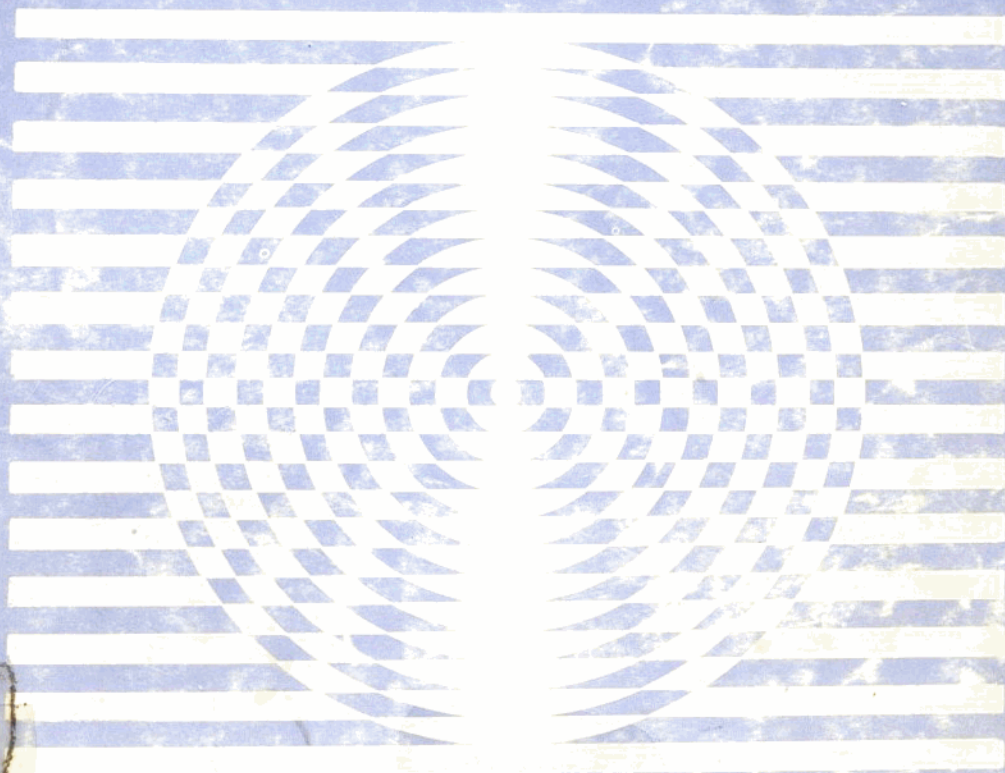


近代爆破理论与实践

JINDAI BAOPO LILUN YU SHIJIAN

主 编 吴森康 林 海 郑国跃
主 审 苏东奕 邓玉雷 刘梓信
副主编 耿 鹏 龙 钰 窦存升



湖北省爆破学会武钢分会

《近代爆破理论与实践》编委会

主 编	吴森康	林 海	郑国跃
主 审	苏东奕	邓玉雷	刘梓信
副主编	杨洪远	龙 钰	耿 鹏
编 委	袁正玉	南遇春	邱崇光
	王光明	刘 毅	毛静民
	刘 强	曾 翀	雷学文
	何 乔	杨干全	王山川
	任贤锋	赵东波	邵才坤
	邹水毛	韩文启	李建奇
	秦春明	余皇奇	吴胜利

前 言

1993年至1994年,湖北省爆破学会和武钢职工大学联合主办了四期近代爆破理论与实践高级研修班,来自黑龙江、辽宁、河北、云南、贵州、四川、安徽、浙江和湖北等20多个省市的爆破工作者参加了学习和研讨。学习期间,我们邀请了著名的爆破专家刘清荣、朱瑞康、董振华、周浩然、张天锡、魏伴云和金人夔教授等到爆破高级研修班作了生动的深入浅出的讲学。学员们知识渊博,理论基础雄厚,实践经验非常丰富,其中有的在国内甚至在国外爆破学界享有很高的声誉。教授们丰富多彩的讲学博得了学员们的高度赞扬。学员们一致反映:“这样的爆破高级研修班办得很好,使我们大大地开阔了眼界,拓宽了爆破知识的领域,明确了爆破科学技术的最新发展动向,提高了我们的爆破理论与实践水平,增长了人的才干,希望今后还继续办、多办”。学员们还强烈要求将讲课教授们的讲稿尽快地整理成册,正式组织出版。为了满足学员们渴求爆破知识的强烈愿望,为了满足今后举办爆破技术高研班的配套教材,为了与爆破科学技术工作者共同探讨爆破科学技术的未来发展,促进爆破事业的繁荣,我们恳请这四次爆破高研班的教授们将讲稿进一步补充修改并加以整理成章,取名为《近代爆破理论与实践》,正式出版发行。

爆破科学虽然是一门十分古老的科学技术,然而由于近代科学技术的突飞猛进,又促进了爆破科学与技术的飞速发展,并且日益深入到国民经济建设的各个工程技术领域中,形成了一门正在迅速发展的应用科学与技术。本书较好地反映了近代的爆破理论与实践,值得爆破工作者一读。

《近代爆破理论与实践》出版以来,得到了爆破学界同行们许多赞扬和鼓励,许多爆破工作者还强烈要求增加近代爆破的内容,于是我们又组织编写《近代爆破理论与实践》正式出版。

本次“近代爆破理论与实践高级研修班”的开办和《近代爆破理论与实践》一书的编辑出版,自始至终得到了武钢职工大学校长李云祖副教授和湖北省爆破学会领导的大力支持、帮助和悉心指导,在此特致谢意,特别是张天锡教授为这本书出版付出了辛勤的劳动,借此表示衷心的感谢。

由于编辑出版时间匆忙,加之水平有限,尽管我们尽了很大努力,书中一定还有许多遗漏之处,恳切地希望爆破技术工作者和读者不吝批评指正,以便再版时加以订正。对此,编者亦深表谢意。

