

爆破器材与工程爆破新进展

汪旭光

(北京矿冶研究总院, 北京 100044)

[摘要] 简要叙述了近5年来国内外爆破器材和工程爆破新进展, 指出了未来的发展前景。

[关键词] 炸药; 起爆器材; 爆破

[中图分类号] TQ560 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)04-0036-05

1 概述

众所周知, 黑火药是我国四大发明之一, 曾经享誉全球, 延续了数百年之久。1865年, 瑞典化学家 Nitro Nobel 发明以硝化甘油炸药为主要组份的 Dynamite 炸药。该炸药占据工业炸药主导地位达100年之久。20世纪50年代中期, 世界工业炸药进入了以廉价硝酸铵为主体的硝酸铵类炸药新时期, 同时带动了工业电雷管等起爆器材和工程爆破技术的快速发展。其主要标志是: 多孔粒状铵油炸药、含水浆状炸药、水胶炸药、乳化炸药等新型工业炸药的发明及露天炮孔装药机械化; 1~30段毫秒延时电雷管、塑料导爆管和毫秒延时非电雷管、低能导爆索和起爆药柱等新型起爆器材的出现; 大区微差与预装药爆破、预裂爆破、光面爆破、球(条)形药包硐室爆破、垂直漏斗球形药包爆破(VCR)等一系列新型爆破技术及爆破数学模型的应用^[1~7]。值得指出的是, 最近五六年来, 工业炸药、起爆器材和工程爆破正朝着精细化、科学化和数字化方向发展, 而且三者结合更为紧密、互相促进、协同发展。

2 工业炸药

2.1 工业炸药的新品种

2.1.1 乳化粉状炸药^[6] 乳化粉状炸药习惯上又称为粉状乳化炸药, 是一种我国拥有自主知识产权

的新型工业炸药。它以含水量较低的氧化剂溶液的细微液滴为分散相, 特定的碳质燃料与乳化剂组成的油相溶液为连续相, 在一定的工艺条件下, 通过强力剪切形成油包水型乳胶体, 这种乳胶体通过雾化制粉、冷却形成一种新型粉状硝酸铵炸药。

乳化炸药的发展给爆破器材带来了革命性的进步, 但由于它的乳胶状态给生产、运输、贮存等带来了一定的不便, 习惯势力的驱使及使用、运输上的便捷, 粉粒状炸药一直是人们最易接受的品种。在我国, 粉状铵梯类炸药一直居于主导地位, 但由于这种炸药污染较大, 生产不能实现连续化和自动化, 严重制约着我国民用炸药的进一步发展。粉状乳化炸药改变了传统乳化炸药的药体概念, 可根据不同的作业对象, 生产出不同粒径、不同密度的粉状炸药, 这是民用炸药技术的一次重大突破。

2.1.2 具有雷管感度的重 ANFO^[5] 重铵油炸药是由不同比例的乳化炸药(乳胶体)与多孔粒状 ANFO 混制而成的。这样, 仅通过改变二者不同比例, 就可以调节这种炸药的密度与能量, 适应了炸药性能与爆破对象紧密、精确匹配的爆破最新发展趋势。早期的重 ANFO 不具有雷管感度, 随着炸药技术的不断进步, 目前具有雷管感度的重 ANFO 已投入使用, 这就取消了起爆药柱, 可大大降低爆破成本、简化作业工序。

2.1.3 雷管敏感的小直径散装乳化炸药 小直径散装乳化炸药可通过泵送到相应炮孔中, 使小直径

[收稿日期] 2001-12-11

[作者简介] 汪旭光(1939-), 男, 安徽枞阳人, 中国工程院院士, 北京矿冶研究总院教授、博士生导师

炮孔的装填效率成倍提高，同时炸药与爆破作业对象紧密匹配，具有良好的爆破效果，简化了炸药生产工序，大大降低了炸药生产及爆破作业的成本。特别是雷管敏感的小直径散装乳化炸药的成功开发，为地下矿山工程炸药装填的机械化铺平了道路。

