

爆炸物理学

Ф. А. 鲍姆
К. П. 斯达纽柯维奇
Б. И. 谢赫捷尔

科学出版社

81.69
813

爆 炸 物 理 学

Ф. А. 鮑 姆
К. П. 斯达紐柯維奇 著
Б. И. 謝赫捷尔
众 智 譯

科 学 出 版 社
1953 年 5 月

Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер

ФИЗИКА ВЗРЫВА

Физматгиз, Москва

1959

內 容 簡 介

本书根据最新的科学水平,系统地論述了有关炸藥轉化規律及其在各种介質中的爆炸作用等一系列問題。书中詳尽地研究了炸藥的一般性質、在各种不同的物理化学因素下的轉化条件以及爆震和爆炸的过程;敘述了爆炸猛度和爆破作用,詳細地研究了聚能效应的理論,本书对非定常流的应用气体动力学也給予了极大的重視。

本书可供从事爆炸理論和实际工作的专家参考,也可作为爆炸物理学专业及有关学科的大学生和研究生的参考书。

爆 炸 物 理 学

Ф. А. 鮑 姆
К. П. 斯达紐柯維奇 著
Б. И. 謝赫捷尔

众 智 譯

*

科学出版社出版 (北京朝阳門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1963 年 6 月第 一 版

书号: 2748 字数: 657,000

1963 年 6 月第一次印刷

开本: 350×1168 1/32

(京) 0001—2,800

印张: 24 5/8 插頁: 3

定价: 4.50 元

序 言

炸藥在極短暫的爆炸瞬間能夠作出很大的功，按其效率，至今它是最大的能源之一。

在軍事上，炸藥应用于各種槍炮、彈藥和爆破工具，以達到發射和破壞的目的。在現代化戰爭的條件下，炸藥的作用極其重大，所用的數量也極多。此外，炸藥也廣泛地应用于國民經濟中進行建築和採礦工作，例如，用于開鑿運河，鑽眼爆破和拋擲廢石等等。水利工程採用爆破方法目前已被成功地用來解決與共產主義建設的宏偉計劃有關的問題。因此，研究爆炸物理問題以及有關爆炸的各種現象是極為重要的。

目前研究爆炸物理學及爆炸作用于周圍介質所發生的各種過程的書籍尚覺缺乏，本書試圖補充這一重大缺陷。

有關爆炸理論的詳細書籍直到目前仍然僅有 K. K. 斯尼特柯編著的教科書“炸藥理論”(第一冊 1934 年出版，第二冊 1936 年出版)和 H. A. 索科洛夫編著的“炸藥理論教程”。自這些著作出版以來的二十多年間，由于蘇聯和其他國家的學者所做的許多工作，爆炸理論已得到了迅速的發展。K. K. 斯尼特柯和 H. A. 索科洛夫的教程中所闡明的許多原理現在已經過時了。許多重要問題在實驗和理論研究方面都已得到了飛躍的發展，而有些只是在近年來才得到了解決，自然在上述書中不是根本沒有談到，就是闡明得相當不夠。

現在，由于廣泛運用了氣體動力學、理論和實驗物理學、物理化學等學科的方法，爆炸物理學已經有可能從分析的观点來描述一系列過去最多只能定性地解釋的複雜現象，从而使爆炸物理學成了一門相當嚴密的、包括一系列極其重要而又複雜的理論与应用問題的科學。因此，對爆炸物理學的大量零星和相互矛盾的研

究材料作一次批判性的总结是必要的。

本书内容和材料的编排基本上符合爆炸物理学的现代概念。鉴于本书不仅应当记载若干问题已达到的现代水平，而且还应指出其进一步发展的远景，因此作者认为有必要以提出问题或初步研究的方式，扼要地阐述某些照作者看来在现代科学和技术中具有现实意义的问题。可以认为，这样本书不仅有益于这门重要学科的科学工作者，而且对与本专业有关的物理和力学系学生也是有帮助的。

书中详细研究了爆炸所产生的各种物理现象，但毫未涉及原子爆炸的问题，作者认为，原子爆炸的特性应在专著中详述。但是冲击波在各种不同介质中传播的某些规律，也同样适用于原子爆炸作用的分析。本书对非定常流气体动力学的应用问题给予了相当的重视，没有它们，是无法研究爆炸物理学的问题的。

