

第2版

骨肌疾病 体外冲击波疗法

GUJI JIBING
TIWAI CHONGJIBO LIAOFA

主 编 邢更彦



人民军医出版社

PEOPLE'S MILITARY MEDICAL PRESS



骨肌疾病体外冲击波疗法

(第2版)

GUJI JIBING TIWAI CHONGJIBO LIAOFA

主 编 邢更彦
编 者 (以姓氏笔画为序)

王 帅	王旭明	王明新	王前源
王振宇	史 展	白晓东	冯 虎
闫 君	刘 彧	刘水涛	刘运晃
刘鹏卫	安佰京	李 平	李云霞
李志国	杨 军	杨金红	吴 坤
余 来	宋立琨	张浩冲	林 琛
金海超	赵 斌	赵 喆	姜 川
娄 靖	耿 欢	翟 磊	

学术秘书 刘水涛 史 展



人民军 医 出版社

PEOPLE'S MILITARY MEDICAL PRESS

北 京

图书在版编目(CIP)数据

骨肌疾病体外冲击波疗法/邢更彦主编.—2版.—北京:人民军医出版社,2015.12
ISBN 978-7-5091-8975-7

I. ①骨… II. ①邢… III. ①骨疾病—冲击波—诊疗 ②肌肉疾病—冲击—诊疗
IV. ①R681②R685

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 281889 号

策划编辑:张怡泓 管悦 文字编辑:刘颖 韩志 责任审读:黄栩兵

出版发行:人民军医出版社 经销:新华书店

通信地址:北京市 100036 信箱 188 分箱 邮编:100036

质量反馈电话:(010)51927290;(010)51927283

邮购电话:(010)51927252

策划编辑电话:(010)51927300—8060

网址:www.pmmp.com.cn

印、装:三河市春园印刷有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:22.75 字数:522千字

版、印次:2015年12月第2版第1次印刷

印数:0001—2500

定价:135.00元

版权所有 侵权必究

购买本社图书,凡有缺、倒、脱页者,本社负责调换



内容提要

本书在第1版基础上进行修订,分5篇共19章。总论部分系统地介绍了体外冲击波的物理学基础、生物学基础及治疗骨肌系统疾病的临床应用概况。各论部分在原版介绍体外冲击波疗法治疗肱二头肌长头肌腱鞘炎、钙化性肌腱炎、肱骨内外上髁炎、跟痛症、股骨头坏死、骨不连、骨折延迟愈合及联合干细胞移植治疗骨病的基础上,结合最新的基础研究成果和临床应用经验,新增了体外冲击波疗法对肌筋膜综合征、肩袖损伤、桡骨茎突狭窄性腱鞘炎、股骨大转子滑囊炎、髌前滑囊炎、距骨骨软骨损伤、骨性关节炎等疾病的治疗,并补充了体外冲击波联合关节镜对骨及软骨组织疾病的复合疗法。特别是新增的第五篇,介绍了冲击波在骨科、康复、心血管、烧伤整形、男科、肿瘤等学科的研究和应用新进展。

本书图文并茂,科学性、实用性强,是有关体外冲击波疗法治疗骨肌疾病较为系统、实用的参考书,可供临床骨科医生、康复科医生和有关研究者阅读参考。

主编简介



邢更彦 男,医学博士,主任医师,教授,博士生导师,享受国务院特殊津贴专家。现任中国人民武装警察部队总医院骨科中心主任兼关节四肢外科(骨一科)主任。中国冲击波医学专业委员会主任委员、武警部队训练伤及运动医学学会主任委员、全军关节镜运动医学学会副主任委员、中国肢体残疾康复专业委员会常务委员、中华医学会运动医疗学会全国委员、全军骨科专业委员会委员、国家自然科学基金委员会评审专家、中华骨科杂志编委、北京市关节镜医学学会委员、国际体外冲击波疗法联合会会员,第四军医大学、安徽医科大学博士生导师。

从事骨外科临床专业 31 年,擅长骨关节外科、运动医学、骨创伤疾病的诊断及治疗,尤其在国内外独创体外冲击波疗法治疗骨不连和成人股骨头缺血性坏死、肩周炎、网球肘、足跟痛、陈旧性软组织损伤等疾病,获得满意疗效,达到国际领先水平。获得国家自然科学基金和首都医学发展基金资助项目资助多项。发表研究论文 200 余篇(其中包含多篇 SCI 收录文章),主编专著 3 部,参编专著 8 部;先后获国家科技进步一等奖 1 项,省部级科技进步二等奖 6 项、三等奖 5 项。



