

国外爆炸力学情况简介

这份材料简单介绍国外爆炸力学的发展情况，做为我们发展科学技术的一个参考资料。遵照毛主席“古为今用，洋为中用”的教导，我们应当批判地吸取外国的经验，根据我国的具体情况，走我们自己发展的道路，自力更生，奋发图强，在不远的将来赶上并超过世界先进科学技术水平。

由于时间很仓促，特别是由于水平所限，国外情况的收集不全，分析研究也做得不够，因此这份材料不免有很大的局限性和片面性。这一点只有在以后的工作中继续克服。

一 概 况

爆炸在很短的时间内产生高温高压的气体。炸药，核的聚变和裂变，强脉冲电流作用下的金属丝，超高速条件下的固体碰撞，大功率、高能量密度的激光，都能产生爆炸。

爆炸气体作用于周围的介质，产生冲击波，引起变形，振动和破坏等多种类型的运动，人们广泛地应用爆炸于军事和工农业生产的目的。

爆炸力学是研究爆炸对周围环境力学作用规律，特别是冲击波的产生、传播和作用规律的学科，爆炸的一个主要特点是高压、高温和瞬时，从而区别于其他力学问题。它也是一门边缘学科，与超高压物理，分子物理，化学物理，计算技术以及各种工程技术有密切的联系。

爆炸力学是应用性很强的一门学科，与国防建设和工农业生产有广泛的联系，突出表现在以下几个方面：

(一)核武器效应，核武器的发展和应用；核武器的防护。

(二)各种常规武器的终点弹道，如穿甲，聚能射流破甲，弹坑及炮弹、炸弹所引起的振动。

(三)爆破技术广泛应用于土建工程，矿山和水利建设以及交通运输等，如定向爆破筑坝，开挖路堑，凿通隧道，剥离矿山，疏通航道等。

(四)应用于机械、航空、动力、石油、冶金、造船等工业中的爆炸加工和爆炸合成技术，如爆炸成形各种零件，爆炸复合金属板，爆炸合成金刚石等。

二次世界大战推动了爆炸问题的研究，形成了爆炸力学的基础。50年代前后发表的一些总结性书籍反映了二次大战时期的发展。以英、美为例，代表性著作有以空中原子爆炸为中心的《冲击波流体动力学与爆炸波》(Shock Hydrodynamics and Blast Waves)，以水中常规炸药爆炸为中心的《水下爆炸》(Underwater Explosions)，以常规炸药为中心的《高能炸药的科学》(The Science of High Explosives)。这一时期还实现了炸药的收缩爆炸，形成了塑性动力学和聚能射流穿甲的理论基础。许多知名人物参与了这些工作，如物理学家贝蒂(Bethe)，数学家冯·诺依曼(von Neumann)，贝尔克霍夫(Birkhoff)，力学家冯·卡门(von Kármán)，泰勒(Taylor)，化学家克

尔克乌德 (Kirkwood)，基斯加考斯基 (Kistiakowsky)，
库克 (Cook) 等。

二次世界大战结束到现在，美帝和后来的苏修为了侵略和扩张，称霸世界，实行核威胁和核讹诈政策，大力发展核武器，洲际导弹及宇宙航行的研究、试验和制造，因而从空中到地下，到水下，爆炸力学也有了更大的发展。核爆炸的防护受到普遍重视。另外 50 年代后期，由于高强度、高精度、大尺寸零件成形的需要，美、苏、英、日、德、挪威等国相继开展了爆炸成形的研究，60 年代又发展为包括多种工艺的爆炸加工和高能率成形。对爆炸过程的进一步认识，也促进了一般爆破技术的研究。60 年代苏联提出定向爆破筑坝问题；钻眼爆破技术也在许多国家有了进一步的发展。于是爆炸力学到达了新的水平，它的应用也更为广泛了。

我国 56 年曾进行近万吨的矿山大爆破。大跃进期间，实现了几处定向爆破筑坝。并开展了爆破的试验、观测工作。同一时期又开展了爆炸成形的研究工作。62 年在力学规划中制订了“爆炸力学”的中心问题。为了打击美帝、苏修的核威胁、核讹诈政策，为了打破核垄断和最终消灭核武器，我国工人、人民解放军和科学技术人员，在毛主席无产阶级革命路线的指引下，群策群力，自力更生，64 年就成功地爆炸了第一颗原子弹，之后又接连爆炸了氢弹，发射了卫星，实现了地下核试验。我国历年都有相当规模的爆破工程，71 年在自己设计的基础上，

进行了万吨以上的矿山大爆破。在实践与观测的基础上积累了不少有关爆破的经验和资料。爆炸成形在一些工矿单位中已经得到应用，为提供尖端技术和其他工业所需的产品做出了贡献。结合爆炸成形，在理论和试验技术上有一定成果。我国在爆炸力学方面的研究工作是有成绩的，但距离形势发展的需要，距离国际先进技术水平，还有不小的差距。

以下分七个方面介绍国外在爆炸力学方面进展的情况：

(一)空中爆炸及防护。

(二)水中爆炸及防护。

(三)地下爆炸、土岩爆破及防护。

(四)超高速碰撞、聚能射流及穿甲。

(五)爆炸加工与爆炸合成。

(六)动载荷作用下材料的力学性质。

(七)一些新的试验装置和测量手段。

最后，提出我们对发展爆炸力学的一些看法。

三 国外情况

(一)空中爆炸与防护

炸药爆炸在空中引起冲击波，对周围结构有强烈的破坏作用。接近地面爆炸时，还在地面形成爆炸坑，在地下产生应力波，能引起地下结构的振动和破坏。

核爆炸的当量远大于一般炸药。大的炸药包以吨计，而核爆炸则为

几百吨到几百万吨，乃至更高。除了表现为空气中的冲击波和地下应力波外，空中核爆炸尚有强烈的热辐射，光辐射，伽玛辐射，在核弹碎片及由爆炸带入空中的尘埃中有放射性物质。这些都有杀伤作用。