本书的出版是编著现代爆炸物理学专著的初次尝试，因而缺点错误在所难免，对读者提出的指正意见，作者将不胜感谢。

Ф. Н. 鲍姆编写了本书第一、二、四、五、六、七、八、十章；К. П. 斯达纽柯维奇编写了第十三和十四两章；Б. И. 谢赫捷尔编写了第三、九和第十五章；鲍姆和斯达纽柯维奇合编第十一和十二两章；其中 § 46 为谢赫捷尔所编写；§ 86 为斯达纽柯维奇和鲍姆所合编；补充材料为斯达纽柯维奇所编写。

作者感谢 М. А. 萨道夫斯基、А. С. 康巴涅也茨和 Г. И. 波克罗夫斯基在审查初稿时所提出的宝贵意见。

目 录

序言	vii
第一章 炸药的一般特性	1
§1. 爆炸现象	1
§2. 爆炸过程的分类	6
§3. 炸药的分类	7
第二章 炸药对外界作用的敏感度	13
§4. 初始冲量或起爆冲量	13
§5. 炸药的热冲量敏感度	14
§6. 炸药的冲击敏感度	20
§7. 炸药的针刺及摩擦敏感度	28
§8. 射击时炸药的震动敏感度	32
§9. 炸药对起爆药的敏感度	34
§10. 在冲击和摩擦下爆炸的引发	36
§11. 炸药敏感度与各种因素的关系	45
§12. 炸药的热分解	59
第三章 炸药的热化学	69
§13. 概論	69
§14. 热效应的计算	72
§15. 热效应的实验测定	82
§16. 爆炸温度	84
第四章 爆炸分解反应	97
§17. 概論	97
§18. 爆炸产物成份的理论计算	99
§19. 爆炸产物的实验研究方法	128
第五章 气体动力学原理	133
§20. 气体动力学方程	133
§21. 伯努利方程	138

§22. 气体的一維等熵运动	139
§23. 气体动力学方程的特征	142
§24. 定常等熵流	149
§25. 先前靜止的气体的单向飞散	151
§26. 气体一維等熵运动的通解	154
§27. 中心稀疏波由固壁的反射	161
§28. 气体由柱形容器向管子作双向流动	168
§29. 产生冲击波的条件	170
第六章 冲击波的基本理論	172
§30. 基本关系式	172
§31. 平面正冲击波	175
§32. 斜冲击波	188
§33. 冲击波的声学理論	195
§34. 能量在冲击波中的耗散	198
§35. 有离解和电离过程的空气中的冲击波	199
第七章 爆震波理論	215
§36. 一般特性和基本关系式	215
§37. 化学反应动力学对爆震波性質及其形成机理的影响	221
§38. 混合气体爆震波参数的計算	226
§39. 气体密度对爆震速度的影响	232
§40. 凝聚炸药的爆震理論	235
§41. 稳定爆震的极限条件	249
§42. 爆震波陣面后爆炸产物状态参数的分布	256
第八章 爆震过程的激发和传播	261
§43. 爆震过程的激发	261
§44. 爆震过程的传播	268
§45. 爆震波陣面上化学反应发生和发展的机理	286
§46. 爆炸过程速度的实验測定方法	291
第九章 冲击波在介質分界面上的初始参数	305
§47. 冲击波从不形变平面障碍物上的反射	305
§48. 爆炸产物飞散时产生的冲击波的初始参数	315
§49. 冲击波在某些介質中的初始参数	338