周浩然 张汉兴 林 海

1994年11月于武汉

目 录

12	爆破器材和爆破安全技术发展近况	郑炳旭 林 海 郑国跃(1)
13	金属爆炸焊接与包覆	郑国跃 周浩然 李铁一(9)
14	铁铤控爆解体	邓玉雷 何 乔 杨洪远(30)
15	水下聚能爆炸切割钢板	朱殿柱 刘 强 王光明(35)
16	爆炸硬化	任昌印 邱崇光 邹水毛(42)
17	爆炸夯实	雷学文 耿 鹏 刘梓信(52)
18	爆炸法消除焊接残余应力	李荣锋 解 德 谭伯聪(67)
19	粉尘爆炸	周 豪 韩文启 赵东波(76)
20	露天矿爆破新技术	雷学文 王山川 龙 钰(95)
21	地下采矿爆破新技术	雷学文 袁正玉 余皇奇(106)
22	定向抛掷爆破	毛静民 任贤锋 颜钦武(119)
23	微型爆破击碎人体肾结石	刘 毅 张汉兴 周浩然(161)
24	土体中可燃气体的爆炸现象	杨干全 祝树枝 张汉兴(166)
附录 中华人民共和国国家标准		
	拆除爆破安全规程(GB13533—92)	(169)
	大爆破安全规程(GB13349—92)	(179)
	主要参考文献	(191)

12 爆破器材和爆破安全技术发展近况

郑炳旭 林 海 郑国跃

从二十世纪五十年代起,起爆器材、工业炸药以及爆破安全技术均得到了迅速发展。安全、经济、高效的新品种相继问世和更新。形成了以粉状和含水的硝铵炸药中继起爆药柱以及电或非电的毫秒延时起爆系统等系列化产品,极大地促进了爆破和安全技术的改善、提高和发展。主要表现在以下几个方面:

12.1 起爆器材

工业安全雷管,特别是具有代表性的和划时代成就的无起爆药雷管、安全电雷管和电子雷管。

12.1.1 无起爆药雷管

无起爆药雷管是雷管发展中具有突破性的产品,是质的飞跃。众所周知,起爆药由于其敏感度高、爆轰速度快,是雷管中的最敏感成份。致使制造、存贮、运输和使用时带来诸多安全隐患,人身、设备等事故时有发生。取消雷管中的起爆药,解决以上所述的不安全隐患,是世界各国长期致力攻克的难题。截至目前为止,虽公布了不少专利,因苦于结构笨大、工艺复杂、成本高昂且难于群爆等因素的制约,难以在工程爆破实践中应用。值得骄傲的是我国冶金部武汉安全环保研究院等单位,基于炸药由燃烧转变为爆轰的原理,采用改善加速燃烧的条件和适当增强雷管内壳强度达到良好约束等可靠技术措施,首先攻克并制成了世界上第一发无起爆药的电和非电毫秒雷管,详见图 12-1。



图 12-1 世界上第一发无起爆药雷管

无起爆药电毫秒雷管

无起爆药非电毫秒雷管

这种雷管与常用的普通雷管相比,其威力、延时精度、防水和成群起爆能力以及制造成本均相近,从根本上改善了安全性且消除了环境污染。并于 1986 年在我国建成了第一条生产线且通过了生产型鉴定。瑞典国诺贝尔硝化物公司(Nitlo, Nobel A. C)随之引进了这一成功的中国技术,建成了该国全自动化的无起爆药雷管生产线。由于我国爆破界科技人员和工人的贡献,在工程爆破中普遍推广应用无起爆药雷管将成为现实。

12.1.2 安全电雷管

这种电雷管能有效地抵御静电、射频电、工频感应电和交直流杂散电等外来电的危害,能较好地解决电爆网路中的不安全作业隐患。为实现这一目的,常用两种方法:一是提高对电引火的抵抗力,二是设计专用的电源和电路。为达到以上目的,其相应的技术措施是通过降低电雷管的桥丝电阻,使电引火在 5V 电压下不放火,以保安全。我国的紫铜桥丝电雷管和瑞典 VA

型电雷管的低阻 NiGr 丝均具这种效果。但其不足的是成群起爆能力较低,需要专用的高能起爆器,如我国马鞍山无线电厂生产的 Bcix5040 型起爆器才能使其准爆。另外,我国的无桥丝抗杂电雷管,用导电药乙炔炭黑和石墨做成导电引火头替代电桥丝,使电阻呈非线性,在低电压下电阻增大,以抵御杂电;高压下电阻减小,以实现良好的成群起爆能力。抗杂管结构如图 12-2。

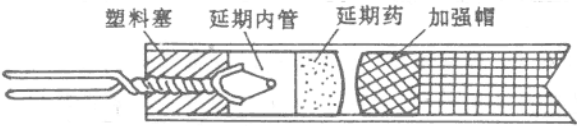


图 12-2 抗杂管结构

抗杂管工作时的伏安特性如图 12-3。

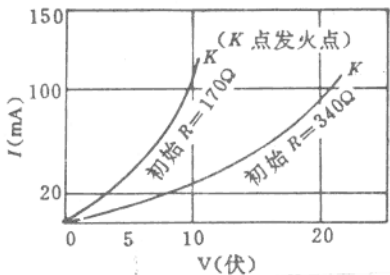


图 12-3 抗杂管工作时的伏安特性

抗杂管引火头的配方如表 12-1。

表 12-1 抗杂管引火头配方

成份	氧化剂	还原剂	导电剂		粘合剂
	氯酸钾	金属锑粉	乙炔炭黑	石墨	
%	17.0—17.4	78.7—79.0	1.6—1.8	2.0—2.5	外加 2% 强棉的 醋酸丁酯溶液

无桥丝抗杂管的主要技术指标如表 12-2。

表 12-2 无桥丝杂管的主要技术指标

电阻范围 (Ω)	安全电压 (V)	发火电压 (V)	铅板穿孔	单串、串并联发数	
				使用 380V 交流电时	使用 900V 起爆器时
50—400	5	10—20	合格	20	50

12.1.3 安全电磁雷管

我国北京矿冶研究总院研制的 BJ-L 型电磁雷管,通过在电雷管脚线和桥丝之间嵌布微型安全电路,以实现抗杂电和成群起爆的目的。该电路的工作原理类似计算机的接收、识别和处理信息的功能,能有效地抵御或识别静电、直流电或低于 1000Hz 的低频交流电,交直流杂散电、射频电、工频感应电以及雷电等外来电危害,使之不能向电雷管桥丝传输而彻底地解决了电爆作业中的安全问题。只有当输入的电符合设定的起爆电能标准时,电流才能顺利传输到

