



中国工程科技论坛第125场论文集

Proceedings of the 125th China Engineering Science and Technology Forum

爆炸合成新材料与高效、 安全爆破 关键科学和工程技术

汪旭光 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



中国工程科技论坛第125场论文集

Proceedings of the 125th China Engineering Science and Technology Forum

爆炸合成新材料与高效、 安全爆破 关键科学和工程技术

汪旭光 主编

冶金工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

爆炸合成新材料与高效、安全爆破关键科学和工程技术/
汪旭光主编. —北京:冶金工业出版社, 2011. 8
ISBN 978-7-5024-5753-2

I. ①爆… II. ①汪… III. ①爆炸复合—复合材料
②爆破技术 IV. ①TB33 ②TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011) 第 173339 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 程志宏 廖 丹 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5753-2

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011 年 8 月第 1 版, 2011 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 34.75 印张; 838 千字; 539 页

150.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

代 序

刘延东

宋健同志、匡迪同志、各位院士、同志们：

今天，很高兴再次来到工程院，参加中国工程科技论坛创办十周年座谈会，共同回顾和见证论坛十年百场的累累硕果。刚才匡迪同志和几位院士做了很好的发言，大家总结回顾了论坛的创办与发展历程，对今后的发展提出了很多好的想法，听后深受启发，倍感振奋。在座的院士和专家都是我国工程科技战线的领军人物，为我国工程科技事业发展做出了重要贡献。在此，我代表党中央、国务院向各位院士和专家，并通过你们向广大工程科技工作者致以诚挚的问候！

中国工程科技论坛创办于本世纪之初，正处于世界科技革命迅猛发展、我国工程科技加快进步之际。作为工程院的一项重要系列学术活动，论坛的创办体现了老一辈科学家的远见卓识，承载着广大工程科技工作者相互交流借鉴的殷切期望，成为广大院士发挥学术引领作用的重要载体。十年来，论坛秉承创办宗旨，紧跟工程科技前沿，把握科技进步方向，服务国家发展大局，以灵活多样的组织形式、和谐宽松的学术氛围，为科技界开辟了一个百花齐放、百家争鸣的学术交流与才华展示的崭新舞台。十年来，论坛不断创新，从个别领域发展到多个领域，从单一学科发展到多学科交叉，从热点学科发展到边缘学科，形成了兼容并蓄、激发创造的良好局面。十年来，论坛积极鼓励优秀青年工程科技工作者参与学术研讨，为院士发现、提携和培养优秀人才创造了良好条件，一批杰出人才崭露头角，加快成长，走进了院士行列，为国家的院士队伍增添了新的活力。十年来，论坛给科技界带来了一股清新的学风，形成了重要学术活动的特色和品牌，赢得了工程科技界的广泛赞誉。

今天，以论坛为代表的学术活动，已经成为我国工程科技界交流学术成果、分享学术思想的重要平台，为活跃学术思想、促进学科融合、引领科学发展发挥着重要作用；已成为一个聚焦战略问题、凝聚集体智慧的重要平台，为做好战略咨询、服务政府决策、促进经济社会发展作出了积极贡献。回首十年，论坛取得了令人鼓舞的成果，这些成果正是我国工程科技事业开拓奋进、跨越发展的具体展示，是中国工程院服务国家、引领学术的生动写照，是广大院士、专家和工程科技工作者心系祖国、勇攀高峰的光辉例证。