第十章 炸药燃烧	350
§50. 炸药燃烧过程的基本特点	350
§51. 气体热点火与链式点火的理论	352
§52. 气体的燃烧	369
§53. 凝聚炸药的燃烧	381
§54. 火药的燃烧	395
§55. 燃烧到爆震的过程	401
第十一章 炸药猛度	412
§56. 猛度的理论估算方法	412
§57. 爆震波由壁反射时的冲量	415
§58. 冲量的实验测定方法及结果	421
§59. 炸药猛度的实验测定方法	426
§60. 作用在装药外壳侧面上的冲量计算	434
§61. 测定碎片由装药侧面飞散的速度	441
§62. 爆炸产物对物体的一维抛射	447
第十二章 聚能效应	453
§63. 概论	453
§64. 爆炸产物由装药斜面上飞散	455
§65. 聚能装药的有效部分	461
§66. 有金属罩的凹槽聚能效应	467
§67. 聚合射流理论的要点	476
§68. 有金属罩时聚能理论的要点	481
§69. 金属罩压缩不均匀性对聚能射流速度分布的影响	493
§70. 聚能射流穿甲作用的理论	500
§71. 聚能射流的运动	503
§72. 聚能射流穿甲作用理论的物理基础	507
§73. 射流与障碍物相遇时的穿甲速度与压力	509
§74. 穿甲深度的计算	514
§75. 穿孔直径的计算	517
§76. 快速旋转对聚能射流稳定性及其穿甲作用的影响	518
§77. 关于聚能射流的稳定性	520
§78. 超速聚能	525

第十三章 空中爆炸·····	537
§79. 爆炸时产生的主要物理现象·····	537
§80. 爆炸产物的一维飞散·····	546
§81. 爆炸产物从斜切面的飞散·····	561
§82. 爆炸产物向空中的飞散·····	570
§83. 传播过程的极限“声学”阶段·····	574
§84. 点爆炸理论。强自相似冲击波。强聚合波·····	582
§85. 球形爆炸·····	608
§86. 装药特有的运动速度对爆炸效应的影响·····	624
§87. 爆炸破坏作用实验研究的若干结果·····	628
第十四章 密实介质中的爆炸·····	647
§88. 冲击波在密实介质中的传播·····	647
§89. 球面冲击波在水中的传播·····	664
§90. 液体中爆炸理论的若干问题·····	674
§91. 气体-液体-发射体系统的拉格朗日问题·····	683
§92. 波在固体中的传播·····	693
§93. 地下爆炸的理论基础·····	703
§94. 抛射爆炸·····	718
§95. 隕石对固体表面的撞击·····	729
第十五章 殉爆·····	738
§96. 空气中的殉爆·····	738
§97. 密实介质中的殉爆·····	754
§98. 炮眼中的殉爆·····	761
附录 气体聚能理论的补充·····	764
参考文献·····	776

第一章 炸藥的一般特性

§ 1. 爆炸現象

广义地說来，爆炸是一种系統的非常迅速的物理的和化学的轉化过程，在这个过程中，系統的势能轉变为机械功。爆炸所作的功是由气体或蒸汽的迅速膨胀产生的，不管它們是在爆炸时形成或是在爆炸前就已經存在。

爆炸的一个最重要的特征是爆炸点周围介质的压力发生急剧的突变。这就是爆炸的破坏作用的直接原因。

爆炸可以由各种不同的物理現象或化学現象所引起。

由物理原因所引起的爆炸，有下面几个例子：

1. 蒸汽鍋炉或装压缩气体的气筒的“爆炸”。前一种爆炸是由于过热的水迅速轉变为蒸汽而引起的；后一种則是由于气筒的气体压力过高而引起的。在这两种場合下，爆炸都是由于克服了容器壁的阻力而产生的，其破坏作用取决于容器中蒸汽或气体的压力。

2. 强火花放电(如閃电)或高压电流通过細金属絲时产生的爆炸。

强放电时，电势差在 10^{-6} — 10^{-7} 秒內展平，因此，放电区达到极其巨大的能量密度和极高的温度(数万度)，这就导致放电区空气压力的急剧上升和强扰动在周围介质中的传播。

細导綫在电能作用下的爆炸是由于金属突然轉变为气态而引起的；此时温度达到 20000°C 左右。

基于这类物理現象的爆炸实际上是极少利用的，它主要是專門的科学研究的对象。

下面我们只想研究炸藥的化学反应过程所引起的爆炸。

炸药,从热力学意义上说来,是相对不稳定的系统,它在外界作用的影响下能够发生极迅速的放热反应,同时生成极热的气体或蒸汽。

爆炸产生的气体,由于化学反应速度极其巨大,在最初时刻实际上只占有炸药本身的体积,并且照例处在强烈压缩的状态中,结果,爆炸点附近的压力便急剧地提高了。

从上述情况得知,化学系统发生爆炸转化的能力取决于下列三种因素:过程的放热性,过程的巨大传播速度和气态(蒸汽态)反应产物的存在。这些性质在不同的炸药中可以有不同程度的表现,但是,只有它们集合起来才能使现象具有爆炸的性质。