前 言

8年前,我们整理“首届全国骨肌系统体外冲击波疗法学习班讲义”,出版了第1版《骨肌疾病体外冲击波疗法》,较为系统地介绍了该疗法在骨科领域的应用,其可读性和实用性受到了读者的好评。由于该疗法确实具有非创伤、疗效显著、并发症少等优点,其逐渐被广大骨科医生、康复科医生及患者所认可。国内发表的相关研究论文由几年前的每年20余篇,增长到2014年的近100篇;国际上发表的相关SCI论文,也由2007年的163篇,增长到2014年的300多篇,由此可见该疗法在国际和国内的热度。

为进一步推动了体外冲击波疗法的应用,我们连续举办了8届国家继续教育项目“骨肌疾病体外冲击波疗法学习班”并于2013年12月,在国内率先成立冲击波医学专业委员会。为规范该疗法在国内的应用,委员会组织多次学术活动,参考国际、国内最新文献,经反复讨论后制定了《骨肌疾病体外冲击波疗法专家共识》。在学术团体的组织下,跟随《专家共识》的指导,体外冲击波疗法的发展步入快车道。目前,体外冲击波疗法已在全国一千多家医院应用,每年受益患者近100万人次。

随着体外冲击波疗法基础研究的深入和仪器的进步,特别是发散式体外冲击波治疗仪的推广应用,使该疗法的适应证不断扩展。为此我们对第1版进行较大幅度的修订,将原书的2篇8章扩展为第2版的5篇19章,结合我们的基础研究成果和临床应用经验,新增了体外冲击波疗法对筋膜综合征、腰脊神经后支综合征、棘上韧带损伤、肩袖损伤、桡骨茎突狭窄性腱鞘炎、坐骨结节滑囊炎、股骨大转子滑囊炎、梨状肌出口综合征、髌前滑囊炎、肌肉痉挛、距骨骨软骨损伤、骨性关节炎、骨质疏松等疾病的治疗,并补充了体外冲击波联合关节镜对骨及软组织疾病的复合疗法及冲击波在心血管、烧伤整形、男科、肿瘤等学科的研究和应用进展。本书通过对相关疾病进行较系统的介绍,让读者较全面的了解疾病的解剖、病理、诊断和鉴别诊断,选择合适的治疗对象,把握好体外冲击波疗法的适应证和禁忌证;通过通俗易懂,图文并茂的描述,使读者迅速正确掌握各种疾病的治疗方法,将适宜的能量精确作用于病变部位,这些都是冲击波疗法取得良好效果的关键。

在本书的编写过程中,我科从事冲击波研究的临床医生和研究生付出了辛勤的努力;冲击波专业委员会的李平、李云霞医师在修订审稿过程中提出了很多建设性意见,在此表示衷心的感谢。

虽然本书为再版,但限于我们的基础理论知识水平及临床经验有限,此版本可能并不成熟和完美,难免存在纰漏,甚至错误,敬请各位专家和同仁批评指正。

邢更彦

2015年10月于北京武警总医院



目 录

绪论	(1)
----------	-----

第一篇 骨肌系统体外冲击波疗法总论

第 1 章 医用体外冲击波的物理学基础	(5)
第一节 医用体外冲击波的物理特性	(5)
第二节 医用体外冲击波的物理效应	(17)
第三节 医用体外冲击波波源产生形式及能量的传递方式	(25)
第四节 体外冲击波治疗机	(33)
第五节 体外冲击波在骨科与泌尿外科应用差异	(40)
第 2 章 医用体外冲击波的生物学基础	(43)
第一节 医用体外冲击波的生物学效应	(43)
第二节 体外冲击波对骨及相关组织的影响	(49)
第三节 体外冲击波对相关细胞的影响	(58)
第四节 体外冲击波生物学效应的分子机制研究	(66)
第 3 章 肌肉骨骼系统疾病体外冲击波疗法治疗临床应用概述	(88)
第一节 骨肌疾病体外冲击波疗法临床应用进展	(88)
第二节 体外冲击波疗法的适应证、禁忌证	(89)
第三节 体外冲击波疗法的定位方法	(94)
第四节 体外冲击波疗法的治疗方案设计	(99)
第五节 体外冲击波疗法的护理要求	(102)