除了外部爆炸所引起的防护问题外，对一类特殊结构（如炸药制备车间），还需要考虑内部爆炸的防护问题。

由于空气中的冲击波载荷与结构物之间一般情况下没有耦合，因此，可以把载荷与这种载荷下结构的运动分别加以研究。这是空中冲击波防护问题区别于地下或水下的一个重要差别。通常把载荷问题作为爆炸力学的一部分，而把结构物在这种载荷下的运动问题，归入结构动力学的范围。

随着测量技术的提高，对于空中爆炸的冲击波参数，50年代已经比较清楚。地面上冲击波压力与药量、爆高、距离的关系，均可通过实测或模拟试验解决。马赫波的运动规律，50年代已用光学测量方法得到数据。但是由于大多数试验只能用炸药进行，而核爆炸的规模大，影响因素多，因此两者之间冲击波参数在本质上有多大差别，现在还没有很好的估计。

40年代，提出了点源爆炸的自模拟理论，解决了核爆炸火球扩张的规律和点源爆炸条件下的强冲击波理论（美，冯·诺依曼，苏，谢道夫（Сердов），英，泰勒）。上述点源爆炸强冲击波理论不能直接应用于超压较低时的情况，而且由于完全忽略了火球与冲击波的有机联系，

因此当超压很大时，其适用性也是有限的。

50年代及以后，进一步发展了点源爆炸冲击波理论，使之能应用于超压较小的情况（一百或几十大气压力以下）。这里有冯·诺依曼，考拉别依尼可夫（Коробейников），日本的 Sakuri 等人的工作，并给出了详细计算结果。随着对炸药爆震和爆炸产物物态方程以及空气物态方程研究的进展，能够对火球与空气相互作用进行分析。50年代末，法国的魏肯（Wecken），根据有限药包的数值计算，发现了火球中的收缩击波，从而解释了在测量空中冲击波时，为什么出现双波结构。60年代，布罗德（Brode，美，兰德公司）对球形炸药包产生的冲击波进行了系统的计算。后来又计算了多种炸药在地下孔洞内起爆时，冲击波在洞壁多次反射的情况。上面这类计算需借助于高速电子计算机（每秒至少十万次）。一般说，这类计算是可靠的，其精度随着计算机容量的增大和速度的提高而增加。Sakuri 等人对爆炸丝爆炸时产生的冲击波进行了理论计算，加拿大格拉斯（Glass）等人建立了球爆炸模拟试验装置。

具有更重要实际意义的是核爆炸条件下，火球的产生和发展，以及空气中冲击波的产生和发展。60年代后期，据报导贝蒂（Bethe）曾做了这方面的工作，但情况介绍不多。贝蒂从美帝^{开始}发展核武器到现在，一直是从事核爆炸研究工作的，而且在水下爆炸方面也作过相当多的工作。美帝刊物《流体物理》60年代后期曾发表过一篇关于高空稀薄气

体中的爆炸问题，但模型很粗糙。火球是产生冲击波，热辐射，光辐射，伽玛辐射的源，因此研究火球的形成和发展有重要的意义。这里需要考虑的物理因素比较多，其中有高温高压气体的性质，它的分解与电离，热辐射与气体运动的耦合等。高空爆炸情况下，核爆炸的主要作用是热辐射和伽玛辐射，这是用核武器进行反导弹的一种手段，因此研究这种条件下火球的性质就尤为重要。由于空气稀薄，还需要考虑气体分子运动的因素和各种非平衡态的物理、化学、力学过程。鉴于美帝、苏修在高温高压空气性质，电磁流体力学，各种非平衡态方面做了大量研究工作，可以估计到他们在火球研究方面是有相当大的进展的，当然，上述研究也有相当数量是为空间技术和热核控制服务的。具有代表性的著作如泽尔多维奇等所著的《冲击波物理与高温流体力学现象》。

随着核爆炸当量的增加，需要考虑大气层非均匀性的影响，直到现在，这方面的工作仍有所报导。

球面冲击波到达地面时产生反射，近区是正常反射，再远是马赫反射^{马赫反射}能显著扩大冲击波的作用范围，增加杀伤能力。因此马赫反射受到重视。美帝在50年代建立了光学测量装置，用以测定球面冲击波马赫反射的规律，包括马赫波的形成，马赫杆的运动，三波点的轨迹等。对三波点结构的理论研究也是大量的，许多试验装置如击波管是围绕这个问题建立的。看来三波点问题不是理论模型不清楚的问题，而是计算问题，因此近年来多用计算方法加以解决，并发展了各种数值计算的方案。60

年代后期，有人从流体力学的基本方程直接算出了马赫波。从实用观点看，美帝积累了不少实测资料，并给出地面压力的经验公式，苏修的情况也类似。当然，我们只能根据我们自己实践与理论研究的成果参考使用。

在火球辐射作用下，地面空气温度骤然升高，形成所谓热爆现象。近地面处，空气中的尘埃也比较多。热爆及由此而产生的尘埃对地面冲击波的强度和动压是有影响的，特别是动压增加显著，对地上结构的破坏作用大为增强。美帝核试验时，曾在不同的介质表面（沙土、沥青、水）测量热层对压力的影响。在理论计算上也进行了一些工作，但发表的材料只限于一些定性的模型。