各位院士，同志们，党中央、国务院历来高度重视工程科技事业的发展，对院士们寄予很高期望。前不久闭幕的十七届五中全会，对未来五年我国经济社会发展作出了全面部署，鲜明指出我国发展仍处于可以大有作为的重要战略机遇期，经济社会发展呈现新的阶段性特征。站在历史的新高度继续推进现代化建设，中央要求必须以科学发展为主题，以加快经济发展方式转变为主线，深化改革开放，保障和改善民生，巩固和扩大应对国际金融危机冲击成果，促进经济长期平稳较快发展和社会和谐稳定，为全面建成小康社会打下具有决定性意义的基础。全会强调加快转变经济发展方式，最根本的是要靠科技的力量，最关键的是要大幅度提高自主创新能力。当前，科技知识创新、传播、应用的规模和速度前所未有，科学研究、技术创新、产业发展、社会进步相互促进和一体化发展趋势更加明显，必须紧紧跟上国际经济科技发展大势，牢牢把握发展主动权。工程科技承担着把科学知识转化为现实生产力的重大任务，是创新驱动、内生增长的关键因素，在加快转变发展方式中承担着前所未有的崇高使命。工程院作为我国工程科技界最高荣誉性、咨询性学术机构，要把握世界科技发展方向，适应国家发展重大需求，把学术引领、战略咨询、科技服务、人才培养有机结合，促进思想库建设的全面协调发展，引领工程科技发展的未来，为国家决策提供坚实的科技支持。

第一，希望工程院面向国家重大战略需求，充分发挥高端思想库的作用。“十二五”时期是实现全面建设小康社会奋斗目标承前启后的关键时期，也是深化重要领域和关键环节改革的关键时期。事关国家长远发展的战略问题、党和政府重大决策都需要强有力的智力支持。希望工程院按照中央的要求，紧扣时代脉搏，聚焦重大工程科技问题，前瞻部署，密切跟踪，组织开展战略研

究，为国家和地方的经济建设和社会发展提供决策咨询。要瞄准世界工程科技发展前沿，大力促进学科之间、科学与技术之间的交叉融合，为我国在工程科技领域占据制高点提供支持。要把科技重大专项、技术创新工程、战略性新兴产业发展作为工程院发挥思想库的优先领域和重要方向，引导广大院士建言献策、贡献力量。

第二，希望工程科技界围绕加快转变经济发展方式这一主线，加强重大工程科技攻关与应用。当前，工程科技进步已成为产业升级和经济发展的有力推手，新一轮产业革命将与工程科技领域的新突破息息相关。加快经济发展方式转变的战略，对工程科研提出了新的更高要求。高水平、高质量、高层次的工程科研是科技事业繁荣发展的重要组成部分，是建设创新型国家的基石。作为工程科研领域的人才高地，工程院应团结动员广大工程科研工作者，围绕中心，服务大局，为转变经济发展方式提供强大的科技支撑。要贴近行业、企业的科技需求，加快推进产学研结合，让科技创新为推动产业升级、民生改善、生态建设开辟新的途径。工程科技与生产实践有着紧密联系，院士和广大工程科研工作者要深入基层，多与生产一线的行业工人和企业家接触，了解他们的需求，让工程科技深深扎根在应用的土壤上。

第三，希望广大院士积极培养和提携年轻人才，造就一支更有朝气、更富活力的工程科技工作者队伍。人才资源是第一资源，优秀的青年科技人才是繁荣科技事业的希望所在。只有不断发现、培养和使用优秀青年科技人才，才能使科技事业薪火相传。胡锦涛总书记在今年的两院院士大会上对院士们以科教兴国为己任、悉心培养和提携优秀青年人才提出了希望。青年工程科技人才是科研战线的生力军，是富有活力的创新力量。希望院士们把培养青年科技人才作为义不容辞的责任，悉心指导，促其成长，并放手让他们担当大任。要开阔视野发现人才，竭诚尽力培养人才，不拘一格使用人才，充分调动广大青年科技工作者投身创新型国家建设的积极性、主动性和创造性。对拔尖创新人才要采取特殊政策，为他们施展才智创造条件，激励他们脱颖而出，在科技创新道路上奋勇拼搏、锐意进取，在人生的黄金时期作出杰出的业绩。