2.1.4 膨化硝酸铵炸药 硝酸铵经过在复合表面活性剂作用下膨化、析晶的物理化学过程，从而制得轻质、疏松、多孔的膨化硝酸铵。膨化硝酸铵颗粒中含有大量的“微气泡”，颗粒表面被“歧性化”、“粗糙化”，当其受到外界强力激发作用时，这些不均匀的局部就可能形成高温高压的“热点”进而发展成为爆炸，实现硝酸铵的“自敏化”。目前，膨化硝酸铵炸药在我国获得了比较广泛的应用，也是我国拥有自主知识产权的新品种。

2.1.5 能量可变的 NOVALITE 炸药^[8] 澳大利亚 Orca 公司在 2000 年下半年推出了能量可变的 NOVALITE 炸药。它包括 5 个品种，即：NOVALITE1100、800、600、450、300，其密度变化范围为 $1.1\sim 0.3\text{ g/cm}^3$ ，爆速变化范围是 $4\ 500\sim 2\ 000\text{ m/s}$ 。应该说，将炸药的密度调节至 0.3 g/cm^3 ，并能保持稳定的爆轰状态，这是低密度炸药技术的一次突破。该系列炸药在澳大利亚矿山软岩爆破作业中获得了实际应用，它还可以在预裂爆破、光面爆破和振动敏感区域爆破作业中使用。据称，与传统炸药相比，该系列炸药具有成本低、爆破效果好的特点。

2.2 现场混装技术^[5]

2.2.1 露天散装系统 一般来说，露天散装系统包括多孔粒状铵油炸药混装车、乳化炸药混制装药车、重铵油炸药装药车。其混制装药设备与技术已经比较成熟，应用范围也比较广泛。但是，近年来随着乳胶基质视作硝酸铵水溶液，允许作为非炸药类危险品在公路上运输，乳胶远程配送系统与重铵油炸药装药车，已成为一个重要发展方向，其应用范围越来越广泛。国内有关专家已密切注意这一动向，并取得了可喜的进展。

2.2.2 地下散装系统 在地下矿山采掘和隧道掘进爆破作业中，炮孔直径通常为 $32\sim 60\text{ mm}$ 。由于高粘度乳胶基质在小直径软管中输送阻力过大和小直径炮孔内快速敏化技术的限制，使得乳化炸药散装装药技术在地下爆破作业中难以实现。近年来，“水环减阻技术”和小直径软管快速渗混敏化

技术的突破，为乳化炸药地下散装系统成功应用提供了可靠的技术条件，澳大利亚 Orca 公司和我国北京矿冶研究总院各自独立地推出了乳化炸药地下装药车系统，并在地下矿山和隧道掘进中获得了推广应用。

3 起爆器材

3.1 数码电子雷管^[9]

数码电子雷管是起爆器材领域里最为引人瞩目的进展，其本质在于用一个微型集成电路块取代普通电雷管中的化学延时与电点火元件。它不仅控制延时精度，而且也控制了通往雷管引火头的电源，从而最大限度地减少了因引火头能量需求所引起的误差（通常可控制在 0.2 ms 以内）。这种起爆系统配合专用的具有特定编码程序的点火设备，改善了操作的安全性。电子雷管各段之间的延时间隔通常为 2 ms ，延时误差为 0.2 ms 。数码电子雷管为爆破设计提供了创新的手段，已在加拿大、美国、南非、澳大利亚、瑞典等有关矿山获得了实际应用，例如 2001 年 7 月加拿大 Noranda 公司在其所属的 Branswick 地下矿山，利用 Orca 公司的 I-Kon 系列数码电子雷管成功地进行了大型卸压爆破，回收了用一般爆破方法难以回收的 $36\times 10^4\text{ t}$ 铅锌矿石。

目前，数码电子雷管的价格仍较贵，但应用实践表明，使用数码电子雷管操作简便、延时精确、安全性能及爆破效果良好，综合效益足以抵偿价格上的差异。目前，我国在数码电子雷管研制处于起步阶段，与国外有较大差距。

3.2 遥控起爆系统^[10]