桥丝引爆电雷管而达到群爆的目的。图 12-4 为 BJ-1 型安全电雷管结构示意图。

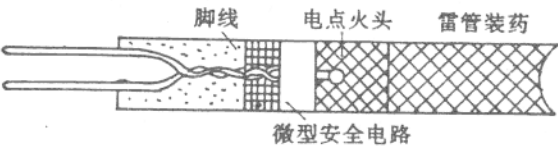


图 12-4 BJ-1 型安全电雷管结构

英国和日本国发展的电磁感应式电雷管，除管体和引火部分与普通电雷管相同外，对供电方式则作了根本性的改变。其结构特点是将起爆电源、爆破母线和雷管脚线组成为三个独立的闭合电路，继由磁环连接形成互感器，最后借助 10—15kHz 高频电引爆。电磁感应式起爆网路原理如图 12-5。

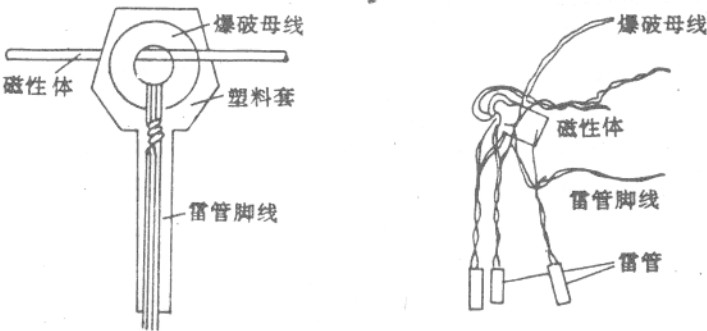


图 12-5 电磁感应式起爆网路

以上结构和措施，能避免各种外界干扰引起的意外爆炸。我国发展的 QB-1 型高能电磁感应电雷管起爆系统亦采用了同一原理。其电源频率为 15kHz，起爆功率为 8kW，一次能起爆 420 发电雷管。

12.1.4 电子雷管

该雷管由美国 P. N worsey (沃塞) 发明，其装药与普通雷管相同。装药上部为电容器，脚线与电容器之间安装有集成电路块，其结构如图 12-6。

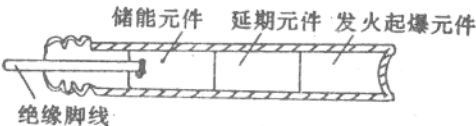


图 12-6 电子雷管

管体内外均有安全电路，可防止电超载以及外界电干扰，如采用微型计算机的专用起爆器，能为雷管提供电能，并可调节每段雷管所设定的延时，而每发电雷管自身还有参考时间，其最终延时则取决于施爆时与起爆器相互运作情况，用户可按预定的延时时间，实现良好稳定的起爆顺序。该雷管仅按起爆器预先设定的讯号工作，有很强的抗干扰能力。目前 美国、瑞典、德

国、日本等国均有少量生产,最低延时可达1ms、最大段发数为250段。我国武汉冶金环保研究院林大泽、李泽华和肖绍清等合作的研试制品延时为5ms等间隔,可提供63段产品,并已于1993年在我国广东省珠海市炮台山成功地进行了万吨级炸药的大爆破。

12.2 非电起爆系统

非电起爆系统包含有低能导爆索起爆系统、塑料导爆管起爆系统(即 Nonel System)和气体爆轰管起爆系统。

12.2.1 低能导爆索起爆系统(即 Primadet System, 普里马德特起爆系统)

该系统由药量为0.85g/m(即4格令/英尺)泰安药蕊的小直径低能导爆索和延期雷管组成。起爆时通过被激发的低能导爆索所产生的爆轰波点燃雷管的延期元件使之爆炸,其爆速约为6200m/s。

该系统在施爆时将雷管系统置入炮孔内,并使用低能导爆索起爆,不致对炮孔内的炸药产生不良影响,且能准确地进行孔内延期爆破,不会出现切断和产生早爆的危险,安全性良好,多段延期起爆时准确可靠。在美国、加拿大应用广泛,特别适用于有杂散电流的金属矿山和易产生挤压现象的小孔径爆破中。我国已研制成药蕊药量为1g/m,爆速为7200—7400m/s的低能导爆索系统,正着手推广使用。另外,在欧美和五十年代我国一些露天矿山还使用过4g/m的导爆索与继爆管配合,实现孔外多段延期,引爆孔内新装的8—10g/m的导爆索,其安全性与Primadet系统相近,操作简便,但噪声较大,成本稍高,故不宜在地下矿山开采和井巷掘进中使用。

12.2.2 塑料导爆管起爆系统(即 Nonel System 系统)

该系统是瑞典、尼特罗诺贝尔公司研制生产的,改进后的产品称之为Nonel GT。

塑料导爆管起爆系统由塑料导爆管、延期雷管和连接元件所组成。其中塑料导爆管的外径为3mm、内径为1.5mm,内壁涂有薄层炸药HMX或RDX与AL粉的混合物,药蕊药量为20mg/m。导爆管经火雷管或电雷管、导爆索以及击发枪等引爆后,爆轰波以 1950 ± 50 m/s的速度传爆至联结元件,进而引爆分支导爆管直至非电毫秒雷管,以实现非电多段毫秒延期爆破。

该系统使用方便、可靠,抗冲击,耐火焰,抵御电干扰能力强,无大的爆破噪声,防潮抗水能力亦很好,是安全、高效、理想的爆破器材,国内已普遍推广使用。近年来还有新的改进,如冶金部武汉安全环保研究院、马鞍山矿山研究院已分别研制出+80℃时不软化,-40℃时不脆裂的高强度导爆管和30段高精度非电毫秒管,总延期时间分别达到1100ms或1350ms,高于总延期时间为2000ms的瑞典产品,居世界领先地位。

12.2.3 气体导爆管起爆系统(即 Hercudet-赫尔库德特起爆系统)

气体爆轰管起爆系统简称为气爆系统。由美国大力神(Hercules Incorporated)工业公司于二十世纪七十年代中期研制成功。该系统的雷管外观与普通雷管相似,但雷管间的连接不是脚线而是用两根内径为1.5mm的空心塑料管(取代脚线)。其中的一根管通过雷管管体,用以向另一根管充以爆炸性混合气体(由可燃气体和氧气混合而成,其组分为 O_2 :60%, H_2 :20%, CH_4 :20%,借助气体爆轰替代电流传输的起爆能,爆轰时管内气体的爆轰速度约为3050m/s。