第四，希望中国工程科技论坛继续创新发展，进一步发挥学术活动的引领作用。中国工程科技论坛等学术活动是工程院高智力密集、多学科荟萃的特色

平台，希望工程院以战略高度、世界眼光和创新思维加强统筹规划，以百场中国工程科技论坛为契机，总结经验，把握定位，发挥优势，创新方法，改进服务，把论坛做好做强，打造成国际上有影响的知名学术活动品牌。要注重四个引领：一是引领科技创新，紧扣工程科技和经济社会发展中的战略性、前瞻性问题，精心组织各种类型的学术活动，让学术思想碰撞的火花点燃创新激情、开阔创新思路，促进多学科交叉融合和重大工程科技问题的解决，带动工程科技创新的长足发展。二是引领国内外交流，准确把握世界工程科技发展的前沿趋势，吸引国内外更多的一流科技专家参加进来，组织国内优秀科技专家参与国际学术交流，提升学术活动的质量和水平，不断扩大我国科技界的国际影响力。三是引领学术风气，积极营造诚信、宽松、和谐的学术环境，倡导求真务实的科学精神，发扬学术民主，提倡学术争鸣，鼓励自主探索，带头抵制不良学风和不端学术行为，自觉维护科学道德。四是引领科学风尚，宣传科学成果，普及科学知识，传播科学方法，促进全社会更加尊重科学、按科学规律办事，为提高全民科学素质作出更大贡献。我相信，经过我们的不懈努力，中国的学术活动一定能够进一步走向世界，形成有影响的品牌，在国家的发展乃至人类科学事业进步中发挥更大作用。

各位院士，同志们，在现代化建设的伟大进程中，工程科技事业正展现出光明前景和勃勃生机。让我们紧密团结在以胡锦涛同志为总书记的党中央周围，求真务实，奋力进取，让工程科技为加快转变经济发展方式、建设创新型国家作出更大贡献！

谢谢大家！

前 言

随着国民经济长期平稳较快发展和经济发展方式的转变，工程爆破科学与技术也得到了前所未有的迅猛发展。爆破技术广泛应用于城市建设、水利水电、航空航天、交通运输、采矿工程等领域并且发挥了巨大作用，取得了举世瞩目的成就。所以，爆炸合成新材料与高效、安全爆破关键科学和工程技术已成为工程爆破行业一个十分重要的研究课题。

爆炸合成新材料作为爆炸技术中最具活力的学科，从最初的爆炸成型、爆炸切割和爆炸硬化等对爆炸机械力学效应的直接应用，已经逐步拓展到包括材料、冶金、化学和高压物理以及生物技术等多学科的交叉领域。例如，将爆炸技术与材料冶金技术相结合形成了爆炸复合（焊接）、爆炸粉末烧结（粉末冶金）和金属材料表面的爆炸硬化（表面加工）等；在高压物理领域中产生了别具特色的动高压冲击相变合成方法；将爆炸与材料化学科学相结合形成了独特的纳米材料爆轰合成技术。最近，人们又将爆炸技术与天然的生物材料处理相结合，将水下爆炸冲击波对细胞和纤维组织的细观破坏作用加以利用，从而形成了较为完善的肉类冲击波嫩化技术，并将冲击波处理逐步拓宽，应用于杀菌、处理植物纤维、木材、速冻食品和药物萃取等多种用途。

在爆炸合成新材料实际应用方面，世界各地建设了许多爆炸加工厂，形成了从爆炸焊接金属复合材料到深加工产品的完善的产业体系。美国、日本、俄罗斯、乌克兰、波兰等均有爆炸复合材料生产，例如由法国、美国和瑞士加盟的 DMC 爆炸加工公司（Dynamic Materials Corp.），以钛、锆等复合钢板制造为主，年产值已经超过 8 亿美元。国内年产值超亿元的爆炸加工企业已经有大连爆炸加工研究所、西安天利、西安宝钛、四川惊雷科技、洛阳双瑞、山西太钢、南京三邦和南京宝泰等多家企业。各种标准的不锈钢复合板、钛钢、锆钢复合材料已经广泛地用于化工设备的制造、舰船、航空航天、军工、机械、冶金产业当中。随着改革开放经济大潮的发展，我国的爆炸复合加工总产量已经越居世界第一位，使得我国爆炸复合板的总产值从 21 世纪初的几亿元人民币，

迅速跨越式发展到现在的近百亿元总产值。另外，爆轰合成的纳米金刚石已经成为纳米材料开发的重要原料，如美国、俄罗斯、乌克兰、白俄罗斯等国均有纳米金刚石商品出售，乌克兰纳米金刚石已经有近一亿美元的产值，在润滑油添加剂、超精抛光、电镀层硬化等方面具有极大的潜力。我国也已经开始在该领域的产业有投入，在兰州、郑州等地已出现了爆炸合成纳米金刚石企业，形成了爆炸合成产业新的生长点。