现在我们来分别研究这三种因素的意义。

反应的放热性。热的放出是第一个必要条件,没有这个条件,爆炸过程根本不可能产生。假若反应不伴有热的释放,那么,反应便不可能自发地进行,因而也不可能出现爆炸的自动传播。显然,要求以外界能源来维持其分解的物质,不可能具有爆炸的性质。

依靠反应的热能,气态产物被加热到数千度,随后发生膨胀。反应热和反应的传播速度愈大,则爆炸的破坏作用也愈大。

反应热是炸药工作能力的一个标志,也是它的一个最重要的特性。

在工程技术所广泛应用的现代炸药中,爆炸转化热介于 900 到 1800 千卡/公斤之间。

过程的高速度。一个最突出的使爆炸区别于一般化学反应的不同点是:爆炸过程具有很高的速度。炸药向最终的爆炸产物的转变是在数十万分之一秒或数百万分之一秒内发生的。放出能量的巨大速度正是炸药较一般燃料的优越之处。但是,从相等重量的总能量贮藏说来,能量最丰富的炸药也比不过一般的燃料系统,不过在爆炸时,它却能达到高得无法比较的体积浓度或能量密度。

例如,这可从表 1 所援引的数据中看到。

一般燃烧物质的燃烧进行得比较慢,这使得反应产物在过程的进行中发生相当程度的膨胀,并使放出的能量通过热传导和辐

表 1. 某些炸药和燃料混合物的爆炸热及热值

炸 药 或 燃 料	一公斤炸药或燃烧混合物的爆炸热或热值(千卡)
低氮硝化纤维素(13.3%N)	1040
硝化甘油	1485
苯与氧的混合物	2330
碳与氧的混合物	2130
氢与氧的混合物	3230

射而严重地散失。由于这种原因,在这种情况下,在燃烧产物中只能达到相对低的体积能量密度。

相反地,爆炸过程则总是进行得如此之快,以致可以认为全部能量实际上只来得及在炸药本身所占据的体积中放出,这就导致在一般化学反应进程中所无法达到的、高度的能量集中。

近来在技术中得到应用的凝态(液体或固体)炸药,在爆炸时达到特别高的能量密度。这是由于炸药的比容比气态燃烧混合物的比容小得多(见表 2)。

表 2. 某些炸药和燃料混合物的能量体积密度

炸药或燃料混合物名称	每升炸药或燃料混合物的能量体积密度(千卡/升)
低氮硝化纤维素(13.3%N)	1350
硝化甘油	2380
碳与氧的混合物	4.1
苯蒸汽与氧的混合物	4.4
氢与氧的混合物	1.7

表中所援引的燃料(碳、苯)的数字系根据如下假设计算的,即假设这些物质的燃烧完全是在相应混合物所占据的初始体积中完成的。

从上述数据中可以看出,标准炸药爆炸所达到的体积能量密度超过一般燃烧物质的体积密度数百倍乃至数千倍。正是这一点使得炸药爆炸具有了巨大的功率和破坏作用。

但是必须承认,许多作者为了清楚地表明爆炸条件下的反应

速度值而采用的推算爆炸功率的方法是站不住脚的。为了定量地估算爆炸功率,他们采用了下面的关系式:

$$B = \frac{MQI}{\tau} = \frac{MQID}{l}, \quad (1.1)$$

式中 B ——爆炸功率, M ——炸药装药重量, τ ——爆炸在炸药装药中的传播速度(秒), Q ——爆炸热(千卡/公斤), I ——热功当量, D ——爆炸的直线传播速度, l ——装药长度。

根据这个公式,在给定有限的 Q 值时,爆炸功率应该随时间 τ 的减小而无限增长,即当 $\tau \rightarrow 0$ 时, $B \rightarrow \infty$ 。

公式(1.1)之所以没有根据,是由于它错误地采用了与爆炸在装药中的传播速度 D (或在爆炸分解反应过程中能量的释出速度)成比例的量,作为爆炸功率(即爆炸产物在单位时间内所能作的功)的标准。

