

爆炸  
焊接  
原理  
及其  
工程  
应用

薛 勇 著  
内 容 简 介



大连理工大学出版社

## 内 容 简 介

作者在总结自己多年研究成果的基础上,搜集了大量国内外的文献资料,系统地论述了爆炸焊接的理论,详细地介绍了其工程应用,并附有大量图表。内容翔实、新颖,不论对科研人员还是对工程技术人员都有很大的参考价值。全书共分七章:爆炸载荷作用下的飞板运动,金属圆管的爆炸复合理论,射流形成理论,碰撞点近区速度场、压力场和应变率场的计算方法,爆炸焊接可焊参数的确定,高应变率、高温和高压下的材料性质,爆炸焊接界面的失稳机理。

本书可供在机械、力学领域内从事爆炸加工的科研人员和工程技术人员参考,也可作为大学有关专业高年级学生及研究生的教学参考书。

## 爆 炸 焊 接 原 理 及 其 工 程 应 用

BAOZHA HANJIE YUANLI JIQI GONGCHENG YINGYONG

邵丙璜 张凯 著

---

大连工学院出版社出版发行

辽宁省新华书店经销

(大连市甘井子区凌水河)

大连船舶生产服务公司印刷公司印刷

---

开本: 787×1092 1/16

印张: 24 5/8

字数: 583 千字

1987年 10 月第一版

1987年 10 月第一次印刷

印数: 2500 册

---

责任编辑: 罗 鸿

封面设计: 谢心阳

责任校对: 王佳玉

---

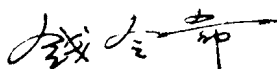
统一书号: 15400·12

ISBN 7-5611-0006-X/TH·1

定价: 4.44 元

## 序

爆炸这门技术在机械加工和土建施工中显示了独特的效益，被工程界日益重视。正因为它在工业应用中的发展，促使爆炸理论的研究显得更加重要。在我国1979年制定的力学学科发展规划中，爆炸力学被列为十四个力学重点分支之一。中国科学院力学研究所有一支很强的理论与实验队伍。各地也有不少的研究和生产单位在从事爆炸力学的研究和实践。大连工学院工程力学研究所在1980年也成立了爆炸力学研究室。这些年来，得到大连造船厂陈火金高级工程师和中国科学院力学研究所邵丙璜研究员的很多帮助，这个研究室在研究工作、队伍培养和工业实践方面都做了不少工作。为了服务于工程和培养研究生的需要，该室主任张凯同志和邵丙璜同志合作写这本书，历时三年，终于脱稿了。邵、张二位在各自的工作单位中都有繁重的工作，并分处北京和大连两地，却并不妨碍他们通力合作，共同切磋。为写好这本书他们付出了很大的毅力和辛勤的劳动。他们写书的指导思想是面向工程实际，把理论与实际密切结合起来，重视爆炸技术的工业应用，也为了爆炸力学的学科发展。写得如何，当然有待读者评议。但是科学院与高等学校两位作者这样的合作，把各自的长处和研究成果融合在一起，为读者服务，是很值得提倡的。



1986.2.24

于大连工学院

## 前 言

爆炸焊接是一门新兴的边缘性学科，截至目前，国内外的主要资料都是以论文形式发表的。国外涉及爆炸焊接的书有四本。一本是“*Principle and Practice of Explosive Metalworking*”，作者是美国的依什拉(A. A. Ezra)，1973年出版，国内已有译本。此书侧重于介绍爆炸成形，对近年来迅速发展的爆炸焊接的研究成果反映很少。另一本是苏联特里伯斯(A. A. Дерцбас)著的“*Физика Управления и Сварки Взрывом*”，1972年出版，1980年又出新版，该书介绍了爆炸焊接和爆炸强化两个方面的内容，是一本取材较好的著作，但是读者要看懂这本书需要阅读很多文献资料，这就给读者造成了一定困难。还有英国克劳斯拉特(B. Crossland)著的“*Explosive Welding of Metals and Application*”和勃兰宗斯基(T. Z. Blazynski)的“*Explosive Welding, Forming, Compaction*”，分别在1982年，1983年出版，这两本书的内容也多偏重于工艺。国内方面，1980年出版了郑哲敏、杨振声主编的《爆炸加工》，此书相当全面地介绍了80年以前国内有关爆炸加工方面的理论和实践，有我国自己的特色，但书的重点仍是爆炸成形。因此迄今在国内外还没有一本系统介绍关于爆炸焊接力学原理及工程应用的书。由于教学工作需要和上述原因，促使本书作者抱着一个愿望，想对六十年代以来国内外爆炸焊接理论领域中的发展，进行比较系统和完整的介绍，不仅对每一个理论的细节尽可能给出严格的数学推导，而且对工程应用给以相当重视。每章每节都提供给读者以循序渐进的知识，必要的数学准备知识，或冠在前导，或束诸附录中。在几个重要章节中，我们尽量由浅入深，依次介绍工程近似公式，近似的解析解和数值计算结果，把近二十年来迅速发展起来的计算力学和爆炸加工结合起来，即在计算中尽量采用微型计算机编制程序进行数值计算，并运用计算机绘图，使得读者对有关理论的相互比较方面有一个完整和清晰的概念。为了使读者在理论与实践方面有一统一认识，在许多理论结果后面，都有相应的实验结果，并提供了某些实验方法，列举了许多工程应用实例。因此，我们希望本书无论对从事理论性研究的科研人员，还是对从事工程实际应用的工程师们都将有所裨益。能做到“雅俗共赏”这也是我们写作此书的最大愿望。

作者努力收集了六十年代以来国外在这个学科方面所发表的主要文献，同时也吸收了1981年以来国内从事这个学科研究的学者们所公开发表的有关论文，其中也包括作者自己的工作。

本书有关内容在1983年由邵丙璜在大连工学院工程力学研究所为研究生开设的专业课中讲授了80学时，课后，作者们又经过详细讨论，作了大量增改与补充，形成了本书目前的内容。其中绪论，第一章的§1—5，§1—6，§1—7，§1—8，第二章，以及第四章的§4—4，§4—5，§4—7为张凯所写，其余为邵丙璜所写。由于爆炸焊接是一门边缘学科，涉及到多方面的理论和知识，而作者学识浅薄，从事爆炸焊接研究的时间不长，遗漏甚至错误之处在所难免，恳切希望从事本学科的专家、同行们批评指正。

