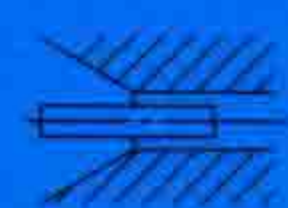
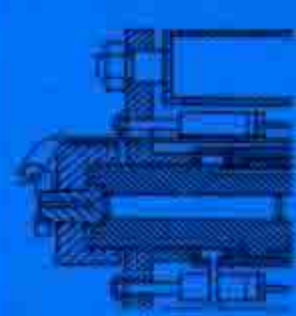
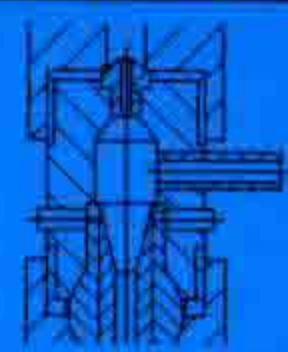


水射流技术 及工程应用

雷玉勇 陶显中 著

SHUISHELIU JISHU
JI GONGCHENG
YINGYONG



化学工业出版社

雷玉勇 陶显中 著

SHUISHELIU JISHU
JI GONGCHENG
YINGYONG

水射流技术 及工程应用



化学工业出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

水射流技术及工程应用/雷玉勇, 陶显中著. —北京:
化学工业出版社, 2017. 4
ISBN 978-7-122-28360-3

I. ①水… II. ①雷… ②陶… III. ①液体射流-射
流技术-研究 IV. ①TP601

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 254765 号

责任编辑: 王 焯 项 激
责任校对: 吴 静

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司
装 订: 三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 20 $\frac{1}{4}$ 字数 555 千字 2017 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究



水射流泛指以各种单一流体或流体与其他介质（包括气体、固体和光）构成的多相介质射流。水射流技术作为一种新兴技术，近几十年发展十分迅猛，各种新型射流形式层出不穷，争奇斗艳。水射流技术的应用更是百花齐放，在机械制造、汽车、航空航天、军工、电子电力、石油化工、轻工、船舶航运、食品、医疗、环保、建筑建材、市政工程等领域得到越来越广泛的应用。

水射流技术在机械工程中的应用涉及诸多方面，概括起来讲，主要是三大类：工业清洗（industrial cleaning）、材料切割（material cutting）和表面处理（surface preparation）。工业清洗包括铸件清砂、去毛刺、除锈、脱漆等；材料切割可适用于几乎任何工程材料，尤其适用于热敏感、压敏感、高韧性难加工材料、复合材料的加工；表面处理则包括表面强化、消除残余应力、研磨和抛光等。

水射流技术作为一门应用技术，涉及机械、电子、液压、气动、数控、计算机应用等多学科知识。水射流特种加工是利用具有很高动能的高速水射流束来冲蚀材料，从而实现材料切削，属于高能束加工范畴，是一种可与激光、等离子体、电子束加工方法媲美的新型切割加工工具。它以无与伦比的适应性、多样性和环保性去扩充火焰、激光、等离子体、电火花（线切割）或传统机械加工所达不到的能力，水射流切割已经成为世界上成长最快的特种加工工艺之一。

本书重点介绍了磨料水射流技术特种加工技术，目的是使读者了解水射流技术的发展过程和最新研究成果，从而较全面地掌握水射流技术在机械工程中的创新应用，著者希望起到抛砖引玉的作用，吸引更多有兴趣的各界人士加入水射流技术的研究、开发和推广应用队伍中来，为我国的先进制造和智能制造贡献自己的力量。

刘克福、蒋代君、万霞、万庆丰、陶欢、陈玄、杨涵、潘峥正、张丽、唐炼等为本书的编写提供了帮助，在此一并表示感谢。

特别鸣谢四川力锋科技股份有限公司的大力支持！

由于水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请各位读者批评指正。

著者
于成都



第1章 水射流技术概论

1.1 水射流技术原理和典型组成	1	1.5.1 水射流工业清洗	8
1.2 水射流技术的产生和发展过程	2	1.5.2 水射流切割材料	9
1.3 水射流技术研究动态	4	1.5.3 水射流材料表面处理	12
1.4 水射流技术的分类及特点	6	参考文献	13
1.5 水射流技术的应用概况	8		