冲击波遇到结构会发生反射和绕射，波后的气流围绕结构则产生绕流。这样，作用于结构上的载荷不仅在不同的位置不相同，而且在同一位置上，压力随时间发生复杂的变化。为了正确设计结构，必需对这种载荷作一个比较准确的估计。在目前，只有在特殊情况下才能对这种载荷进行精确计算。多数情况下，需要用实验方法解决。国外多采用现场试验或模型试验与典型情况的理论计算相结合的方法。模型试验包括小型爆炸场，爆炸洞和各种类型的击波管。除了通常的等截面击波管外，为了不仅模拟更高的压力而且模拟波形和波后气流，还发展了锥形击波管。对典型的地上结构，有一些供设计用的简化载荷公式。应当指出，这些数据往往只适用于超压不很大的情况。

（二）水下爆炸及防护

美帝、苏修为实现称霸世界的野心，发展海军，到处侵略，并争夺海洋资源。为此，大力开展水下爆炸方面的研究，其实际兴趣在于研究鱼雷、核武器爆炸对舰艇及海岸建筑物，如港口、码头、船塢、隧洞等的破坏效应，便于进行武器和结构物的设计和使用。

美帝在二次大战中，海军戴维·泰勒模型水槽 (David Taylor Model Basin)，海军军械实验所 (Naval Ordnance Laboratory) 等单位进行了大量的系统研究，其研究报告有的直到最近才陆续解密发表。50年出版的库尔 (R. H. Cole) 所著《水下爆炸》一书总结了这个时候美国的研究成果，给出了水下爆炸的一些基本参数和爆炸现象的一般介绍，研究的细节和核心内容则介绍甚少。二次大战以来，有关部门继续进行研究，研究内容大致有以下几方面：

1. 水下爆炸载荷的研究 (包括爆炸所引起的冲击波，爆炸气球所发出的压力脉动，水面、沙石底、刚壁的边界效应，近水面或浅水爆炸所引起的波浪等等)；

2. 水下爆炸载荷对舰艇、海岸建筑的振动效应和破坏效应；

3. 结构物对水下爆炸的防护措施 (如隧洞设计，气幕设计等)；

4. 核爆炸的模拟试验 (炸药爆炸、爆炸丝等)；

5. 测量及实验技术 (压电测量、高速摄影等)；

6. 计算方法 (各种计算模型及程序)；

7. 炸药的爆震参数及爆炸气体和水的状态方程;

8. 金属材料在动载荷下的力学性质及物态方程,

在水下核爆炸方面, 美国也进行过多次水下核试验, 但是这类资料却未见公开发表, 只是在某些资料中透露过点滴消息, 并不转引实质性内容。

由此可以看出, 水下爆炸方面研究成果的保密性是很强的。可能也是由于这个原因, 最近几年的研究结果仍然发表得不多, 尤其是最有实际兴趣的爆炸对舰艇和海岸建筑物的振动和破坏效应方面的研究更是少见。已发表的文献反映了一些基本现象方面的研究, 诸如: 自由场中爆炸产生的冲击波, 冲击波在自由面、海底、刚壁上的反射, 浅水中爆炸所引起的波浪等。不过可以看出, 从二次大战到今天, 一些单位在水下爆炸方面的研究是一直不断的。例如美国的海军军械实验所在研究冲击波方面, 美海军土木工程实验所 (Naval Civil Engineering Laboratory) 在研究水波方面作了不少工作, 有的还做得很细致。例如 70 年美国海军军械实验所的斯特恩波格和沃克 (H.M. Sternberg 和 Walker) 用人工粘性法计算球形药包爆炸所引起的运动和能量分配, 给出了冲击波扩展到一百倍药包半径以前的详细情况。美国的研究工作经常发表在 A D 报告中。

苏联方面的研究也有类似的情况。研究工作一直不断, 但公开发表的只限于基本现象的研究方面。他们在小型模型实验方面的工作做得比

较细致，并不断有所报导。例如新西伯利亚分院化学物理研究所的赫里斯多佛罗夫（Христофоров）最近十年来，利用小型压力探头（直径不超过一毫米左右）和高速摄影机（每秒250万张），实测水下爆炸的压力场，包括自由场中的爆炸及冲击波在自由面、沙石底、刚壁上的反射。苏联的研究工作大部分发表在《应用力学与技术物理》（ПМТФ）及《燃烧和爆炸物理》（Физ. Гор. и Взр.）杂志中。

由于计算技术和测量技术取得飞速的发展，以及在爆炸研究领域关于爆震参数和各种介质的状态方程的研究取得新的成果，所以水下爆炸的实验和理论研究，比起二次大战时期做得更加细致和准确，进行了大量实验室内的研究工作，对水下爆炸的压力场取得较多的实测数据。