澳大利亚矿山现场技术公司和澳瑞卡公司合作相继推出了适用于不同作业场所的遥控起爆系统，其中 BLASTPED 型遥控起爆器，可用于露天和地下爆破作业，BLASTPEDEXEL 型遥控起爆器只能用于露天爆破作业。这两种型号遥控起爆器既可以用于电雷管（包括数码电子雷管）起爆系统的遥控起爆，也可以用于塑料导爆管非电起爆系统的遥控起爆，适用范围广泛，遥控引爆率很高，已在澳大利亚矿山爆破作业中获得推广应用。在爆破作业安全警戒线以外的适当位置进行遥控起爆，使起爆作业更加安全可靠。应该说，这是起爆技术与装备的一次重要变革。

3.3 低能导爆索及起爆系统^[5]

导爆索通常可分为三类：高能导爆索（ $70\sim 100$

g/m)、普通导爆索 (32 g/m)、低能导爆索 (6 g/m、3.6 g/m)。目前已将低能导爆索的装药量降为 1.6 g/m, 这就为爆破设计提供了一些新的手段。低能导爆索起爆系统由小直径低能导爆索和延时雷管组成。通常用铺在地面上的普通导爆索起爆炮孔中的低能导爆索, 通过爆轰波点燃雷管的延期元件使雷管爆炸, 进而引爆炸药。其优点是低能导爆索不会对炮孔内的炸药产生动态压死等不良影响, 也不会出现切断和早爆的危险, 无外来电的危险。

3.4 微型起爆药柱^[5]

起爆药柱是随着铵油炸药、浆状炸药等钝感炸药及现场混装技术的发展而涌现的一类中继起爆器材, 通常是露天爆破作业提供的 500 g/只高能起爆 (如 TNT、PETN、RDX) 药柱。微型起爆药柱是为小直径 (25 mm, 32 mm 等) 炮孔爆破作业设计, 一般只有 10 g/只、5 g/只, 甚至更小, 通常是用高能塑性炸药制备的。这种微型起爆方式更有利于小直径炮孔内炸药能量的释放, 获得良好的爆破效果。这一技术已在美国、加拿大等国的有关地下矿山获得应用, 也引起我国起爆器材生产厂和使用矿山的注意。

此外, 30 段高精度等间隔 (25 ms) 电雷管的广泛应用, 也为爆破作业的精细化和科学化发展提供了有力的技术与物质支撑。

4 工程爆破

4.1 破岩机理研究活跃, 数学模型获实际应用^[7]

自 50 年代末 60 年代初提出爆破应力波与爆生气体作用破岩机理以来, 随着相关科学技术的发展, 特别是计算机技术的广泛应用, 人们对爆破破岩各个方面的把握也在逐步深化, 新的数理方法, 新的观测、分析技术为研究爆破破岩这一复杂过程提供了新的技术支持。到目前为止, 人们应用分形、损伤等数理新方法, 正试图对岩体的天然结构进行全面、真实地描述; 结合卫星定位系统, 人们对炮孔进行精确定位, 并利用钻机工作参数获取岩体性质数据; 新型矿用炸药, 为人们调节爆破破岩的能量输入提供了可能; 高精度电子雷管, 使人们精确地控制爆破时序成为现实; 新的爆破破碎块度分布光学量测、分析技术, 为人们提供对爆破破碎效果的定量、全面评定提供了手段; 大容量、高速计算机可以满足爆破破碎复杂系统的模拟要求。基于上述对爆破破碎的综合认识, 人们已能全面审

视爆破破碎的机理, 以求最终获得全面的理解与把握, 使爆破真正走向科学化、数码化。表 1 和表 2 分别列述了国内外主要爆破数学模型和应用程序。

目前, 国外爆破数学模型已经在不同爆破作业中获得实际应用, 尤其 SABREX, HARRIES 模型, JKMRC 模型等应用得更为广泛。我国在这方面与国外存在一定的差距。

4.2 爆破技术精细化^[11,12]