第二篇 软组织疾病体外冲击波疗法

第 4 章 颈、腰、背部软组织疾病	(109)
第一节 肌筋膜综合征	(109)
第二节 腰脊神经后支综合征	(114)
第三节 棘上韧带损伤	(119)
第 5 章 肩部软组织疾病	(124)
第一节 肱二头肌长头肌腱鞘炎	(124)
第二节 肩钙化性肌腱炎	(132)
第三节 肩峰下滑囊炎	(141)
第四节 肩袖损伤	(146)
第 6 章 肘、腕部软组织疾病	(157)

第一节	肱骨外上髁炎	(157)
第二节	肱骨内上髁炎	(162)
第三节	桡骨茎突狭窄性腱鞘炎	(164)
第7章	髋及骶尾部软组织疾病	(170)
第一节	坐骨结节滑囊炎	(170)
第二节	股骨大转子滑囊炎	(172)
第三节	梨状肌出口综合征	(174)
第8章	膝部软组织疾病	(178)
第一节	胫骨结节骨软骨炎	(178)
第二节	髌前滑囊炎	(182)
第9章	足部疾病	(186)
第一节	跖筋膜炎	(186)
第二节	止点性跟腱炎	(191)
第三节	跟骨骨刺	(195)
第四节	跟下脂肪垫炎	(198)
第五节	跟骨骨膜炎	(200)
第10章	肌肉痉挛	(203)
第一节	痉挛性脑瘫引起的肌肉痉挛	(203)
第二节	其他疾病引起的肌肉痉挛	(206)
第11章	皮肤不愈合	(209)
第一节	皮肤创面	(209)
第二节	糖尿病足溃疡	(213)

第三篇 骨组织疾病体外冲击波疗法

第12章	骨不连及骨折延迟愈合	(221)
第一节	骨不连及骨折延迟愈合的定义	(221)
第二节	病因病理	(221)
第三节	临床表现与诊断	(227)
第四节	临床常用治疗方法	(228)
第五节	体外冲击波疗法	(230)
第13章	股骨头缺血性坏死	(239)
第一节	应用解剖	(239)
第二节	病因、病理及发病机制	(245)
第三节	临床表现、诊断、分期及分型	(247)
第四节	临床常用治疗方法	(254)
第五节	冲击波疗法	(257)
第14章	距骨骨软骨损伤和距骨缺血坏死	(262)
第一节	距骨的应用解剖	(262)

第二节	距骨骨软骨损伤	(263)
第三节	距骨缺血坏死	(270)
第 15 章	骨性关节炎	(278)
第一节	髌关节骨性关节炎	(278)
第二节	膝关节骨性关节炎	(280)
第三节	踝关节骨性关节炎	(288)

第四篇 体外冲击波疗法联合其他疗法

第 16 章	体外冲击波联合关节镜治疗骨组织疾病	(297)
第一节	体外冲击波联合关节镜治疗股骨头坏死	(297)
第二节	体外冲击波联合关节镜治疗距骨骨软骨损伤	(301)
第三节	体外冲击波联合关节镜治疗膝关节骨性关节炎	(307)
第 17 章	体外冲击波疗法联合自体骨髓间充质干细胞移植治疗骨病	(313)
第一节	骨髓间充质干细胞特性及分离纯化	(313)
第二节	体外冲击波疗法联合骨髓间充质干细胞移植治疗骨不连	(316)
第三节	体外冲击波疗法联合骨髓间充质干细胞移植治疗早期股骨头坏死	(320)
第四节	体外冲击波疗法联合骨髓间充质干细胞移植治疗骨不连和早期股骨头坏死的可能机制	(323)

第五篇 体外冲击波疗法基础及临床研究新进展

第 18 章	体外冲击波基础研究进展	(329)
第 19 章	体外冲击波疗法临床研究进展	(339)



