

# 让工程爆破技术更好地服务社会、造福人类——我国工程爆破60年回顾与展望

冯叔瑜<sup>1</sup>, 郑哲敏<sup>2</sup>

(1. 中国铁道科学研究院, 北京 100081; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**[摘要]** 结合典型爆破工程, 回顾了我国工程爆破自20世纪50年代以来的发展历史, 将其总结为“起步、成长、壮大”三个阶段, 简要介绍了各阶段工程爆破基础理论、工程实践、科学研究和行业组织的主要成果。并对我国工程爆破行业未来的发展方向进行了展望。

**[关键词]** 工程爆破; 典型工程; 发展历史; 展望

**[中图分类号]** U416.1+13 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)11-0005-09

## 1 前言

工程爆破, 就是利用炸药爆炸所产生的巨大能量对介质做功, 达到预定工程目标的作业, 如采矿爆破、岩土开挖爆破、清淤炸礁爆破、建(构)筑物拆除爆破、爆炸加工(含金属破碎切割)、聚能爆破、地震勘探爆破、灭火爆破、围堰拆除爆破及堰塞坝抢险爆破等。我国工程爆破技术的发展历程是与国家经济建设的发展需要密不可分的。

新中国成立后, 百废待兴, 百业待举, 国家亟需恢复和发展生产。1953年是新中国进入大规模建设的第一年, 举国上下开始实施第一个“五年计划”。正是从那时起, 工程爆破技术被认为是“一门应该大力发展的科学技术”。时至今日, 60年过去了, 工程爆破已经发展成一门相对完整的学科体系, 广泛地应用于交通、采矿、水利水电、城市建设

和新材料加工等领域中, 取得了巨大的经济社会效益。

钱学森先生对我国的工程爆破行业寄予了很大希望, 他指出:“爆炸技术对我国高速度地搞社会主义建设有重要意义。我国土岩爆破技术发展比较快, 其原因也就在此。但在这里要讲究成本, 也就是要讲究效率, 所以爆炸要设计得好, 要力求能量转化效率高。在这个方面, 我们还有大量工作要做”<sup>[1]</sup>。抚昔追今, 爆破工作者没有辜负钱先生的殷切希望, 我们逐步建成了系统的工程爆破学科, 基本实现了爆炸过程能量转化的精密控制。作为我国工程爆破技术发展的见证者, 我们亲历了中国工程爆破行业的“起步、成长、壮大”三个阶段。温故而知新, 回顾中国工程爆破60年取得的巨大成就, 总结60年爆破技术和爆破行业发展的宝贵经验, 展望发展前景, 对推动工程爆破技术更好地服务社

**[收稿日期]** 2014-09-29

**[作者简介]** 冯叔瑜, 1924年出生, 男, 四川邻水县人, 中国工程院院士, 长期从事工程爆破技术的研究与应用工作

郑哲敏, 1924年出生, 男, 山东济南市人, 中国科学院院士, 中国工程院院士, 长期从事爆炸力学、固体力学研究

会、造福人类意义十分重大。

## 2 六十年回顾

### 2.1 起步阶段(1953—1978年)

20世纪50年代初,我国爆破作业基本上处于用钢钎人工打眼、点火放炮为主的阶段,工作效率低、劳动强度大、安全可靠差。可以说,基本上没有形成工程爆破技术。

从第一个“五年计划”开始,国家为了恢复经济、发展生产,突出抓铁路、交通、矿山和水利工程的修复与建设工作,工程爆破技术正式进入起步阶段。

1955年8月10日,在苏联专家指导下,铁道兵成功实施了宝成铁路观音山车站大爆破,装炸药142.8 t,是中国铁路修建史上第一次成功的大爆破。1954年开工的鹰厦铁路,全线共进行了116次大爆破,完成石方 $2.39 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,占全线的7.1%。但是,由于理论创新和技术普及工作跟不上,爆破效果和工程质量不够理想,对硐室爆破技术的声誉也造成了一些不利的影

响。1956年3月,苏联建材部爆破工业托拉斯派遣了以M·道库采也夫为总工程师的专家组,与原北京有色设计总院边克信等人合作,完成了甘肃白银厂露天矿万吨硐室大爆破工程<sup>[2]</sup>。这是我国首次采用硐室爆破方法进行开采初期的基建剥离工程,先后三次爆破总装药量为15 573.29 t,爆破岩石总量为 $9.065 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

1958年11月,国家科学技术委员会为解决三峡大坝工程的爆破技术问题,由中国铁道科学研究院筹建,中国科学院力学研究所、水利水电科学研究院、长沙矿冶研究所、长江水利委员会、中国人民解放军铁道兵和北京工业学院等单位参加的三峡工程爆破组<sup>[3]</sup>,由冯叔瑜任秘书负责日常工作,进行了硐室大爆破和定向爆破的试验研究与推广工作。

1959年初,河北邢台东川口新建水库首次采用定向爆破筑坝,该项工程由北京水利设计院、水利水电科学研究院霍永基等人设计和组织施工,冯叔瑜和朱忠节参加了部分工作,并对药包布置、抛掷堆积等提出了合理的建议,爆破后效果良好<sup>[4]</sup>。一时间全国掀起了定向爆破筑坝的高潮,至1960年已有16座定向爆破筑成的水坝。

1960年,由广东省水电厅设计施工的南水电站,是国内采用定向爆破筑坝最成功的典型事例,

至今仍在正常运行,发挥着蓄水、防洪、发电功能,并于20世纪80年代被推荐到世界大坝会议上进行介绍。该项工程由广东省水电厅马乃耀主持设计,霍永基、冯叔瑜、朱忠节等众多爆破专家参与,爆破用药1 394 t,一次抛掷石方量 $1.05 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,形成了高62.3 m的堆石大坝<sup>[5]</sup>。此后数十年间,定向爆破技术在水利、矿山、交通、建材等部门得到广泛应用,并进一步创新发展。