第2章 纯水射流技术

2.1 水射流技术基础理论	14	2.4.2 水射流结构特征参数	32
2.1.1 水的物理特性	14	2.5 水射流打击力模型	37
2.1.2 流体动力学基本方程	15	2.5.1 射流对靶体的冲击压力	37
2.1.3 孔口流动基础理论	18	2.5.2 水射流冲击压力作用面积及总作用力	39
2.2 纯水射流系统	18	2.5.3 喷嘴的结构和几何参数对射流的影响	40
2.2.1 直驱式超高压泵	18	2.6 水射流冲击破坏理论	43
2.2.2 液驱超高压增压缸	19	2.6.1 水射流冲击物体表面的应力	43
2.2.3 气驱超高压增压缸	20	2.6.2 水射流冲击作用下的材料破坏微观机理分析	49
2.3 水射流喷嘴组件	21	2.6.3 水射流切割理论	51
2.3.1 喷嘴结构形式	21	参考文献	52
2.3.2 喷嘴的流量系数	23		
2.3.3 喷嘴内部流动分析与设计理论	25		
2.4 水射流结构特征与基本参数	31		
2.4.1 水射流结构特征	31		

第3章 水射流打击力增强技术

3.1 减阻液水射流	53	3.3.4 脉冲水射流的几何结构与动力特性	82
3.1.1 减阻液	53	3.3.5 爆炸式脉冲水射流	85
3.1.2 减阻液射流原理及特性	55	3.3.6 电液脉冲水射流	91
3.1.3 减阻液水射流动力特性及应用	56	3.3.7 工业水炮装置	95
3.2 空化水射流	58	3.3.8 调制脉冲水射流	100
3.2.1 空化原理及其动力学理论	58	3.4 磨料水射流	109
3.2.2 空化喷嘴	59	3.4.1 后混合磨料水射流	109
3.2.3 空化水射流的作用机理及工程应用	63	3.4.2 前混合磨料水射流	114
3.3 脉冲水射流	64	3.4.3 悬浮磨料水射流	115
3.3.1 脉冲水射流发生原理	65	3.4.4 脉冲磨料水射流	122
3.3.2 冲击式脉冲水射流	67	3.4.5 微磨料水射流	125
3.3.3 脉冲水射流喷嘴	77	参考文献	130

第4章 磨料水射流切割技术

4.1 磨料水射流切割的一般特征	133	4.3 磨料水射流切割工艺参数	146
4.1.1 磨料水射流切割断面的宏观形貌	133	4.3.1 磨料水射流参数对加工性能的影响	146
4.1.2 磨料水射流切割材料时的切缝宽度	134	4.3.2 工艺参数对切割加工的影响	149
4.1.3 磨料水射流切割的锥度	136	4.3.3 材料性能对切割加工的影响	150
4.1.4 磨料水射流切割断面的表面粗糙度	137	4.4 磨料水射流切割理论	151
4.1.5 磨料水射流切割断面的磨料残留	139	4.4.1 磨料射流切割材料过程	151
4.2 磨料水射流切割过程中的温度分布	143	4.4.2 磨料水射流切割材料的微观机理	152
		4.4.3 磨料水射流切割理论模型	155
		参考文献	158

第5章 磨料水射流精密切割控制技术

5.1 数控磨料水射流切割机床	159	5.4 磨料水射流精密切割的运动控制	171
5.1.1 磨料水射流切割机床的速度处理	161	5.4.1 “先计算、再加工”控制法则	171
5.1.2 磨料水射流切割机床的路径插补	162	5.4.2 误差校正	173
5.1.3 磨料水射流切割机床的驱动控制	163	5.5 磨料水射流精密切割的优化处理技术	176
5.2 磨料水射流精密切割表面质量控制技术	164	5.5.1 磨料水射流动态穿孔技术	176
5.3 磨料水射流精密切割几何精度控制	167	5.5.2 尖锐拐角(或圆角)处的速度校正	176
5.3.1 磨料水射流精密切割的几何形状误差	167	5.5.3 拐角(或圆角)处的“过切”处理	176
5.3.2 磨料水射流倾斜加工技术	169	5.6 人工神经网络模型在磨料水射流精密切割中的应用	178
		参考文献	181