应当指出,单位体积爆炸产物在其自由地流向真空的条件下的功率,应该与 ρq^3 成比例,其中 ρ 为爆炸产物密度, q 为爆炸产物流向真空的速度。

关于爆炸转化过程进行的速率,一般是根据炸药装药中爆炸的直线传播速度的数据来判断的。现代技术中应用的各种炸药的最大爆炸传播速度 D ,在 2000 到 9000 米/秒之间。

气体的形成。假如化学反应不伴有相当大量气态产物的形成的话,那么在爆炸时就不可能达到高压及由高压所引起的破坏效应。在爆炸的瞬间处于强烈压缩状态的这些产物,是在其膨胀过程中迅速实现炸药势能转变为机械功或运动气体动能的物理因素。

某些炸药气态爆炸产物的体积(在标准物理条件下)示于表 3。

由此可见,一升普通炸药可以产生 1000 升左右的气态产物,它们在爆炸瞬间处在非常大的压力之下。

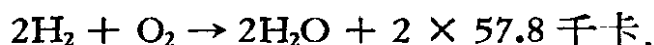
在凝态炸药爆炸时,最大压力可达数十万大气压。这类现象在一般化学反应的条件下当然是无法实现的。

表 3. 某些爆炸产物的体积

炸 药 名 称	气态爆炸产物体积(升)	
	每公斤炸药	每升炸药
低氮硝化纤维素(13.3%N)	765	995
苦味酸	715	1145
梯恩梯	740	1180
硝化甘油	690	1105

当气态系统爆炸时,体积一般不会增大;在某些场合下,爆炸转化甚至还伴有体积的减小。

爆鸣气体的爆炸就是这种反应的例子:



由于爆炸的结果,体积减小了三分之一。不过,体积的减小为过程的放热性和速度所补偿了,因此爆炸时的压力仍可达到 10 大气压。

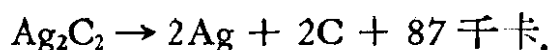
在爆炸过程中形成气态产物这个因素的意义,可通过一系列不形成气态产物的反应看出。其中最简单的这类反应是我们所熟知的热剂反应:



这种反应通常不发生爆炸,尽管反应的热效应足以把最终产物(Fe, Al₂O₃)加热到 3000℃,在该温度下它们仍然处于液体状态。在大量热剂混合物着火的条件下,有时可以观察到在性质上类似于一般爆炸的现象。对这类爆炸的分析导致如下结论:这类爆炸主要是由于周围空气以及热剂混合疏松物质所含的空气被加热和膨胀而引起的附带现象的结果。此外,由于空气中有氧,炽热的粉末状脂也可能有一部分发生非常迅速的燃烧。在这种情况下,反应产物之一 Al₂O₃ 就有一部分处在粉末状态中。

与热剂混合物及其类似的混合物不同,有一系列物质虽然在其分解时会形成在正常条件下处于固态的产物,但却具有炸药的全部特性。

这类物质的一个典型例子是乙炔银,它很易按下式发生爆炸:



显然，在反应的温度条件下，银的行为应该与单原子气体相同。

这样，根据我们上面所确定的定性规律，可以得出结论说，只有三种基本因素——放热性、过程的速度和气体的形成——同时结合起来，才能够保证现象具有使它得到正常爆炸性质的总合特性。

§ 2. 爆炸过程的分类

根据化学反应的激发条件、炸药的性质和某些其它因素，爆炸转化过程可能以不同的速度传播，同时在性质上也具有重大的区别。

我们所了解的各种爆炸过程，按其传播的性质和速度，可分为以下主要的三种：燃烧、爆炸和爆震。

燃烧过程进行得比较缓慢，并且其速度是变化着的——通常从每秒几分之一厘米到每秒数米。燃烧速度与外界压力有重大关系，它随着后者的提高而显著地增加。

燃烧过程在大气中进行得比较缓慢，并且不伴有任何显著的声效应。

但是，在有限的容积中，过程的进行便强烈得多，此时过程的特点是压力多少有较快的上升，而气态燃烧产物能够作出抛射功，就象射击时一样。燃烧是火药爆炸转化的典型形式。

与燃烧相比较，爆炸在过程传播的形态上有重大的本质的区别。

爆炸的特点是：爆炸点压力急剧地突变，过程的传播速度是可变的——每秒达数千米，并且与外界条件的关系不大。爆炸的作用性质是气体急剧地冲击周围介质，因此能导致爆炸点附近物体的碎裂和强烈变形。