对于爆炸后期的气球运动和爆炸所引起的波浪方面的研究，由于都涉及重力作用，而重力模拟只限于小型试验，且设备庞大，因此这方面理论研究的任务也更重。

按照当前计算技术的发展水平，已经有可能提供爆炸冲击波作用于结构物引起破坏的大致规律，但是未见到这方面的报导。

（三）地下爆炸、土岩爆破和防护问题

1. 地下爆炸

这类爆炸在地下进行，不产生漏斗。这是一个时期以来，美帝、苏修发展核武器的主要试验方式。最近美帝在阿拉斯加，阿姆契卡的一次

地下核试验为500万吨级，埋深为6000呎。

据报导，地下爆炸试验需要解决的主要力学问题有：

(1)选择合理埋深，以防止形成漏斗或防止放射性气体逸出；

(2)钻孔的密封，以防止放射性气体逸出；

(3)爆炸点周围冲击波参数，空腔直径，压碎区和断裂区直径的计算；

“烟囱”高度的计算；防护设计；

(4)爆炸点周围应力、应变、位移、速度、加速度的测量；地震测量；

(5)爆后实况测量。

美帝已经取得玄武岩、凝灰岩、花岗岩、沉积岩、盐矿等介质里核爆炸所形成的空腔直径与烟囱高度的经验数据，整理出经验公式。

在理论计算方面，美帝发表了流体——弹塑性的几种计算模型。有的计算结果与实测结果进行了比较，计算结果能定性地反映实际情况。但从定量角度看，有待改进的方面还很多，特别是在所谓弹塑性区。这是由于岩石在这种情况下的力学性质复杂，难以充分描述。所以，计算模型需要与实测结果反复校核，不断改进。应当说把实测、岩石性质测量、力学模型、计算技术，几方面配合起来，可以解决这个问题。目前发表的计算多属球对称的，如果考虑到地层的不均匀性，那末计算机必须有很大的容量，速度超过每秒一百万次。

美帝发表的资料只限于“犁头”计划，更大量的军事研究的情况未见透露。“犁头”计划对地下核爆炸的利用提出以下几个方面：(1)在地

下破碎油页岩，就地提取石油；(2)在地下破碎铜矿（因品位低，用通常方法开採在经济上不合算），就地溢取；(3)利用地下爆炸形成的空腔和破碎区，增产天然气及开辟水源等；(4)利用地下爆炸形成的空腔储存石油、天然气、水等；(5)生产同位素；(6)进行地球物理、核物理方面的科学研究。该计划自57年开始已有十余年历史，每年花费约一千五百万美元，做了不少次大小试验，但距实际应用还有不小差距。看来这并不是由于技术上的原因，而是因为美帝的重点在于发展核武器，而所谓和平利用不过是用来麻痹和欺骗世界人民的。

围绕地下爆炸，美、苏、法都进行大量关于岩石及其他介质动态超高压性质的研究，特别是测定它们的雨果尼奥曲线和热力学性质。以炸药为能源，可以在岩石样品中产生高达几百万大气压的冲击波。这是确定动态超高压性质的基本方法。苏联在60年代初曾报导能达到一千万大气压，美帝的一些研究人员对此表示怀疑。

多年来对于岩石中压力较低（约一千到几万大气压这个区域）的应力波的研究也是不断进行着的。爆炸现场测量证明，即使在较低应力的条件下，也不能认为岩石是弹性的，因为应力波幅值随距离的衰减比到爆心距离的倒数要快。实验室试件的动态和静态试验也表明，岩石具有复杂的非弹性性质，如果牵涉到断裂则情况更为复杂。然而为了解决地下爆炸和防护的许多问题，这些方面的研究是必要的。重要的防护结构往往是位于这个区域的。

在美国，以上这些工作主要是在原子能委员会主持下许多单位参加
的，其中一个主要单位是加州大学的劳伦斯辐射实验室 (Univ. of Calif,
Lawrence Radiation Laboratory)。美帝早期发展核武器的劳斯·阿拉莫斯
科学实验室 (Los Alamos Scientific Laboratory)，现在是由劳
伦斯辐射实验室经营的。另外美帝矿业局也参与这方面的工作。圣地亚
(Sandia) 公司着重于发展测量技术 (如加速度计、压力计等)。文
摘多见于《核科学文摘》(Nuclear Science Abstract)，文章
除 A D 报告外，常在《地球物理研究杂志》(Journal of Geophysical
Research) 中发表。

2. 地下浅层爆炸 (松动爆破或抛掷爆破) 和地面爆炸

这类爆炸的历史比较长，经验也较多，炮弹和炸弹弹坑，洞室爆破
剥离矿山，定向爆破筑坝，开挖路堑等都属于这一类。各国都有一些经
验公式，用以在一定埋置和石质条件下计算药量，漏斗大小，破碎区大
小，抛掷方量和抛掷距离等。随着工程规模的增大，特别是随着核炸药
的出现，过去的经验公式已经不够用了。因此，十多年来，对核炸药和
常规炸药的爆破进行了许多试验，理论研究水平也有显著提高。

“犁头”计划包括多次常规炸药与核炸药的漏斗试验，并观测了鼓
包运动和抛掷情况；有单药包试验，也有多药包试验。例如 68 年 3 月
同时起爆成组核炸药，形成宽 200 呎，深 65 呎，长 850 呎的沟。
最大单药包平地扬弃试验为 104 千吨，在沉积岩中进行，形成直径为

6 1 1呎，深3 2 3呎的漏斗（6 2年“驕车”试验）•常规炸药漏斗试验最大装药量为一百万磅（苏联最大的一百万公斤）•

爆破工作中一个重要问题是，如果漏斗尺寸按比例放大，药量应当怎样随深度变化。苏联曾建立重力模拟设备来解决这个问题•美帝根据“犁头”计划的试验，提出药量正比于埋深的3·4次方，但同时指出，由于介质的差异和核炸药与常规炸药的区别，这个模型律只限于当量为一百万磅以下的单药包•