正如前述, 数码电子雷管、新型系列炸药和遥控起爆等为爆破技术精细化提供了有利的条件。近年来, 利用数码电子雷管和新型乳化炸药的优点, 在爆破作业环境复杂的地下矿山实现了爆破技术精细化, 获得了良好的爆破效果和显著的技术经济效益。例如, 加拿大诺兰达公司的布朗士卫克矿是一座大型地下铅锌矿山, 在预留矿柱 (长 150 m、高 100 m、厚 80 m) 连续发生大规模岩爆和塌方, 致使矿山 1/3 采区被迫停产, 占矿山现有储量 1/4。在此紧急情况下, 需要采用大规模的精确短延时的卸压爆破, 使矿山恢复生产和保证安全作业。经过加拿大和美国有关专家的研讨论证, 数码电子雷管和小直径散装乳化炸药的结合便成为首选技术方案。爆破专家刘谦博士等首先利用 DMC (distinct motion code) 程序对爆破过程进行了模拟, 形成了完整的爆破方案。炸药和起爆器材均由美国 Orica 公司提供, 即利用地下装药车装填炮孔的散装乳化炸药, I-Kon 数码电子雷管 (延时间隔为 2 ms, 如 13, 15, 17, 19 ms 等, 延时误差为 0.2 ms)。炮孔直径 114 mm, 孔间距 2.5 m, 排间距 2.0 m。从南到北沿走向布置 74 排共 850 个炮孔, 使用 I-Kon 雷管 1500 发, 散装乳化炸药 252 t, Top 炮孔雷管早爆 5 ms, 以避免爆轰波相碰撞。观测结果表明, 在 74 排炮孔约 6 s 延时爆破中, 其延时误差在 5 ms 以内。每个爆破分区的起爆分区的起爆时间, 延期顺序和各排炮孔的作用, 都是按照设计进行的, 没有出现振动水平超高或超低的异常现象。此次爆破共破碎矿石 36×10^4 t。装运结果表明, 破碎的矿石块度象预料的一样, 碎小易装, 大大地提高了矿山生产效率, 做到了卸压与生产双收益。刘谦博士在澳大利亚 2001 学术会议上作报告指出, 数码电子雷管的应用是起爆技术上的一次革命, 必将改变许多爆破设计方面的指导思想, 许多以前认为是不可能做到的高难度爆破, 由于数码电子雷管的使用而变为可能。

表 1 国内外主要爆破数学模型

Table 1 Main mathematical models for blasting developed at home and abroad

模型	作者	目的	方法	参数
BCM (bedded crack model)	Margolin	研究破碎形成	断裂力学和动态应变	爆轰基本参数；动态应变参数
MAG-FRAG	Mchlugh	岩石破裂的产生和扩展	裂纹产生和扩展的统计	裂纹分布和弹性波传播特性
SHALE	Adams Demth	岩石破碎的本质	用以说明破碎机理的应力波和气体模型	爆轰参数，破碎分布，弹性参数和断裂韧性参量
KUSZ	Kuzmaul	模拟岩石断裂	损伤力学方法	除一般岩石性能尚需损伤参量
Word Inde	Bond	露天矿破碎预测	根据能量、体积平衡	平均块度尺寸；能量消耗
BLASPA	Faveau	详细爆破设计及破碎预测	由于爆炸气体和冲击作用而产生的破碎动态模型	能量因数；岩石分类和爆炸参数
KUZ-RAM	Kuznezov Cunning-ham	台阶爆破平均块度尺寸的预测	爆破参数与平均块度的经验公式	能量因数；岩石分类和爆炸参数
Harries	Harries	岩石破裂、隆起、破碎块度和爆堆的预测	动态应变引起的炮孔周围岩石破碎	爆破振动和岩石的动载特性
爆破设计准则	Longefors	岩体爆破设计准则	爆破设计经验模型	岩石破碎参数；爆破几何参数及炸药特性
块状岩石破碎模型	Gama	构造体岩石的破碎预测	多面体的块状描述，破碎作用理论和能量消耗	岩石结构；能量消耗；破碎作用特性
可爆性指数	Lily	普通露天矿爆破设计指南	破碎与岩石参数的相关式	岩体分类；爆破设计
SABREX	ICI 炸药集团	预测台阶爆破效果	计算机图解算法，炸药与岩石相互作用原理	岩石力学参数，爆破几何参数；炸药、爆破器材及钻孔的单位成本
JKMRC	Kleine Leung	破碎度预测，炸药选择和爆破设计	破碎理论应用到原岩矿块	矿岩块度尺寸分布；能量分布和破碎特性

