

爆炸成形机床的回顾和展望

章仕表

本文从航空工业钣金加工现状和发展趋势出发,论述了爆炸成形今后在钣金加工中的重要作用。而且从国内外爆炸成形发展历史和国外爆炸机床发展概况来说明二个问题:一是研究爆炸成形这项课题难度很大,国内外研究工作进展缓慢;二是说明要使爆炸成形能发挥其更大的作用,今后必须向成组化、机床化、自动化方向迈进。本文还介绍了国外在这方面的发展情况,最后用我们厂已经过七年生产考验的封闭爆炸机床作为具体例子来说明上述问题。

一、钣金工艺的现状、存在的问题及发展趋势

我国钣金工艺是飞机制造工业中相当落后的一种零件加工工艺,主要是机械化程度太低,一般约为20%。

目前钣金加工使用的常规机床,其中如冲床、落锤、滚弯机、闸压床以及摩擦压床等,在冲压过程中,由于侧向压力缺乏或不足,使变形区域材料所受综合拉伸应力或综合压缩应力小于材料的屈服极限而呈弹性变形。至于囊式液压机床,虽然具有侧向压力,也由于单位压力不高,仍然有不少零件回弹较大。此外,还存在大型双曲度(型面变化较显著)整体壁板、2~3毫米厚的板弯梁、4~6毫米厚的型材梁成形后的回弹问题以及油箱外壳焊接后的变形问题。消除这种回弹或变形,要求大量的手工工作量,不仅劳动强度大、加工费用高,而且零件表面质量差。

随着航天和航空事业的迅速发展,高强度铝合金(LC4、LF3、LF6等)、高强度钢(30CrMnSiA、GC11、2Cr₁₃Ni₄Mn₉)以及钛合金(TA2、TC1)等新材料,在飞行器结构上采用的数量日趋增多。这些新材料在工艺上的共同特点是屈服极限高,延伸率低,尤其是这些材料的屈服极限和强度极限相差不大,给成形工艺带来了更大的困难。

原有的钣金成形机床本来已不能满足当时钣金加工的需要,随着航空工业的发展,这个矛盾就变得更突出了。怎么办?只有寻求新的工艺方法和新的机床设备来解决这个矛盾。这种新工艺、新机床必须使零件材料在变形区域内获得较高的单位压力,方可迫使材料屈服,从而消除回弹。

飞机工业中的钣金件,一般用薄板成形,液压弯曲零件和浅拉伸零件所需要的单位面积上的变形能量不大;过多的能量不仅无用,反而使机床设备或模具产生变形或损坏。为了满

本文收到日期:1980年12月30日

足压力高、能量不太大这一成形要求，只有采用压力高、持续时间短的动力源。根据这些特点，使用炸药爆炸是可以符合这一要求的。这就是爆炸成形将获得进一步发展的原因。

二、爆炸成形发展简史

爆炸力在人们的思想中被认为是一种难以控制的甚至是起破坏作用的力量。实际上，它一旦为人们所认识、所掌握，就可驯服地为生产提供巨大的能量。

据有关资料介绍，将爆炸力最早应用于生产的是美国人，他们在1888年用炸药在铁板上进行压印，1894年，英国利用炸药制造自行车上的一个套管。在随后的六、七十年间，爆炸工艺在生产上未得到更多的采用。直到1950年，美国才用爆炸成形法制造出第一个直径达几英尺的螺旋浆轴壳，可是仍未得到更广泛应用。

五十年代末和六十年代初，由于航空工业的迅速发展，在飞行器上出现了许多大尺寸、高精度和一些难加工材料制成的零件，爆炸成形才有机会得到发展和推广。当时许多西方国家的工厂、大学和研究院、所都配备一定的人力物力进行这方面的理论和实践的研究，使爆炸成形对这类零件的成形取得了一定的进展。但是，由于炸药爆炸属于高压、高速的瞬态过程，不论是击波的传递理论或是零件的成形机理，都十分复杂，以致初期的爆炸成形在生产中应用甚为困难，操作过程中盲目性较大，并且还存在一些缺点（如污水飞溅、废气弥漫、地基震动、爆声振耳、能量利用不高、压力分布不均、表面质量较差、生产效率较低等）暂时难以解决，致使爆炸成形的采用在七十年代前后在国内外又处于低潮，只剩下少数单位继续研究。回顾这段历史，可知这项科研难度很大，要有所进展必须花很大的精力和很长的时间。同时还可以看出，要使爆炸成形在工业上发挥更大的作用，必须进一步克服所存在的缺点。