1962年10月,在冯叔瑜、朱忠节的主持下,开展了“路基土石方爆破技术”的研究,1963年为了查明硐室大爆破路堑边坡的运营现状,总结经验,提高大爆破的设计施工水平。由原铁道部组织,中国铁道科学研究院爆破室牵头,有关高校、设计院和铁路管理局等17个单位参加的“大爆破路堑边坡稳定情况”调查组,对鹰厦、宝成、内宜、川黔、都贵、兰新、天兰、丰沙、宝天、贵昆等10条新线铁路的100多处大爆破工点逐一进行调查,收集爆破设计施工资料,了解爆破前后的地形、地质情况以及通车后运营中的问题。经分析总结,基本弄清了爆破设计与工程地质、水文地质及地形地貌的关系,恢复了大爆破的名誉。这为以后在成昆、湘黔等线大爆破设计提供了有益的数据,极大地改善了大爆破路堑边坡的稳定程度,并对建立和发展爆破工程地质学起到了重要作用<sup>[6]</sup>。

1964年上半年,我国开始在地形、地质条件十分复杂陡峻的西南山区修建成昆铁路。为了解决设计施工中的诸多难题,国家科学技术委员会协调组成战斗组进行科技攻关,在成立的40多个多学科的新技术战斗组中,与爆破有关的是“爆破器材”、“40技术”和“爆破技术”三个战斗组。“爆破器材组”主要是在硐室大爆破中推广使用铵油炸药,由冯叔瑜等人负责,取得了显著的技术、经济效果。“40技术”是利用军用破甲弹的聚能原理制作聚能弹,置于岩石表面爆破穿孔,尝试替代隧道开挖的凿岩机具。

“爆破技术战斗组”以中国铁道科学研究院、铁道兵科研所、中科院力学所、长沙矿冶所、中铁二局集团有限公司为主,冯叔瑜为组长,朱忠节、张建华为副组长,共30多人,分别在沿线70多处爆破工点全面推广硐室大爆破并指导设计与施工,爆破石方近千万立方米。后期回访表明,其路堑边坡开挖质量及稳定状况远高于20世纪50年代的爆破工点。

20世纪60年代,国外石方开挖已采用深孔台阶

爆破及相应的微差爆破、光面预裂爆破等新技术,石方机械化施工程度高达90%以上。而推广深孔爆破首先必须解决深孔钻机问题。为此,冯叔瑜建议原铁道部购置1965年在北京展览馆展出的法国产潜孔钻机作样机,同时和宣化风动工具厂合作,将该厂生产的用于矿山和采石场的YQ-100和YQ-150型潜孔钻机分别改装在拖拉机上,便于在铁路施工流动性大、地形复杂的条件下使用。

正当成昆铁路爆破技术战斗组在全线施工发挥重要作用时,受特定历史时期的影响,施工全线停止,爆破技术战斗组的工作相应结束。1966—1970年,是受影响最严重的几年,国民经济濒临崩溃的边缘,铁路、公路、矿山、水电等基础设施建设均被迫停工,大部分技术人员到农村、工厂参加劳动,工程爆破技术研究处于瘫痪停顿状态。

1971年初,周总理亲自批准了攀枝花朱家包包狮子山万吨大爆破工程,并指示万吨大爆破要“周密组织,杜绝失误”,大爆破由边克信、朱德达等国内爆破技术人员自行设计,有36家单位,共3万军民参加。狮子山万吨大爆破一次爆破总装药量达10 162 t,松动岩石 $1.104 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,采用“一次分层、延发爆破”新方法起爆,没有早爆和拒爆现象发生<sup>[7]</sup>。

1971年,广东省为疏通珠江黄埔航道,由广州航道局组成了专业水下爆破炸礁队,邀请中国铁道科学研究院合作。不到两年的时间里,在马乃耀、冯叔瑜的主持下,解决并疏通了黄埔大石、二石长约2 000 m的大濠州航道,拓深达10 m,拓宽航道80 m,总计爆破炸礁量达 $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。创造了一套水下深孔爆破水上作业全新的设计、施工工艺(被誉为“黄埔水下爆破法”<sup>[8]</sup>),并收集整理了大量水下爆破振动和冲击波效应及水工结构物响应和安全防护的测试资料,达到了国际先进水平,彻底改变了过去水下爆破作业的困难、落后状态。

1972年,南京冶山铁矿为了尽快形成地下采矿条件,在主副井附近水下100 m处进行露天硐室大爆破,利用崩落的岩石形成井下采矿垫层,为确保工业建筑物和井巷的安全,我国第一次在硐室爆破中采用微差爆破,成功地控制了地震效应和飞石的危害作用<sup>[7]</sup>。

1973年,开展铁路路基石方机械化施工的任务提到了日程上。在冯叔瑜提议、中铁三局集团有限公司(铁三局)刘圣化局长和缪垂祖总工程师的大力支持下,组建了“铁路深孔爆破石方机械化施工技术研究”课题组,并在邯长线东戌车站成立了深

孔爆破石方机械化施工队,经一年的努力完成了试验任务,石方施工工效平均提高到 $14.6 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{天}$ 的水平<sup>[9]</sup>。铁道部基建总局召开了各铁路工程单位参加的现场经验交流会,收到了良好的效果。铁三局也在此基础上,建立了铁路系统第一支专业化的深孔爆破石方机械化施工队。

1974年青藏铁路西宁—格尔木段开工,铁道部科学研究院承担了铁道部下发的“高原冻土爆破技术研究”和“青藏线高原冻土桥涵基坑爆破快速开挖试验研究”两项课题,顾毅成任组长。与中铁西北科学研究院有限公司、铁道兵部队合作,在青藏高原海拔4 000 m以上的风火山一带,极其艰苦的条件下进行了近3年的试验研究。其成果为2000年青藏线格尔木至拉萨段的建设提供了技术储备。

1974年,葛洲坝水利枢纽工程正式开工,水利电力部330工程局张正宇通过大规模预裂爆破试验,取得了适用于该工程的预裂爆破参数,不但提高了基坑壁面的质量,还相应地减少了大量的石方开挖数量。之后,设计单位在施工中将缓坡均改为较陡的边坡,并实施预裂爆破。该成功经验为水利水电行业全面推广应用预裂爆破打下了良好的基础。

