

爆炸加工

(修 订 本)

郑哲敏 杨振声 等编著

国防工业出版社

爆 炸 加 工

(修 订 本)

郑哲敏 杨振声等 编著

國防工業出版社

内 容 简 介

本书是1969年出版的《高能成形》的修订本。

爆炸加工是以炸药、火药作为能源的一种高速高压的加工方法。它的特点是能量大、设备简单、产品质量高、工序简单，还能对某些其他加工方法难以加工的材料进行加工。

本书着重介绍国内有关单位的科学试验和工艺总结，也介绍了国外的一些资料。全书共分十三章，分别介绍了爆炸成形和爆炸焊接，包括原理、模型试验、典型工艺方法以及材料、炸药、爆炸场地、测试技术等部分。

本书可供从事这方面工作的科技人员，工人，以及有关高等院校的师生参考。

爆 炸 加 工

(修订本)

郑哲敏 杨振声等 编著

*

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 22¹³/₁₆ 586 千字

1981年7月第二版 1981年7月第三次印刷 印数：7,000—9,800册

统一书号：15034·1201 定价：2.80元

7938/3-2
16626

修订版前言

爆炸加工是近 20 年来发展起来的一种新工艺方法,在我国也开展了多年,积累了许多自己的经验,并对若干机理做了探讨。1969 年出版了《高能成形》一书,我们在此基础上进行了增补和删改,并改名为《爆炸加工》出版。

近几年来,爆炸焊接在国内外都有较大的进展,因此本书用了较大的篇幅来介绍爆炸焊接的内容。有关爆炸焊接机理的问题,书中主要介绍了国外的资料。另外我国研制成了一些爆炸加工的机床,已经成批地生产许多产品,无论从产品质量和生产效率都有了很大的提高,因此也用一章的篇幅加以介绍。还有一些章节对原书作了较大的改变,如:测试技术一章,我们摒弃了一些旧的测量技术,介绍了一些较新的技术,对脉冲 X 光,高速摄影等也作了补充介绍。炸药一章中介绍了我国自制的橡胶、塑料炸药等新炸药品种、对毛料的贴模过程和模具强度进行了分析。其他章节也有若干增补,并删去了液电、电磁成形两章。本书对于爆炸加工机理,只作了定性的分析,列出了计算的结果,对于具体力学模型的建立和计算请参考中国科学院力学研究所的有关科研报告。工艺部份概括了有关工厂的科技报告。

本书在有关工艺方法的章节中,还对一些产品的工艺参数列表作了介绍,这对一些工厂在加工时有较大的参考价值。

参加本书编写的有中国科学院力学研究所郑哲敏、杨振声、赵士达、邵丙璜、陈维波、赵双禄、李国豪以及有关工厂的陈火金、梅知贤、姚坎元、张振逵、李振华、李有泉等。

对本书不足之处,请读者批评指正。

目 录

绪论	1
第一章 爆炸成形的原理	9
§ 1 波的基本概念	9
§ 2 炸药的爆震	13
§ 3 水下爆炸的若干特点	14
§ 4 爆炸成形机理概述	19
§ 5 爆炸成形能量的转换和分配	27
第二章 爆炸成形模型律	31
§ 1 爆炸成形的相似参数	31
§ 2 几何相似律	36
§ 3 能量准则	37
§ 4 模型律的实验验证	38
第三章 爆炸拉深	54
§ 1 爆炸拉深的特点	54
§ 2 爆炸拉深工艺参数的选择	60
§ 3 爆炸拉深件的质量	70
§ 4 封头类零件的爆炸拉深	81
§ 5 深拉深件的爆炸拉深	102
§ 6 环形冷气瓶的爆炸成形	114
§ 7 406超高强度大型椭球封头爆炸成形	125
§ 8 大型复杂薄板零件的爆炸拉深	140
§ 9 无凸缘薄板零件的爆炸反拉深工艺	150
§ 10 部分爆炸拉深件的工艺参数——附录	161
第四章 爆炸胀形	188
§ 1 爆炸胀形的特点	189