表 2 国内外主要爆破应用程序

Table 2 Application procedures of blasting at home and abroad

程度	数值方法	维数	坐标系
SWAP	MC	1-D	Lagrangian
WONDY	FD	1-D	Lagrangian
TOUDY	FD	2-D	Lagrangian
DUFF	FD	1-D	Lagrangian
HEMP	FD	1, 2, 3-D	Lagrangian
STEALTH	FD	1, 2, 3-D	Lagrangian
PRONTO	FD	2, 3-D	Lagrangian
MESA	FD	2, 3-D	Eulerian
PAGOSA	FD	3-D	Eulerian
JOY	FD	3-D	Eulerian
DYNA	FE	2, 3-D	Lagrangian
CALE	FD	2-D	Lagrangian
CAVEAT	FD	2, 3-D	Eulerian
CTH	FD	2, 3-D	
PICES	FD	2, 3-D	CEL
CRALE	FD	1, 2-D	ALE
AFTON	FD	1-3	
CSQ II	FD	2-D	Eulerian
BPIC-2	FE	2-D	Lagrangian
BPIC-3	FE	3-D	Lagrangian
NIKE-2D, 3D	FE	2, 3-D	
微机应用程序			
ZEUS			Lagrangian
AUTODYN	FE	2-D	
TDL MADER	FD	2-D	Lagrangian

此外，南非 AEL 炸药公司和 Sasol 雷管公司的数码电子雷管也在开采条件复杂的几座地下金矿获得应用，其技术先进性改变了爆破的传统观念，综

合效益优越。

4.3 软岩与高温矿岩爆破技术有突破^[8,13]

低密度、低爆速、低威力炸药为改善软岩爆破效果提供了有力的工具。正如前述 Orca 推出的 Novalite 系列炸药的密度范围为 0.3~1.1 g/cm³，爆速为 2~4.5 km/s，且爆轰稳定。这样就可以针对软弱矿岩的实际情况，选用不同密度和爆速的炸药，既可以使装填药柱保持达到上部，减少上部大块，又可以避免炮孔底部药量过于集中产生过远的抛掷。该系列炸药在澳大利亚猎人谷几个煤矿的上盘软岩剥离爆破中获得应用，爆破效果良好，爆堆和块度均匀，非常适宜铲装。笔者 2001 年在猎人谷的两个煤矿参观考察了该项技术，印象是相当深刻的。北京矿冶研究总院研制的低密度 (0.5~0.6 g/cm³) 粉状炸药也在江西武山铜矿的软岩爆破中获得应用。此外，低密度炸药在预裂爆破和光面爆破中使用效果也很理想，半孔率高达 90% 以上。

高温 (通常 60~100 ℃) 硫化矿岩爆破作业中的早爆事故是全世界爆破工作者十分关注的问题，早期的研究工作主要集中于药卷包装材料。近年来，研制生产了能够耐高温的散装炸药，既能保证安全，又能得到好的爆破效果。例如，澳大利亚 Dgno Nobel 亚太公司，针对西澳两大铁矿存在的炸药与岩石接触自燃自爆问题，用重铵油炸药和泵送乳化炸药取代原先的 ANFO 炸药，使问题得到

彻底解决。

澳大利亚 Orica 炸药技术中心, 针对巴比亚新几内亚火山区金矿开采的高温硫化矿炸药自燃自爆问题, 开发成功一种散装乳化型起爆弹, 使高达 150 ℃ 极端爆破的炸药问题得以解决。

4.4 爆破规模和爆破设计实现系统优化^[7]