三、国内外爆炸机床发展概况

为了使爆炸成形更好地为工业服务，许多国家都从初期爆炸成形向爆炸成形机床化、自动化方向发展，使所存在的缺点得到一定程度的克服。以下介绍各国爆炸机床的发展概况。

1. 英国

英国在1965年《工程新闻》206期上的报道，英国伯明翰大学自称预计将在1965年底制造出世界上第一台自动化爆炸机床。实际上，此机床仅仅是一个反射罩。

1970年，该大学出版了《高速金属成形的研制》一书。此书的图129仅为该机床的轮廓示意图，如图1所示。书中指出该机床的能量相当于7.5吨—米，能成形600毫米直径的钛金零件。在书后还提出了该机床将来进一步改进的设想，即打算自动送料、装药、取件及自动起爆等。至于改进后的机床是否已投入试制，未见报道。

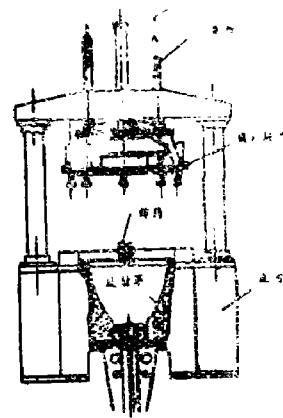


图1 爆炸机床轮廓示意图

1972年3月英国《钣金工艺》杂志报道了英国的封闭爆炸成形及多模爆炸成形装置，如图2和图3所示。这篇报道文章的结论是：“对于爆炸成形技术的若干部分进行了讨论，从而明白了有关的工艺参数。现已证明‘多模’成形有着许多优点，特别是需要成形小批量零件时，它可以使工艺过程变得更加经济。”

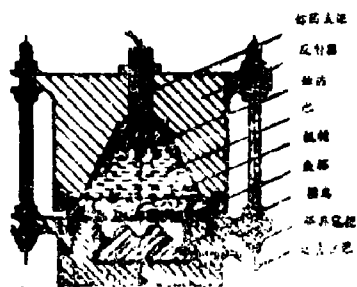


图2 封闭爆炸成形装置

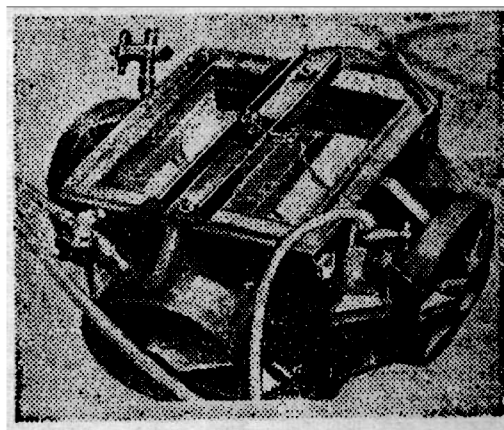


图3 四模式爆炸成形装置

2. 美国

美国1968年5月《金属加工生产》杂志报道：LTV宇航公司根据美国空军拨给研制费为50万美元的合同，在1967年底研制了一台22500吨高能机床。

美国1970年12月《生产工程》杂志消息：几年来对该机床一直进行着设计和研制工作，当时正处于研制的第二阶段，即重点放在制造飞机零件上，并报道已成功地炸出了四种飞机零件，其目的是验证机床的生产能力和积累可成形的数据。该机床的爆炸力为22500吨，单位峰压为3500公斤/厘米²，成形零件最大尺寸为直径900毫米，运转一次周期为10~15分钟，机床重量为90吨。当机床爆炸零件时，炸药产生的22500吨爆炸力需用22500吨液压的油缸活塞来承托。液压系统的单位压力为1970公斤/厘米²。

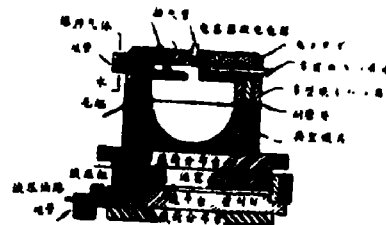


图4 高能机床结构原理图

1973年，美国出版了《金属爆炸加工的原理与实践》一书，其中介绍了一种斜井缆车式爆炸装置，如图5所示。

美国1967年1月30日《航空周刊与空间工业》杂志消息，美国空军为了寻求新的锻压成形工艺，责成巴特勒研究所完成高能锻压试验。它将利用废弃的阿特拉斯—F导弹发射装置改装成高能锻压机床，以275500公斤一米的巨大能量完成锤击试验。成形原理是以38米/秒的速度将9吨重的滑块锤击到装在约90吨重平台的工件上。