1976年改革开放后,各行各业的安全生产恢复。原国家计化委员会物资总局在过去几次硐室炸药库爆破事故的教训基础上,提出进行一次大规模的试验研究,彻底解决炸药储备洞库的布局和安全设计问题。1977年成立了“七七工程”试验组,按500 t TNT 储存洞库原型进行了1:1、1:1/2、1:1/4和1:1/8的试验洞库爆炸设计。这是建国以来最大的一次综合性化爆试验,先后有30多个单位、300多名科技人员参加,动用了上千台测试仪器和设备。在湖北随县花岗岩地区和甘肃砾岩、黄土地区进行了数十次试验,历时8年,取得了丰硕成果,通过了国家计划委员会组织的国家级鉴定。

在爆破器材方面,随着国民经济建设的恢复和五年计划的实施,炸药从3个品种发展到9个品种,1959年生产出抗水型铵梯炸药。1958年开始研制,1960年开始批量生产毫秒电雷管,1966年开始生产铵油炸药。1970年以后,在研制和引进的基础上开始生产浆状炸药、乳化炸药和水胶炸药,同时开始研究非电导爆管系统。

自1958年东北工学院(现为东北大学)在国内首次用定向控制爆破技术拆除钢筋混凝土烟囱之



后,拆除爆破技术引起了普遍重视和全面推广。1973年,北京铁路局采用控制爆破,拆除了旧北京饭店约2 200 m<sup>2</sup>钢筋混凝土结构的地下室,并且保证了周围建筑群、交通和人员的安全。1976年,中国人民解放军工程兵工程学院(现解放军理工大学)林学圣教授主持运用控制爆破技术安全地拆除了天安门广场两侧总面积达1.2×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>的三座大楼,标志着城市拆除控制爆破技术在我国开始应用。1976年,在冯叔瑜的领导下,爆破技术人员开始系统地研究建(构)筑物拆除控制爆破技术。

我国爆炸加工的试验研究始于1960年,最初研究爆炸成形工艺。从1962年起,该工艺逐步用于生产,1963年起研究爆炸焊接,1968年用于生产。最早参与爆炸加工技术研究的单位有大连爆炸加工研究所、宝鸡稀有金属加工研究所、洛阳船舶材料研究所、中国科学院力学研究所等。在进行了大量的爆炸焊接试验研究之后,1966年11月,在陈火金的带领下,大连爆炸加工研究所诞生了国内第一张爆炸焊接复合板。1970年,宝鸡稀有金属加工研究所为化工部门提供了钛/钢金属复合板,制成了我国第一台大型爆炸复合板设备,1974年,又开始以爆炸复合-轧制技术研究各种复合材料。1978年,大连爆炸加工研究所利用弹性应力波在固体介质中传播的“飞片”原理,研究成功了内孔爆炸壳体的“吸能块保护法”,为爆炸焊接技术在复合管件上的应用创造了条件<sup>[10]</sup>。

## 2.2 成长阶段(1978—1994年)

1977年12月15日至27日,中国力学学会在安徽黄山召开了“全国第一届爆炸力学学术会议”,学科创始人郑哲敏作了《爆炸力学的概况和任务》报告,系统介绍了爆破力学的研究意义、研究历程和爆破力学学科规划问题。来自全国66个单位的201名代表参加了会议,参会者相互交流了研究成果,明确了下一步研究方向。

1978年1月17日至26日,在国家科学技术委员会、中国科学院、中国科学技术协会的领导与关怀下,中国力学学会在云南昆明举办了全国土岩爆破学术经验交流会(第一届土岩爆破会议),来自全国96个单位的160名代表参加了本次会议,会议期间,代表们带来了许多土岩爆破工程的重大研究成果、施工经验、有关土岩爆破基本理论、新技术、安全防护以及量测技术,并探讨了当时国内一些重大土岩爆破工程项目和关键技术,提出了很好的意见。

1979年,我国成立了第一届爆炸力学专业委员会(1979—1985年),郑哲敏任主任委员,程开甲、丁敬任副主任委员,朱兆详、冯叔瑜、陈火金等人任委员,并相继组建了土岩爆破和爆炸加工两个专业小组。1984年6月,经中国力学学会常务理事会议批准,成立第一届工程爆破专业委员会(1983—1989年),专业委员会的成立标志着我国工程爆破事业进入了一个新的发展时期。

1984年,铁道部为提高重大铁路干线的运能,决定修建京广复线。三年多的时间内,“衡广铁路繁忙段改建中的爆破新技术试验研究”课题组在衡阳—广州区段不中断行车、距既有线近在咫尺的条件下进行了大量的试验研究,并同时完成了数十处工点的爆破开挖任务。提出了适用于不同条件的预留隔墙纵向拉槽、纵向V型拉槽、小台阶控制爆破、等复线施工控制爆破法。

1981年动工修建的大瑶山隧道,长14.295 km,是当时我国最长的铁路隧道,由王梦恕等人主持设计施工。在大瑶山隧道开挖中,推行了国内外最先进的设计和施工方法——“新奥法”,采用20世纪80年代国内外先进的大型机械,实现了钻爆、支护、装运三项主要工序的机械化作业。大瑶山隧道于1988年12月建成,其钻爆技术在我国山岭隧道建设中有着里程碑意义,该工程荣获1992年国家科技进步奖特等奖。

1986年大(同)秦(皇岛)重载铁路新线开工,在冯叔瑜的指导下,在隧道爆破中推广非电导爆管起爆系统;在20世纪70年代石方机械化施工试点的基础上,进一步开展深孔控制爆破的研究,钻爆、挖装、运卸等工序的机械化施工程度达到了93%~95%的水平。

1989年至1990年,长沙矿冶研究院、北京科技大学、首钢水厂铁矿成功地进行了3次“70万吨~100万吨级大区毫秒延时微差”爆破试验,检验了大规模塑料导爆管起爆网路设计的可靠性,为进一步扩大爆破规模,推广大区微差爆破技术打下了良好的基础<sup>[11]</sup>。

1992年经原铁道部科技司批准立项,成立了“条形药包洞室爆破技术及其特性的研究”课题,由中国铁道科学研究院张志毅、戈鹤川任课题组正、副组长,合作单位有铁三局和中国矿业大学北京研究生部,先后在总参北京工程兵东花园试验场及中国矿业大学北京研究生部实验室内进行了土中模拟爆破和室内动光弹、动云纹爆炸机理试验,并结