在本书的编写过程中，自始至终得到了大连工学院钱令希教授和中国科学院力学所郑哲敏教授的关心与支持，使作者们合写此书得以实现，在此谨表示深深的谢意。

作者 1986.2

# 目 录

绪 论 .....	( 1 )
第一章 爆炸载荷作用下的飞板运动 .....	( 6 )
§ 1—1 一维简化模型 .....	( 6 )
一、概 述 .....	( 6 )
二、复板运动过程中各参数关系 .....	( 7 )
三、一维格尼飞板运动公式 .....	( 8 )
四、阿述兹一维飞板公式 .....	( 11 )
五、小参数摄动法的解析式 .....	( 16 )
§ 1—2 列契脱简化模型下的二维计算公式 .....	( 22 )
§ 1—3 滑移爆轰作用下飞板运动的二维近似解析解 .....	( 33 )
§ 1—4 爆轰产物多方指数 $\gamma$ 的确定 .....	( 55 )
§ 1—5 滑移爆轰作用下飞板运动的二维数值计算 .....	( 71 )
§ 1—6 滑移爆轰作用下飞板运动理论综述 .....	( 84 )
§ 1—7 材料强度对飞板运动的影响及其计算方法 .....	( 89 )
§ 1—8 飞板运动的测试方法 .....	( 97 )
一、一般探针法 .....	( 97 )
二、高压脉冲X光照相方法 .....	( 97 )
三、电阻丝测试的原理和方法 .....	( 98 )
四、电阻—探针测试法 .....	( 113 )
§ 1—9 多层金属平板爆炸焊接参数的工程计算方法 .....	( 120 )
附录一 .....	( 129 )
一、用特征线法求解 P—M 绕流问题 .....	( 129 )
二、利用 P—M 绕流理论求解 $\phi_0$ 和 $\gamma_0$ 的关系 .....	( 133 )
附录二 维尔斯特拉斯椭圆函数 .....	( 135 )
附录三 $\delta$ 函数的性质 .....	( 141 )
第二章 金属圆管爆炸复合理论 .....	( 143 )
§ 2—1 金属圆管爆炸焊接的基本形式与装置 .....	( 143 )
§ 2—2 考虑圆管强度时的格尼—维修正公式 .....	( 149 )
一、内爆时圆管膨胀的格尼—维修正公式 .....	( 149 )
二、外爆时圆管收缩的格尼—维修正公式 .....	( 151 )
§ 2—3 滑移爆轰作用下的圆管二维工程近似计算公式 .....	( 153 )
一、圆管膨胀的二维工程近似计算公式 .....	( 153 )
二、圆管收缩的二维工程近似计算公式 .....	( 157 )
§ 2—4 金属圆管在爆炸载荷作用下的一维轴对称流体模型的解析解 .....	( 160 )

§ 2—5 金属圆管的一维轴对称流体弹塑性的数值解 .....	( 169 )
<b>第三章 射流形成理论</b> .....	( 188 )
§ 3—1 不可压缩流体模型 .....	( 189 )
§ 3—2 形成再入射流的下限条件 .....	( 190 )
§ 3—3 可压缩流体模型的射流形成机理 .....	( 197 )
§ 3—4 再入射流厚度、分散角的实验测定 .....	( 202 )
<b>第四章 碰撞点近区速度场、压力场和应变率场的计算方法</b> .....	( 205 )
§ 4—1 理想流体运动的基本概念 .....	( 205 )
§ 4—2 对称碰撞条件下, 碰撞点附近速度场、 压力场的经典复变函数计算方法 .....	( 212 )
§ 4—3 理想不可压缩流体模型的平面速度法 .....	( 223 )
§ 4—4 理想不可压缩流体模型的应变率场 .....	( 233 )
§ 4—5 温度场计算的简化模型 .....	( 247 )
一、影响温度场的因素 .....	( 247 )
二、温度场简化模型的计算结果 .....	( 249 )
三、界面温度的实验测试方法 .....	( 263 )
四、爆炸焊接参数窗口上限的确定 .....	( 264 )
§ 4—6 非对称碰撞条件下理想不可压缩流体模型的 碰撞点近区的速度场、压力场的计算 .....	( 266 )
§ 4—7 真实材料驻点压力的计算 .....	( 277 )
<b>第五章 爆炸焊接可焊参数的确定</b> .....	( 286 )
§ 5—1 焊接参数变化范围的理论计算 .....	( 286 )
§ 5—2 确定可焊参数的实验方法 .....	( 296 )
<b>第六章 高应变率、高温和高压下的材料性质</b> .....	( 306 )
§ 6—1 高应变率下的材料性质 .....	( 306 )
§ 6—2 高温对材料性质的影响 .....	( 329 )
§ 6—3 高压对材料性质的影响 .....	( 341 )
<b>第七章 爆炸焊接界面的失稳机理</b> .....	( 346 )
§ 7—1 成波机理研究的历史回顾 .....	( 346 )
§ 7—2 伯赫拉尼的刻入机理 .....	( 347 )
§ 7—3 平行流的失稳模型(亥尔姆霍尔兹失稳) .....	( 349 )
§ 7—4 流体弹塑性失稳模型中的若干问题 .....	( 367 )
一、粘性流体模型和流体弹塑模型的鉴别 .....	( 367 )
二、关于碰撞点浮动、碰撞角周期变化的实验研究 .....	( 369 )
三、碰撞点附近瞬态界面波形的“冻结”试验 .....	( 372 )
§ 7—5 高压下热塑失稳和旋涡中铸态组织的关系 .....	( 375 )
<b>参考文献</b> .....	( 383 )

# 绪 论

## 一、发展概况

爆炸焊接的方法是美国的卡尔 (L.R. Carl)<sup>(1)</sup>在1944年首先提出来的。他在一次炸药爆炸试验中偶然发现两片直径约1英寸,厚度为0.035英寸的黄铜圆薄片,由于受到爆炸的突然冲击而被焊接在一起。于是他便提出了利用炸药和超声波技术把各种不同的金属焊接起来的研究课题。十几年以后,美国的费列普捷克 (V. Philipchuk)<sup>(2)</sup>第一次把爆炸焊接技术引入到工业工程上。以后,英国、苏联、联邦德国、捷克、日本等国也相继展开了对这门新工艺的研究工作。我国对爆炸焊接的研究始于六十年代,1868年大连造船厂陈火金等同志试制成功了国内第一块爆炸复合板。