爆破规模由采场几何形状、年产矿石量、爆破技术和装备水平等综合确定的。国外爆破规模普遍较大, 爆破量一般为 $35 \times 10^4 \sim 70 \times 10^4$ t。大型露天矿均采用高台阶大孔径爆破, 台阶高度为 18~29 m, 孔径为 310~414 mm。中小型矿山的台阶高度为 12 m 左右, 孔径 150~172 mm。国外不同矿山的爆破设计程序尽管有所差异, 但是一些主要矿山均采用计算机的辅助设计。通常根据爆区地质平面图、现场孔位标志、炮孔和爆堆的品位标志以及矿岩性质、地质构造、爆区形状和炸药类型等进行爆破, 设计优化孔网、装药量等参数。美国奥斯汀炸药公司爆破服务队承担为矿山进行装药爆破任务, 他们编制的 QET 计算机程序, 可以根据地形地质情况、爆破参数、装药结构、要求的爆破块度和爆破有害效应等项内容, 用以确定出不同的爆破方案供用户选择。同时也对各方案进行单价分析, 作为投标的依据。

4.5 油气勘探和开发中的特种爆破技术^[5]

近年来, 国外研究开发油气地震勘探和油气井开发中的特种爆破技术发展迅速。例如, 将小型高能震源器材应用于三维地震勘探, 可大大地提高地震勘探质量和安全, 降低成本费用; 新近发展起来的井下套管爆炸补贴和整形等特种爆破技术, 以解决那些用传统和常规方法难以解决的井下问题; 稠油地层、高致密低渗透地层等特殊地层的射孔爆破技术的开发等等。与此同时, 对聚能射流对岩石的侵彻机理的规律, 金属聚能罩所形成的射流特性和影响稳定性的因素等基础研究课题, 国外均取得了可以用于指导生产实践的研究成果。

此外, 在城市拆除爆破, 特别是高耸建(筑)物的定向爆破拆除技术, 软基爆破处理技术、超长孔预裂爆破、孔内多段装药爆破、爆炸加工、微型爆破等方面均取得了可喜的进展, 爆破监测仪器也正向自动化、微型化、多功能方向发展。

参考文献

- [1] 郭声琨, 汪旭光. 中国工程爆破的成就与发展战略[J]. 工程爆破, 1999, 12(5):4
- [2] 汪旭光. 浆状炸药的理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985. 1~17
- [3] 汪旭光. 乳化炸药[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993, 1~4
- [4] 汪旭光, 于亚伦. 国外工程爆破的现状与发展[A], 工程爆破文集(第六辑)[C]. 海天出版社, 1997. 6~14
- [5] 汪旭光, 刘永, 熊代余. 略析第六届国际爆破破岩学术会议[J]. 工程爆破, 6(2): 87~93
- [6] Xuguang Wang, Emulsified powdered-granulated explosive and its application in underground mines[A], (Explosives and Blasting Technique[C], Balkema, 2000. 251~254
- [7] 汪旭光, 于亚伦. 岩石爆破理论研究的若干进展[A]. 工程爆破文集(第七辑)[C], 新疆: 新疆出版社, 2001. 12~20
- [8] Rowe, J. L. Variable Energy Explosives for Soft Ground Blasting[A], EXPLO 2001. 111~114
- [9] Orica Co. I-Kon Digital Energy Control, 2001 The Orica Group
- [10] Mine Site Technologies Pty Limited, Remote Blast Initiation[A], 2001 MSTPL. 1~7
- [11] 刘谦. 利用电子雷管进行大型卸压爆破[J]. 工程爆破, 2001. (1)
- [12] Petzpold, J. Hammelman, F. The second generation of electronic blasting Systems, Explosives and Blasting Technique[A], Balkema, 2000. 159~164
- [13] Galvin T. When Not Only the Ground is Hot[A], EXPLO 2001. 115~120

Progresses in Explosive Materials and Engineering Blasting

Wang Xuguang

(Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100044, China)

[Abstract] The progresses in explosive materials and engineering blasting in the recent five years at home and abroad are briefly described and the development prospects are pointed out.

[Key words] explosive; blasting accessories; blasting