气体导爆管起爆系统如图12-7所示。

该起爆系统由储气箱、混合室、点火器、连接元件和气爆毫秒雷管组成,利用形态各异的连

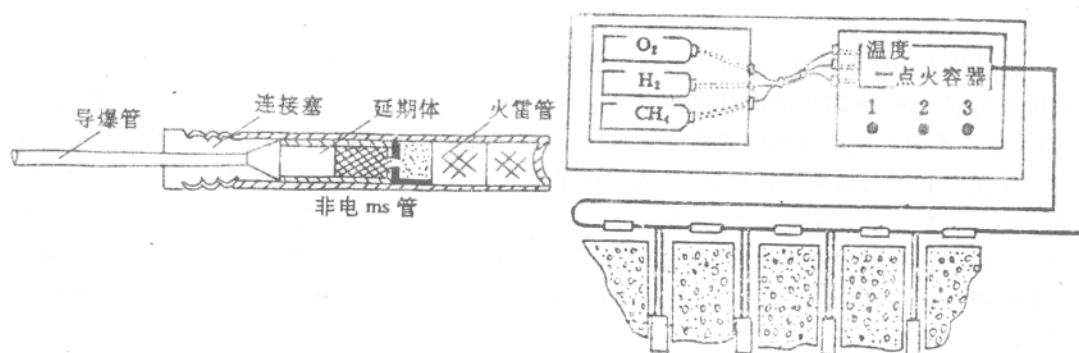


图 12-7 气体导爆管起爆系统

接元件组成串联或并联爆破网路。施爆前先以空气泵压入储气箱，用压力试验仪检查气管网路，若完好不漏气；继以 N_2 气置换空气；再将混合气置换 N_2 气，以上各步骤完成随即切断混合室与储气室的联结，最后可操纵点火器起爆。

此系统无电击危险，安全性良好，无空气冲击波，不会破坏药包；延时准确，迟发时段多，网路检查方便，工作可靠。但充气时需采用特殊装置，管路易被污染堵塞，操作复杂，需对有关人员进行专门培训后才能上岗工作，这些问题有待进一步研究改进和完善。

12.3 工业炸药(现代爆破剂)

当代，硝铵基炸药已基本上取代了胶质硝化甘油炸药，使爆破作业的安全程度显著提高，这类炸药对撞击、摩擦、火花或热量等外界作用的感度远远低于传统的炸药，其中某些品种甚至不能直接用雷管起爆而必须借助高威力的中继起爆药柱才能使其爆轰。由于这类炸药的高安全性、低成本又适用于现代工程爆破，人们习惯称之为爆破剂(Blasting agent)，以示其与传统炸药的区别。具有代表性的现代硝铵基炸药可分为含水和粉状两类。中继起爆药柱只是配合这类炸药的应用而发展起来的专用爆破器材。

12.3.1 含水硝铵基炸药

这种炸药包括浆状炸药(即 Slurry Explosives)、水胶炸药(即 Water Gel Explosives)和乳化炸药(Emulsion Explosives)。众所周知，硝酸铵易溶于水，粉状硝铵炸药常因吸湿结块而使爆炸性能降低。为克服粉状硝铵炸药这一致命弱点而研制成含水的硝铵基炸药。

水虽然容量很大，在变成水蒸汽时要夺走 540 卡/克的蒸发潜能，在加水炸药中，能使其爆炸威力下降，据实验测定，若水大量存在并使之在瞬间蒸发，则热量还有剩余，且生成的水蒸汽还能参加作功。理论上研究得出：水在蒸发时每加 1% 的水，其能量约减少 2%，而实际测定能量减少仅为 0.6%。当炸药中的水量 $\leq 15\%$ 时，则有利于 CO_2 、 H_2O 之类的高能生成物分解，可使其性能提高。另外，硝酸铵溶解于水中时是吸热的，所以因水的蒸发热所造成的热损失可以得到补偿。

由此启示而在炸药中主动加水的想法，是哲学方面否定之否定原理的具体体现和应用，是人们认识上的重大突破和质的飞跃。这一想法提出并付诸实施成功应归功于前人乌德贝勒-莱茨曼(Woodbury-Wrightsmann)、斯特令-凯斯钦包(Streng-Kischenbaum)以及库克(M. A.

Cook)。

12.3.1.1 浆状炸药

浆状炸药中水的含量,据国内外资料报道为 7~25%,随炸药中组分的不同而变化。由于水和胶粘剂一起,对防止成份凝聚,维持成份长时间地成为一体而不分离,并能保持其粘着性。同时,由于水的入使炸药能取得消焰效果,促成感度降低而更为安全和具有抗水性。另外,水又能与炸药中的其它物质紧密接触,构成传播爆轰的连续性物质,能提高炸药密度和传爆性能。浆状炸药基本上已形成系列产品,有适用于各种不同岩矿强度的炸药品种。国内外的浆状炸药组成一般包含有硝酸铵水溶液、敏化剂(炸药或金属粉)、胶凝剂、可燃剂、表面活性剂、交联剂和密度调节剂等成份。根据配方的不同,其密度为 $1.10 \sim 1.54 \text{ g/cm}^3$,爆速为 $3500 \sim 5800 \text{ m/s}$ 。

12.3.1.2 水胶炸药

水胶炸药是在浆状炸药的基础上发展起来的,既有油包水型,又有水包油型两种,我国二十世纪七十年代中期才开始研制。其主要特点是以水溶性的敏化剂如甲基胺硝酸盐(MMAN— $\text{CH}_3\text{NH}_2 \cdot \text{HNO}_3$),由原料来源广的甲胺(以重油为原料)制取。用之代替浆状炸药中的 TNT 成分。因为敏化剂和氧化剂(硝酸铵)均处于溶液相,故较易混匀,且传爆性能良好。目前我国的水胶炸药产品有大、中、小直径,适用性广,既有雷管感度品种,又有岩石型和煤矿许用型品种。