合横南铁路新线武夷山车站工地作了条形药包洞室爆破工程应用试验。在条形药包定义、爆炸机理、应力场和振动场分布、爆破设计计算方法和参数、药包间距排距和端头效应及施工工艺等方面取得了系统、完整的成果。条形药包以其众多的优点成为洞室爆破装药的主要形式,条形药包装设计标志着我国洞室爆破技术发展进入第三阶段。

1992年12月28日,由总参工程兵工程学院林学圣主持设计、钱七虎等人组织实施、冯叔瑜等人参加,成功实施了珠海炮台山万吨级洞室大爆破,大爆破总装药量为12 000 t,一次性爆落破碎和抛掷石方总量达 $1.08 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,该工程综合运用了我国40年来实施大药量土石方爆破的科研成果与工程经验,考验了我国当时爆破器材、爆破设计施工的水平和质量,标志着我国爆破技术迈上新台阶<sup>[12]</sup>。

我国海岸线绵延数千千米,沿海建码头、堤岸以及防波堤等工程数量巨大,20世纪80年代,中国科学院力学研究所郑哲敏院士首先提出爆炸处理水下淤泥质软基方法和应用条件,其研究成果为爆炸法处理水下淤泥质软基技术奠定了理论基础。中国科学院力学研究所与连云港及中华人民共和国交通运输部有关单位组织联合攻关,经过多年理论和现场试验研究、工程性试验、工程实践,总结提出了一套完整的淤泥软基爆炸处理新技术。十多年来,利用他们的发明专利技术先后在连云港建港工程、深圳电厂煤码头、珠海高兰港口工程、粤、海铁路通道轮渡码头港口防波堤以及其他类似工程的建设中,采用爆破排淤技术筑堤总长超过50 km,为我国沿海港口建设作出了重大贡献。

改革开放后,随着我国经济建设的高速发展,在大规模城市现代化建设、铁路干线和厂矿企业技术改造中需要改建、拆迁的工程项目日益增多,拆除爆破技术得到了迅速发展。1979年,中国铁道科学研究院成功运用控制爆破技术成功拆除了北京火车站口原中央科技馆遗址五座大型钢筋混凝土整体框架结构及其他钢筋混凝土圬工,结合本工程提出的“综合控制爆破新技术”获1985年国家科学技术进步奖三等奖,该项工程所取得的成果对于推动我国建(构)筑物拆除爆破技术的推广应用起到了积极作用。1981年,中国科学院力学研究所成功拆除了秦皇岛耀华玻璃厂管窑厂房,拆除过程中观测研究了建筑物在爆破后的倒塌过程和形态,监测了爆破及塌落振动特性。结合本工程,周家汉等人

采用无量纲相似参数分析方法,提出了爆破振动和塌落振动预测计算公式<sup>[13]</sup>。在此期间,国内许多城市都有一批建(构)筑物是采用控制爆破技术拆除,如1984年由北京军区工程科研设计所完成的天津化工厂氯化苯7层钢筋混凝土车间大楼爆破拆除工程;1986年由广东省爆破公司实施的广东佛山市石湾汾江水泥厂烘干车间爆破拆除工程;1987年由工程兵工程学院完成的济南八一礼堂爆破拆除工程;1988年由中国科学院力学研究所完成的北京华侨大厦爆破拆除工程;1994年6月由珠海爆破新技术开发有限公司完成的珠海裕新纺织厂火灾危楼抢险爆破拆除工程等。

1978—1994年,爆炸加工无论是在理论还是在产品开发上都取得了突飞猛进的进展。在我国1979年制定的力学学科发展规划中,爆炸力学被列为十四个力学重点分支之一,同年郑哲敏、杨振声出版了《爆炸加工》一书,全面地介绍了有关爆炸加工方面的理论和实践<sup>[14]</sup>。1984年前后,大连爆炸加工研究所完成了“铵油系炸药爆炸性能的试验研究”、“爆轰焊接参数试验的台阶法”、“复板飞行姿态的试验报告”、“爆炸焊接界面压力的计算”四篇对爆炸焊接具有重要意义的研究论文,为工艺参数的选择提供了理论指导。在产品开发方面,20世纪80年代,爆炸焊接就已经进行了50多种材料组合的研究工作,其中就有铜及其合金/钢、钛/钢、不锈钢/铜、铜/铝、铝/钢等,最大复合板的面积达到了 $10 \text{ m}^2$ 。大连爆炸加工研究所1987年在中国石油化工总公司重点科技开发项目(不锈钢与容器钢爆炸复合板性能研究)的支持下,对用于石化加氢装置的9种复合材料组合性能进行了系统的试验研究,并用321/15CrMo爆炸复合板制造了预加氢反应器、加氢脱砷反应器、加氢脱蜡反应器。1986年金属复合板在锦州石油五厂 $1 \times 10^6 \text{ t}$ 塔上的成功应用,成为金属复合板生产逐渐进入商品化规模生产发展的里程碑。1988年11月全国第六届爆炸加工学术交流会后,爆炸焊接产品相继在一些大型工程装备上被推荐和采用,七二五所研制的爆炸复合板成功地应用在了克拉玛依炼油厂 $1 \times 10^6 \text{ t}$ 减压塔(1990年)、济南炼油厂 $2.5 \times 10^6 \text{ t}$ 减压塔(1991年)等工程<sup>[10]</sup>。

### 2.3 壮大阶段(1994年至今)

20世纪90年代初,全国从事工程爆破、科研、设计、教学和施工的企业达到1 000余家,新成立的爆破公司就有500多家,从业人员超过100万,其中科



技人员达到3万人,民用工业炸药年产量超过 $1\times 10^6$  t,潜力巨大的市场给工程爆破业带来每年约1000亿元的产值。成立一个全国性的行业技术交流与合作组织,成为工程爆破行业的当务之急。

1993年10月,中国力学学会工程爆破专业委员会在武汉召开了第五届全国工程爆破学术交流会。在郑哲敏、冯叔瑜、杨善元、汪旭光、霍永基、杨振声、边克信等知名专家共同的发起和努力下,1994年10月13日,经中华人民共和国民政部和有色金属工业总公司批准,中国工程爆破协会在人民大会堂正式成立,第一届理事会由王芳、郑哲敏任名誉理事长,费子文任理事长,冯叔瑜任第一副理事长,汪旭光任常务副理事长,边克信、杨振声、徐天瑞、钱七虎等人任副理事长。中国工程爆破协会的成立,将长期分散在各行业、各地区的工程爆破技术力量和人员组织起来,通过定期培训考核爆破工程技术人员、组织国内外学术交流、加强横向协作、发挥整体优势,大大促进了中国工程爆破行业的繁荣与发展。