高效、安全、环保爆破关键科学与技术是我国爆破行业多年研究的一项重要课题，主要针对城市高大建（构）筑物爆破拆除。采用多体-离散体动力学分析方法来研究和模拟高大建（构）筑物多段折叠倾倒过程，为高层建筑物和烟囱多段折叠爆破拆除选用合理的倒塌方式、切口高度、分段时间及不对称高大楼房倒塌过程中出现的偏离定向中心问题等关键技术，提供了理论支撑。在高大建（构）筑物爆破拆除工程中，首先进行化繁为简、保效降耗等措施，有效减少爆破拆除工作量和爆破器材消耗量，降低施工费用，从而提高爆破拆除效率；采用拆除爆破专家预评系统事前消除安全隐患，通过爆破拆除的预拆除预警系统，提高施工安全性；研究爆破拆除扬尘机理，运用泡沫控制爆破拆除中的扬尘，并取得显著成效，为推行无污染爆破拆除奠定了坚实基础。

实现高效、安全、环保爆破关键科学技术的一个重要理论依据是精细爆破。精细爆破是由我国工程爆破界本着“从效果着眼，从过程入手”原则，在多年的爆破工程实践中提出的，通过定量化的爆破设计、精心的爆破施工和精细化的爆破管理，对炸药爆炸与介质破碎、抛掷等过程进行控制，从而达到预期的爆破效果，并实现安全可靠、技术先进、绿色环保和经济合理的工程爆破。

精细爆破根据爆破介质的力学特性，运用爆炸力学、岩石动力学、结构力学、材料力学和工程爆破等相关学科的最新研究成果和飞速发展的计算机技术，实现了爆破方案和工艺参数的优化；通过爆破作用过程的仿真模拟以及爆破振动、冲击波和飞石等有害效应的跟踪监测与信息反馈，实现爆破效果及有害效应的预测与预报；依赖于性能优良的爆破器材及先进可靠的起爆技术，辅以精心施工和严格管理，实现炸药爆炸能量释放、介质破碎、抛掷及堆积等过程的精密控制。

本论文集是中国工程院中国工程科技论坛第 125 场论文的汇集, 它从多方面较全面地反映了我国爆炸合成新材料和高效、安全爆破技术的研究成就。关于爆炸合成新材料的研究, 既有爆炸焊接与爆炸烧结的理论研究, 也包含了爆炸合成纳米粉末、爆炸冲击合成新材料等科学前沿内容, 更多的是关于新材料开发、新材料应用领域拓展以及材料检验、材料处理、质量控制等工程应用技术; 而高效、安全爆破技术所涉及的内容包括水利水电、交通运输和城市高大建(构)筑物爆破拆除等精细、高效、安全和环保爆破技术等方面。论文集的内容丰富、质量较高, 相信“爆炸合成新材料与高效、安全爆破关键科学和工程技术论坛”的成功召开与本论文集的出版, 必将促进我国特种爆破理论与应用技术的进一步发展。

中国工程院院士
中国工程爆破协会理事长



2011 年 8 月

目 录

1 特种爆破基础理论研究

爆炸合成新材料中的几个关键问题	李晓杰 汪旭光 张 勇 等	3
金属材料爆炸焊接精确化研究及应用	王耀华	13
复合板冲击性能影响因素分析	赵 惠 李平仓 薛治国	31
金属爆炸复合材料的界面分析	徐宇皓 邓光平 韩顺昌 等	37
爆炸与轧制复合钢板结合界面的研究	范述宁 卫世杰 续春明	44
0Cr13Ni5Mo-Q345C 爆炸焊接界面波试验探讨	侯发臣 张 超 刘富国	52
爆炸合成钛/钢复合板探伤界面波与结合强度的研究	关尚哲 赵 妍 刘润生 等	58
爆炸焊接界面波的模拟研究	李晓杰 莫 非	65
有限元仿真技术在爆炸焊接中的应用	薛治国 樊科社 黄杏利 等	71
浅谈水下爆炸焊接的发展及试验研究	陈晓强 张可玉	77
爆炸焊接复合板在石化装备应用中的关键技术研究	周景蓉 邹 华 邓家爱 等	84
爆炸不锈钢复合钢板焊接裂纹研究	卫世杰 王海峰 刘云飞	93