12.3.1.3 乳化油炸药

前已述及,乳化炸药分为油包水型和水包油型两种,后者较前者性质更好、用途更为广泛。乳化炸药是以氧化剂水溶液的微细液滴为分散相,悬浮在含有分散气泡或空心玻璃球或其它多孔性材料的似油类物质构成的连续介质中,形成一种油包水型的特殊乳化体系的硝酸基抗水炸药。因其用普通有机燃烧物和硝酸盐来取代具有爆炸性的高能燃料和高威力单质猛炸药敏化剂,并利用油包水的物理内部结构而可获得良好的抗水性和防止组分分离,且能量密度可以调节,爆炸性能和爆轰感度优越,故对各种条件下的工程爆破均有较好的适应性。

理论和经验均表明,合理选择乳化剂应以 HLB(Hydrophilic Lipophilic Balance,即亲水亲油平衡)值为标准。经验表明,油包水型乳化剂 HLB 值为 3~6,水包油型 HLB 值为 8~18 的表面活性剂为佳。1949 年 Griffin(格里芬)首先提出了非离子表面活性剂的 HLB 值概念,并得出了如下定量关系计算式:

$$\text{HLB} = 7 + 11.7 \lg \frac{M_w}{M_o} \quad (12-1)$$

式中: M_w ——亲水部分的分子量;

M_o ——疏水部分的分子量。

由式可以得知,表面活性分子中,极性基团愈长,其 HLB 值就愈大,亲水性愈强;非极性基团愈长,其 HLB 值就愈小。亲油性最强的表面活性剂 $\text{HLB}=1$,而亲水性最强的表面活性剂 $\text{HLB}=20$ 。

对脂肪醇的聚氧乙烯衍生物及多数多元醇(包括聚二醇)的脂肪酸酯,可用下式近似计算:

$$\text{HLB} = 20 \left(1 - \frac{S}{A} \right) \quad (12-2)$$

式中: S ——酯的皂化数;

A ——脂肪酸的酸价。

对于皂化数不易准确测定的脂肪酸酯,如松节油、松香、蜂蜡、羊毛脂等按下式计算 HLB

值:

$$HLB = \frac{E+P}{5} \quad (12-3)$$

式中: E —— $C_{12}H_{25}O$ 的重量百分比;

P ——多元醇基的重量百分比。

其它符号同前。

对于只用聚氧乙烯基作为亲水部分的产品和脂肪醇与 $C_{12}H_{25}O$ 的聚合物, 计算 HLB 值可简化为:

$$HLB = \frac{E}{S} \quad (12-4)$$

式中符号同前。

12.3.2 粉状硝铵基炸药

这类炸药包括铵油炸药和铵梯炸药。

12.3.2.1 铵油炸药

铵油炸药是一种混合猛性炸药, 由爆炸性成分(如硝酸铵——氧化剂)和非爆炸性成分(如柴油——燃烧剂), 按一定配比(以上两种成分具有代表性的配比是 94.5~95% : 5.5~5.0%)混合制成的炸药。继后又发展成由爆炸性成分、非爆炸性成分并添加木粉(作疏松剂, 以改善炸药密度和在一定程度上可防止硝酸铵受潮结块)所组成, 三种物质常用的配比是 92% : 4% : 4%。铵油炸药的发明为爆破业提供了一种安全经济、具有中等威力的爆破剂。多孔粒状硝酸铵的发明, 又进一步改善了硝酸铵的结块性和混合的均匀性, 并提高了硝酸铵对柴油的吸附能力, 使爆炸威力有所提高, 贮存期有所延长, 现场混合后直接装入炮孔成为现实, 简化了工艺过程。

12.3.2.2 铵梯炸药

铵梯炸药由硝酸铵(氧化剂)、梯恩梯(敏化剂、燃烧剂)和木粉(可燃剂、疏松剂)所组成, 具有代表性的是 2 号岩石炸药, 三种成分的比例是 85% : 11% : 4%。这类炸药的主要缺点是易吸湿结块而降低爆炸威力, 且爆炸后有毒气体产出量也较高, 据测定 CO 为 47.4L/kg, NO_x 为 5.12L/kg, 总量 $V = 6.5NO_x + CO = 6.5 \times 5.12 + 47.4 = 80.68L/kg$ 。冶金部长沙矿冶研究院经探索研究用复合表面活性剂已较好地解决了吸湿结块问题。不含梯恩梯的粉状硝铵炸药在工程爆破中正推广使用。

12.3.2.3 中继起爆药柱

由于爆破剂起爆感度较低, 故随着爆破剂的迅速发展和大量应用, 而又要保证其达到良好的爆轰效果, 释放出足够大的威力, 中继起爆药柱可以说已成为工程爆破中不可缺少的爆破器材。对于露天深孔爆破装药, 国外一般使用单个重 500 克或 1000 克的太安/梯恩梯药柱, 国内一般使用 60 黑索金/40 梯恩梯药柱。这种药柱有两个预制孔, 用作装配雷管、导爆索或导爆管雷管, 使操作方便可靠、效果良好, 我国已广泛使用。目前, 国外正在进一步发展由橡胶和太安炸药制成的小直径起爆药柱, 可望能改善炮眼爆破装药的起爆性能。

12.4 现代破碎剂

现代破碎剂分为铝热燃烧剂和低温破碎剂, 是国外七十年代研制出来的新型破碎材料。随后我国铁道部第二设计院和武汉工业大学等单位相继研制成功。燃烧剂是由金属氧化剂

(CuO; MnO₂)和金属还原剂(Al)按一定比例组成的混合物,以上按克分子量比值其常用配比如下:

$$\text{Al} : \text{CuO} = 1 : 4; \text{Al} : \text{MnO}_2 = 3 : 7。$$

使用时将其装入炮孔内,用水泥砂浆或含一定水份的黄土紧密捣实,然后用电阻丝通电点燃,使配比材料进行化学反应,同时在炮孔内释放出大量的热能,继而迅速产生含有还原金属粉末的高压气体,借助这一压力来破碎切割介质。反应时的温度可达 2700℃,压力可达 80MPa~100MPa。而破碎剂(即静态破碎剂或低温破碎剂)则是在膨胀水泥的基础上,经过高温锻烧后而制成的。由于岩石和混凝土的抗拉强度通常只有 1.5~2.0MPa,远低于其抗压强度,而破碎剂经过 2~24 小时的水化作用后,膨胀应力可达 20~50MPa,为岩石和混凝土抗拉强度的 13.4~25 倍,故能较顺利地使其胀裂而产生破坏。由于以上两种破碎材料在使用时无声响、无振动、无飞石粉尘、无冲击波,并且不产生有毒气体,因此,在石材(如大理石和花岗石)的成型切割、素混凝土构筑物安全拆除、基岩开挖、弧石破碎,以及膨胀锚杆等方面广泛应用,尤其是对建(构)筑物附近的要害部位拆除作业场合是常规炸药爆破所无法比拟的。但这两种破碎剂破碎介质的力量是缓慢增加的,过程长、效率低,力量较小,对钢筋混凝土块体及其中常用的 A3 号钢,因其抗拉强度大,为 373MPa, >>20~50MPa 的膨胀应力,故难于使其拉断而产生破坏。从而破碎剂使用受到了爆破介质条件的限制。其次,在装药操作时不及时且赶不上水化反应的速度,往往也会产生冲孔现象而具有一定程度的危险性。

根据实地测试统计和调查知,破碎剂在较高的外界环境温度下反应时,会生成大量的水化热,这时如果周围介质散热较慢,孔内的蓄热状态则将不断地加剧;当温度达到 100℃ 以上时,破碎剂中未水化的水便沸腾而产生蒸汽压力;如果这种压力超过破剂反应体与炮孔壁间的粘结力,随即就会产生喷出现象;与此同时,破碎剂反应又将进一步加剧,使整个反应过程很快地完成。中国地质大学张拔川同志提出在较高的外界环境温度下($\geq 23^\circ\text{C}$)使用低温型的破碎剂,并在炮孔孔口采用工字型部分密封塞(塞的肋部也充满破碎剂)和将水灰比控制在 0.30~0.32 的比例,在破碎剂搅拌好后迅速装填炮孔,在采取了上述措施后就能圆满地解决冲孔现象。

北京市水利科学研究所刘迁恺、孟振全两同志研究用于燃烧剂、膨胀剂的电力爆切,也圆满地解决了冲孔现象。电力爆破器主要由电热丝和热敏材料构成,结构如图 12-8。

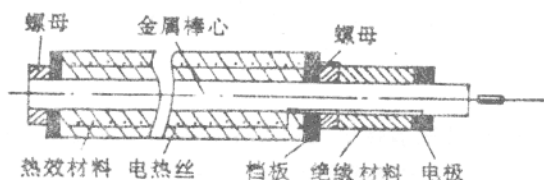


图 12-8 电力起爆器

热敏材料在 50Hz、220V 交流电加热电阻丝时产生体积膨胀。在约束条件下,热敏材料随之产生极高的膨胀应力以提供动力(功率 $\leq 400\text{W}$)来源。该爆破器通电时工作,断电时可以停止工作,既不会爆炸,也不会冲孔,更不会因受潮等原因而失效。并可多次重复使用、成本不高、操作简单、便于掌握、易于推广。并且避免了破碎剂过程缓慢,故安全高效,省时、省工、省电。还具有切割弧石、加工条石的基本功能,切面平整,废料少。对不要求破碎的拆除部分,能够实施严格保护,尤其适用于控制爆破和光面爆破工程中。

13 金属爆炸焊接与包覆

郑国跃 周浩然 李铁一

13.1 前言

随着科学技术的日新月异,设备对工作压力、工作温度以及抗腐蚀性等要求越来越高。为满足这些要求,以往均使用热滚轧法予以解决。但实践证明,用爆炸包覆法较热轧法能更好地提高金属间的结合强度,据测定统计,前者较后者约提高 50%,并还能改进其结合的连接性。

金属爆炸焊接与包覆是利用炸药爆轰产生的高压,使具有适当几何形状和运动方向的两块金属表面高速地碰在一起,并在其间产生巨大的塑性而相互作用结合的一种加工方法。爆炸焊接与包覆广泛地用于一切韧性工程合金:如镍合金、Monel 合金、钛和 Hastelloy 合金、金属箔、金属薄片和金属薄板等。

爆炸焊接或包覆金属板材的好处是能把用作工作表面的昂贵抗腐蚀金属与廉价的碳钢或低合金成份的背衬金属结合起来。并还能成形加工,或进行热压和冷旋压。焊接或包覆金属薄片在金属板面上是利用表面喷射效应进行的,据此,可以将厚度从 0.02mm 到 6.50mm 的金属薄片焊接或包覆在厚板的表面上。如图 13-1。

焊接或包覆金属板材较金属薄片要困难得多,其症结在于将板材与活性金属复合,以及带有插入件和盖板条的情况。如图 13-2。

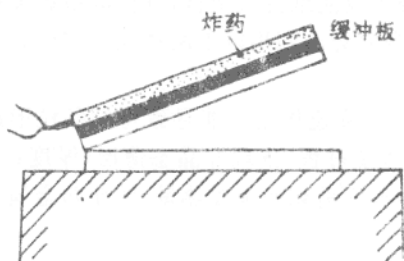


图 13-1

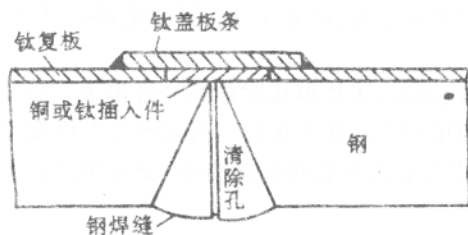


图 13-2

13.2 爆炸焊接或包覆的基本原理及其结构系统

爆炸焊接或包覆利用的基本原理是炸药爆轰时产生的金属喷流。据实验研究得知,能产生金属表面喷流的结构系统常见的有四种,即:

- (1) 锥形装药;
- (2) 运动的投射体——静止目的物;
- (3) 两运动板块;