## 二、爆炸焊接的优点及其应用

爆炸焊接的最大优点是能把不同的金属焊接在一起。大家都知道,铝与钢,铜与钢等一些金属是不易用常规方法来焊接的,即使采取一些特殊方法把它们焊接在一起,其焊接质量也是难以保证的。而爆炸焊接却能做到这一点,且焊接界面处的强度往往大于母体金属的强度,这是其它焊接方法所无法比拟的。目前在工程上常用的焊接组合有:铜—钢,铝—钢,铜—铝,钛—钢,不锈钢—钢,镍—钢,银—铜,铅—钢等。爆炸焊接的另一个优点是可以进行大面积焊接,例如可以把一块长宽为2×1.2米,厚度在1~10毫米之间的复板焊到母板(基板)上,其焊接完好面积达到98%以上。爆炸焊接不仅可焊接平板,还可以对金属管进行外包与内包焊接,即在某种材料母管的内壁或外表面上,焊上另一种材料的薄金属管。如钢管与钛管、钛管与紫铜管、硬铝管与软铝管、铜管与钢管的焊接等,这是别的焊接方法所无法代替的。

爆炸焊接目前已经成为一种崭新的工艺技术,在工程领域中得到了广泛的应用。在电解槽中采用铝—钢或铜—钢制成的爆炸焊接接头是节能的好措施,因为爆炸复合钢结合面上的电阻几乎等于零。较先进的铝厂的电解槽接头多采用爆炸焊接,但现在尚有一些铝厂仍采用旧式工艺,即用螺钉压接,耗能巨大。据统计,一个年产10万吨的炼铝厂过去在这种接头上所损耗的电流达8亿度(每吨铝耗电8000度)。在化工设备方面,如各种反应器、反应釜、交换器、冷却器等都是接触腐蚀性的液体与气体,一台设备有时不到半年,甚至半个月就被腐蚀导致报废。如果采用爆炸焊接,寿命可几倍延长。1981年国内某化工厂造了两台纯钛管的尾气收集器,每台价值25万元,不到半个月两台全部报废,主要原因就是管与管板采用常规氩弧焊,焊接处经受不住应力腐蚀而渗漏报废。后来,采用爆炸焊接又制造了一台,运行两年多仍完好无损。当时,修复这台设备只用了三万五千元,足以见其经济价值如何。许多容器多用有色金属制造(如铜、钛、不锈钢),成本很高,但如用复合板、复合管就可大量节省有色金属。特别是,通过爆炸复合与轧制相联合的工艺制作的复合板,爆炸复合与冷拔轧制相联合的工艺制作的复合管,例如采用铜—钢复合的复合管,冷拔后,可使铜层达



0.15mm厚，不仅大量节省了铜，且其质量也是一般轧制复合管所无法比的。由于复层厚度向薄型发展，复合板成本大大降低，这就有可能使爆炸复合材料进入建材工业与家具制作领域。一种银与磷青铜双金属电触头，如采用爆炸焊接，经过轧制银层厚度可达0.1毫米，这比纯银触头节银达95%以上。据在电视高频头中的初步试验，这种触头寿命达五万次以上。大管径石油管线接头也可以采用爆炸焊接，石油管线长达数千公里，接头多至数十万个，采用这种焊接工艺可使工程进度加快，经济价值也是很高的。据讯加拿大已使用了这种技术，每天铺设管线5000英尺，可比常规焊接节省二万伍千元加币（一加币约折合两元人民币）。现在国内正在研究这项技术，很多电力线路上已广泛采用高压电缆的爆炸压实技术。

无论是国内还是国外，复合板用量最大的部门就是化学和石油化学工业。其中如石油精炼工厂中的真空塔、蒸馏塔及各种热交换器；化工厂里的各种反映塔、沉析槽、搅拌器；海水淡化厂的海水淡化装置；纸浆造纸工业中的染色缸、洗涤塔、高压釜；制盐工业中的蒸发器；核能工业中的加压器、脱盐装置、纯水装置、反应堆热交换器的管板以及各种金属管接头都要用到复合板。造船工业中甚至利用复合板建造小型舰艇、巡逻艇及化学品运输船。美国铜开发协会（CDA）等单位发起建造的“铜海员Ⅱ号”捕虾船已于1976年下水，船长23米，宽6米，航速10节，船壳材料为CA-706铜镍合金复合钢板。由于铜镍合金表面具有优良的抗海水腐蚀性能，因而不需要涂刷油漆，且此种船壳材料具有良好抗海生物附着及生长能力，从而提高了航速增加了海洋作业时间，大大减少了维修时间和费用。在食品工业的食品贮藏中冷冻机的各种管接头的应用也是很有前途的。日用炊具如果采用多层复合材料不仅可以达到高的导热率，而且可以加强食品卫生，消除金属氧化物的污染，这或许会使炊事用品进入高档化。由普钢与有色金属组合的爆炸复合材料由于它的防腐性能已广泛地用于石油、化工、食品、制药等工业。爆炸复合的另一领域是普钢和高级合金钢的爆炸复合，用这种复合材料所制成的各类刀具其刀刃既坚硬、锋利，又具有较高的韧性。普钢与65Cr<sub>4</sub>-W<sub>3</sub>Mo<sub>2</sub>VNb高强度合金钢复合的刀具，其刃口强度可达到24000巴。不锈钢—65Mn弹簧钢—不锈钢三层一次爆炸复合的刀具用钢，兼有锋利和耐腐蚀的优点……。因此爆炸复合材料在机械、轻工部门有着广泛应用的前景；在某些电子工业部门中要求材料兼有多种合金性能，因此近年来又发展了三层、四层、五层甚至十层金属或合金的一次爆炸复合的技术；在宇航工业中为了增强铝合金蒙皮的强度，把具有高强度的钼丝复合在两层铝板中间，大大增强了蒙皮的抗拉能力。

不难看出通过爆炸复合技术可以使绝大多数金属材料相互复合在一起形成一种兼有两种或多种金属（合金）性能的复合板材或管材，这就大大地扩展了现有金属（合金）的性能及应用范围。在今后一段时期内作为一种新工艺技术，它应用的广度与深度将不断开拓与加深，其发展势头不会衰竭。爆炸复合材料的研制是属于当今遍及世界的新技术革命中材料科学革命的一个重要组成部份，它的经济效益是十分明显的，它将为我国国民经济的发展作出应有的贡献。

爆炸焊接的机理通过深入的探讨，有些已经作了很好的定论，但尚有一些内容迄今在国际上仍未得到圆满的解释，例如焊接界面处的结构及成波机理仍有待于这个领域的研究工作者去继续探讨。本书将逐章深入地来探讨爆炸焊接的力学模型及物理机制，为了先有一个全