2 爆炸复合新技术

镍基合金复合板的制造及应用	薛小军 刘建立 刘国洪	101
论钛钢复合板覆层钛板特性及对爆炸复合板的影响	闫 力 陈孝国 王小兵	109
不锈钢复合冷轧薄钢板的开发与应用	郭励武 范述宁 王虎成 等	114
爆炸焊接铝钢复合板在城市轨道交通中的应用	李玉平 范述宁 王虎成	120
爆炸焊接地铁用铝钢复合电磁感应板研制	侯发臣 辛 宝 张 超 等	125
高速铁路桥梁整体桥面用复合钢板应用研究	张 超 侯发臣 辛 宝 等	135
水利工程用不锈钢复合钢板的研发	夏万福 李志毅 郭 勇	147
爆炸复合过渡接头在舰船行业中的应用	徐宇皓 岳宗洪 侯发臣 等	157
爆炸轧制钛/钢复合板在燃煤脱硫烟囱中的应用	张杭永 关尚哲 刘润生 等	164
爆炸轧制复合型不锈钢螺纹钢工艺研究	方 雨 葛 伟 邓宁嘉 等	171
钛/不锈钢爆炸复合过渡接头在国内航空航天领域中的应用	王虎年 李 莹 郭悦霞 等	176
爆炸焊接过渡接头的研制与应用	王 勇 姚 政 张越举 等	180

大面积钛/钢复合板不同装药方式对焊接质量的影响研究

.....	张杭永	刘润生	关尚哲	等	187
挠性/塑性爆炸加工炸药及其应用研究	黄亨建	杨攀	袁启纯	等	193
低温对爆炸焊接用粉状铵油炸药爆速的影响研究	张越举	杨旭升	李晓杰	等	199
爆炸轧制铜铝复合排的制备和检测方法研究	苏海保	吴小玲	李勇		204
爆炸焊接场地地基结构优化与研究	周景蓉	李勇	陈寿军		212

3 爆炸合成新材料

爆轰法合成纳米碳材料的研究	李晓杰	罗宁	闫鸿浩	等	221
爆炸合成纳米氧化物与应用	谢兴华	邱云信	严仙荣	等	236
爆轰参数对爆轰合成纳米粉体的影响	谢兴华	邱云信	颜事龙		243
磷酸铁锂爆炸合成	谢兴华	邱云信	颜事龙		248
爆炸粉末烧结的细观沉能机理研究	王金相	赵铮	李晓杰		256
爆炸法在制备碳材料中的应用	魏贤凤	韩勇	黄毅民	等	268
冲击波法制备可见光活性的氮掺杂 TiO_2 光催化剂研究 ...	陈鹏万	高翔	刘建军		277

4 高效安全爆破技术

冰凌灾害破除高效爆破施工技术	周丰峻	郑磊	李永忠	等	287
黄河凌汛期爆破破冰减灾技术研究	杨旭升	佟铮	宋长青	等	297
水电工程开挖精细爆破技术	张正宇	刘美山			304
精细爆破理论与技术体系概述	谢先启	贾永胜			311
爆炸加速深部软土地基排水固结的研究与应用	杨年华	张志毅	邓志勇		323
环保爆破理论基础与技术研究	郑炳旭				331
椭圆双极线性聚能药柱数值模拟及应力测试研究	李必红	秦健飞	崔伟峰	等	351
SPH-FEM 方法在聚能射流侵彻岩石靶板数值模拟中的应用	李磊	沈兆武	马宏昊		359
冷激波灭火卷及其卷吸现象研究	蒋耀港	沈兆武	龚志刚		365
基于未确知测度的爆破质量综合评价模型	陶铁军	宋锦泉			372
爆炸加载反射式焦散线实验方法与技术探讨	杨仁树	杨立云	岳中文		378
损伤及应变率效应对结构动力响应影响分析	陈士海	张安康	杜荣强	等	387
多体-离散体动力学分析及其在建筑爆破拆除中的应用 ...	傅建秋	刘翼	魏晓林		393
裂隙带富水层铁矿山采场爆破技术的应用	陈佩富				402
深凹露天矿富水岩层护帮控制爆破技术研究	王运敏				407
深水环境特种爆炸作用原理及应用	沈兆武	李磊	马宏昊		414
模拟深水爆破块度与装药量的研究	张立	张明晓	孙跃光	等	426
某港口海底水雷排除和引爆技术	吴金仓	朱京武	张昆		435
51 米深水海底沟槽爆破开挖技术	朱京武	王朝军	吴金仓		441

