炸成形坦克炮塔和厚壁管的爆炸内膛挤压硬化等, 一些愈来愈多的经济的成功应用正被发现。同时在商业上开始出现爆炸加工广告。

1.1.3 优点和缺点

金属爆炸加工引人注目之点是, 多方面的适应性, 设备投资

低，以及不受限制的潜在能源。炸药可做成各种形状：带状、片状以及根据最适合成形部分轮廓所需要压力分布的任何形状。从改变吊高和选用不同炸药着手，很容易地将压强从每平方英寸几百万磅降低到一般压力加工所用的压强数值。如能量要求增大，只要增大药量就行。它能改变压力分布和成形时的压力强度，使能量在一个很大范围内变化，提供爆炸加工的适应性，远非一般成形方法和其它高能成形法所能媲美的。它所需的设备投资低，一磅炸药仅值几分（美元），而它具有像百吨落锤或相当于二百万焦尔电容器组箱那样大的能量级。一个二百万焦尔能量级的电容器组箱价值百万美元，然而一磅炸药的爆炸设备投资仅需几千美元。

其它的优点是所有高能率成形过程所共有的。这就是，在一定范围内的高速变形将增大材料的延伸性，这点是伍德(Wood)⁽⁴⁾在爆炸胀形封头时的发现，如图 1.1 所示。

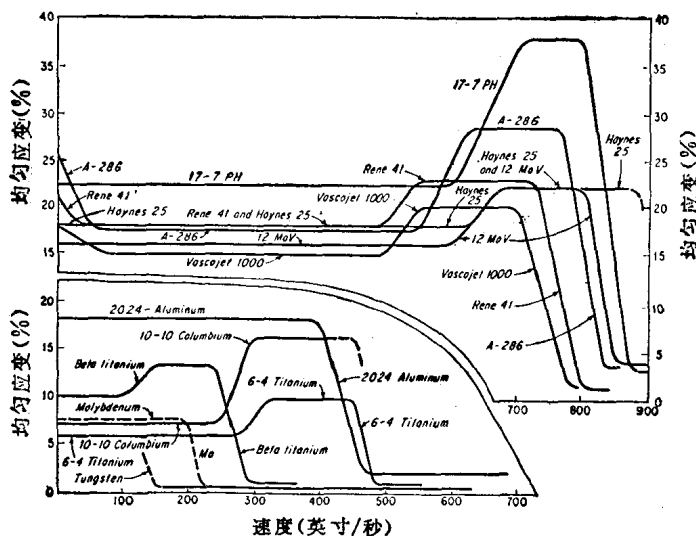


图 1.1 速度对胀形封头的影响

爆炸加工也有缺点，但多数缺点可能会随着时间的推移而减少。主要缺点是爆炸加工需要有高度专门知识，然而它却被工艺过程简单的假象所隐蔽，这一困难将会随着这方面的技术知识广泛的普及逐渐消除。

在金属爆炸加工中遇到的另一困难是高能炸药所释放出的能量的不稳定性，例如，药包所产生的压力与装药密度成正比，因此，就必须尽量仔细控制装药密度，并采取严格控制质量的措施，压药时采取抽真空，以避免药中存有气泡。同理，浇铸炸药时也要排除气体。

虽然控制炸药密度后能量释放不稳定现象减少，但还发现不同批次同种炸药所释放能量也不一样，这点在生产使用中也必须考虑到。还必须对每批新到炸药进行测定，以修整炸药能量的含量变化，再根据金属加工情况测出其所需的调整量。

虽然恰当的注意和正确的质量控制措施能减少能量释放的不稳定，但完全消除还不可能。如果根据工件要求，必须更进一步地减少误差，那就要对药进行精压和精密机械加工，以得到更为精确的装药。