对于爆破过程，提出了冲击波作用，鼓包形成和抛掷过程的计算模型•与计算技术相结合，能够对单药包的作用进行比较细致的分析。但是由于岩石的性质复杂，过程的一些环节如断裂还不够清楚，因此所发表的计算结果仍然是定性的•随着实际资料的积累，力学模型的改善，岩石性能参数的进一步完善，这个问题是有可能突破的•布罗德（Brode）曾计算过当量为百万吨的地面爆炸，计算结果表明，在垂直于地面的45度锥角范围内，冲击波基本上是球面的•

美帝十几年来曾研究利用核炸药开挖运河和修建海港（“犁头”计划的一部分），并曾对某些工程进行勘探设计•参加这方面工作的主要有加州大学的劳伦斯辐射实验室和美国陆军工程兵，但迄今为止，并未见诸实施•苏修、法国在所谓核爆炸和平利用方面也有类似的报导•

对于一般爆破工程，一个重要问题是爆破对附近建筑物的振动影响问题，但这几年我们对这方面的情况了解不多•

3. 钻眼爆破

这类爆破的规模一般较小，在机械化程度较高的国家，常用以代替洞室爆破，因为这类爆破的振动影响较小，破坏范围也较小。

在国民经济中，炸药的用量是很可观的，因此发展炸药品种，改善爆破效果，提高效率是很突出的问题。

国外的研究工作看来着重于以下几个方面：

(1) 发展适用于各种岩石，各种作业条件（如水下）的多品种，高效能，低成本炸药。例如美国杜邦（Du Pont）公司就是这样做的；

(2) 发展毫秒爆破技术，用以提高爆破效果，减少振动影响；

(3) 发展预裂和光滑爆破技术，减小破坏范围，提高边坡稳定性；

(4) 发展各种钻眼爆破技术（炮眼排列，起爆顺序，延时爆破，掏槽等），以提高隧洞的掘进速度。

4. 地下结构的防护问题：

(1) 关于土壤中的应力波，国外报导有多种线性粘弹性波理论，但准确性与可靠性如何，尚难分辨，这是因为所发表的材料中实测资料比较少。土壤中应力波的测量，由于土壤的非弹性和测量仪器与土壤的阻抗匹配问题不好解决，因此往往难以判断测量数据的真实意义。看来应力测量远比振动测量困难；

(2) 关于岩石中的应力波，有的测量应力，有的测量应变，有的测量振动。一般认为后两者比较容易解决。美帝矿业局主要是测量应变；

(3)不少理论性文章(例如美国《应用力学杂志》(Journal of Applied Mechanics))讨论应力波在坑道壁上的反射与绕射问题。对核爆炸而言,除非距离很近,一般说来应力波或地震波的波长远大于地下结构的尺寸,因此反射、绕射现象对作用于地下结构总体载荷的影响不大,可以用准静态的方法处理结构的强度问题。有人用模型试验方法证实了这一点。当爆炸点距离结构物比较近时,才需要考虑应力波的作用,这时当然也不宜採用弹性模型了。有人认为,只要结构处于严重破碎圈之外,它的防护问题是可以解决的。

四超高速碰撞、聚能射流与穿甲

这类问题首先是从炮弹、炮弹的穿甲问题开始的。目前穿甲弹的速度已到达1.5—1.7公里/秒。二次世界大战发展了聚能射流破甲弹,它的射流速度可达7—8公里/秒。第三种弹丸是碎甲弹。增加弹丸的侵彻(穿透)能力,提高装甲的抗侵彻能力是要研究解决的中心问题。

洲际导弹,宇宙航行提出了新的问题,因为外层空间存在着大小不等的隕石,它们运动的速度很高,因此就发生了与导弹或宇宙飞船相碰撞的问题以及由此而引起的防护问题。隕石的飞行速度为每秒几十公里,因此这类碰撞被称为超高速碰撞。

1.超高速碰撞

十余年来,超高速碰撞方面的工作是比较多的。在美国开过多次超高速会议。为了进行这项研究,发展了多种超高速试验装置,其中有轻

气炮，电磁炮，利用炸药或水下爆炸丝推动等多种装备。

根据巴泰尔纪念研究所 (Battelle Memorial Institute) 64年统计，在美、加、英有151台使用中的加速器，其中80%是双级轻气枪式的，速度可达每秒11.3公里 (弹重0.044克) 或每秒4.7公里 (弹重2.5公斤) 。有这种装置的单位很多，如美国新墨西哥矿业学院 (New Mexico School of Mines) ，阿诺尔德工程发展中心 (Arnold Engineering Development Center) ，美国航空和宇宙航行局 (NASA) 的艾姆斯研究中心 (Ames Research Center) ，通用动力公司防务研究实验室 (General Motors Defense Research Laboratories) 。从事这项研究的还有加拿大兵器研究发展研究所 (Canadian Armament Research and Development Establishment) ，英国皇家兵器研究发展研究所 (Royal Armament Research and Development Establishment) ，美国海军军械实验所等。

应用聚能射流加速器，弹丸速度可达每秒16.5公里，但弹丸的质量和形状不易测定。应用其他推动原理可以达到更高的速度，但弹丸的质量很小。

美帝一个时期以来进行了大量试验与理论研究。大量超高压状态方程的研究也是和这个问题有联系的。通过研究，基本明确了超高速碰撞的机理，建立了若干经验公式，提出了计算模型。这些模型大都限于碰撞初期的可压缩流体运动阶段，仅对后期运动的材料强度因素作一些修

计。在试验配合下，对弹坑或穿透的一些参数能够做出某些合乎实际情况的预测。

实践证明，在外层空间遇到陨石的机率是不高的。从防护角度看，只需考虑一些质量很小的陨石，因此问题没有原来设想的那么严重。目前飞船採用双层壳结构，中间放陶瓷或其他物质。外层的作用是使陨石粉碎或气化以减弱其对内层的破坏作用，内层是保证壳体的密封性。