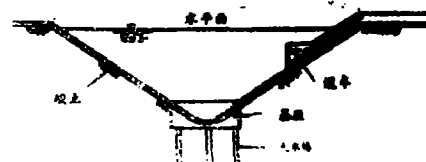


图5 斜井缆车式爆炸装置

3. 日本

根据第二届国际爆炸成形会议论文集报道，日本在1969年研制了一个小型爆炸装置，如

图6所示。该装置能起爆3克左右的炸药，炸出0.4毫米厚不锈钢镶全口假牙用的牙床底板。关于爆炸机床的研制，未见有任何报道。

4. 苏联

1974年苏联《锻压生产》杂志上发表了已在生产上使用的燃气爆炸机床，如图7所示。此机床公称压力为1200吨。关于机床的重要技术指标，基本上未作任何说明，只是写了可成形0.1~3毫米厚的铝皮和高强度板料。

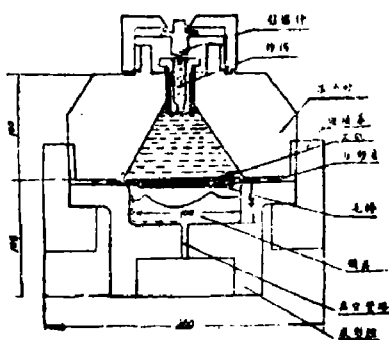


图6 封闭压力腔

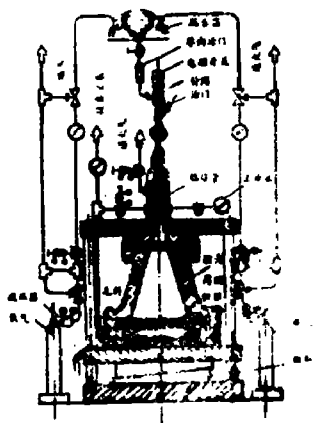


图7 燃气爆炸机床

5. 国内

国内爆炸成形工艺开展较晚，有些单位在1959——1965年期间，除开展了单件爆炸成形外，还搞成了真空爆炸井，到1968年又搞成了惯性模和斜井缆车式爆炸装置。

我们工厂在学习国内外爆炸技术的基础上，在上级党委的关怀和领导下，广大职工自力更生、艰苦奋斗、破除迷信、解放思想，在1965年就掌握了初始阶段的单件爆炸成形技术，如气爆、水爆、泥爆、沙爆、接触爆炸等，即以不同的介质传递冲击波压力，以适应不同类型的零件成形。在随后的十多年时间里，我厂从单件爆炸发展到成组爆炸，从室外露天爆炸发展到室内爆炸，由敞开爆炸发展到封闭爆炸，由压制钣金零件用的爆炸压床，发展到锻制机械加工零件的爆炸锻锤。现将发展过程简述如下。

1962年，我厂首先搞的是单件爆炸。到1964年四季度，为了解决大量钣金零件的手工成形问题，以及为了解决那些强度高回弹大的钣金件的成形关键，设想将液压机床所具有的高效率和爆炸产生的高压二者结合起来加以利用，设计成爆炸机床。为了探索这个设想的可能性，于1965年3月进行了橡胶板爆炸成形模拟试验，出乎意料地获得了成功，并且明显地可以看到它具有许多优点，如上马快、投资小、能成形常规设备难以成形的钣金零件等。因此，这项试验不仅很快在生产上获得应用，而且国内一些工厂也加以采用。这项试验称为成组爆炸，所使用的设备称为爆炸容器，但是它仍然存在着单件爆炸所固有的许多缺点。成组爆炸设备及其所生产的零件，如图8、图9所示。