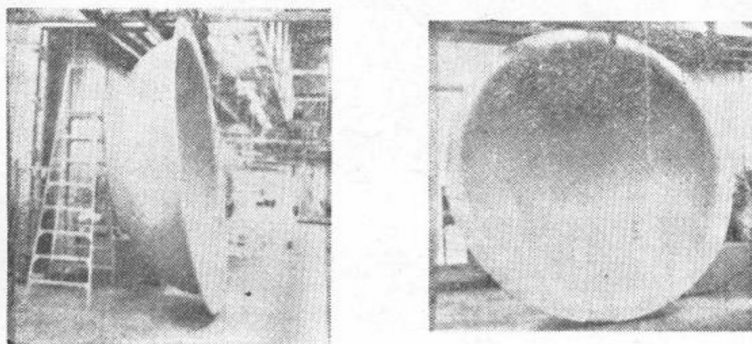
缺乏自动化是现存的另一个缺陷。因为设备投资低，金属爆炸加工技术基本上用于少数或小批量单件生产。缺乏自动化妨碍了爆炸成形推广到大量生产中去。然而，爆炸成形机床正在研制和发展中。如：托拜厄斯 (Tobias)⁽⁶⁾ 的 Explo-Forma 式爆炸机床可用 195 格令的泰安炸药量，可产生 55000 英尺·磅的爆炸能，并能装卡最大外径为 20 英寸和深 8 英寸的模具。而伍德⁽⁶⁾ 的组合式爆炸机床，可以用炸药为能源，也可用爆炸气体或水下放电，甚至可用压强高达 50000 磅/英寸² 液压作为能源，它比托拜厄斯的机床大得多，它可装卡直径为 60 英寸的模具。而伍德的机床主要是作为研究用的，在相同条件下对爆炸成形、液电成形、可爆性气体成形以及通用的液压成形作出比较。

1.1.4 技术水平

金属爆炸加工用于小批单件大型件的生产,如果在其它工艺设备不能胜任的情况下,它就显示出最大的经济意义。由于技术知识迅速增长,过去一些失败今后不会重演了。但这些知识尚且不能像一般压力加工那样普及,但是情况会很快改善。

对于板料和管子的爆炸成形而言,目前知识状况与大多数的一般压力加工方法,如冲压、液压胀形、落锤等相仿,或者比它们更好些。在本书后几章节中,将介绍一些近似方法,用来预估水下爆炸时,爆炸能量传递给板料以及预估金属板料所需变形功。这些方法在研究过程中作粗略估计是好的,也能减少部分试探工作(但不是全部)。在某些情况下,用近似算法已能完成全部工艺过程,不再需试探^[7]。例如:Giannoccolo,海洋第二试验室所成形的12英尺直径的钢封头。已有精确的分析方法来预估板料拉入模腔的变形应变能量^{[8]、[9]}。威特默(Witmer)^[10]等人制定了一个很复杂的计算机程序,用以分析在冲击载荷作用下,周边弯曲圆板的变形,其中包括弯曲与薄膜应力。博伊德(Boyd)^[11]做出不包括有弯曲但仍受边界枢接条件限制简化解。而瑟斯顿(Thurston)^[8]研究的更为有用的问题的解,即从一个初始冲击量或速度分布开始,预估板料边缘拉入量,在整个板料上的应变分布和合成量以及总的变形应变能。

目前对大型精密板金件最可靠和迅速的爆炸成形是运用近似分析法,随之再用模型试验对预估值进行修正。不仅是爆炸参数,而且包括一些模具项目:如模具尺寸、模具刚度,卡紧件个数以及模具壁厚等。也能通过模型试验来确定和验证。在以后章节中介绍埃兹拉(Ezra)^{[12]、[13]}提出的爆炸成形模型律法^[14],能够由小模具上取得的结果,有把握地外推到大模具上。在图1.2中表明已作出模型律的全尺寸验证。由于这一工艺一旦发生错误损失是大的,并且只能分摊在少数几个零件的成本中。模型研究对成形数量有限的大零件,它可最充分的探索其潜在的经济效益。