水介质预裂爆破试验研究	张西良	446
-------------------	-----	-----

5 爆破安全

非冲击引爆与炸药安全	朱建士	453
精确延时起爆控制爆破地震效应研究	杨 军 徐更光 高文学 等	459
机组人员高空应急逃生精确爆破保障系统研究	王耀华	467
城市地下顶管爆破施工危害分析及控制	傅光明 任才清 李必红 等	488
炸药类爆炸事故应急预案的制定	张远平 赵继波 庞 勇 等	494
爆破振动频率调控技术研究	施富强 柴 俭	500
爆破振动频率控制技术的研究	施富强 柴 俭	505
工程爆破有害效应远程监测信息管理系统初步设想	吴新霞 黄跃文	513
爆破振动反应谱分析及其应用研究	陈 超 闫国斌 张亚宾 等	518
减震沟相邻区域内爆破地震波传播实验研究	周明安 陈志阳 周晓光 等	527
地下矿山减振控制爆破技术研究	刘为洲 杨海涛	535

特种爆破基础理论研究

爆炸合成新材料中的几个关键问题

李晓杰^{1,2} 汪旭光^{1,3} 张 勇^{1,4} 王耀华^{1,5} 邓家艾^{1,6}

- (1. 中国工程爆破学(协)会, 北京, 100044; 2. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁大连, 116024; 3. 北京矿冶研究总院, 北京, 100044;
4. 大连船舶重工集团爆炸加工研究所有限公司, 辽宁大连, 116024;
5. 中国人民解放军理工大学, 江苏南京, 210007;
6. 南京三邦金属复合材料有限公司, 江苏南京, 211155)

摘 要: 文中总结了半个世纪以来各种爆炸合成新材料技术的发展历程, 对爆炸复合、爆炸粉末烧结、爆炸冲击合成、气相爆轰合成技术与应用进行了分析总结, 结合目前新材料的发展方向指出了爆炸合成新材料发展的关键问题所在。

关键词: 爆炸合成; 爆炸复合; 爆炸烧结; 爆炸冲击合成; 气相爆轰合成; 纳米材料; 金属复合材料

Key Issues in the Explosive Synthesis of New Materials

Li Xiaojie^{1,2} Wang Xuguang^{1,3} Zhang Yong^{1,4} Wang Yaohua^{1,5} Deng Jiaai^{1,6}

- (1. China Society of Engineering Blasting, Beijing, 100044; 2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian, 116024;
3. Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, Beijing, 100044;
4. Dalian Shipbuilding Industry Explosive Processing Research Co., Ltd., Liaoning Dalian, 116024; 5. PLA University of Science and Technology, Jiangsu Nanjing, 210007;
6. Nanjing Sanbam Clad Metal Co., Ltd., Jiangsu Nanjing, 211155)

Abstract: This paper concludes the developing process of various explosive synthesis technologies in the last half century, analyzes and summarizes explosive cladding, explosive powder sintering, shock wave high pressure synthesis and detonation synthesis technologies and their utilization. Combining with the development orientation of new material research, authors figure out the key issues in the development of explosive synthesis technologies for new materials.