20世纪90年代,中深孔爆破技术已广泛应用于公路、铁路、水利水电建设和矿山开采的开挖和场地平整等工程中,并根据工程需要形成了微差爆破、挤压爆破、光面爆破和预裂爆破等,呈现出大孔径钻机、高台阶、一次爆破规模大、采用高精度高可靠性导爆管、混装车装药以及钻机数据自动采集和计算机模拟技术等特点。

1994年12月,中铁三局在青岛环胶州湾高速公路路堑开挖工程施工中,采用深孔爆破技术成功地实现了一次爆破开挖成型长达470 m、深10 m的路堑。采用非电导爆管毫秒差接力网路,一次爆破203排,起爆雷管 $1.34\times 10^4$ 发,共分594响,爆破延续时间4770 ms,爆破石方总量 $1.15\times 10^5$  m<sup>3</sup>。此后,中铁三局等单位在广西柳桂高速公路采用超深孔高台阶预裂光面爆破技术(台阶高达27 m),成功地实现了在石灰岩复杂多变的地质条件下,爆破后坡面稳定、平整、美观,半孔率达95%左右,成为我国高速公路路堑边坡成型光面设计与施工的标准样板路段。

三峡水电枢纽工程永久船闸双线五级闸室总长1621 m,最大开挖深度170 m(直立墙最大开挖深度68 m),闸室开挖总量达 $1.308\times 10^7$  m<sup>3</sup>。1994年4月—1999年12月,武警水电部队在三峡水电枢纽工程永久船闸双线五级闸室开挖工程中,采用直立边坡成型、闸槽底部保护层开挖、双重缓冲、双重光

面爆破技术和毫秒延时起爆等综合爆破技术,实现了船闸直立深槽爆破开挖成型,且百米高边坡稳定的良好效果。此后,中深孔预裂或光面爆破技术广泛应用于各大水电站主体工程边坡开挖中,其规模之大和开挖质量之优异,已达到世界先进水平<sup>[15]</sup>。

露天矿山生产中,德兴铜矿从1996年6月全面推广在有自燃自爆危险的难爆矿岩中实行机械化预装药爆破技术;山西安太堡露天煤矿2003年3月成功进行了一次逐孔毫秒延期爆破,爆破孔数1285个,炸药量为480 t,爆破量为 $1.25\times 10^6$  m<sup>3</sup>;太钢峨口铁矿2005年3月进行了一次大区多排深孔毫秒爆破,炮孔总数为871个,使用炸药398.7 t,矿岩爆破量为 $1.303\times 10^6$  m<sup>3</sup>,均取得了良好的爆破效果;神华准能公司黑岱沟露天矿引进大型迈步式拉斗铲,自2007年下半年开始采用高台阶抛掷爆破—拉斗铲倒堆采矿工艺,台阶高度为45 m,台阶宽度为60 m,采用70°倾斜钻孔,钻孔直径为310 mm,采用现场混装重铵油炸药、高精度导爆管雷管逐孔起爆技术,一次爆破装药量为900~1500 t。

20世纪90年代后期,我国铁路与城市地下铁道建设、高速公路修建、矿山开采、西部大开发进程中的水力资源开发和南水北调等工程修建了大量隧道、输水隧洞和地下厂房,毫秒微差爆破、光面爆破、岩巷全断面一次爆破和复杂硐室群爆破开挖等技术都获得了新的突破。西康铁路秦岭Ⅱ线隧道,长18.5 km,由中国铁道科学研究院铁道建筑研究所承担“秦岭硬岩特长隧道爆破快速掘进研究”课题,通过炸药匹配、掏槽方案优化和机制炮泥填塞等关键技术攻关,施工单位创造了平均月进尺264 m、最高月进尺456 m的国内最高纪录,并达到国际同类隧道最高掘进速度,形成了特硬岩、特长隧道爆破掘进的快速施工技术,秦岭隧道修建技术于2003年获国家科技进步奖一等奖,而“硬岩特长隧道快速钻爆掘进技术”是其重要成果之一。此后,2003年开工建设的乌鞘岭特长隧道、2005年开工建设的厦门翔安海底隧道均采用钻爆法掘进,隧道爆破技术不断创新。近几年来,随着地铁建设高潮的掀起,特小净距平行隧道、城镇浅埋暗挖双层隧道和浅埋穿江隧道开挖爆破以及隧道减振控制爆破技术等方面都获得了新突破,出现了许多近距离埋深10~30 m的城区、埋深小于1倍洞径的水下和与既有建(构)筑物净间距小于10 m的隧道工程。

大型水利水电工程及地下厂房开挖,在推广光

面爆破、预裂爆破技术和采用先进爆破器材的同时,贯彻精细爆破技术的理念和管理,将精细爆破技术作为爆破开挖工程中的技术核心和地下大洞室“新奥法施工”的第1道屏障。三峡、龙滩、小湾、溪洛渡和向家坝等大型水电工程,都是大跨度地下厂房洞室群开挖工程的典型代表,在爆破成型、爆破振动及爆破损伤控制方面达到了很高水平。

地下矿山开挖与开采工程中,大直径深孔爆破得到了推广应用,并已形成“VCR”、“台阶深孔”、“束状深孔”、“高阶阶段深孔”、“阶段深孔等效球形药包”等各具特色与运用条件的大直径深孔爆破技术。如安庆铜矿的高阶阶段达120 m;2010年1月16日湖南柿竹园有色金属公司821 t炸药地下大爆破,采用阶段密集束状深孔为主,辅之以深孔及小洞室药包的爆破方案,并采用了预裂爆破降振与双导爆索传爆等技术,成功落矿 $1.886 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

随着我国经济建设的高速发展,在大规模城市现代化建设、铁路干线和厂矿企业技术改造中需要改建、拆迁的工程项目日益增多。许多爆破企业、研究机构 and 大专院校的研究工作者,在对爆炸力学、材料力学、结构力学、断裂力学等工程学科认知的基础上,结合典型工程实例提出了对不同结构和环境条件采用原地坍塌、定向倾倒、折叠倒塌爆破拆除方案,采用高速摄影、应力应变、振动测试等多种手段进行观测并进行数据分析,研究了不同建(构)筑物在爆破作用下的失稳、解体、倒塌机理和构件破碎过程,大大促进了我国拆除爆破技术的发展。