为10英尺的2014-0铝合金封头爆炸成形，
无焊缝（马丁公司）

图1.2 10英尺封头件的爆炸成形

1.1.5 应用

1.1.5.1 爆炸成形

板料爆炸成形已得到有效的和创造性的应用。在美国、法国、比利时、西德、英国、波兰、苏联、日本等许多国家中已用来成形压力容器的封头或端盖，随使用者不同，其经济效益也有差异。北美航空公司已常规生产爆炸成形 33 英尺直径的“土星”压力容器封头的大瓜瓣型零件（图 1.3）。

马丁公司已经为“大力神Ⅱ”火箭规划，用爆炸成形生产 10 英尺直径 2014 铝原型封头（图 1.4）和大量生产 5 英尺封头。

近来一篇文件报导^[15]了法国 Secathen 公司无模成形法，炸成 3 米直径不锈钢封头。法国这种方法用了两个焊在一起的截头圆锥作为预制件，在预制件中盛满水，将炸药放入件内，炸药爆炸后发出球形冲击波，使预制焊接件不用模具便可形成一个球，这个球再割成两半，即得到两个半球，用作压力容器封头。因为这个方法能够成形直径与厚度比高的球型封头（即 1000），所以它的意义已超出了无模成形的范围，如此高的直径与厚度比的半球封头，如用平板料去炸，即使能成形也会严重的起皱。