爆震是以恒定的、对一定炸药和一定条件而言为最大的、超过该物质中声速的速度而传播的爆炸。从现象的特性和本质说来，

爆震与爆炸并无不同之处,不过它是爆炸的定常形态。

对每一种炸药说来,爆震速度在给定条件下是一个固定的常数,这是它的最主要的特性之一。在爆震条件下,爆炸具有最大的破坏作用。

爆炸和爆震过程,就其传播的性质而言,和燃烧过程有重大的不同:燃烧是通过热的传导、扩散和辐射在炸药质量中传播的,而爆炸和爆震则是通过冲击波压缩物质而传播的。

各种不同形式的爆炸转化特性将在以下各章较详细地讨论。

§ 3. 炸药的分类

目前有大量炸药是我们所熟知的,它们在成分或物理化学性质及爆炸性质上均各有不同。因此,为便于对现有的各种炸药进行研究,将其进行适当的分类是必要的。

所有炸药可分为两大类:爆炸化合物和爆炸混合物。

爆炸化合物是相对不稳定的化学系统,它在外界作用的影响下能够发生迅速的放热转化,结果,导致分子内键的完全断裂,自由原子(或离子)随后复合成热力学上稳定的产物。

这类炸药多数都是含氧的有机化合物,它们能引起局部或全部分子内燃烧。

但是,也有相当大量的不含氧的吸热的爆炸化合物,它们在爆炸条件下分解成其组成元素。这类化合物的例子有迭氮化铅,它在爆炸时分解成自由氮和铅,放出的能量等于迭氮化物形成时的生成热。

这类化合物通常具有不够牢固的分子结构,和对外界作用的高敏感度,这就大大限制了实际应用它们的可能性,甚至往往排除了实际应用它们的可能性。

这种不牢固的化合物的实例有氮的卤化物和硫化物,例如, NCl_3 , NH_2 , N_4S_4 等等,它们容易在极小的机械作用下发生爆炸。

按照范霍夫(Vant-Hoff)的意见,爆炸化合物的不稳定性是由于其分子中有着特殊的所谓爆炸性原子络合物而引起的,属于这

类絡合物的有

$C\equiv C$ 基——存在于乙炔衍生物中，

$N-X$ 基——存在于氮的卤化物中，

$N=N$ 基——存在于迭氮化物、重氮化物和四氮化物中，

$N=C$ 基——存在于雷酸盐中，

$N=O$ 基——存在于硝酸盐和硝基化合物中，

$O-O$ 基——存在于过氧化物和臭氧化物中，

$O-Cl$ 基——存在于氯酸盐和高氯酸盐中。

爆炸混合物是至少由两种在化学上不相联系的组分所构成的系統。混合物组分之一通常为含氧相当多的物质，另一组分则相反，是根本不含氧的、或含氧量不足以发生分子完全氧化的燃烧物质。

爆炸混合物是气态、液态、固态或多相系統。

气态混合物由于它在爆炸时所能得到的能量密度很小，故在爆炸技术中没有得到实际的应用。但是，气态混合物具有巨大的科学意义。由于对这种混合物的研究，使得在研究爆炸的传播过程以及爆炸反应机理和动力学方面取得了许多重大的结果。

具有爆炸危险的气态混合物，是各种实际工作所经常遇到的。例如，在煤矿矿井所常见到的一种可燃气体，就是甲烷和空气的混合物。

液态爆炸混合物的燃烧组分通常是燃烧时具有巨大热效应的物质，例如，苯、甲苯、一硝基化合物等等。在液态混合物中，常常用有烟硝酸和四硝基甲烷作为氧化剂。

这类液态混合物是功率相当高的炸药，但由于它们的敏感度高，用起来很不方便，在实践中也少采用。

固态爆炸混合物的种类是非常之多的，在民用或军用技术中，它们均得到了广泛的应用。根据其组成中氧化剂化学性质之不同，它们相应地分为几类，其中最重要的是硝酸铵炸药或阿梅尼特。这类炸药的基本组分是硝酸铵 NH_4NO_3 ，其含量在不同的炸药中介于 40 到 95% 之间。炸药的燃烧组分采用各种硝基芳香族爆炸