绪 论

由于科学技术的不断进步,疾病治疗技术的整体发展趋势是在精准的基础上微创及无创化。20世纪80年代出现的体外冲击波技术正是顺应这一趋势的产物。冲击波是一种通过振动、高速运动等导致介质极度压缩而聚集产生能量的具有力学特性的声波,会引起介质的压强、温度、密度等物理性质发生跳跃式改变。20世纪80年代初,德国医生首先利用高能冲击波击碎肾脏泌尿系统结石,使患者免除手术。1988年,Graff等在动物实验过程中无意中发现了体外冲击波(extracorporeal shock wave,ESW)的成骨作用。此后很多学者开始研究震波对骨折愈合的促进作用。20世纪90年代开始,世界各地一些骨科医学中心开始利用体外冲击波治疗骨不连、骨折延迟愈合及慢性软组织损伤性疾病,取得了明显的疗效。由此,逐渐演变产生了治疗骨肌系统疾病的体外冲击波疗法(extracorporeal shock wave therapy,ESWT)。

20世纪90年代后期,世界各地的临床及基础研究不断深入。1997年12月欧洲骨肌系统冲击波疗法联合会(the european society for musculoskeletal shockwave therapy,ESMST)在奥地利维也纳成立,随后,1998年在土耳其的伊兹密尔举行了第一届国际骨肌系统冲击波疗法会议,1999年在英国伦敦年会上 ESMST 更名为国际骨肌系统冲击波疗法联合会(international society for musculoskeletal shockwave therapy,ISMST)。ESWT在欧洲,尤其是德国、瑞士、奥地利及英国核准该技术应用于临床,中国国家药品监督管理局(SDA)于2000年8月批准国产ESWT治疗机用于临床治疗骨科疾病[注册号:国药管械(试)字2000第302156号],美国食品药品监督管理局已于2000年10月及2002年核准通过ESWT用于足底筋膜炎及胫骨外上髁炎的临床治疗,韩国也都在2002年相继核准。

我国的体外冲击波医学发展迅速,从1994年我们在国内首先刊文报道体外冲击波疗法治疗网球肘开始,经过20多年发展,体外冲击波疗法已被广大医生和患者接受,应用于国内1000多家医院,成为治疗骨肌系统疾病的重要疗法。同时,广大学者也对体外冲击波的作用机制进行了大量的基础研究,取得了丰硕的成果,并由此推动了体外冲击波治疗适应证的扩展。为更好的凝聚国内体外冲击波研究力量,促进学科的发展,于2013年12月在北京成立了中国研究型医院学会体外冲击波医学专业委员会,委员会组织专家参考国际、国内最新文献,结合国内实际情况,经过多次讨论后制定《骨肌疾病体外冲击波疗法专家共识》,为规范该疗法在国内的推广应用提供指导意见。

近年来,随着ESWT基础和临床研究不断深入,该疗法已逐渐扩展至心内科(用于治疗陈旧性心肌梗死)、泌尿外科(用于治疗阳痿)、内分泌科(用于治疗糖尿病足)、烧伤整形外科(用于治疗皮肤溃疡及软化瘢痕)、肿瘤科(用于肿瘤靶向治疗)等,展现出ESWT的广泛应用前景。由于其具有非侵入性、高效、费用低廉和易于被患者接受等显著优势,相信在不远的未来,ESWT必将发展成为一门新的学科——冲击波医学。随着这一新技术的应用与研究的深入,

必将促进冲击波医学在中国的传播与发展,为广大患者造福。

(邢更彦)