貌认识，对焊接机理先作一形象说明。

### 三、爆炸焊接基本概念简介

图1(a)与1(b)表示炸药引爆前的结构。1(a)是倾斜放置爆炸焊接法，1(b)是平行放置法，1(c)表示平行放置时的焊接过程。炸药经过引爆器（一般是雷管）引爆后，自左向右以爆轰波速度 $V_d$ 传播。如果布药均匀，控制得当，在距离引爆端不远处，爆速 $V_d$ 即可达到稳定。悬置板材（简称飞板或复板）在爆轰产物压力作用下以速度 $V_p$ 向下飞行，通常 $V_p$ 的准确方向预先不易测定，因而必须做一些假定。一般假定它垂直于弯折角 $\theta$ 的平分线，如图2所示。随着爆轰的进行，碰撞点 $c$ 也以速度 $V_c$ 自左向右行进，在飞板平行放置的情况下， $V_c = V_d$ ，如果对基板加一负方向的速度 $-V_c$ ，则碰撞点 $c$ 就静止不动了。换句话说，我们把坐标系取在碰撞点 $c$ 上，让它随同碰撞点 $c$ 一起运动，于是，对这个坐标系来说，复板来流速度

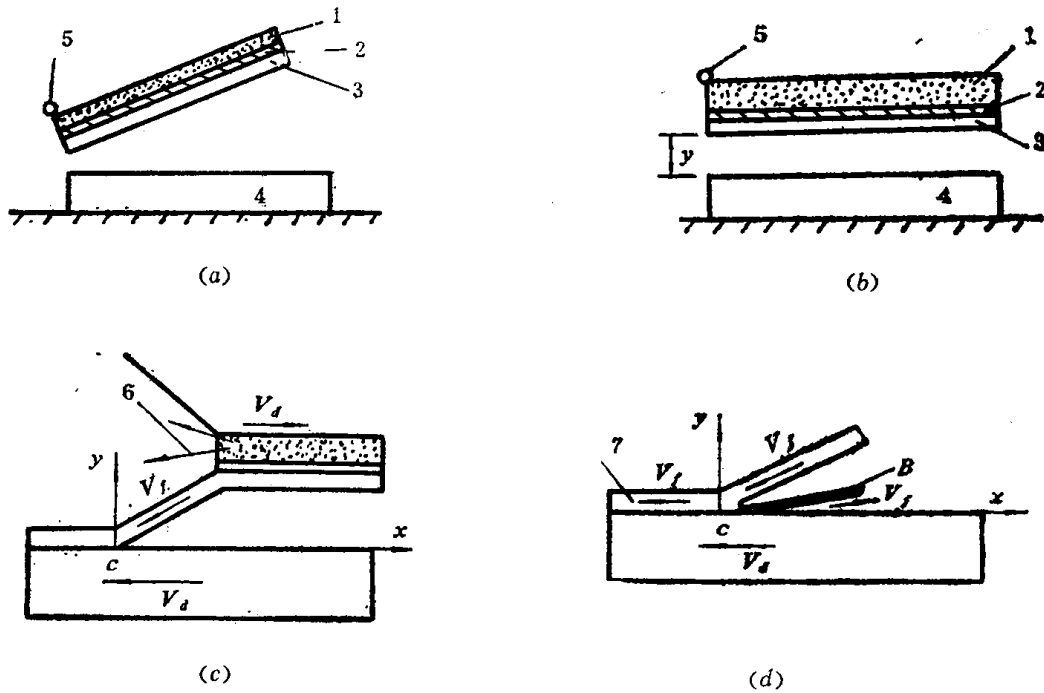


图1 平板爆炸焊接

(a) 倾斜放置爆炸焊接法 (b) 平行放置爆炸焊接法

(c) 爆炸焊接过程 (d) 再入喷射流的形成

1—炸药；2—缓冲层；3—悬置板材；4—基板；

5—引爆器；6—爆轰产物；7—主体射流；8—再入射流

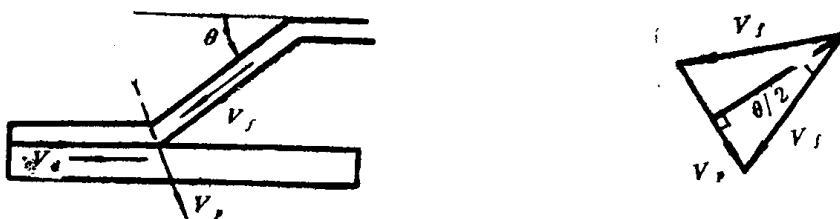


图2 速度关系图

$V_f$ 和碰撞角 $\beta$ ( $\beta = \theta$ ) 向碰撞点流来,  $V_f$ 与 $V_p$ 的关系如图2所示, 满足以下关系式

$$V_p = 2V_f \sin \frac{\beta}{2} \quad (1)$$

在平行放置时有

$$V_p = 2V_d \sin \frac{\beta}{2} \quad (2)$$

在碰撞点 $c$ 处, 由于高速斜撞击产生很大压力, 该处的金属受到很大的剪切作用。塑性剪切功转变成热量, 由热传导所耗散的热量只占很小一部分, 大部分热量促使金属温升。而材料的抗剪强度随温升而降低, 因此在碰撞点 $c$ 附近一个很窄的区域内会有熔化现象产生。这样, 碰撞点附近区域的金属呈现流体性态, 根据流体力学的动量守恒定理, 速度为 $V_f$ 的来流经碰撞点后分成两股, 向左的称为“主体射流”, 向右的称“再入射流”。主体射流在实验室坐标中实际上是被焊接好了的复板层, 而再入射流(以下简称为射流)实际上是从飞板和基板表面上剥离下来的表面层金属。板的表面层是污染面, 产生射流的结果就是把污染面冲刷干净, 使得复板与基板露出了洁净的接触表面。在高压作用下, 两种板材的表面就可牢固地结合在一起了。这里要特别指出一点, 碰撞点速度小于材料声速, 也就是说流动应是亚音速的。如果 $V_f$ 超过基、复板材中各自的体积声速, 射流就会被抑制, 自清理的作用就消失了, 从而也就达不到焊接的要求。另外, 在一般的焊接条件下, 焊接界面会有波纹出现, 成波机理是很多学者的研究课题, 国内外学者都曾提出过许多不同的模型, 其详细内容在第七章中将另行介绍。