§ 2 爆炸胀形的几种工艺方法	192
§ 3 工艺参数	205
§ 4 零件质量	214
§ 5 举例	222
§ 6 部分爆炸胀形零件之工艺参数	239
第五章 爆炸成形的模具结构与工艺	247
§ 1 爆炸成形的贴模机理	247
§ 2 爆炸拉深模的结构设计	250
§ 3 爆炸胀形模的结构设计	264
§ 4 板状零件的爆炸成形模	268
§ 5 非金属材料在爆炸成形模中的应用	270
第六章 爆炸成形与材料性能	289
§ 1 爆炸成形的金属变形条件	289
§ 2 爆炸成形件的材料种类及其成形性能	290
§ 3 爆炸成形后材料性能的变化	293
§ 4 爆炸成形后材料的金相组织及其与材料性能的关系	315
§ 5 结束语	322
第七章 爆炸焊接机理	324
§ 1 概述	324
§ 2 爆炸载荷下, 金属复板的运动规律	332
§ 3 高速飞行下复板碰撞和射流形成的机理	354
§ 4 波的形成机理	366
第八章 爆炸焊接工艺	383
§ 1 爆炸焊接参数选择	383
§ 2 爆炸焊接工艺方法	412
§ 3 爆炸复合材料的性能及试验方法	464
第九章 其他类型的爆炸工艺	497
§ 1 爆炸校形	497
§ 2 爆炸装配——爆炸缩口	504
§ 3 爆炸平板压印	512
§ 4 板状零件爆炸成形	515
§ 5 爆炸强化	530

§ 6 爆炸硬化	532
§ 7 爆炸冲孔	536
§ 8 锥形件爆炸成形	539
§ 9 复合工序的爆炸成形	540
§ 10 成组爆炸成形工艺	546
§ 11 真空模腔爆炸成形	555
§ 12 无模爆炸成形	565
第十章 爆炸机床	576
§ 1 封闭爆炸机床	577
§ 2 四十吨米模锻火药锤	588
第十一章 炸药概论	613
§ 1 炸药的基本知识	613
§ 2 炸药爆轰	625
§ 3 火炸药的一般特性	637
§ 4 起爆用品及引爆技术	655
§ 5 药包制作工艺	661
§ 6 爆炸加工安全常识	666
第十二章 爆炸加工中的测试技术	671
§ 1 小时间间隔及速度的测量	671
§ 2 超动态应变的测量	681
§ 3 高速摄影及脉冲 X 射线摄影	685
第十三章 爆炸成形场地	697
§ 1 设计爆炸场地时应考虑的主要问题	697
§ 2 爆炸场地面积的确定及内部的布置	699
§ 3 爆炸场地内部设施	702
编后记	721

绪 论

一、我国爆炸加工的情况

爆炸加工是以炸药为能源的一种高速高压的加工方法。在我国开展这项工作，已有 20 年的历史。经过广大科技人员和工人的努力，目前对于爆炸成形，创造了不少的新工艺方法，在成形拉深件、胀形件和其他板金零件方面，取得了比较成熟的经验。就封头而言，我国已经加工出符合公差要求，并用于生产的最大直径为 3 米左右，最大厚度为 40~50 毫米的；对半球或超半球的深拉深零件，做到了变薄量不超过 9%；对直径为 600~700 毫米的胀形零件，尺寸公差可控制在 0.3 毫米以下；制成的最薄零件厚度只有 0.08 毫米，最小零件直径只有十几个毫米，最大平板件达 5×1.6 米²，金属材料的品种也有很大的增加。另外在模具制作方面，包括铸钢模、铸铁模、球墨铸铁模、环氧树脂模、玻璃丝加强树脂模、混凝土模、焊接结构模，以及惯性模等取得了许多经验。同时还研制了爆炸压床、封闭爆炸压床、火药锻床等爆炸机床，提高了生产效率。在爆炸焊接方面，已焊 $1000 \times 2000 \sim 1000 \times 3000$ 毫米² 面积的板。另外对于低碳钢板，中碳钢板和有色金属，以及稀有金属之间进行了多种相互焊接。除了板焊外，还可以进行管焊，封头类型件的焊接。另外，对爆炸硬化、爆炸强化、爆炸冲孔等作了大量工作，取得了不少成绩。我们相信，在党的领导下，有社会主义制度的保证，我国的爆炸加工会取得更大的成就。