参考文献

- [1] G Haupt AH, A Ekkernkamp BG, Chvapil M. Influence of shock waves on fracture healing. *Urology*, 1992, 39(6):529-532.
- [2] Foldager CB, Kearney C, Spector M. Clinical application of extracorporeal shock wave therapy in orthopedics: focused versus unfocused shock waves. *Ultrasound Med Biol*, 2012, 38(10):1673-1680.
- [3] Al-Abbad H, Simon JV. The effectiveness of extracorporeal shock wave therapy on chronic achilles tendinopathy: a systematic review. *Foot Ankle Int*, 2013, 34(1):33-41.
- [4] Dizon JN, Gonzalez-Suarez C, Zamora MT, et al. Effectiveness of extracorporeal shock wave therapy in chronic plantar fasciitis: a meta-analysis. *Am J Phys Med Rehabil*, 2013, 92(7):606-620.
- [5] 邢更彦. 骨肌疾病体外冲击波疗法. 北京: 人民军医出版社, 2007.
- [6] 翟磊, 邢更彦. 体外冲击波诱导骨髓间充质干细胞成骨的力化学信号转导机制. *中华骨科杂志*, 2007, 27(4):301-304.
- [7] 中国研究型医院学会冲击波医学专业委员会. 骨肌疾病体外冲击波疗法专家共识. *中国医学前沿杂志(电子版)*, 2014, 6:170-177.
- [8] Notarnicola A, Tamma R, Moretti L, et al. Effects of radial shock waves therapy on osteoblasts activities. *Musculoskelet Surg*, 2012, 96(3):183-189.
- [9] Zhao Z, Ji H, Jing R, et al. Extracorporeal shock-wave therapy reduces progression of knee osteoarthritis in rabbits by reducing nitric oxide level and chondrocyte apoptosis. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2012, 132(11):1547-1553.
- [10] 艾全, 邢更彦. 骨性关节炎的研究与体外冲击波疗法治疗新进展. *中国医学前沿杂志(电子版)*, 2012, 4(11):16-20.
- [11] Holfeld J, Tepekoylu C, Kozaryn R, et al. Shockwave therapy differentially stimulates endothelial cells: implications on the control of inflammation via toll-Like receptor 3. *Inflammation*, 2014, 37(1):65-70.
- [12] 翟磊, 孙楠, 王景贵, 等. 体外冲击波对早中期股骨头坏死患者骨髓间质干细胞生物学特性的影响. *中华骨科杂志*, 2010, (1):84-91.
- [13] 邢更彦, 张鹏礼, 姜川, 等. 体外冲击波疗法联合自体骨髓干细胞移植治疗股骨头坏死. *中华关节外科杂志(电子版)*, 2011, 5(4):3-6.
- [14] 邢更彦, 井茹芳, 李春玲. 超声定位在体外冲击波疗法治疗肩部疾患的价值. *中华骨科杂志*, 2005, 25(4):193-196.
- [15] Ioppolo F, Tattoli M, Di SL, et al. Clinical improvement and resorption of calcifications in calcific tendinitis of the shoulder after shock wave therapy at 6 months' follow-up: a systematic review and meta-analysis. *Arch Phys Med Rehabil*, 2013, 94(9):1699-1706.
- [16] Kolk A, Yang KG, Tamminga R, et al. Radial extracorporeal shock-wave therapy in patients with chronic rotator cuff tendinitis: a prospective randomised double-blind placebo-controlled multicentre trial. *Bone Joint J*, 2013, 95-B(11):1521-1526.
- [17] Dizon JN, Gonzalez-Suarez C, Zamora MT, et al. Effectiveness of extracorporeal shock wave therapy in chronic plantar fasciitis: a meta-analysis. *Am J Phys Med Rehabil*, 2013, 92(7):606-620.
- [18] Al-Abbad H, Simon JV. The effectiveness of extracorporeal shock wave therapy on chronic achilles tendinopathy: a systematic review. *Foot Ankle Int*, 2013, 34(1):33-41.



第一篇

骨肌系统体外冲击波疗法总论



第一节 医用体外冲击波的物理特性

一、体外冲击波的形成

ESWT 是物理学和医学相结合的新技术,是定位于保守治疗和开放式手术之间的一种全新疗法。它具有以下优点:①损伤轻微,可替代某些外科手术疗法;②一般采用简单麻醉或不必麻醉;③治疗时间短,风险小,可在门诊进行治疗;④无须特殊术后处理,且术后恢复较快;⑤治疗费用远低于开放式手术。理解和掌握有关冲击波的物理知识,对于指导 ESWT 的临床应用以及正确掌握冲击波治疗机的使用和维护均有重要意义。

冲击波是一种特殊形式的声波,属于量子物理的研究范畴。为了便于理解,通常参照声学的物理知识来讲解和对比冲击波的形成、波形和传递等特性。冲击波的这些物理特性也是决定 ESWT 疗效和安全性的一个重要参数。

(一) ESW 产生原理

ESW 是一种兼具声、光、力学特性的机械波,它的特性在于能在极短的时间内(约 10ms)高峰压达到 500bar,而且周期短(10ms),频谱广($16 \sim 2 \times 10^8$ Hz)。由于其独特的特性,冲击波在穿越人体组织时,其能量不易被浅表组织吸收,可直接到达人体的深部组织。冲击波有以下四种物理学效应来产生。