为了获得良好的焊接效果, 必须正确选择爆炸焊接参数。十多年来, 国内外很多学者对不同材料作了大量的试验研究, 提出了爆炸焊接参数“窗口”的概念, 也就是可以完成焊接的参数界限。主要的爆炸焊接参数是: 碰撞点速度 $V_c$ , 飞板的动态弯折角 $\beta$ 和飞板的飞行速度 $V_p$ 。而在这三个参数之间有公式(1)或(2)相联系, 因而独立的参数只有两个。在以后的章节中将详尽地论述这三个参数的计算方法, 现在只作一个初步的定性介绍。

(1) 碰撞点速度必须保持在亚音速范围内, 亦即碰撞点速度或者说炸药爆速必须小于板材中的音速, 否则不能保证良好的焊接质量。因此, 爆炸焊接中所用的炸药要采用低爆速炸药。

(2) 倾斜的动态弯折角 $\beta$ 应处于某个高界限和低界限的范围内, 这个高低界限将随着材料的性质和表面状态的不同而改变, 一般为 $5^\circ < \beta < 25^\circ$ 。如超过这个限度, 则无论 $V_p$ 是何数值也不能完成焊接。这是因为 $\beta$ 增大, 射流量就增大, 可以产生高度的表面净化作用; 当 $\beta$ 过小时, 射流消失, 无法进行自清理, 焊接就会失效。

(3) 为完成合格的焊接必须得到最小的 $V_p$ 值。如果 $V_p$ 过小, 压力就小, 以致不能产生类流体状态。不是流体状态, 也就没有射流概念, 因此要达到焊接的目的一定要有一个最小的临界压力存在, 亦即最小 $V_{pmin}$ 。大量试验表明, 最好的焊接质量出现在最小的临界速度 $V_{pmin}$ 的附近。

(4)  $V_p$ 的最高值也应有一个限制。 $V_p$ 过高, 动能就高, 从而转变为焊接界面的热量也

高。如果这个热量使焊接界面产生过度熔化，焊接质量就要大大降低。由于公式(2)把 $V_p$ 、 $\beta$ 、 $V_0$ 连系在一起，所以 $\beta$ 值的范围与 $V_p$ 的范围是彼此相连系的。对于厚板焊接，由于厚板质量大，在同一 $V_p$ 值时，厚板的动能就比薄板的动能大，过度熔化现象就显得厉害。因此，在厚板焊接时，要尽量降低 $V_p$ 值。根据(2)式，在 $\beta$ 不变时，只有降低爆速 $V_0$ ，才能达到降低 $V_p$ 值的目的。所以，厚板进行爆炸焊接时，要尽量采用更低爆速的炸药。

(5) 间隙 $y$ 是使飞板获得加速度所必需的，正确选择间隙 $y$ 对爆炸焊接也是很重要的。在使用硝酸铵/柴油炸药( $V_0$ 在1500~3000m/s范围内)时，飞板的加速段很长， $y$ 值可取大值，使用爆速较高的炸药时，加速段短， $y$ 值可选得小一些。

# 第一章 爆炸载荷作用下的飞板（复板）运动

## § 1-1 一维简化模型

### 一、概 述

在绪论中介绍了当炸药一端被引爆后，在复板金属表面将迅速掠过—个高压脉冲载荷的“滑移爆轰波”，复板在爆炸产物的高压作用下迅速弯折，在几个微秒的时间内，复板被加速到每秒几百米的速度，然后和基板相碰，这个碰撞点将以每秒几公里的速度，从引爆端开始，依次地掠过基板表面。其碰撞点的压力可达几十万大气压，它将大大地超过金属板材本身的动态屈服极限。由于在碰撞区的压力为金属板材静态强度的几十倍到上百倍，因此材料强度在该区域内是一个相对小量。这时，碰撞点附近的金属板材的行为和流体十分相似，这是一个重要的概念，人们称之为“流体模型”。其现象之一就是相互碰撞的金属板材将形成两股运动方向相反的金属射流。其中一股喷向碰撞点的上游，称为“再入射流”。其速度可以达到每秒5~6公里，厚度为基、复板的2%~5%左右。它的形成意味着从两块相互复合（或焊接）的金属板材的内表面上剥离掉一层包含氧化膜和污染物的金属表面层，使金属露出了有活性的清洁表面，为两块金属板的焊接提供了极为重要的条件。因此，再入射流的形成是爆炸焊接的必要条件，也是“流体模型”的直接证明。另一股射流也即“主体射流”，它的喷射方向指向碰撞点的下游，其厚度约为基复板的95%~98%，它就是爆炸复合后的复合板。

当金属板在碰撞点附近形成两股方向相反的射流时，材料在那儿形成高速的塑性剪切变形和急剧增长的热效应。这种绝热剪切形成的高温，可以使界面层发生不同程度的熔化。

金属板材物理性质的不同（强度、熔点等不同），炸药性能的不同（密度、爆轰波速度、多方指数不同）和质量比的不同（即单位面积的炸药量和复板质量之比），以及安装时的初始预置角的不同，都将影响碰撞区的压力大小和分布形状，以及再入射流的厚度和接合面的形态。

由于上述条件的变化，通常在结合区将出现三种界面的结合形态。

- （1）金属复板与金属基板之间形成平直界面；
- （2）形成波状界面结合；
- （3）形成具有熔化层的结合。

其中波状结合是最为常见的形态。细小的波状结合在通常情况下也是较佳的结合形态。

为了得到较好的焊接质量，必须合理地选择爆炸焊接的参数，也即确定合理的炸药爆轰波速度 $V_0$ ，炸药密度 $\rho$ ，爆轰产物的多方指数 $\gamma_0$ 和质量比 $R$ ，以及安装角 $\alpha$ 和飞行的间距 $\delta$ 。因此，首先需要了解在爆炸焊接过程中四个相互衔接的力学过程，即：

- （1）爆炸载荷作用下的复板运动规律；

- (2) 再入射流形成的条件和过程;
- (3) 碰撞区压力场、速度场、应变率场以及温度场的确定;
- (4) 爆炸焊接波状界面形成的机理。

以后将依次来介绍上述四个方面的问题。现在首先讨论爆炸载荷作用下的复板运动规律,由浅入深依次介绍:工程近似公式、一维近似公式、二维的近似解析解、数值计算方法以及材料强度影响和飞板运动测试技术。在本章最后介绍多层复合的计算方法。