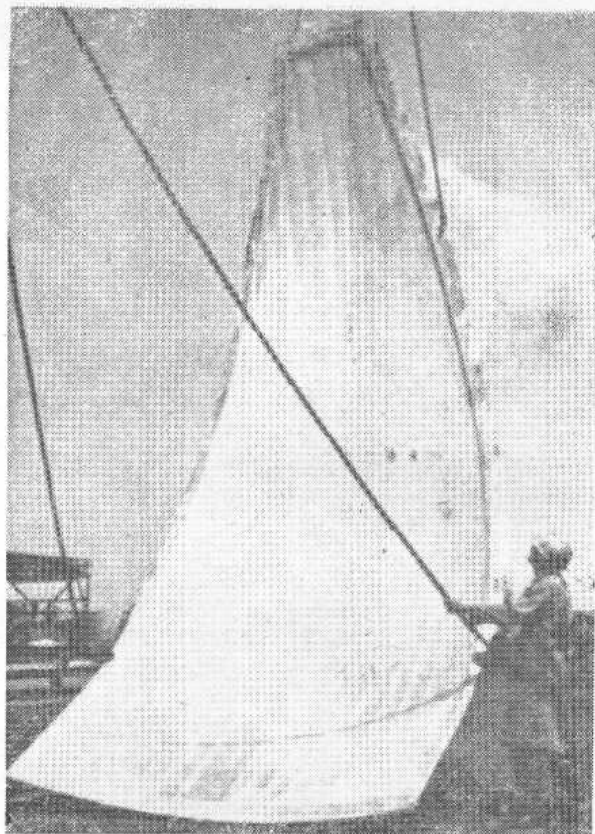


图1.3 33英尺2014-0铝封头分瓣爆炸成形（北美Rockwill）

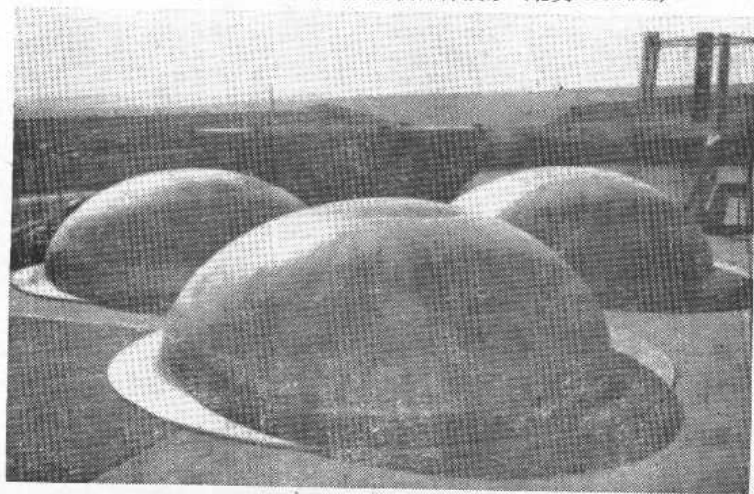


图1.4 爆炸成形的120英寸直径2014-0铝封头（马丁公司）

用板料炸不对称形工件很容易，爆炸冲击波有如凸模将金属板料强力挤入所需要的一定形状的凹模中去，Foster-Wheeler 公司在例行生产中用爆炸成形来炸热交换器部件，如图1.5和图1.6中所示的具有平边的波纹板。法国、挪威^{[15]、[16]}也发现用爆炸法很适合于做热交换器板（图1.7），美瑞安公司（Ryan）用爆炸加工制成铝反射罩（图1.8）。

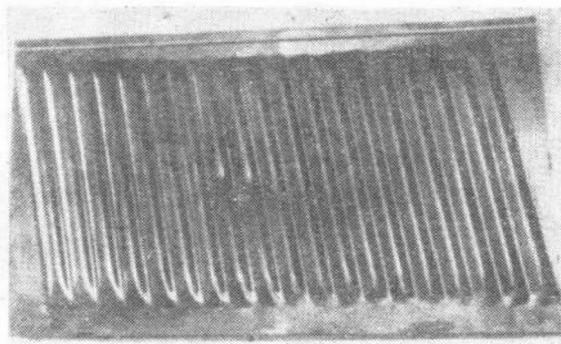


图1.5 爆炸成形的锅炉顶板

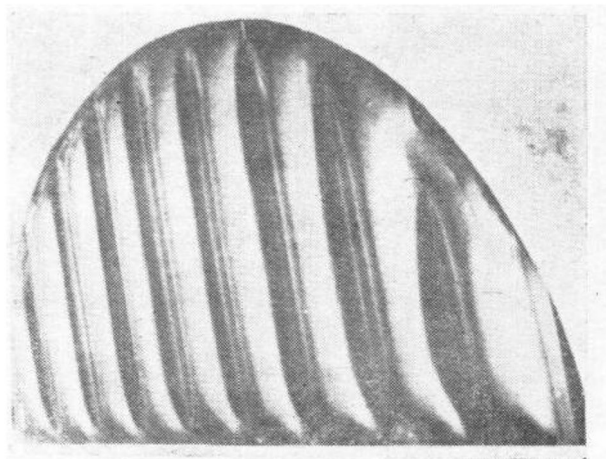


图1.6 爆炸成形的给水加热器隔板



图1.7 爆炸成形的不锈钢热交换器板

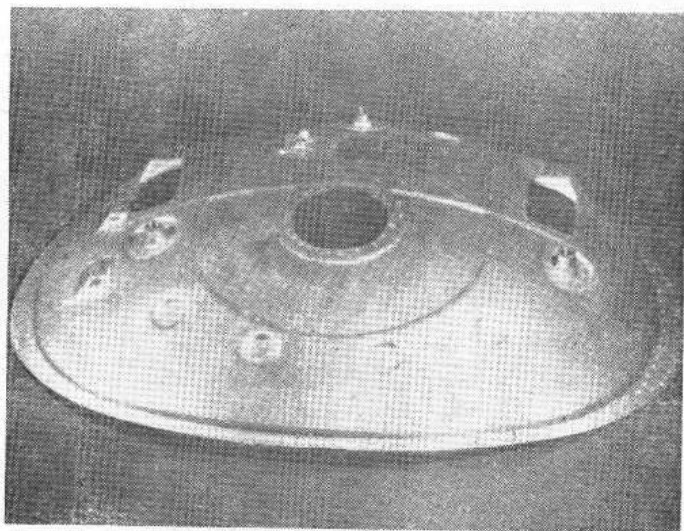


图1.8 爆炸成形的铝反射器罩（瑞安航空公司）