1. 利用高压电、大电容,在水中电极进行瞬间放电而产生冲击波,在半椭圆形反射体的第一焦点处向四周扩散,被平滑的反射体聚焦于第二焦点处即人体内的骨肌组织,利用冲击波在不同物质中传递时的声阻抗差产生强大的能量即可产生相应的生物学功能。

2. 利用电磁线圈,在电能的作用下,发生强大的电磁场,通过逆感应作用在绝缘膜处产生排斥性磁场,电磁能量遇到绝缘膜后折射到水囊中产生平面冲击波,再由凹透声镜将冲击波聚焦并导入需要治疗的局部区域。

3. 利用数以百计的压电晶体,排列在一个凹形面上,在电能的作用下,全体压电晶体共同振动,一起发出冲击波,经椭球体的收集,全部能量聚集于焦点处(图 1-1)。

4. 利用机内压缩机产生压缩空气去驱动一个类似运动活塞的射弹,射弹获得加速度并撞击一个刚性治疗头的尾端,治疗头前端通过耦合剂作用于人体组织。

(二) ESW 的脉冲形式

在用 HM₃ 型冲击波治疗机进行冲击波碎石的实验中,可见 3 个明显的压力脉冲(图 1-2)。

前两个脉冲亦称作初级冲击波,其中,第一个脉冲是直达波脉冲,代表初级冲击波中未经

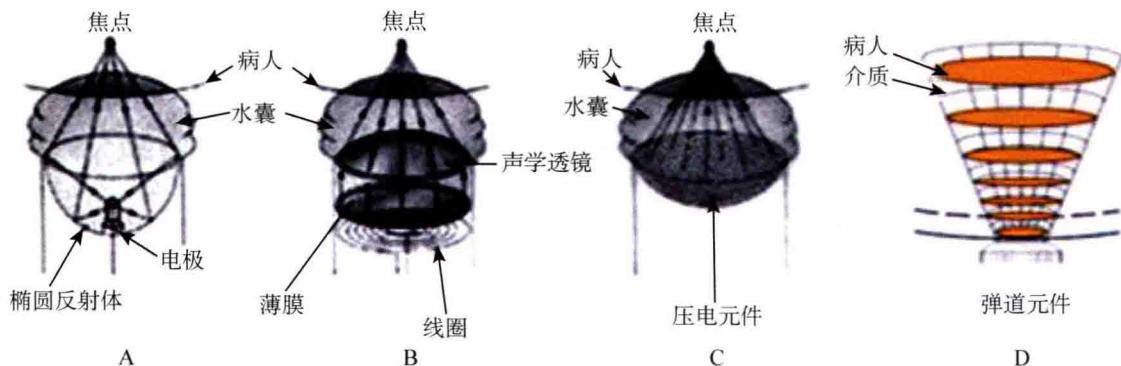


图 1-1 冲击波的产生方式

A. 液电式; B. 电磁式; C. 压电式; D. 气压弹道式

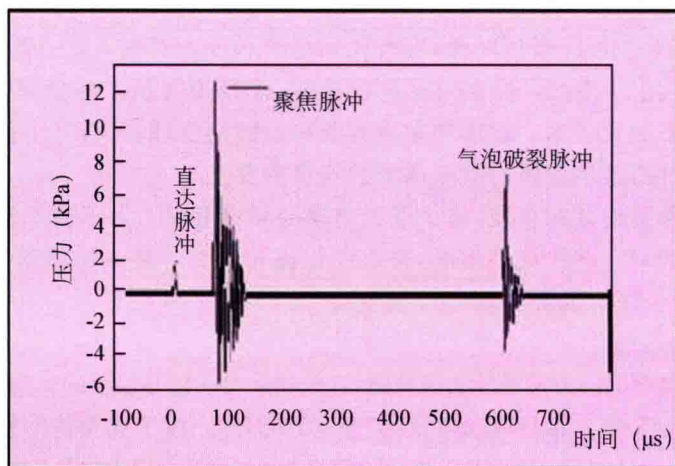


图 1-2 聚焦式冲击波焦点压力-时间曲线

椭圆体反射的部分。因其能量较小,而且在 F_1 到 F_2 点的传播过程中,其幅度进一步衰减,所以这一直达脉冲的压力较小。第二个脉冲代表初级冲击波的聚焦部分,占冲击波总能量的绝大部分(90%),其峰值的平均压力为 72.5kPa,压力脉冲时间为 $2.5\mu\text{s}$ 。从 F_1 到 F_2 之间的距离,初级冲击波在放电之后,直达冲击波和反射冲击波出现的时差为 $29\mu\text{s}$ 。据此可以推算,冲击波通过这段距离的速度为 1700m/s 。第三个脉冲约在放电之后的 $500\mu\text{s}$ 后发生,是一个较强的冲击波,但其压力幅度低于聚焦的初级冲击波。