## 二、复板运动过程中的各参数关系。

在介绍复板运动公式之前先介绍一下各运动参数之间的关系。

在爆炸焊接过程中,复板的运动速度 $V_p$ 和复板的弯折角 $\theta$ 是确定碰撞区压力大小和分布形态的两个重要因素。从图1-1-1(a)中可以看到当爆轰波的传播是稳定时,如将坐标原点 $O$ 置于爆轰波阵面上时,则看到复板运动姿态不变且复板以恒速 $V_d$ 向下游流动。如取静止坐标系,则将看到复板以图1-1-

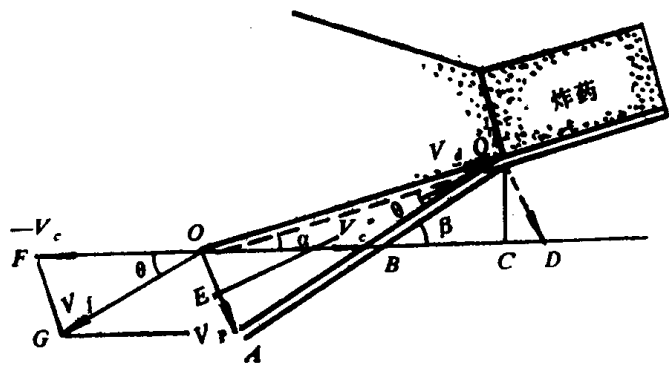
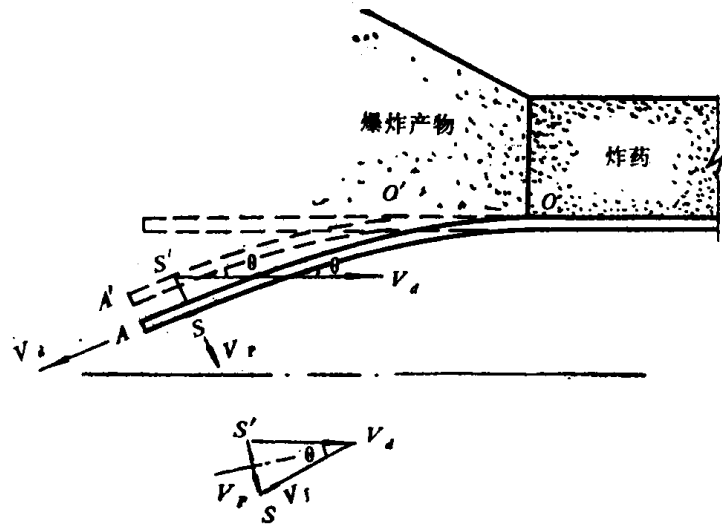
1-1 (a) 中的姿态以速度 $V_p$ 向右下方移动,其水平速度为 $V_d$ 。这时在复板上任一点 $S$ 处的速度 $V_p$ 、弯折角 $\theta$ 与爆轰波速度 $V_d$ 之间存在如下关系式:

$$V_p = 2V_d \sin \frac{\theta}{2} \quad (1-1-1)$$

上式中有假定,即认为 $V_p$ 的方向垂直于 $\theta$ 角的两等分线。

如果复板与基板相互平行安置,并将坐标原点放在爆轰波头 $O$ 点上,并认为复板为不可压缩的流体,则复板来流对于碰撞点的速度 $V_f$ 为恒值,并且等于爆速 $V_d$ 。平行法是爆炸复合中通常采用的安置方式。如果爆速过高或其它某些原因,复板与基板之间则常常采用预置角 $\alpha$ ,以改善焊接条件,如图1-1-1(b)所表示。此时 $V_f$ 将小于 $V_d$ 。

假设经过单位时间后,



(b)

图1-1-1 不同时刻的复板运动姿态

碰撞点由O点移到B点其速度为 $V_c$ 。这时相应的爆轰波阵面到达O'点。则 $\vec{OO}'$ 表示爆轰波速 $V_d$ 。用 $\vec{OA}$ 表示相应的复板运动速度 $V_p$ 。 $\vec{OA}$ 垂直于 $\theta$ 角的分角线O'E并等于 $2V_p \sin \frac{\theta}{2}$ 。如果在碰撞点O处叠加一反向的速度 $-V_c$  (用 $\vec{OF}$ 表示)，则这时碰撞点O将停止不动。 $\vec{OA}$ 和 $\vec{OF}$ 的合速度 $\vec{OG}$ 表示复板来流对碰撞点O的速度 $V_r$ 。这是因为 $\vec{OG}$ 与 $\vec{O'B}$ 的延长线段 $\vec{BA}$ 平行，且大小相等，即 $\vec{OG} = \vec{OA} - \vec{O'B} = \vec{BA}$ 。这里 $\vec{BO}' = V_d - V_r$ 为“逃逸速度”，表示爆轰波头O'对碰撞点B的分离速度。正是由于这个速度，安装角 $\alpha$ 越大则分离速度也越大，则相应 $V_r$ 越小。

通过三角形OAB和O'BD的相似关系，不难求得 $V_r$ 值为：

$$V_r = \frac{V_p \cos \left( \beta - \frac{1}{2} \theta \right)}{\sin \beta} = \frac{2V_d \sin \frac{\theta}{2} \cos \left( \beta - \frac{1}{2} \theta \right)}{\sin \beta} \quad (1-1-2)$$

这里 $\beta = \alpha + \theta$ ，称 $\beta$ 为“动态碰撞角”。

在第四章中，当讨论碰撞点附近的压力场、速度场和应变率场时，我们将看到 $V_r$ 和 $\beta$ 是描述上述分布的主要参数，也是确定界面波形的主要参数。通过(1-1-2)式看出 $V_r$ 和 $\beta$ 可以由 $V_p$ 和 $\theta$ 来确定，这两组参数是相互联系的，其中只有两个是独立变量。

因此，当炸药爆轰速度 $V_d$ 一定时（在平行装置中 $V_r$ 也相应确定），则决定复合质量好坏的力学参考数就是 $V_p$ 了，所以复板运动速度的确定是研究爆炸复合首先遇到的问题。

### 三、一维格尼 (Gurney) 飞板运动公式

如前所述，在滑移爆轰作用下爆炸产物或通过缓冲层或直接对复板进行加载，使复板产生弯曲运动。由于炸药层在一般情况下都有一定厚度与长度，因此存在侧向的稀疏和引爆端的稀疏波的作用。这是一个复杂的二维不定常的爆炸力学问题。为了对复板运动过程进行定量的计算和讨论，很多人对此进行了研究，建立了各种近似的简化公式。