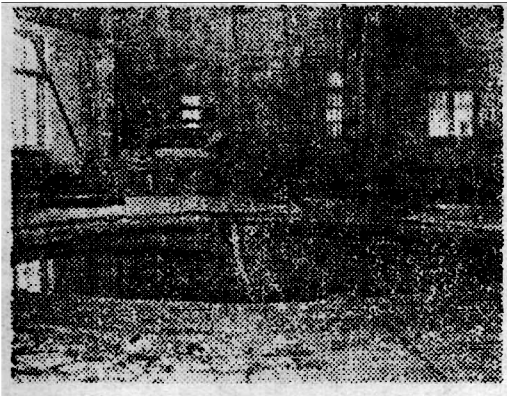


图8 成组爆炸完毕起吊情况

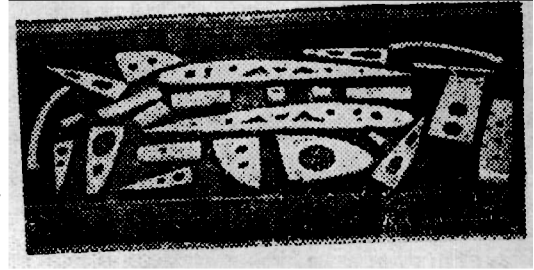


图9 一次爆炸成形的25个零件

由于单项模拟试验获得成功，便立即投入了综合模拟试验。到1965年底，综合模拟装置研制成功，并生产出优质的飞机钣金零件。在南京航空学院、北京航空学院、三机部625研究所、西北重型机床研究所、江西工学院等单位共同协作下，到1966年6月，研制完成了一台15000吨（峰压）爆炸压床，并于6月30日爆炸出第一批装上飞机的合格零件。该爆炸压床如图10所示。

此压床每爆炸一次周期为五分钟，可爆炸 2400×1000 毫米的钣金零件（对于小钣金零件，最多一次炸过25件）。

从同年下半年开始爆炸锻锤的研究。当时设想经过几个阶段搞成450吨一米锤。经过一年多时间的简易模拟试验，将试验结果向三机部和六院作了汇报，由部、院召开了在京有关单位参加的方案讨论会，不仅得到了参加讨论会的有关单位的支持，而且中国科学院和625研究所指派有关同志前来我厂协助这项科研工作。到1968年4月，同时完成了二台2吨一米的爆炸模拟锤，一台以梯恩梯炸药为能源，一台以炮用发射药为能源。经过近两年的模拟试验，到1970年底，研制成一台以发射药为能源的20吨一米的爆炸锻锤。如图11所示，经过一段时间的试生产，于1974年改装成为40吨一米的爆炸锻锤，并已锻制过钢、青铜和铝合金锻件。

当2吨一米模拟锤研制完成时，便总结了爆炸压床和2吨一米炸药式爆炸锻锤的经验教训。在此基础上，于1968年下半年提出了封闭爆炸机床方案，经过近一年时间的简易单项模拟试验，于1970年5月研制出一台综合模拟装置，又经过一年多时间的试生产，到1971年12月正式研制完成一台峰值压力为15000吨的封闭爆炸机床，如图12所示。

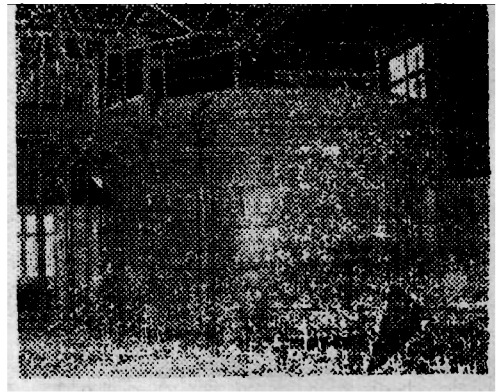


图10 爆炸压床



图11 爆炸锻锤

为了进一步扩大爆炸成形机床化、自动化的应用范围，于1973年提出了爆炸涨形机床的设计，并以简易装置进行了模拟试验，拟定了正式研制爆炸涨形机床的方案。

根据以上所述，几个主要国家的爆炸成形工艺都在向机床化、自动化的方向发展，同时还可看出，我国在爆炸成形机床方面也取得了很大的成绩，今后更应将这项科研工作搞得更快更好。