(4) 一块运动板、一块固定板。

以上各结构系统详见图 13-3。

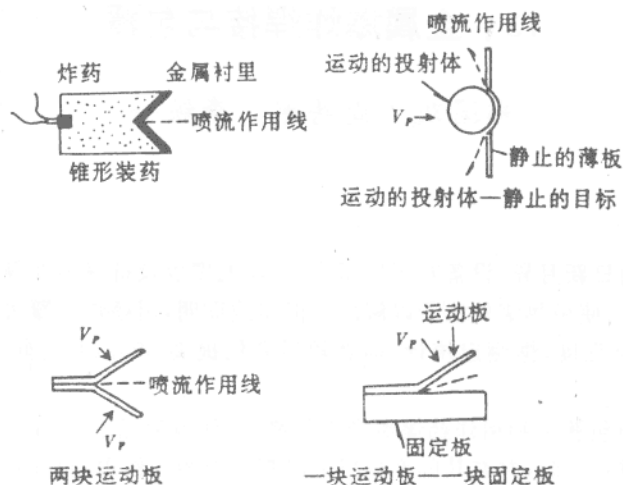


图 13-3

爆炸焊接或包覆在早期发展阶段,以 Zernow 等为代表,认为爆炸焊接过程是纯熔化过程。其论点是把界面的动能作为热源,使跨界面两边熔化,并且在熔层中扩散,这种流动扩散致使一种金属至另一种金属之间产生逐渐过渡区而固结。另一种观点是把爆炸焊接过程看作是一种压力焊过程。其论点是界面塑性变形大,只要在足够长的时间内保持高压水平,就可进行固态扩散而固结。实践表明,熔焊仅局限于焊接具有相当熔点的金属。而压焊则局限于焊接具有塑性流变应力的金属。爆炸焊接则不然,并不要求金属具有熔化性或高度的塑性流动性,因爆炸焊接过程过渡急剧,据显微技术(扫描电子显微镜和透射电子显微镜)观测证明,即使熔融金属凝固,其局部仍可能出现空穴或叠层。另外,因爆轰峰生仅能维持数微秒,且扩散系数又很小,从而出现界面波、涡流,因此,熔融金属凝固时产生的空穴无法利用以上两种观点作出满意的解释。

观测还证明,爆炸焊接时炸药一经爆轰,在约 10^5 m/s 的高速作用下能导致特细晶粒形成(但晶粒的排列方向并不规则),从而产生界面波,并伴有流变过程,出现非晶态薄层(厚度约 $1 \sim 2 \mu\text{m}$),进行射流喷射和焊接接触。交界面因界面波衍生界面剪切而聚集热量,致使两金属固结。

典型实例:板材的爆炸包覆,如图 13-4。

炸药层一经起爆,其爆轰波将沿炸药层传播,形成一种高速发射,使被焊接或包覆的两块平板(或投射体与目的物)之间以很高的速度彼此碰撞在一起,且每单元逐段顺序展开,最后导致紧靠着的相互作用表面中金属成为瞬时流体,参与表面喷射,即表面喷射效应。这时的金属原子在原子间的范围内相遇,为高碰撞压力的产生创造了条件,使被焊接或包覆金属的电子介质“打开”,产生化学配合面,同时能清除薄膜和污染,从而使两种不同性质的金属材料在承受炸药爆轰所产生的约 10^7 MPa 压力状态下进行界面结合。

图 13-5 为两块钢板爆炸焊接过程中的 x 射线亚微秒闪光摄影照片的示意图。

炸药起爆前(即两板碰撞前),两板间的夹角 β 为静态角(临界面的夹角),该角是保证射

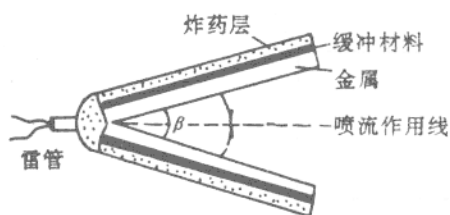


图 13-4

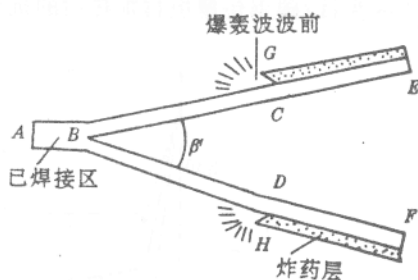


图 13-5

流形成的极限条件，为碰撞速度的函数。炸药起爆后的两板，在碰撞过程中其静态角 β 变成动态夹角 β' 。图中A、B两点之间的区域为已碰撞固结包覆区， $\angle CBD = \beta'$ ，此时CE和DF段的夹角仍为静态角 β 。

爆炸焊接或包覆时，常用高能混合炸药或薄片塑性炸药。包覆或焊接结构中应加装缓冲材料或阻尼物，目的是使被焊接或包覆的金属板与炸药隔开，以防止爆炸应力波的二次射流直接作用于金属板而导致金属表面破坏。

为了实现良好的焊接或包覆，应选择和控制好如下的有关几何参数，即：板的厚度、炸药的厚度、角度 β 和焊接或包覆系统的长度和宽度。其他的有关变量，如炸药的种类、金属和缓冲材料的性质亦应选择和控制好。以上的几何参数应根据被焊接或包覆零件的不同而作相应的变化。如为了把两根钢管的端头焊接起来，可以用环形炸药套在准备焊接的管子端头上；为了给厚壁圆筒包覆衬里，可以把衬里和炸药装在圆筒中。能焊接或包覆复合板的金属有：铝合金、黄铜、铜、镍合金、低碳钢、不锈钢和钼。

综上所述，Ishi 等将金属焊接或包覆的要求概括为：

- (1) 在界面产生射流；
- (2) 压力的增加，应使伴随动能的耗散达到足够大的值，并能保持足够长的时间，以实现原子间的结合。在此情况下，压力取决于冲击速度，而结合所需的时间由碰撞点的速度确定。

13.3 焊接或包覆材料的极限温度控制

对于特定的焊接或包覆件而言，温度太低，达不到焊接或包覆的目的。温度过高，又会使金属的交界面间形成化合物，致使其结合强度降低。为了实现良好的焊接或包覆，应控制好合适的极限温度。

表 13-1 为数种焊接或包覆材料的极限参考温度。

表 13-1 焊接或包覆材料的极限参考温度

金 属 组 合	极限温度(℃)	
	制造(热成形)温度	使用温度
不锈钢/碳钢	1100	—
Monel 合金/碳钢	1100	—
Hastelloy 合金/碳钢	1200	—
铜镍合金/碳钢	1000	—
铜/碳钢	925	540
钛/碳钢	800	400
铜/铝	260	150
铝/碳钢	315	260