二、爆炸加工是高能率加工

加工任何金属毛料使之成形为人们所需要的零件，或者将两

种不同金属毛料焊接在一起，都必需对毛料施加足够大的力和供给足够的机械能。而且从毛料开始变形到成形，或者对毛料焊接，都需要一定的时间。与常规加工方法相比，爆炸加工最根本的特点是压力大，变形速度大，加工时间短，因而功率就大。所以说爆炸加工是高能率的加工。

可以举毛料直径为一米的封头成形为例说明以上的特点。用水压机生产时，作用于毛料的平均压力为几十个大气压，成形时间为十几秒。采用爆炸成形时，压力为数千个大气压，成形时间约为百分之一秒。在这两种情况下，由于用于使毛料变形的有效能量基本相等，所以爆炸成形的平均有效功率就比常规方法大一千倍。

三、爆炸加工的能源

实现爆炸加工，首先需要提供一个能提供足够的压力，有足够能量的大功率能源。爆炸加工的能源一般是化学能，这种能源有炸药（又称为高级炸药）、火药（又称为低级炸药）、爆炸气体或可燃气体。

常用的炸药有黄色炸药（梯恩梯）、硝酸炸药、导爆索（内含黑索今）和爆胶。炸药在雷管的激发下，以所谓爆震的形式，转化为高温，高压气体。每公斤炸药所释放的能量约为 420 吨米，这能量相当于将 420 吨的重量提升一米。生成气体的压力在十万大气压以上。在炸药包的内部，已被引爆的炸药强烈地压缩和冲击相邻的炸药，于是后者也被迅速引爆。按照这种方式，爆炸就从一部分炸药以很高的速度传播到另一部份炸药。这个速度称为爆震波速或爆速，每秒几千米。如果在一公斤球形药包的中心点起爆，全部炸药转化为高温高压气体所需的时间只有十万分之一秒。对于一定品种和一定物理状态（颗粒度，密度等）的炸药，只要药包尺寸不是过于小，爆速和气体的最大压力都是一定的，和药量及药包的包装条件没有关系。

火药在点火后也是成高温高压的气体，每公斤火药所释放的能量不亚于，甚至超过炸药，然而气体的压力只有几百个大气压，比炸药小得多。火药转化为高温高压气体是一种快速燃烧过程，燃烧从一部分火药蔓延到另一部份的速度约为每秒 0.3 到 30 厘米，这也比炸药的爆速小得多。火药燃烧的速度以及生成气体的压力都和药包的外部约束条件有关。

炸药或火药所生成的高压气体，通过适当的方式，直接或者间接地作用到金属毛料上，就能达到成形或焊接的目的。

四、爆炸加工的应用

目前爆炸加工的应用主要有以下几个方面：

1. 板金零件的成形和校形

这是当前爆炸加工应用最成熟的工艺。常规工艺中的拉深、胀形、卷边、翻口、冲孔、压梗、弯曲和校形等，都可以用爆炸加工来完成。图 0-1~图 0-3 所示是用爆炸成形方法制造的拉深件（例如封头），胀形件（例如喷气发动机的喷管）和平板件（例如波纹板）的示意图。

现在结合图 0-1 介绍拉深零件的爆炸成形，其他板金零件的成形都是类似的。毛料 *A* 放在凹模 *B* 上，然后用压边圈 *C* 压紧。*D* 是装水的水圈。在水圈中注水至一定高度，然后将炸药包 *E* 放在距毛料适当距离的位置上。在多数情况下，应当将凹模里的空气通过抽气孔 *F* 抽走，以避免在毛料向凹模高速运动时，模腔里的空气迅速升压，使毛料不能满意地贴模，甚至引起破损。如果模具和压边圈的设计合理，成形参数也选择得当，只要引爆炸药，就能在很短的时间里成形出一个与凹模内壁贴合得很好的零件。