在发生原理上,与前两种液中放电后直接产生的冲击波有所不同,第三个冲击波是间接发生的,其发生过程是:当 F_1 周围的气泡膨胀到极限时,便停止膨胀,同时开始以加速度回缩。由于这种气泡的迅速塌陷和回缩,产生一个反抽性负压脉冲。这个负压性脉冲可引起 F_2 处的空化效应,即在焦点范围内产生大量的气泡。当其破裂之后便引发了第三个冲击波,亦称作次级冲击波。

二、体外冲击波的波形

冲击波在传播过程中形成压缩区和稀疏区。压缩区内压力大大超过大气压,即冲击波超压;稀疏区内压力下降,甚至低于大气压,称之为负压。空气冲击波的波形特征是:大气压瞬时突跃上升达到峰值,随后呈指数下降,并降至低于大气压水平,然后回到常态大气压。这种波形被称为 Friedlander 波形(图 1-3),其数学表达式如下:

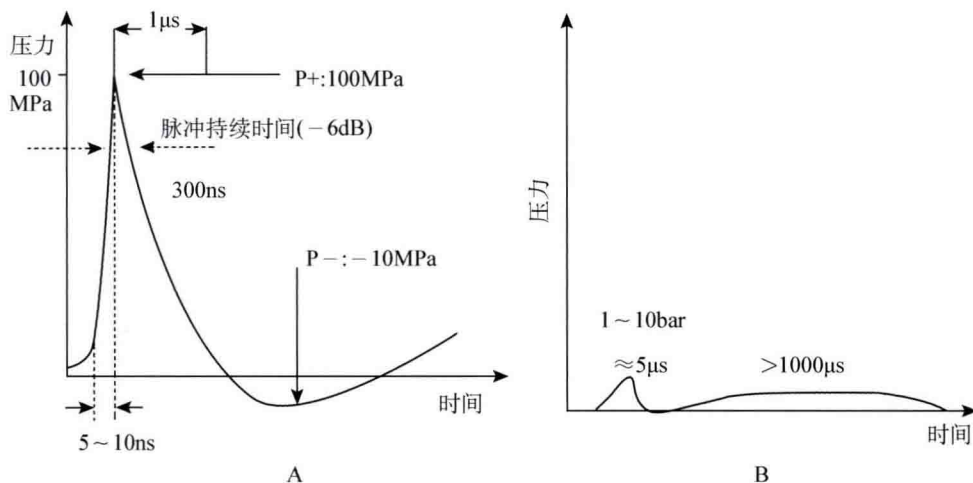


图 1-3 体外冲击波典型压力波形对比

A. 聚焦式;B. 发散式

$$P(t) = P_s(1-T)^{(-bT)} \quad (1.2.1)$$

此式中, $T=t/t_0$, $P(t)$ 是指任一给定时刻的压强, P_s 是压力峰值, (t_0) 是正压持续时间, (b) 代表冲击波达到峰值后超压下降速率的衰变常数。

在围闭空间内或有障碍物的环境下, 固壁反射和物体位移使冲击波波形复杂化。这种条件下的冲击波波形仍有一个主超压峰, 但其后压力下降至大气压水平之前, 往往有多个较小的超压峰, 这些超压峰叠加在平均总压力之上。平均总压力降至大气压水平之下后, 压力在大气压水平附近上下波动而形成一系列脉冲波。平均总压力达负压峰值后向稳态大气压回升, 与此同时, 脉冲波幅逐渐变小。对这种复合冲击波时程, 有学者用两个时段进行描述, 将压力从超出大气压(超压)之始达到峰值后下降至大气压水平的变化过程称为 A 时段, 而将压力从超压之始历经超压和负压峰值至脉冲波稳定在 $\pm 10\%$ 超压峰值的过程称为 B 时段(图 1-4)。