1995年12月,武汉爆破公司、武汉铁四院控制爆破技术有限公司、中钢集团武汉安全环保研究院有限公司、长江科学院和武汉理工大学等单位采用控制爆破方法成功拆除了一栋因地基不均匀沉降而严重倾斜的18层新建高楼。该楼房是我国当时采用爆破技术拆除的最高楼房,该工程在切口形式、倒塌方式、起爆系统和安全控制等方面都实现了创新,为类似工程起到重要的示范作用,推动了我国复杂环境下高层楼房爆破拆除的技术进步。

2000年以后,建(构)筑物爆破拆除趋向高层化和结构形式多样化,结构倒塌的形式趋于多样化,更加重视城市拆除爆破环境的影响。典型工程有:2002年3月,武汉爆破有限公司采取控制爆破方法成功拆除的位于长江防洪堤内的8栋违规新建楼房;2004年2月解放军理工大学工程兵学院成功实施了南昌五湖大酒店爆破拆除工程(高85.7 m,高

22层);2004年7月广东中人集团成功实施的温州中银大厦爆破拆除工程(高93.05 m,共22层);2009年8月广东中人集团成功实施了中山石岐山顶花园爆破拆除工程(高104.1 m,共34层);2011年1月大连开盛爆破拆除工程有限公司成功实施了大连金马大厦爆破拆除工程(高94.3 m,共28层);2004年1月武汉爆破有限公司采用双向折叠倒塌方案成功爆破拆除了阳逻化肥厂100 m钢筋混凝土烟囱;2007年12月,武汉爆破有限公司采用定向倒塌和双向三折叠倒塌方案成功爆破拆除了两栋19层大楼,双向三折叠方案的成功实施为对象日趋大型化、复杂化的爆破拆除工程提供了新的选择。为解决爆破所产生的粉尘污染,武汉爆破有限公司2002年11月在武烟煤锅炉房爆破拆除工程率先引入“绿色环保爆破”新理念,采用“综合降尘技术”有效控制了爆破粉尘对环境的危害;广东宏大爆破工程有限公司研制开发了“活性水”、“活性雾”,采用“活性泡沫”浸没塌落的建筑,通过“活性雾”的方式来包围捕捉扬尘,并成功应用于2007年1月广州天河城西塔楼的爆破拆除工程中。

近20年来,国内几十座废旧桥梁采用控制爆破成功拆除,其中包括南昌八一大桥、临汾马务大桥、阜新至锦州公路上的清河门大桥、恩施浑水河清江大桥、江西宜春大桥、云南保山永保大桥、贵州册亨岩架大桥、贵阳艺校立交桥、南京水西门高架桥、武汉沌阳高架桥和武汉汪家嘴立交桥等工程。其中,由武汉爆破有限公司设计并施工的3.5 km沌阳高架桥一次性爆破拆除工程,总装药量1.9 t,总延时24.77 s,该桥是目前国内外采用爆破方法拆除的长度最大、环境最复杂、施工难度最高的钢筋混凝土高架桥梁,堪称“世界桥梁第一爆”。

水下爆破工程方面,2006年6月6日,中国长江三峡工程开发总公司、长江水利委员会长江勘测设计院、长江科学院等单位成功地实施了长江三峡水利枢纽三期上游碾压混凝土围堰拆除爆破工程。爆破拆除围堰总长度为480 m,拆除量 $1.86 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,最大爆破水深达38 m,设计爆破炮孔(药室)总数达1 022个,总装药量191.3 t,采用现场混装乳化炸药,使用数码雷管2 506发,爆破总延时12.88 s。该工程在围堰拆除理念、总体方案、模型试验、有害效应控制和混装炸药等方面的创新,不仅满足了三峡三期工程建设的需要,更使我国在围堰拆除爆破技术上处于国际领先水平<sup>[16]</sup>。



近20年来,我国的爆炸焊接技术及其深加工技术已经处于国际领先水平。西安天力金属复合材料有限公司、宝钦集团有限公司金属复合板公司、南京宝泰特种材料有限公司等企业生产的钛、镍、锆等复合材料可与美国DMC公司产品相媲美,日本东京、横滨等地铁采用大连爆炸加工研究所生产的铜/钢、铝/钢复合材料作为直线电机材料。各企业生产的品种多样、性能各异的金属复合板材、型材所制造的耐高温、耐腐蚀等设备,已成为我国工业化发展不可或缺的重要装备,如四川惊雷科技股份有限公司、太原钢铁(集团)有限公司复合材料厂等企业生产的双相钢复合材料应用于三峡水利枢纽工程,企业的生产能力逐年增加,据不完全统计,2007年中国爆炸加工企业复合板的产量大约在 $1 \times 10^5$  t,占全球复合板产量的一半。为满足国民经济建设的需要,加强对全国爆炸加工行业的管理工作,规范行业的市场行为,促进我国爆炸加工行业可持续健康发展,中国工程爆破协会爆炸加工行业委员会于2007年12月26日在北京成立,开创了我国工程爆破爆炸加工工作的新局面。

进入20世纪后,爆破器材广泛地应用于采矿、煤炭、石材开采,交通建设,水利水电工程,地震勘探等国民经济的各个领域。爆破器材已细分为工业炸药、工业雷管、工业索类火工品、油气井用爆破器材、地震勘探用爆破器材等八大类,39个品种。

特别需要指出的是,在汪旭光的主持下,其研究团队先后突破大量无机盐乳胶体系的储存稳定性、快速敏化技术、耐低温抗酸性水、密度对炸药性能的制约、连续化微机控制生产、大产能多品种生产等一系列关键技术,成功地研制出适合各种不同爆破作业的EL、SB、BME、BSE、BMH、CLH、MAN、ML、MZ、P等10个系列38种安全、高效、低成本乳化炸药以及配套的工艺、设备和专用的原材料,从而形成了较为完整的BGRIMM乳化炸药技术。目前,乳化炸药技术不断向发达国家和发展中国家转让,国内外用户达90余家<sup>[17]</sup>。