在板金零件的爆炸成形里，通常不使炸药和毛料直接接触，因为炸药的壓力过大，容易损坏零件和模具。为了将炸药的壓力传递到毛料上去，必须在两者之间有一个传递壓力的介质。最常用的传压介质是水，这不仅是因为水的供应问题容易解决，更主要

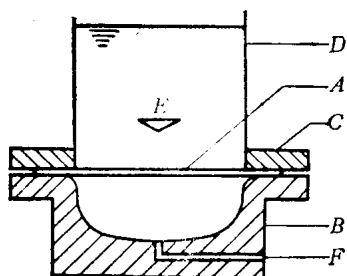


图0-1 爆炸拉深

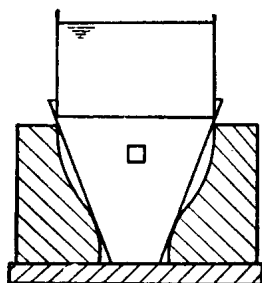


图0-2 爆炸胀形

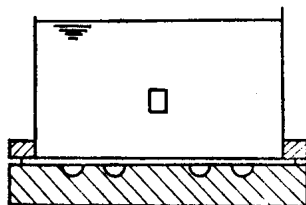


图0-3 平板件爆炸成形

的是因为水传递压力的效率较高。在一些特殊情况下，也可以采用砂，然而这时所需用的炸药量要比用水时大好几倍。一般不用空气做传压介质，因为它传压的能力太小，以球形黄色炸药为例，如果在水中爆炸，紧邻药包的水里，压力可达十万大气压，在距离药包中心十倍药包半径的地方，压力约有一千个大气压。在空气中爆炸时，在相应的位置上压力分别只有五百和二十个大气压。

如果零件比较薄，成形所需的压力比较小，可以用火药代替炸药。采用火药时，为了获得较大的压力，可以采用密封式的成形方案如图 0-4 所示。如果成形所需的压力和能量更小，也可以

考虑在密封室里使用爆炸气体或可燃气。应该指出，密封室方案只适用于中小型零件，因为大型零件，密封室强度问题难以解决。

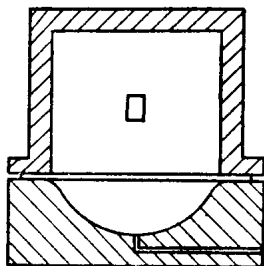


图0-4 密封式爆炸成形

2. 爆炸焊接

利用炸药爆炸的巨大压力可以使两种金属间形成牢固的联结。这方面主要的应用是双层金属板和多层金属板和管的制造，突出的例子是，在碳素钢上蒙以不锈钢和铝、钛、锆、铜及其合金的表层。这种工艺可以节约贵重金属，提高焊接质量，或制作不同金属焊接的过渡接头。

现在结合图 0-5 板焊来介绍爆炸焊接。甲金属称为复板，乙金属称为基板，一般复板厚度较薄。爆炸焊接一般是采用接触爆炸，即将炸药直接敷在复板金属表面上进行爆炸。有时为了保护金属表面，改进接触面质量，避免金属表面出现起伏不平的波浪形的印痕，烧伤或细裂纹的出现，一般在金属表面放一缓冲层，如软橡皮等。在基、复板之间，置以一定的间隙，两板之间可以是平行的，也可以有一定的角度。炸药爆震后，一方面使复板金属往下送落，另一方面使复板弯曲变形，复板向下运动的速度约为 1000 米/秒，因而在几个微秒内，复板与基板进行撞击，撞击时产生很大的压力，一般能使两板内金属表面产生射流，形成冶金性的粘结。为了提高焊接的质量，一般采用线起爆装置。