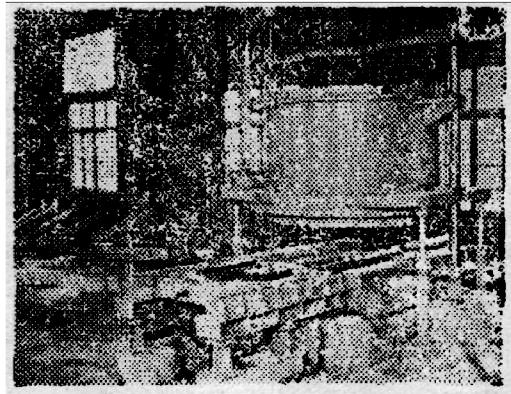


图12 封闭爆炸机床

四、机床化可以实现，困难可以克服

爆炸成形是否只能在室外操作？是否可以实现成组化、机床化、自动化？人们对这些问题不仅在1965年初有很大的意见分歧，因为当时国内外并未对这一可能性作过报道，就是现在也还有人持怀疑态度。原因是认为研究这项课题难度很大，一时难于掌握它的机理和规律，从而不易克服尚存在的缺点和确保机床寿命。

困难究竟在那里？现限于篇幅，不能细述，只提出当时问题所在。其中有的问题已经解决，在此作为经验交流；有的问题仅限于定性认识，尚待进一步深入探讨，并希望专家学者们帮助和指正。

1. 要想实现爆炸成形成组化、机床化，必须首先探讨橡胶板作为水和零件的隔离层有无可能。这一点，美国从1957年就已经开始试验，结果都失败了。这个消息传出后，至今未曾见到任何国家采用橡胶板作为烈性炸药爆炸时的隔离层。国内当时亦相信这种说法，并认为橡胶板作隔离层不太可能。但是我们改变了一些试验参数，试验获得成功。

2. 爆炸腔中的峰压以各处均匀为好，因此试验初期，希望密闭腔内的流体传压能够遵循巴斯卡原理，即“密闭容器里的液体能把所受的压强按着原来的大小向各个方向传递”。但是实际上并不如此，而是爆炸瞬间的前阶段各处峰压不均匀，后阶段才获得均匀的静压。事后分析发现，任何一点的冲击波压力都是时间和距离的函数，因此前阶段不均匀；后阶段由于只剩下爆炸气体所产生的静压，所以仍然适合巴斯卡原理。这样看来，巴斯卡原理只适合密闭容器里的静压传递，而对密闭容器里的冲压是不适用的。因此，只有通过反射罩型面的合理设计来实现工作台上压力的均匀分布。

3. 任何机床的强度计算，首先考虑的因素是结构的受载大小。但是，爆炸腔内峰压的计算即不能采用美国P.库尔的压力计算公式，又无合适的测压仪器，因为采用石英压电方法目前只能测试2000公斤/厘米²左右的压力，而紫铜压电方法只能测试数万公斤/厘米²以上的高压，而且压电测试甚为麻烦。我们采用了一种新的测压方案，现在正验证其可靠性。

4. 爆炸腔的设计是一个比较复杂的问题，因为设计时不仅要考虑爆炸腔的结构强度和产生层裂、角裂及冲蚀的可能性，还要考虑冲击波和高速液流经反射罩型面反射后在工作面上所引起的压力分布。在这方面，我们做了一些工作，摸索到了一些经验。

5. 爆炸引起的峰压是很高的。爆炸腔的设计采取以刚克刚, 还是以柔制刚是值得很好考虑的。我们不采用刚性腔, 而用缓冲腔, 所用材料不是经过淬火的, 而是退火的, 其目的是缓冲峰压, 增强爆炸腔的抗变形能力。

6. 基础设计若按常规考虑, 钢筋混凝土是无法承受超过其承载能力几倍的冲击载荷的。但是, 在砧座与基础之间加一缓冲层后, 问题即解决了。至于基础尺寸以多大较好, 反射罩以多重为宜, 无资料可查。现用从实践中摸索的经验公式计算。

7. 由于爆炸力的峰压很高, 惯性力对机床构件产生严重的破坏作用, 因此结构设计时对惯性力这一因素丝毫不能忽视。

8. 至于结构设计上的困难也是不少的, 现仅举一例加以说明。

如图13所示, 爆炸压床筒体内的36吨水, 促使橡胶板压住容框, 如果不能使橡胶板从A的位置上升到B的位置, 则爆炸前无法将容框送到筒底, 爆炸后无法将容框拉至外面。同时橡胶板上抬时间不能太慢, 否则生产周期太长。现采用筒体上部抽真空的办法, 只要数十秒钟即可将橡胶板上抬至B点位置。可是这样又带来了五米直径筒体内腔密封困难问题。我们在筒体连接部位的设计上采取了一系列措施, 解决了这个困难。