据报导，在美国已将这方面的部分科研力量转入穿甲问题。还应当指出，超高速碰撞和地面爆炸在理论上是基本相同的。

2. 穿甲、聚能射流

二次世界大战以来，常规武器有飞速发展，特别是进攻性武器发展很快。目前从人体、飞机、军舰的防护装甲到装甲车辆，坦克的防护，在国外，特别是美帝和苏修，都集中大量人力物力进行研究。近十年来这方面的工作虽然有很大的进展，但距离有效的实用防护还有很大的距离。从力学角度看需要进一步明确弹丸与装甲的作用原理和力学过程，明确侵彻与弹丸参数和装甲参数间的关系，为发展新弹种和新装甲提供理论依据。

研究工作大体包括以下几个方面：

(1) 各弹种的穿甲过程及其特点的研究

对各种弹的加载方式，弹和装甲的破坏方式以及它们的特点，除了进行定性观察外，使用电学测量和光学测量（如高速摄影机）等手段，

进行一些参数的定量测量，以研究弹着甲板后的能量分配，速度变化，穿甲阻力，穿甲时间，装甲板的变形过程，应力，应变等。这方面国外对老弹种已做了一些工作，但研究得还很不够，特别是对一些新弹种如超速脱壳穿甲弹（目前反坦克武器中威力最大的一种弹）等的研究，发表的资料很少。

(2)从理论角度，对具有代表性的简化弹种，用理论计算或估算的方法，研究穿甲过程或过程的某些现象，例如应力应变分布，变形过程，能量的消耗，破坏过程等。这方面工作的难度较大，对计算机性能的要求较高，有的工作因为过于简化而脱离实际。这方面的工作没有超高速碰撞理论那么深入。但目前很多单位及力学工作者已从超高速碰撞问题转到穿甲问题方面来。

(3)从为防护设计直接提供数据出发，研究穿甲过程参量的经验或半经验公式，找出弹种，弹形，着速，着角，装甲材料的强度指标与侵彻深度之间的关系。早期工作多从总能量出发分析穿甲过程。这方面的工作还比较粗糙，搞出的公式和系数的局限性很大。

(4)从提高防护能力，寻找新材料，新结构的角度来研究，对不同弹种，如何防护是最有效的，以及如何确定材料的性能指标与抗弹性能之间的关系。目前除金属材料外，用于防护的还有陶瓷，玻璃钢等非金属材料。如何充分利用这些材料的潜力，发展新的复合装甲材料等，这些方面的工作很多，多是一些兵工厂，高等院校和专门研究机构结合起来

进行研究，进展也很大，如已使用到人体防护装甲方面。但用于坦克或装甲车的则不多。

(5)研究装甲板的非破坏性检验方法或建立抗弹性能鉴定的新方法。这方面的工作很多，除了一般工程材料力学或工艺性能鉴定方法外，也用爆炸的方法和模拟试验的方法。目前实弹打靶是检验装甲板的主要方法，但是这个方法浪费大，每年一个工厂仅这项检验费用就达数百万元，而且检验质量不能很好保证。因此各主要资本主义国家多在这方面集中了很多人力物力进行研究。

除穿甲弹外，对两种特殊弹种，破甲弹（聚能射流）和碎甲弹的穿甲机理的研究，在国外也受到重视。对射流穿甲而言，穿甲的初始阶段，材料的密度似乎起主要作用，但是到了后期，问题就不很清楚了。

从事这类研究工作的部门很多，在美国据不完全统计有：航空和宇宙航行局（NASA），载人宇宙飞船中心（Manned Spacecraft Center），通用动力公司防务研究实验室（General Motors Defence Research Laboratories），海军军械实验所（Naval Ordnance Laboratory），空军研究和发育司令部（Air Research and Development Command）所属单位，卡尼基理工学院（Carnegie Institute of Technology），麻省理工学院（Mass. Inst. of Tech.），水城兵工厂（Water Town Arsenal）等。

(五)爆炸加工和爆炸合成

爆炸加工自50年代开始以来，在工业上特别是在航空和空间技术上得到应用，60年代继续得到发展，应用的范围更加扩大。如果说50年代爆炸加工主要是由于大型钣金另件成形的需要，那末在目前，应用范围已经扩大到包括焊接，复合，爆炸合成金刚石，强化，硬化等，而且在进行着一些新的探索，如爆炸压实，爆炸复合带有另一种金属丝的组合材料，爆炸挤压等。60年代最突出的两项成就乃是爆炸复合和爆炸合成金刚石。前者首先由杜邦公司发展，在美、英、法、德等国取得专利，并投入生产。后者由斯坦福德研究所（Stanford Research Inst.）的德卡利（Decarli）所发现并取得专利。

美帝的一些大企业如从事航空和宇宙航行的制造厂“通用动力”（General Dynamics），“北美”（North American），洛克希德（Lockheed）等都把爆炸成形作为生产钣金另件的一种手段，土星火箭上的大型带筋封头就是用爆炸成形法成形的。巴泰勒纪念研究所则从事爆炸焊接，压实方面的工作。杜邦公司有专门生产爆炸复合板的基地，复合多种双金属板材，商品最大面积为300平方米，日产最高达100块。65年美国防务部为了推动爆炸成形的发展，使这项工作的研究放在更加巩固的理论基础上，组织马丁—玛丽埃塔飞机公司（Martin Marrietta）与丹佛尔（Denver）大学合作，建立了高能成形研究中心。这个中心的研究工作内容比较广泛，既从事爆炸加工的理论研究，也从事工艺方面的研究。自67年起，该机构每