现场混装乳化炸药爆破技术由装药车装载炸药原料或半成品驶入爆破作业现场后,用车载系统将其连续制备成炸药,并完成炮孔装填,实现了制药、装药作业的机械化和连续化<sup>[18]</sup>。

与此同时,我国还自行研制、生产了塑料导爆管及其配套的非电毫秒雷管,并在工程爆破作业中获得了广泛的应用。北京北方邦杰科技发展有限

公司、北京京煤化工有限公司、贵州久联企业集团有限公司,中国兵器工业集团213所等单位均推出了各自的电子雷管产品,并已在爆破工程中获得初步应用。爆破器材的产品种类和产量基本满足了各类爆破工程的需要,并出口瑞典、俄罗斯、蒙古、赞比亚等19个国家。

随着我国工程爆破科技的不断发展,爆破安全技术管理水平也得到了很大提高。近20年来,我国工程爆破技术人员十分重视爆破有害效应的观测和研究,并制订相应防护措施,这些研究成果和防护措施不仅可以预防和减少各种爆破事故,还有效地控制了爆破有害效应对周围环境的影响。为了使爆破安全技术管理科学化和法制化,2006年国家颁布了《民用爆炸物品安全管理条例》(国务院令466号),《爆破安全规程》(GB 6722—2003)由中国工程爆破协会组织专家进行修订后,即将颁布新版本。为提高从事工程爆破技术人员的素质,加强工程爆破专业队伍的管理,由公安部主持,中国工程爆破协会协助对全国工程爆破人员进行爆破安全技术培训考核发证,实行持证上岗。对爆破公司实行等级管理制,对重大爆破工程的设计施工进行安全评估,逐步推行爆破工程安全监理制度,这些使中国工程爆破安全管理更加有序化和规范化。

近20年来,我国不少科研单位和高等院校结合国家大型工程项目的立项与实施以及研究生的培养,在工程爆破学科方面进行了广泛而深入的研究。在爆破作用机理、爆炸应力波传播、炸药的能量分配、爆破鼓包运动、抛掷堆积形状、预裂爆破成缝机理、岩石破碎机理、爆破工程地质、岩石爆破性分级以及爆破振动效应观测和分析以及爆破优化设计、爆破过程计算机模拟等研究方面取得了一大批理论研究成果<sup>[19]</sup>。

武汉爆破有限公司谢先启教授在国际上首次提出了“精细爆破”的理念,并建立了精细爆破技术体系<sup>[20]</sup>。2008年4月23日,中国工程爆破协会在武汉组织召开了“精细爆破”研讨会,2009年10月27日,湖北省科技厅主持召开了“精细爆破”项目成果鉴定会,与会专家一致认为“精细爆破”“是工程爆破发展新阶段的标志,对工程爆破技术发展必将产生深远的影响”。

在国际交流与合作方面,也取得了前所未有的成绩。在汪旭光的努力下,经国际岩石爆破破碎委员会投票决定,第七届国际岩石爆破破碎学术会议



(International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 简称 FRAGBLAST, 1982 年发起, 每 3~4 年召开一次) 由中国工程爆破协会承办, 会议于 2002 年 8 月在北京成功召开, 这是国际爆破界对我国改革开放以来爆破技术进步的正视和肯定。作为发起方, 中国工程爆破协会于 2006 年 6 月在湖北宜昌成功组织召开了第一届中日韩炸药与爆破技术国际会议(The International Conference on Explosives and Engineering, 每年举行一次, 由中日韩三国轮流举办, 2011 年起改为两年一届), 截至目前, 中日韩炸药与爆破技术国际会议已成功举办 7 次。此外, 2007 年 5 月在昆明成功召开了“第一届亚洲太平洋地区爆破技术研讨会”(亚洲太平洋地区爆破技术研讨会, The Asian-Pacific Symposium on Blasting Techniques, 简称 APS Blasting, 每两年举办一次), 截至目前, 亚洲太平洋地区爆破技术研讨会已成功举办 3 次。上述系列会议加强了我国与世界各国爆破界之间的学术交流与技术合作, 增进了各行业各学科间的相互渗透, 显著提升了我国工程爆破在世界范围的影响力。

### 3 展望

伴随着国民经济的发展以及城镇化进程的加快, 工程爆破必将迎来更为广阔的天地和更加艰巨的挑战, 广大工程爆破技术人员须在以下几个方面进一步开展深入研究。

1) 结合国家经济结构调整, 拓宽工程爆破技术的应用领域, 如在合成新材料、处理废料、防灾减灾等方面开展相关研究, 让其更好地服务社会、造福人类。

2) 进一步加强基础理论研究, 一方面应加深对爆炸过程本质的认知, 另一方面应探索研究如何提高爆炸能量利用率。

3) 安全是工程爆破的永恒主题, 加强爆破安全技术研究, 对爆破技术应用范围的扩大有着重要的意义, 只有解决与工程爆破有关的安全技术问题, 爆破技术才能发挥更大的作用。

4) 进一步推广和发展“精细爆破”, 精细爆破是我国工程爆破的发展方向, 应在爆炸基础理论和关键技术研究基础上, 融合大数据、物联网等新技术, 实现工程爆破行业的精细化、数字化和可持续化。

### 4 结语

石破天惊须臾间, 砥砺前行一甲子!