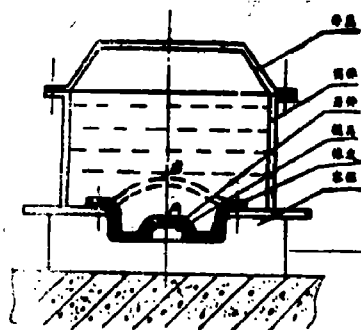


图13 爆炸压床橡皮抬高示意图

五、封闭爆炸机床在钣金工艺中的作用将日趋显著

爆炸成形是否只适合单件生产和特大件成形? 是否只能是常规机床可有可无的补充? 是否有了万吨级囊式液压机封闭爆炸机床就没有什么作用了? 要澄清这些问题, 只要看一看封闭爆炸机床在我厂七年多的生产实践中所显示出来的优越性就可以明白了。现将封闭爆炸机床的主要技术数据、试生产情况以及在生产过程中显示出来的优越性及暴露出来的问题逐一分述如下:

1. 主要技术数据

- (1) 工作台面尺寸: 直径为1000毫米的圆形台面。
- (2) 成形模具高度: 视模具形状而定, 一般允许为150毫米左右。
- (3) 筒体上升高度: 0~450毫米。
- (4) 炸药量: 20~60克。
- (5) 峰压单位压力: 约3000公斤/厘米² (容框中心)。
- (6) 峰值总压力: 约15000吨。
- (7) 机床运转周期: 1.6分钟。
- (8) 电机功率: 22千瓦。
- (9) 机床主体尺寸: 长4600毫米, 宽3800毫米, 高3195毫米。
- (10) 主要基础尺寸: 长3000毫米, 宽3800毫米, 高2545毫米。
- (11) 机床主体金属结构重量: 28吨。

2. 飞机零件试爆情况

自1971年12月机床研制成功到1977年12月底已爆过9028次，已生产零件12030件，炸过的零件材料品种规格见下表：

材 料 名 称	材 料 牌 号	材料厚度 (毫米)
铬 锰 硅 钢	30CrMnSiA	1.2, 1.5, 2, 6
不 锈 钢	1Cr18Ni9Ti	1, 2
	2Cr18Ni4Mn	0.6
新 钢 种	GC11	1.2, 1.5
低 碳 钢	20	2, 8, 10
高 强 度 铝	LC ₄ M	1.5, 3
硬 铝	LY ₁₂ M	1.2, 2
铝 镁 合 金	LF6, LF3	1.2, 2
铝 锰 合 金	LF21M	1.2, 1.5
纯 钛	TA2	0.3

上述生产过的零件材料品种和厚度并不是能成形的极限，而是说明用这些品种的材料制的零件，已成功地在封闭爆炸机床进行了成形或校形。

3. 工艺上的优越性

通过几年来的试生产，证明封闭爆炸机床成形与常规冲压成形相比较具备下列优越性：

(1) 单位压力大，解决了回弹问题：回弹是钣金工艺中一个长期难以解决的问题。过去曾依靠模具来修回弹量，但往往由于影响回弹的因素较多，且不稳定，以致回弹量修过头而报废模具。采用封闭爆炸不仅有色金属贴模较好，黑色金属也是一样。因此，目前生产的模具一律不修回弹。

(2) 能成形常规机床难以成形的材料：对一些在退火状态屈服极限和强度极限差别不大的材料，如TA2、GC11、LF6、LF3等材料，采用封闭爆炸较之常规冲压成形工艺性能好得多。