二年组织一次高能成形国际会议，并发表会议论文集，第三次国际会议于71年举行。它的技术进展报告刊于AD·67年美帝海军军械系统司令部 (Naval Ordnance System Command) 责成在肯塔基 (Kentucky) 州的海军军械试验站 (Naval Ordnance Test Station) 建立高能成形示范生产设备以生产海军所需的器械装备。据69年报导，这个单位所进行的工作包括用以再生旧炮管的衬砌焊接，炮弹铜带的爆炸焊接，爆炸压实，爆炸复合固体润滑材料，水电与电磁成形等。美帝航空和宇宙航行局，工具与制造学会 (ASTME) 都组织过爆炸加工专门会议，出过文献总结或专门著作。锅炉制造厂 Babcock & Wilcox 则从事管道焊接方面的研究工作。

68年英国焊接学会召开过一次专门会议，讨论爆炸焊接问题，参加单位有英国的原子能部门，炸药厂，制造厂和贝尔法斯特女皇大学 (Queen's University of Belfast) 等。爆炸焊接不限于生产复合板，已扩大到锅炉，反应堆，压力容器，化学反应器部件的焊接方面。

苏联、日本、法国、德国在爆炸加工方面的工作也是很活跃的。

60年代发展了多种类型的高速压机，多数以压缩气体为能源，有的以爆炸气体为能源，少数小型的以炸药为能源例如美帝HE55型，能量为72300—397650呎磅，最大锤速为65呎/秒，最大冲程为 $12\frac{1}{4}$ 吋，模具面积为 $43\frac{1}{4} \times 43\frac{1}{4}$ 平方吋。最近报导又有550000呎磅的机器，可能是2045型，其设计为70吨米，模具面积为36X

~ 23 ~

3.6 平方吋 •

爆炸合成金刚石一般为微米级粉末。杜邦、通用电器公司 (General Electric) 等单位发展了以金属粉末为冷却剂的工艺方法, 使产率得到提高。据报导, 对粉末再次爆炸压实, 可获得颗粒度约一毫米左右的金刚石。

在爆炸加工领域中, 近几年最突出的是爆炸焊接。一方面因为这种方法是成功的, 而且在许多场合下能复合用一般方法难以复合的双金属。例如两种金属的熔点差别大, 强度差别大, 或者高温时容易形成脆性化合物等。另一方面是因为工业上对复合板的需求日益增加, 其应用遍及动力、原子能、石油、化工、造船等工业。近几年, 在各国爆炸加工的文献中, 爆炸复合所占比重最大。

从爆炸力学观点看, 需要研究的主要问题有:

(1) 钣金零件爆炸成形过程或机理的研究和爆炸载荷的研究, 为改进产品质量, 制订成形方案, 合理使用炸药, 合理设计成形装备, 提供理论根据和测试手段;

(2) 爆炸焊接机理的研究。研究复合板焊接质量与炸药, 爆炸参数, 几何参数和材料性质间的关系, 为复合工艺提供基本参数, 发展新的爆炸焊接工艺;

(3) 研究用炸药实现超高压的途径 (例如各种收缩爆炸), 成为合成新材料的手段;

(4)研究爆炸在机械加工中的新应用,如爆炸压实,爆炸复合新的组合材料,爆炸合成固体润滑材料等。

(六)动载荷作用下材料的力学性质

就一般核爆炸的防护而言,由于载荷作用时间比较长,所以材料力学性质的变化(相对于静载荷)不很显著,一般说在设计时可以适当地提高材料的强度极限。

爆炸点附近,爆炸所引起的冲击波的压力很大,所以近来对动态超高压固体(及液体)状态方程的研究很为重视,无论在美国、苏联、法国,都有类似的情况。使用方法为炸药直接作用或高速炮。例如美国华盛顿州立大学冲击动力学实验室(Shock Dynamics Laboratory),70年在美帝空军支持下建立了高速枪,直径10.16厘米,重量1100克,设计最高速度为1.05公里/秒,实际已达900米/秒。他们准备用来研究高速、高压下金属相变等有关的物理现象。

在美国的主要研究单位以洛斯·阿拉莫斯科学实验室为代表,一个长时期以来,对各种固态物质的超高压动态性质进行了大量细致、深入的工作。他们陆续发表了许多物质的超高压雨果尼奥数据,其中有金属,岩石,高分子等。应当注意的是,为了分析各种超高压现象,如地下核爆炸、穿甲等,除了物质的雨果尼奥数据外,还必须有它们的物态方程。美帝显然在这方面做了很多工作,但发表甚少,多数资料是保密的。

他们在做雨果尼奥曲线时,选定几种材料为基准。在几种基准相互

校核的基础上，测定其他材料的雨果尼奥曲线。所用测量手段基本上是光学的和电子学的。对于弹塑性对雨果尼奥曲线的影响，也做出了修正。

在压力较低时，由于物质的弹塑性性质，冲击波的构造出现复杂的情况，为此美帝进一步发展了试件表面质点运动速度的测量技术，现在能记录试件表面质点速度与时间的关系，分辨能力在0.1微秒以上。测量技术分为光学的与电子学的两大类。在光电系统中开始应用激光技术。电子学技术包括探针法，电动力法（用于非金属），压电晶体、钨铜丝，但最常用的仍为直流电容器法。