60 年来, 我国在工程爆破的基础理论、关键技术、爆破器材和施工机械等方面都取得了明显进步, 且某些领域已处于国际领先水平, 这是广大工程爆破设计、施工和科研技术人员勇于探索、敢于创新、不断开拓、努力奋斗的结果。在此, 我们回顾了工程爆破行业 60 年来的重大成就, 一是为记录它的发展进程, 更是为了激励全国工程爆破技术人员再接再厉, 让工程爆破在推动人类文明进步, 促进社会经济发展等方面发挥更大的作用。

### 参考文献

- [1] 钱学森. 写在前面[C]//土岩爆破文集(全国土岩爆破经验交流会议论文集). 北京: 冶金工业出版社, 1980: 1-2.
- [2] 边克信. 白银厂露天矿万吨硐室爆破[C]//中国典型爆破工程与技术(1950—2006). 北京: 冶金工业出版社, 2006: 143-146.
- [3] 铁道建筑研究所. 铁道建筑研究所志(1941—1987)[M]. 北京: 铁科院铁道建筑研究所, 1989.
- [4] 霍永基. 东川口水库定向爆破筑坝[C]//中国典型爆破工程与技术(1950—2006). 北京: 冶金工业出版社, 2006: 147-150.
- [5] 霍永基, 马乃耀, 冯叔瑜, 等. 南水定向爆破筑高坝技术[C]//中国典型爆破工程与技术(1950—2006). 北京: 冶金工业出版社, 2006: 151-153.
- [6] 张志毅, 王中黔. 工程爆破研究与实践[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004: 4.
- [7] 朱德达. 爆破工作三十年的回顾[J]. 长沙矿石研究院季刊, 1986, 6(4): 157-160.
- [8] 马乃耀, 冯叔瑜, 王中黔, 等. 黄埔炸礁工程[C]//中国典型爆破工程与技术(1950—2006). 北京: 冶金工业出版社, 2006: 391-395.
- [9] 冯叔瑜, 缪垂祖, 杨杰昌. 部长铁路东戎车站石方深孔爆破机械化施工[C]//中国典型爆破工程与技术(1950—2006). 北京: 冶金工业出版社, 2006: 3-8.
- [10] 张勇, 李晓杰, 张越举. 爆炸加工的历史、现状及其未来发展[C]//中国爆破新技术 II. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 17-22.
- [11] 高晓初, 于亚伦, 孙仲, 等. 水厂铁矿深孔台阶 70 万吨级大区毫秒延时爆破[C]//中国典型爆破工程与技术(1950—2006). 北京: 冶金工业出版社, 2006: 35-39.
- [12] 钱七虎, 林学圣, 齐世福, 等. 炮台山硐室爆破工程[C]//中国典型爆破工程与技术(1950—2006). 北京: 冶金工业出版社, 2006: 200-209.
- [13] 周家汉. 建筑物爆破拆除塌落振动速度计算公式的讨论和应用[C]//中国爆破新技术 II. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 727-733.
- [14] 郑哲敏, 杨振声. 爆炸加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [15] 周光奉, 王青屏, 梅锦煜. 三峡船闸直立深槽控制爆破工程[C]//中国典型爆破工程与技术(1950—2006). 北京: 冶金工业出版社, 2006: 78-81.
- [16] 陈敦科, 向文飞. 三峡三期 RCC 围堰拆除方案与设计关键技术研究[J]. 中国水利, 2007, 21: 53-55.
- [17] 汪旭光. 汪旭光院士论文选集[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [18] 汪旭光. 爆破器材与工程爆破新进展[J]. 中国工程科学, 2002, 4(4): 26-30.
- [19] 汪旭光, 周家汉, 王中黔, 等. 我国爆破事业的发展和新世纪的展望[C]//第七届全国工程爆破学术会议论文集. 2001: 1-11.
- [20] 谢先启. 精细爆破[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.

(下转 27 页)

# Advances in numerical simulation of demolition blasting

Xie Xianqi<sup>1</sup>, Liu Jun<sup>2</sup>, Jia Yongsheng<sup>1</sup>, Sun Jinshan<sup>1</sup>

(1. Wuhan Blasting Engineering Co. Ltd., Wuhan 430023, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**[Abstract]** The applications of numerical simulation in demolition blasting were reviewed. Several methods of numerical simulation in demolition blasting were introduced. The strength and weakness of the numerical methods mentioned in this paper were also indicated, respectively. Furthermore, the solid lattice model in the frame of discrete element method (DEM), which was developed by the author and his team, was detailed described. The existed problems in the current numerical simulation methods of demolition blasting were presented and the future trend of the numerical simulation is finally prospected.

**[Key words]** demolition blasting; numerical simulation; discrete element method; solid lattice model

---

(上接13页)

# Let the engineering blasting technology serving for society and benefit of mankind better: Sixty years of engineering blasting in China, review and prospect

Feng Shuyu<sup>1</sup>, Zheng Zhemin<sup>2</sup>

(1. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**[Abstract]** Based on representative blasting engineering projects, the development history of engineering blasting in China since 1950's was reviewed, three development phases were summarized, main achievements in fundamental theory, engineering practice, scientific study and industry organization of engineering blasting in each phase were described briefly. Finally, prospective to engineering blasting development direction is given.

**[Key words]** engineering blasting; representative engineering examples; development history; prospect



## 冯叔瑜

爆破工程专家。1924年6月20日出生，四川省邻水县人。1948年毕业于上海交通大学。铁道部科学研究院研究员。20世纪50年代最早将苏联大爆破技术引用到我国鹰厦、川黔、成昆、湘黔等铁路新线建设中，取得良好的工程效果。提出的大爆破药包布置理论和计算参数、定向爆破筑坝的设计理论、坝体堆积计算方法和建筑物拆除爆破理论已被国内工程普遍采用。通过铁路路堑大爆破工点的大量调查，为建立爆破工程地质学奠定了基础。参与国家科委三峡工程水利大组爆破小组的组织领导工作；协助并组织开展了定向爆破筑坝技术的研究；参与和指导国家科研项目“七七工程安全防护技术”的试验研究和我国爆破安全、大爆破、城市拆除爆破三部法规的编写和制定工作；参与交通部广州黄埔港航道炸礁工程，解决了万吨轮通航问题；推动和组织铁道部石方深孔爆破机械化施工，取得了良好效果；大力推动光面预裂爆破技术在路堑边坡和隧道开挖中应用。1995年当选为中国工程院院士。



## 郑哲敏

应用力学家。1924年10月2日出生，山东省济南市人。1947年毕业于清华大学，1952年获美国加州理工学院博士学位。中国科学院力学所研究员。早年从事热应力、振动与水弹性力学、地震工程力学方面的研究，1952年对输水管振动的分析曾为解决其重要工程作出贡献，1960年后致力于爆炸力学及其应用的研究，涉及爆炸成型、爆破、地下强爆炸、穿甲破甲、爆炸复合、瓦斯突出、水下沙土爆炸等问题。获全国工业新产品展览奖一等奖，国家自然科学基金二等奖，国家科技进步奖二等奖，2013年国家最高科技奖。1994年当选为中国工程院院士。