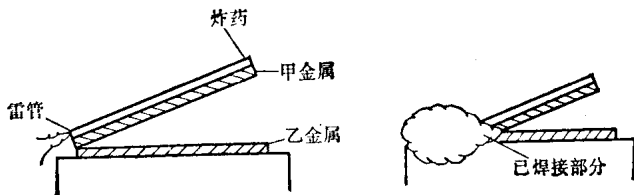


图0-5 板爆炸焊接

3. 爆炸硬化

有些金属，例如高锰钢，在炸药爆炸的高压作用下，能够显著地提高表层硬度。这一现象已经用来提高一些金属部件的使用寿命。用这个方法硬化高锰钢铁路辙叉、推土机、拖拉机或坦克的履带，铲斗的刃口等是突出的一些应用。

爆炸硬化的方法是把一层炸药敷在需要硬化的部位，炸药与金属之间有时放一层薄的硬橡皮或其他物质的缓冲层。

4. 高速模锻

根据和火炮的原理，可以用火药或高压空气推动锻锤，它的速度远大于一般落锤，可达到每秒几十米到一、二百米。高速模锻具有动量大，设备小等优点。

5. 其他

其他的应用有爆炸切割——用炸药切断工字钢或钢轨；爆炸压实——用炸药压实粉末等。

爆炸加工是一个正在发展中的工艺，随着生产和科研的发展，一定还会出现新的应用。

本书主要介绍爆炸成形，爆炸焊接方面的应用。

五、爆炸加工的特点

爆炸成形，爆炸焊接有很大的优点，可归纳为以下几点：

1. 简化了设备

爆炸加工可以在机床上进行，如果单件，小批，大型零件也

可以不用机床。即使使用机床，机床也比一般机床简单很多。爆炸成形在不用机床时，辅助设备一般只有起重和搬运装置、水泵、真空泵。爆炸焊接比起常规加工更简单得多，无需轧机、加热炉等，因此不仅条件好的工厂能搞，条件差的也能搞，工厂里能搞，施工现场也能搞。

爆炸焊接无需什么模具，爆炸成形也只需要一个模具，通常只有凹模，因此模具的制作周期可以缩短，材料可以节约。

2. 能加工一些用常规方法不易加工的材料

有些材料在常规成形加工时容易破裂，而改用爆炸成形后往往能够避免，可以从两方面解释这个现象：有些材料在高速变形条件下，塑性变形的能力，即加工性能，有所提高；爆炸成形不使用金属冲头，因而毛料受力比较均匀。

对熔点相差悬殊，或热膨胀系数相差很大或硬度相差很大的两种金属，用常规焊接法很困难，而用爆炸焊接则无需用什么特殊措施，就可得到较好质量的产品。

3. 产品质量高

用爆炸成形加工时，零件以很高的速度贴模，在零件和模具之间产生很大的碰撞压力。一般说来，如果模具内表面的光洁度较高，零件贴模面的光洁度也较高。相反，如果模具的内壁上有加工刀痕或者有水珠、砂粒，成形后的零件上就有相应的痕迹，因此对模具质量要求较高。同时，大的碰撞力还有另外两种效果，首先模具的变形有所增加，其次和钢板在通过轧辊时所受到的辗压一样，大的碰撞压力辗压毛料，使毛料的展开面积有所增加。第一种效果显然有利于减少成形后零件的回弹。在采用凹模的情况下，第二种效果一般也有利于减少回弹。经验告诉我们，爆炸成形的零件有较高的尺寸精度，其原因就在这里。

爆炸焊接的金属板一般联结强度要大大超过热轧板。一般说来，爆炸焊接板的联结强度高于复合板材中强度较低的那种金属的抗张强度。同时爆炸焊接后，一般不影响原金属的化学性能。

4. 有利于采用综合工艺

用常规方法成形一个复杂零件，往往需要多道工序，每一道工序又需要专用的模具。采用爆炸成形时，诸如成形、压梗、冲孔、翻边、校形等工序往往可以在一个模具上同时完成。

当前爆炸加工的工艺经验和理论都不如常规工艺那样成熟，因此往往需要经过一段试验才能制出合格产品。但是，爆炸加工有很多突出的优点，经过一段总结提高，可以肯定，它将作为一个独立的工艺存在和发展下去。