应用这类技术可以研究固体的非弹性性质以及卸载条件下它们的力学性质。

除了力学性质外，在金相与电磁性质方面也进行了很多的工作。

在超高压范围以外，苏联发表另外一些工作，主要是配合高速锻造，测量不同温度、速度下，材料的变形阻力和可塑性，供设计高速锤和模具以及选择工艺参数时参考。苏联锻压机械制造实验科学研究所（Экспериментальный Научно-исследовательский Институт Кузнечно-прессового Машиностроения）在这方面的的工作比较多。他们建立了一个火药驱动式高速锤，锤重3公斤，最大速度达100米/秒。明斯克机械研究所建立了一个凸轮式高速试验机，能量为20吨米，速度2—30米/秒。乌克兰一个研究单位，试验速度最大达到320米/秒。因为主要是配合工艺性的试验，设备能量一般都比较大，而且在测试方

~ 26 ~

法方面，都採用准靜態的方法，不考慮慣性的影響。

有關高速動應力應變關係方面的研究工作，近年來以採用霍布金森壓力杆的方法最多。把有關應力波的分析結合進去，使這個方法的应用範圍逐漸擴大，在測量技術上也不斷改進，由常溫到高溫，由壓縮試驗到拉伸試驗，由一般試驗到高靜水壓下的試驗等都有應用。已有的試驗結果，撞擊速度達300米/秒，應變率達 10^5 /秒，最大壓縮變形為70—80%。

近年來國外關於高能成形後零件性能變化方面的報導比較多，所試驗的零件種類，材料品種也比過去豐富得多，涉及的性能不外是硬度、強度、延伸率、疲勞強度、熱處理性能等。與常規成形方法相比，材料性能有一些不同，有的提高，有的降低，但总的效果並不至於對零件的使用產生明顯的影響。在微觀方面也應用電子顯微鏡，發克斯光進行許多工作。目前對宏觀性能的变化還不能做出規律性的解釋，因此高速變形條件下材料性能方面的知識仍然是比較缺乏的。

(四) 一些新的試驗裝置和測量手段

1. 爆炸源

(1) 爆炸絲或箔，它的特点是：如果能夠提高脈沖電流的強度，比一般炸藥更接近於核爆炸，因此美帝海軍軍械實驗所曾提出用此法模擬水下核爆炸時的气球運動。

(2) 美帝的一些工作表明，在強激光作用下，可使金屬箔迅速氣化，

~ 27 ~

产生爆炸。

2.美帝已开始采用激光作为纹影仪的光源，据说可以更深入地分析气体的运动。

3.美帝曾用玻璃模型研究地下爆炸。应用穆氏干涉图片的原理，可以求出瞬间冲击波波后的应变分布。

4.气体中的收缩爆炸。加拿大格拉斯 (Glass) 曾报导用爆炸气体引爆炸药，产生气体中的半球面收缩爆炸。可以设想用此法推动高速弹丸或作其他用途。

三 我们的看法

(一)我国发展爆炸力学的必要性和重要性

以上国外情况表明，爆炸力学的研究在国民经济和军事上有重要的意义。美帝国主义和苏修社会帝国主义为了称霸世界，侵略、压迫、剥削和奴役世界人民，竭力发展尖端和常规武器，都把爆炸力学领域中的研究放在重要位置上。他们所发表的一些资料只是他们在这方面实际工作的一部分，有时甚至是不很重要的一部分。他们力图用技术封锁来保持他们在这个领域中的领先地位。

我国国防和国民经济部门对爆炸力学的研究提出多方面的要求。因此，为了加速实现我国的四个现代化，打破美帝国主义、苏修社会帝国主义对我们的封锁，更加有力地支援世界革命，我们在这个领域内的科学研究工作无疑应当加强。

（二）发展爆炸力学应注意的几个问题

我国在爆炸及其应用方面做过不少工作，有许多实践经验，并且积累了许多资料，但是因为测量技术和理论工作跟不上，因此许多实际问题不能很好地解决。爆炸力学方面的工作既落后于当前形势，又不适应国防和工农业建设发展的需要。

因此我们认为，在理论联系实际的前提下，紧密结合国防和国民经济建设的需要，我们应当着重注意以下几个问题。

1. 加强基本理论的研究；
2. 加强试验技术和测量技术的研究；
3. 加强爆炸在国防和国民经济各部门中的应用研究；
4. 加强有关部门间的技术交流。

（三）爆炸力学目前应着重发展的几个方面

根据我国的实际情况，并遵循伟大领袖毛主席关于“备战、备荒、为人民”的教导，我们提出以下几个方面，作为目前应当着重研究的问题，供领导参考。

1. 继续开展空中、水下爆炸冲击波参数的试验与理论研究，建立模拟试验设备。进行核爆炸条件下，特别是高空条件下，火球—冲击波理

论的研究。研究水下爆炸对结构作用的理论，观测技术和模拟试验技术。

2. 继续开展岩石中爆炸的研究（地面，地下浅层，地下深埋），加强现场近区冲击波参数的观测，开展理论研究。

3. 加强超高压条件下，岩石、金属及其他有关物质的状态方程的研究。开展岩石、金属、土壤动态应力应变关系的研究。开展高温高压空气性质的研究。

4. 研究岩石、土壤中应力波的测量技术，特别是在所谓弹塑性区或非弹性区。

5. 开展穿甲理论的研究，激光穿甲问题也应提到日程上来。

6. 继续开展爆炸加工与爆炸合成的研究。

更正：本刊1972年第1期应作如下更正：

页	行	误	正
1	倒6	的滑度	的平滑度
1	倒5	縐文	縐紋
11	倒9	问题。	问题。”