Keywords: explosive synthesis; explosive cladding; explosive sintering; shock wave synthesis; detonation synthesis; nano material; clad metal

1 引言

随着现代实验技术、计算技术的发展, 人们对爆炸这样高速猛烈现象的认识正在逐步

深入,炸药爆炸不再仅限于战争、采矿、拆除建(构)筑物等破坏效应的应用;人们还利用爆炸的高速度、高压、高温环境以及物理、化学效应开发了众多新的应用领域。爆炸加工就是其中的一朵奇葩,如用薄片炸药去爆炸冲击奥氏体钢材,可以使材料表面硬化,由此衍生的爆炸硬化技术^[1](Explosive Hardening)已经在工厂室内进行大量的铁道辙叉预硬化加工(如乌克兰和我国秦皇岛等地);用小量的爆炸处理大型容器焊缝的爆炸消除焊接残余应力技术^[2,3],可以消除焊缝应力、改善应力腐蚀,已经用于大型化工储罐和三峡等水利工程引水压力管线,实现了焊接应力现场消除;利用水中爆炸实现了金属板料的无模成型和连铸结晶器等精密部件成型^[4,5];在数千米的油井下也正在进行射孔、整形、补贴和压裂增采等爆炸作业^[6]。人们甚至将爆炸冲击效应用于食品、生物材料的处理,如对肉类进行的冲击爆炸嫩化^[7]、对木纤维进行爆炸膨化^[8]等。其中用于新材料合成的爆炸加工技术包括有:用于制造金属包覆材料的爆炸复合(焊接)技术,用于金属与陶瓷粉末冶金爆炸粉末烧结技术,用于陶瓷粉末和金刚石等超硬材料粉末制造的冲击波合成方法以及制备纳米粉末的气相爆轰合成方法等。

2 爆炸复合

爆炸复合(Explosive Cladding)是一种制造金属包覆材料的技术,也是焊接异种金属的特种焊接技术,是力学与金属材料学相结合的产物。爆炸复合的基本原理是利用炸药爆炸驱动复板与基板产生高速斜碰撞,碰撞在材料接触面上剥离并喷出微量的金属射流,产生“自清理”作用使焊合面露出无污染的洁净金属本体;同时射流后部的金属本体接触面在碰撞高压、大变形以及高速近乎绝热变形和高压压缩所产生高温的联合作用下,产生固相扩散和熔化焊接;焊合后界面的高温又会迅速向小变形的低温基体内散热,使高压界面结合态被快速淬火固定下来,阻止金属过度扩散反应和大量脆性相的生成。这个特殊的焊合过程使爆炸复合具有两大优点。一是可以阻止异种金属间的过度反应,能焊接普通熔化焊方法无法焊合的不同种类金属;二是适于进行大面积复合作业,便于制造各种包覆材料。

爆炸复合方法从20世纪50年代初被发现,70~80年代爆炸金属复合板逐步进入工业市场,80年代后逐渐成为金属复合板制造的主要技术。目前已成功爆炸复合金属组合有数百种。对于铝-钢、铜-钢、钛-钢、锆-钢这些非常难焊接的金属,采用爆炸复合的界面结合强度均可接近或大于母材,且复合界面能保持一定的韧性。在爆炸加工厂内,一次起爆数百公斤炸药,将厚度2~6mm的不锈钢板一次爆炸复合在面积30m²左右碳钢板上,已经成为常规的生产技术;类似大小的铜、铝、钛、镍合金的大板幅复合钢板也均有成品板材出售。另外,爆炸复合还可以对管材实现内包覆与外包覆,可在一种管材的内表面或外表面包覆焊接上另外一种金属管材。因此,爆炸复合技术最普遍的应用领域就是用于制造各种双金属包覆材料,如复合板、棒、管材等。除此之外,爆炸复合还被用于制造各种双金属过渡材料,如导电接头、结构过渡接头等。也被用于特殊场合焊接,如热交换器管与管板焊接、电气铁路的导电连接焊、化工容器和管道的快速堵漏、电网快速焊接、输油管线接地焊等特定领域的焊接。爆炸复合技术与其他金属加工技术的结合,则更进一步拓宽了其产品的应用范围,如将爆炸复合坯料进行热轧、冷轧制成薄板复合材料的爆炸-轧制技术,加工复合管、棒、丝材的爆炸-挤压、爆炸-拉拔方法等。