第一章 爆炸成形的原理

爆炸成形是复杂的高速变形运动过程，包含着炸药、传压介质和其容器（如水池）、毛料、模具之间的相互牵连运动，这就要考虑惯性力和波动等动力学的因素。因此，必须透过复杂的表面现象，用典型分析的方法来抓住事物的实质。现对最简单的球形或圆柱形的零件进行较系统的爆炸成形过程分析。通过分析说明爆炸成形的基本原理，提供处理复杂零件的基本原则。用这些原理，就能解释爆炸成形的现象，进一步地利用和发挥其特点。对复杂零件，目前还不能通过计算来确定工艺参数，只能通过具体实验解决。

本章讨论以下问题：波，特别是冲击波的概念；炸药的爆震；水中冲击波和波后的水流运动，最后用实例讨论圆球零件的胀形过程。

§1 波的基本概念

在日常生活中，经常碰到波的问题。譬如向水面抛一石块，石块直接扰动的那一部分水面就开始运动，运动由这一部分水面向其余部分传播，在水面上就得到了水波。再譬如取一条绳子，用手抖动绳的一端，这时就看到变形沿着绳子传播。

从以上现象归纳起来，如果某一质点在一介质内引起扰动，这种扰动可以是力，也可以是变形，也可以是能量。在一定时间以后，可以传播给周围介质，而引起周围质点产生扰动，这样的传播过程叫做波。

一般力学上的波可以分为两种，一种是波达到以后，压力是递增的，这就是压缩波。另一种是当波达到以后，压力有所下降，

这就是膨胀波或称之为稀疏波。

当我们听到炸药的爆炸声时，假如空气（如果在水下爆炸时，则为水）的密度是眼睛看得见的话，我们就可以看到一个密度很大的空气层在运动。这时如果把空气里的压力分布，用曲面表示出来，这个密度大的气层就像个前沿是陡壁、后沿是缓坡的山峰一样。要是用照相的方法把它照下来，相片上就呈现为一条黑线，这就是冲击波。

在某一相同时刻下，冲击波波头达到空间所组成的曲面，谓之波阵面。波阵面是球面的情况，谓之球面波；柱面的话，则为柱面波；平面的话，则为平面波。它们的共同之点是：在和波面垂直的方向，压力、温度、密度的变化是突跃的。在普遍情况下，这种变化可以利用跃变来表示（见图

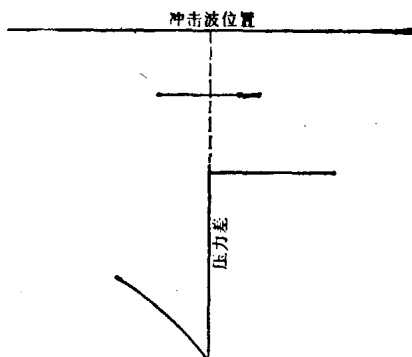


图1-1 球面波径向压力分布

1-1)。这个不连续的跃变差（通常用超压 Δp 来表示）便叫做冲击波的强度。冲击波愈强，跃变差就愈大。

如果介质里（空气或水）忽然发生压力变化，这种变化便向各方传播。如果波动区域里压力的起伏小，便叫做小振幅波，声波就属于此类。波动区域里压力起伏很大的，叫做大振幅波。

由于振幅小的关系，声波的传播对于介质的密度影响非常小。如果介质是均匀的，声波对于介质的传播速度便是个与波幅无关的恒量。在一般情况下，水中声波传播速度约为 1500 米/秒。

冲击波是一种大振幅的压缩波，它的传播速度大于小振幅波的速度，其数值取决于压缩波的强度。我们用一简单的实例来介绍冲击波的形成和传播。在一个很长的直管里，装置一个活塞，如果使管内的活塞前后运动，那么在管内静止的气体（或水）里就