(3) 模具简单：对一些浅拉深或落压零件，不仅不需要上模，而且只需一个简易的模块即可，大大削减了生产准备工作量。

(4) 可冷压钛板零件：对TA2一类钛板零件，可以冷态成形，从而避免了因热成形带来一系列的麻烦和困难。

4. 机床结构上的优越性

(1) 投资少：常规液压机较之相同效果的爆炸机床，总投资要高许多倍，尤其爆炸机床的动力源费用在总投资中所占甚微。

(2) 机床结构简单：常规液压机采用持续静压，因此它的全部力量都需要由机床的结

构来承受，致使结构庞大复杂。而爆炸机床是瞬时加压，惯性支承，因此构架受力不大，结构简单，耗钢较少，制造容易，安装方便。

(3) 不存在因泄漏减压问题：封闭爆炸机床系瞬间加压，因此泄漏问题对腔压影响不大，不象液压机那样形成严重的减压问题。

(4) 提高单位压力容易，且侧向压力大：封闭爆炸机床提高单位压力和能量比较容易，而且可使侧向压力不仅不降低，反而有所提高。

5. 主要技术数据对比见下表

类别	机床类别	常用压力(公斤/厘米 ²)		工作台面尺寸(毫米)	循环周期(分)	可加工材料厚度(毫米)	机床(吨)	投资(万元)	耗电(千瓦)
		液 压	峰 压						
大型工作台面	9600吨液压机	400		2000×1200	2.5	铝合金1.5以下	250	220	92
	15000吨液压机	500		2700×1100	2.5	铝合金2以下	120	100	115
	15000吨爆炸压机		1000	2400×1000	4	铝合金3以下	60	12	34
小型工作台面	6000吨液压机	500		1910×560	2.5	铝合金2以下	30	66	42
	15000吨封闭爆炸机		3000	Φ1000	1.6	高强度钢2以下	28	8	22

6. 封闭爆炸机床还存在着一些缺点和问题。

(1) 存在的缺点

- ①仍有水溅、废气、震动、噪音等问题。
 - ②目前腔压不均匀。细长的模具易变形，需要加强。
 - ③操作不当或注意不够时易烧伤零件。
 - ④因为未经长期考验，机床的设计维护和使用经验都不够成熟。
- 上述缺点，在实践中仍在继续研究试验，以便不断求得改善。

(2) 尚未深入研究的问题

爆炸成形机床化之所以发展缓慢，主要原因在于爆炸成形的理论还跟不上实践发展的需要。虽说早在五十年代美国P. 库尔已对水下爆炸机理和高速测量技术作了较为深入的研究；1956年苏联H. H. 松佐夫对爆炸力学理论进行阐述；1972年英国W. 约翰森对金属材料的冲击强度在理论上作了探讨；1972年美国J. S. 林哈尔脱论述了金属在脉冲载荷下的性态；1973年美国A. A. 依时来发表了《金属爆炸加工的原理与实践》一书；历届国际高能成形会议论文选以及其它一些杂志，都从理论上作了一定程度的论述。但是，这些论述都不能满足目前爆炸机床科研设计的需要。如爆炸机床设计需要的具体强度计算公式，反射罩型面的具体设计要求以及测压测能的仪器设备和具体方法等问题，都还没有得到圆满的解决。这是摆在爆炸成形基础理论工作者面前的急需研究的问题。

任何事物都有它的两重性，爆炸成形机床也与常规机床一样。各有其优缺点。在低压

力、低吨位的情况下，爆炸成形机床有一定的缺点，所以在大批生产条件下，当普通冲床能够加工出优质零件时，在效率上爆炸成形机床无法赶上普通冲床，因为和普通冲床、中小型液压机床相比较，爆炸机床显得笨拙。但是在高压力、高吨位的情况下，爆炸机床的优越性就显示出来了，尤其是在加工零件强度高、回弹大的情况下，其优越性较之囊式液压机床更为突出。

六、展 望

综上所述，封闭爆炸机床从研制到使用，在曲折的道路上前进，已经历了九年多时间的考验。在这段时间里，结构不断得到改进，优越性不断发现，应用范围日益扩大，新的爆炸成形机床又将出现。可以预料，在不久的将来，事实将会证明，爆炸成形机床不仅是航空工业非常需要的一种新工艺、新设备，就是对其它机械工业部门来说也是一种较好的加工手段。到那时，吨位更大和性能更好的封闭爆炸机床和爆炸锻锤将会出现。

EXPLOSION PRESS MACHINE, ITS DEVELOPMENTS AND PROSPECTS

Zhang Shi-biao

This paper describes the important roles of explosion press machines in machining metal parts from the point of view of the present and future states of aviation industry.

On the basis of the developing history and prospects of explosion press machine, the author explains two questions:

1/. the item of explosion forming is a difficult problem. Research work has progressed slowly both at home and abroad;

2/. In order that the explosion forming can play a more important role, it is ought to develop its compactization, machinability and automatization in future.

The latest developments of the press machine in foreign countries are also introduced in this paper. As an example, for illustrating the above mentioned problems, a close type press machine, which has been manufactured by the author's factory and operated very well for seven years, is described.