1943年格尼<sup>(8)</sup>在研究弹壳的爆炸时建立了最简单的一维膨胀模型下的工程近似公式。由于其形式极其简单，现在，在近似估算时仍为人们所采用。其模型如图1-1-2所表示。 $\rho_0$ 、 $E_0$ 分别表示凝聚炸药的装药密度和内能。在炸药两侧为不可压缩物质（例如金属材料），其密度和厚度分别为 $\rho_1$ 、 $\delta_1$ 和 $\rho_2$ 、 $\delta_2$ 。格尼作了如下假定：

(1) 爆轰是瞬间发生的，这瞬时炸药密度仍为 $\rho_0$ 。

(2) 被抛掷的物体瞬时就获得了速度 $V_1$ 和 $V_2$ 。

(3) 爆炸产物中速度变化和 $x$ 的大小呈线性关系，即：

$$V(x) = -V_2 + x(V_1 + V_2)/\delta_0 \quad (1-1-3)$$

在上述假定下，根据动量守恒和能量守恒定理，我们可以确定速度 $V_1$ 和 $V_2$ 具有如下形式：

$$\text{即 } \rho_1 V_1 \delta_1 - \rho_2 V_2 \delta_2 + \rho \int_0^{\delta_0} V(x) dx = 0 \quad (1-1-4)$$

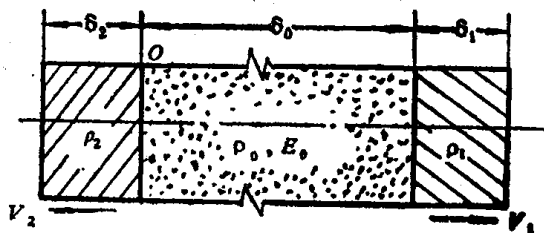


图1-1-2 格尼的一维膨胀模型

$$\text{和} \quad \rho_0 \delta_0 E_0 = \frac{1}{2} \rho_2 \delta_2 V_2^2 + \frac{1}{2} \rho_1 \delta_1 V_1^2 + \frac{1}{2} \rho_0 \int_0^{\delta_0} V^2(x) dx \quad (1-1-5)$$

以上三式联立，我们可以得到  $V_1$  和  $V_2$ 。即 (1-1-4) 式成为：

$$\rho_1 \delta_1 V_1 - \rho_2 \delta_2 V_2 - \rho_0 \delta_0 V_2 + \frac{1}{2} \rho_0 \delta_0 (V_1 + V_2) = 0, \quad (1-1-6)$$

(1-1-5) 式为：

$$\rho_0 \delta_0 E_0 = \frac{1}{2} \rho_2 \delta_2 V_2^2 + \frac{1}{2} \rho_1 \delta_1 V_1^2 + \frac{\rho_0 \delta_0}{6} [(V_1^2 + V_2^2) - V_1 V_2] \quad (1-1-7)$$

令  $\frac{\rho_0 \delta_0}{\rho_1 \delta_1} = r_1$ ,  $\frac{\rho_0 \delta_0}{\rho_2 \delta_2} = r_2$ , 则从 (1-1-6) 式得到：

$$V_2 = V_1 \frac{r_1 + 2}{r_2 + 2} \cdot \frac{r_2}{r_1} \quad (1-1-8)$$

对 (1-1-7) 式遍除  $\rho_0 \delta_0$ , 则得到：

$$E_0 = \frac{V_2^2}{2r_2} + \frac{V_1^2}{2r_1} + \frac{1}{6} [(V_1^2 + V_2^2) - V_1 V_2], \text{ 引进 (1-1-8) 式关系, 消去 } V_2 \text{ 则:}$$

$$E_0 = \frac{V_1^2}{2r_2} \left( \frac{r_1 + 2}{r_2 + 2} \cdot \frac{r_2}{r_1} \right)^2 + \frac{V_1^2}{2r_1} + \frac{1}{6} \left[ V_1^2 + \left( \frac{r_1 + 2}{r_2 + 2} \cdot \frac{r_2}{r_1} \right)^2 V_1^2 - V_1^2 \frac{r_1 + 2}{r_2 + 2} \cdot \frac{r_2}{r_1} \right],$$

或：

$$\begin{aligned} 6r_1 E_0 &= V_1^2 \left\{ 3 \left( \frac{r_1 + 2}{r_2 + 2} \right)^2 \frac{r_2}{r_1} + 3 + r_1 \left[ 1 + \left( \frac{r_1 + 2}{r_2 + 2} \cdot \frac{r_2}{r_1} \right) \left( \frac{r_1 + 2}{r_2 + 2} \cdot \frac{r_2}{r_1} - 1 \right) \right] \right\} \\ &= V_1^2 \left\{ 3 + r_1 + \left( \frac{r_1 + 2}{r_2 + 2} \right) \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \left[ -\frac{2(r_2 - r_1)}{r_2 + 2} + \frac{3(r_1 + 2)}{r_2 + 2} \right] \right\} \\ &= V_1^2 \left\{ 3 + r_1 + \frac{r_1 + 2}{(r_2 + 2)^2} \cdot \frac{r_2}{r_1} (2r_2 + r_1 + 6) \right\} \end{aligned}$$

所以

$$\frac{V_1^2}{E_0} = \frac{6r_1}{3 + r_1 + \frac{r_1 + 2}{(r_2 + 2)^2} \cdot \frac{r_2}{r_1} \left( 2 + \frac{r_1}{r_2} + \frac{6}{r_2} \right)} \quad (1-1-9)$$

我们经常碰到炸药的一侧为自由表面，这时  $\rho_2 = \delta_2 = 0$ ,  $r_2$  为无穷大，则 (1-1-9) 式为：

$$\frac{V_1^2}{E_0} = \frac{6r_1}{5 + r_1 + 4/r_1}$$

或者写成：

$$V_1 = \sqrt{2E_0} \left[ \frac{0.6R}{1 + 0.2R + 0.8/R} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-1-10)$$



这里 $R$ 就是质量比,  $2E_0$ 为具有能量量纲的参数,  $E_0$ 称为格尼能, (1—1—10)式称为格尼公式。

这个公式在早期的爆炸焊接研究中由于形式简单, 在描述复板的最终速度 $V_{pmax}$ 时有一定的可靠性而被广泛使用。但是由于它作了瞬时就获得了速度 $V_1$ 值的假设, 因此无法描述复板的加速过程。此外具有能量量纲的格尼能实际上也是一个待定系数, 需要通过实验来确定。对于爆炸复合中常遇到的几种炸药, 其数据如下表所示。