图 13-6 为钛/碳钢包覆板材加热后的抗剪强度。

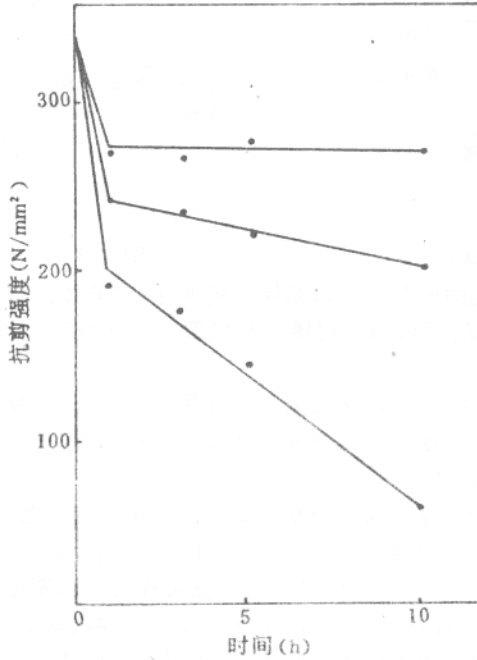


图 13-6 钛/碳钢包覆板材加热后的抗剪强度

13.4 碰撞速度的控制

实践证明,若碰撞速度过高(相对于某金属的性质而言),则交界面上的材料将在喷流形成的过程中被全部移位,使两焊件之间只能间断地结合,甚至根本不能结合。反之,若碰撞速度太低,则交界面上不可能产生塑性相互作用。因此,只有处于这两种极端情况之间的碰撞速度,才能在两相互作用的焊件表面上产生一定程度的塑性变形,继而形成表面喷射所造的波状起伏。同时,随载荷的急剧释放,两焊件表面的喷流相互会合而永远地固结在一起。

13.5 爆炸焊接或包覆的工艺参数

爆炸焊接或包覆过程可分为三个基本阶段,即:

- (1) 炸药的爆轰(提供爆轰的稳定传播和覆板跨越间隙变形以及加速所需的能量);
- (2) 覆板或元件的爆轰和加速(确保覆板获得动能和在固定元件碰撞点处应达到的速度);
- (3) 焊接或包覆件之间发生碰撞(使动能在碰撞区域耗散而实现焊接或包覆)。

爆炸焊接或包覆的参数可概括为:

- (1) 冲击速度 V_p ;
- (2) 碰撞点速度 V_c ;
- (3) 动态碰撞角 β 。

不同的研究者定出的金属板材速度 V_p 和方向均不相同,故此从速度图得出的速度关系

结论亦各异。爆炸焊接或包覆参数及相对于碰撞点上的速度变化范围如图 13-7。

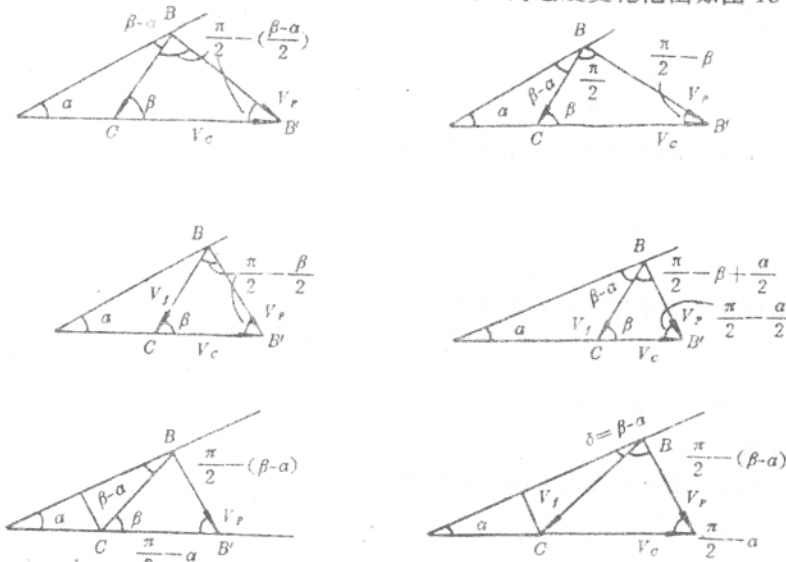


图 13-7 速度变化范围

图中 a, 假设 V_p 为爆轰波波前尾部已加速的板材部分与未变形部分之间的夹角大小。该假设得到 Birkhoff 在考虑了碰撞点质量流的连续性后用于轴对称锥形壳体件的状况所证实。

图中 b, 表示爆轰后的 V_p 与板材垂直时, 其被加速的元素绕在爆轰波波前所形成的塑性节点旋转时的状况。

图中 c, 表示等边三角形给出 $V_c = V_f$ 时, 即覆板长度不变时的状况。

图中 d, 表示 V_p 与初始倾角 α 的二等分线垂直时的状况。

图中 e, 表示 V_p 与原始位置的板材相垂直时的状况。

通过对上述相应图形比较后表明, 确定 V_p 方向的 θ 角有五种情况, 其间并存在如下关系:

$$\theta_B > \theta_A > \theta_C > \theta_D$$

另外, 利用图中 b, 参照图中 e 还能导出如下关系:

$$V_p = D \sin(\beta - \alpha)$$

$$V_f = V_p \cot \beta$$

$$V_c = V_p \sin \beta$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{V_f}{V_c} \right) = \alpha + \delta \quad (13-1)$$

为了设定 V_p 值, Gurney 提出了著名的方程, 该方程表明了板材速度既是爆炸能量的函数, 亦是装药和板材质量比的函数。

对于一维爆轰(与覆板平面相垂直、且平行于炸药爆轰速度 D 的平面中求得):

$$V_p = \sqrt{2E_k} \left(\frac{3R^2}{R^2 + 5R + 4} \right)^{1/2} \quad (13-2)$$

式中: E_k ——单位质量炸药的爆轰产物所具有的动能;

$\sqrt{2E_k}$ ——按所用炸药的几何结构所得出的 Gurney 特征速度;

R ——单位面积的装药量 m_c 与单位面积的板材质量 m_p 之比值, 即: $R = \frac{m_c}{m_p}$ 。