水中冲击波场与空气中冲击波场的物理特征有差异。由于水的密度远大于空气, 压缩性很小, 所以冲击波在水中不形成典型的压缩区和稀疏区, 但传播速度明显比空气中快, 传播距离也远得多。水下冲击波峰值压力高, 前沿上升时间极快, 仅为数微秒, 正压持续时间较短, 为数百微秒, 冲量较大。随冲击波能量的增加, 峰值压力逐渐下降, 正压持续时间缩短, 冲量减低, 前沿上升时间变化非常小, 这些参数的衰减速度均较空气中缓慢。同时, 陡峭的冲击波上升沿压力带给水的运动速度, 连续气泡破裂产生的脉冲, 伴有水的骚动和推挤。冲击波传至水底或其他刚性障碍物表面时会引起反射, 传至水与空气的界面时, 会在水中形成拉伸波, 削减

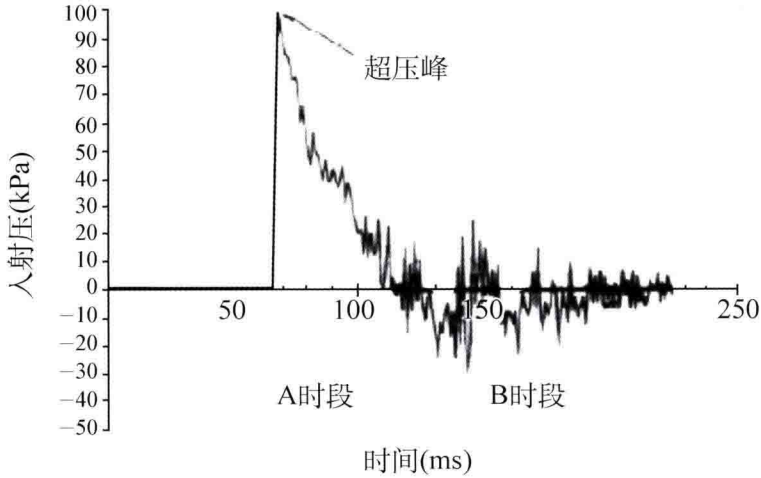


图 1-4 围闭空间内空气冲击波的压力-时间曲线

入射波的作用。因此,在水中一定位点记录的冲击波波形可能是很复杂的。

虽然冲击波压力变化的时间极短,但是变化幅度和速度极高,破坏力是非常大的。随冲击波的强度及介质密度的不同,冲击波的物理参数有着差异。影响物体对冲击波响应的主要因素包括超压和负压峰值和持续时间、传播速度、脉冲数(在复合波形条件下)、物体与冲击波波面的方向关系等。在围闭空间内,由于周壁和其他物体表面的反射效应,传递给人体的冲击波能量更多。另外,人体和物体对冲击波的响应还要受环境压力的影响。

三、医用冲击波的基本性质

冲击波是一种不连续峰在介质中的传播,这个峰导致介质的压强、温度、密度等物理性质跳跃式改变。任何波源,当运动速度超过了其波的传播速度时,这种波动形式都可以称为冲击波,或者称为激波。其特点是波前的跳跃式变化,即产生一个锋面。锋面处介质的物理性质发生跃变,造成强烈的破坏作用(图 1-5)。冲击波的传播通常通过物质的媒介。

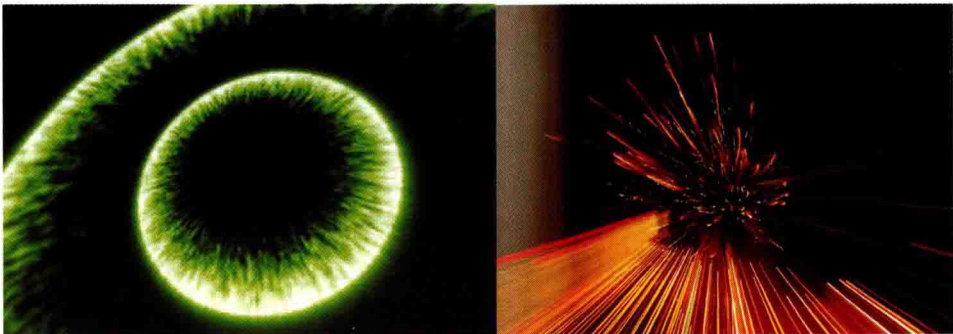


图 1-5 冲击波模拟照片