表1—1—1 几种爆炸焊接炸药的性能\*

名 称	爆 热 E卡/克	Gurney 能 $E_0$ 卡/克	爆 速 $V_d$ 米/秒	密 度 克/厘米 <sup>3</sup>	$\sqrt{2E_0}$ 米/秒	$\sqrt{2Q}$ 米/秒	$\gamma_0$
TNT/RDX = 40/60	1240	1240	7840	1.68	3220	3270	2.6
Pentolite (浇注)	1220	1220	7470	1.66	3170	3112	2.6
Pentolite (粉状)	1220	900	5150	0.95	2730	2788	2.1
TNT (浇注)	1160	1160	6700	1.56	3100	3070	2.4
TNT (粉状)	1160	800	4800	1.0	2580	2600	2.1
AN** + Dynamite(40%)	800	240	3200	1.25	1400		
AN + 8% Al粉	1100	205	2300	1.05	1300		
AN + 6% 柴油	890	310	2540	0.82	1600	1607	1.87
80/20阿马托	800	275	4000	1.0	1518	2410	1.94

\* 数据取自Ezra: Principles and Practice of Explosive Metalworking Vol.1 §10, (1973)

\*\* AN为硝酸铵,

显然, 当炸药品种有变动时, 必须重新测相应的格尼能, 这是很不方便的。如果我们把 $2E_0$ 的格尼能理解为维持爆轰所需要的能量 $Q$ , 即炸药爆炸后所释放出的热量则根据雨贡纽方程

$$E_1(T_1, \rho_1) - E_0(T_0, \rho_0) = \frac{1}{2}(p_1 + p_0)(V_0 - V_1) + Q \quad (1-1-11)$$

这里脚注“0”, “1”分别表示爆炸化学反应前后的状态。 $E$ ,  $V$ ,  $p$ 分别表示内能、比容和压力。设爆炸产物满足等熵假定, 即 $pV^\gamma = \text{const}$ , 以及 $dE = -pdV$ , 则 $E_1 - E_0 = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} - \frac{p_0 V_0}{\gamma - 1}$ 。

因此(1—1—11)式为:

$$\frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} - \frac{p_0 V_0}{\gamma - 1} = \frac{1}{2}(p_1 + p_0)(V_0 - V_1) + Q \approx \frac{1}{2}(p_1 V_1) \left( \frac{V_0}{V_1} - 1 \right) + Q \quad (1-1-12)$$

由多方方程可知:  $\frac{dp}{dV} = -\gamma \frac{p}{V}$ , 则 $\frac{p_1 - p_0}{V_0 - V_1} = \gamma \frac{p_1}{V_1}$ , 也即 $\frac{1}{\gamma} \approx \frac{V_0 - V_1}{V_1} = \frac{V_0}{V_1} - 1$ , 因

此 $\frac{V_0}{V_1} = \frac{\gamma + 1}{\gamma}$ , 代入(1—1—12)式忽略 $p_0$ (因 $p \ll p_1$ ), 可以得到:

$$p_1 = \frac{2\gamma(\gamma - 1)}{\gamma + 1} \rho_1 Q$$

由爆炸力学基本方程可以知道爆速  $V_d = V_0 \sqrt{\frac{p_1 - p_0}{V_0 - V_1}}$ ，将上式  $p_1$  值代入，则得到：

$$V_d = \sqrt{\frac{2\gamma(\gamma-1)QV_0^2}{(\gamma+1)(V_0-V_1)V_1}}$$
，再次利用  $\frac{V_0}{V_1} = \frac{\gamma+1}{\gamma}$ ，则得到：

$$Q = \frac{V_d^2}{2(\gamma^2-1)} \quad (1-1-13)$$

如果把格尼能  $E_0$  理解为  $Q$ ，并认为这部分能量全部转变为动能，则 (1-1-10) 式可写成：

$$V_1 = \frac{V_2}{\sqrt{\gamma^2-1}} \left[ \frac{0.6R}{1+0.2R+0.8/R} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-1-14)$$

这是一个半经验公式，其计算结果与实测结果相当一致。相应  $Q$  值也一并表示在表 1-1-1 中。其中  $\gamma$  为该炸药的有效多方指数。关于有效多方指数的讨论参看 § 1-4。

#### 四、阿述兹一维飞板公式

A. A. Aziz<sup>[4]</sup> (1961年) 研究了在爆炸载荷作用下金属平板运动的一维解。

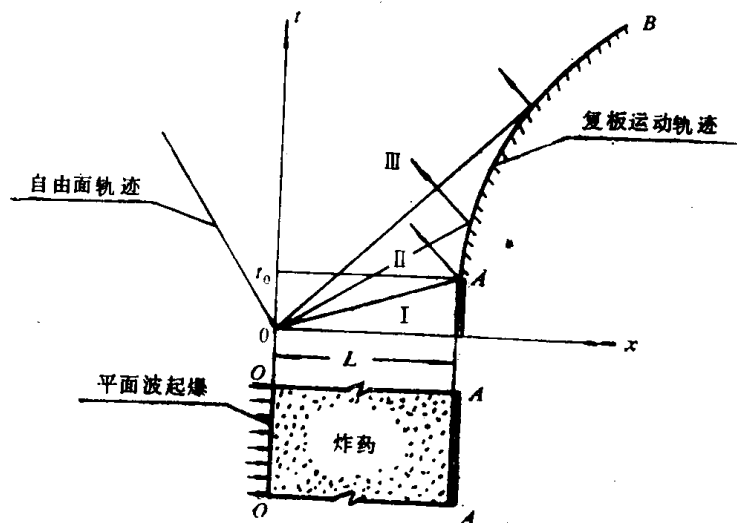


图1-1-3 阿述兹一维飞板运动的时空图

图1-1-3 表示炸药在顶部  $O-O$  平面上受到平面波发生器的激发同时引爆，形成一束中心波。其中爆轰波阵面以速度  $V_0$  经过  $t_0$  时间到达平板  $A-A$  的背面上，并开始驱动平板产生加速度运动。在时—空图上， $\widehat{AB}$  曲线表示平板的运动轨迹。在求解中采取如下假设：

- (1) 忽略平板运动中空气阻力的影响，认为平板在真空中飞行。
- (2) 只考虑在爆炸载荷下平板的刚体运动，而忽略平板本身的应变。
- (3) 认为炸药具有足够大的加载面积，忽略侧向稀疏波对爆炸载荷的影响。

令  $p$  表示爆炸产物作用于平板上的击波压力， $u$  表示飞片运动速度，则：

$$\frac{dx}{dt} = u \quad (1-1-15)$$