第6章 磨料水射流精密特种加工

6.1 磨料水射流精密切割厚材料	183	验证	196
6.1.1 切割厚度对射流滞后的影响	184	6.3.3 磨料水射流精密钻孔实例	198
6.1.2 射流冲击角度对射流滞后的影响	185	6.4 磨料水射流车削加工	199
6.1.3 切割厚度对切缝宽度的影响	186	6.4.1 磨料水射流车削加工类型	199
6.1.4 切割厚材料时的切割头优化设计	187	6.4.2 磨料水射流加工参数对车削的影响	200
6.1.5 磨料水射流切割大厚度材料实例	188	6.4.3 磨料水射流车削加工质量	202
6.2 四轴联动精密切割加工异形零件	189	6.5 磨料水射流铣削加工	210
6.3 磨料水射流精密钻孔加工	192	6.5.1 磨料水射流参数对铣削的影响	211
6.3.1 磨料水射流钻孔的理论模型	192	6.5.2 磨料水射流铣削加工模型	213
6.3.2 磨料水射流钻孔过程的试验		6.5.3 磨料水射流铣削加工策略	214
		6.5.4 磨料水射流摆动铣削加工	218
		6.5.5 磨料水射流铣削复合材料	222
		6.6 磨料水射流超精密磨削加工	227

6.6.1 微磨料水射流磨削加工人工髌关节股骨头	227	6.7.3 磨料水射流抛光技术的应用	240
6.6.2 微磨料水射流磨削加工人工膝关节	231	6.8 磨料水射流精密特种加工的应用及发展趋势	245
6.7 磨料水射流抛光技术	233	6.8.1 磨料水射流精密特种加工的应用	245
6.7.1 磨料水射流抛光机理	234	6.8.2 磨料水射流精密特种加工的发展趋势	249
6.7.2 磨料水射流抛光工艺参数对抛光的影响	236	参考文献	250

第7章 水射流技术在机械工程中的典型和创新应用

7.1 水射流技术在航空航天制造领域的应用	252	7.3.1 基于水射流技术的薄板渐进成形	267
7.1.1 磨料水射流切割航空复合材料	252	7.3.2 基于脉冲水射流技术的有模成形	275
7.1.2 水射流技术在航空高性能涂层修复中的应用	259	7.4 磨料水射流在微电子制造中的应用	278
7.2 水射流技术在材料表面强化方面的应用	261	7.5 水射流技术在医疗器械制造中的应用	282
7.2.1 基于水射流的表面强化处理模型	262	7.5.1 磨料水射流精密切割心脏修补支架	282
7.2.2 基于水射流的表面强化处理实践	265	7.5.2 磨料水射流车削加工骨连接螺钉	287
7.3 水射流技术在材料成形方面的应用	267	参考文献	292

第8章 水射流技术在军工国防领域的应用

8.1 水射流切割军事用途高爆弹药的安全性评估	294	8.4 水射流技术扫雷	303
8.2 磨料水射流拆除海军废旧炮弹	298	8.5 水射流技术洗消装甲运兵车放射性污染	309
8.3 水射流技术销毁生化武器	301	参考文献	314

水射流技术概论

1.1 水射流技术原理和典型组成

水射流 (water jet) 是用高压或超高压泵将普通水介质增压, 然后使其通过喷嘴 (orifice) 以亚声速或超声速喷出, 从而形成高速、高能、高穿透力水束, 即高速水射流束, 如图 1-1 所示。

典型水射流系统主要由高压发生系统、喷嘴组件、控制阀组及高压管件四部分组成。图 1-2 所示为超高压水射流切割机床的水射流系统组成。该系统由液压油回路和高压水回路组成。其工作原理为: 液压油回路中, 液压泵 3 由电动机驱动工作, 经过滤器 2 从油箱 1 中吸油, 液压泵输出的压力油经节流阀 5、三位四通电磁换向阀 6 左位进入增压缸 7 左活塞腔, 同时增压缸 7 右活塞腔的液压油液经电磁换向阀 6 左位回油箱, 则增压缸 7 活塞在压力油作用下右行, 此时增压缸 7 的柱塞对柱塞腔右侧的水介质进行增压。

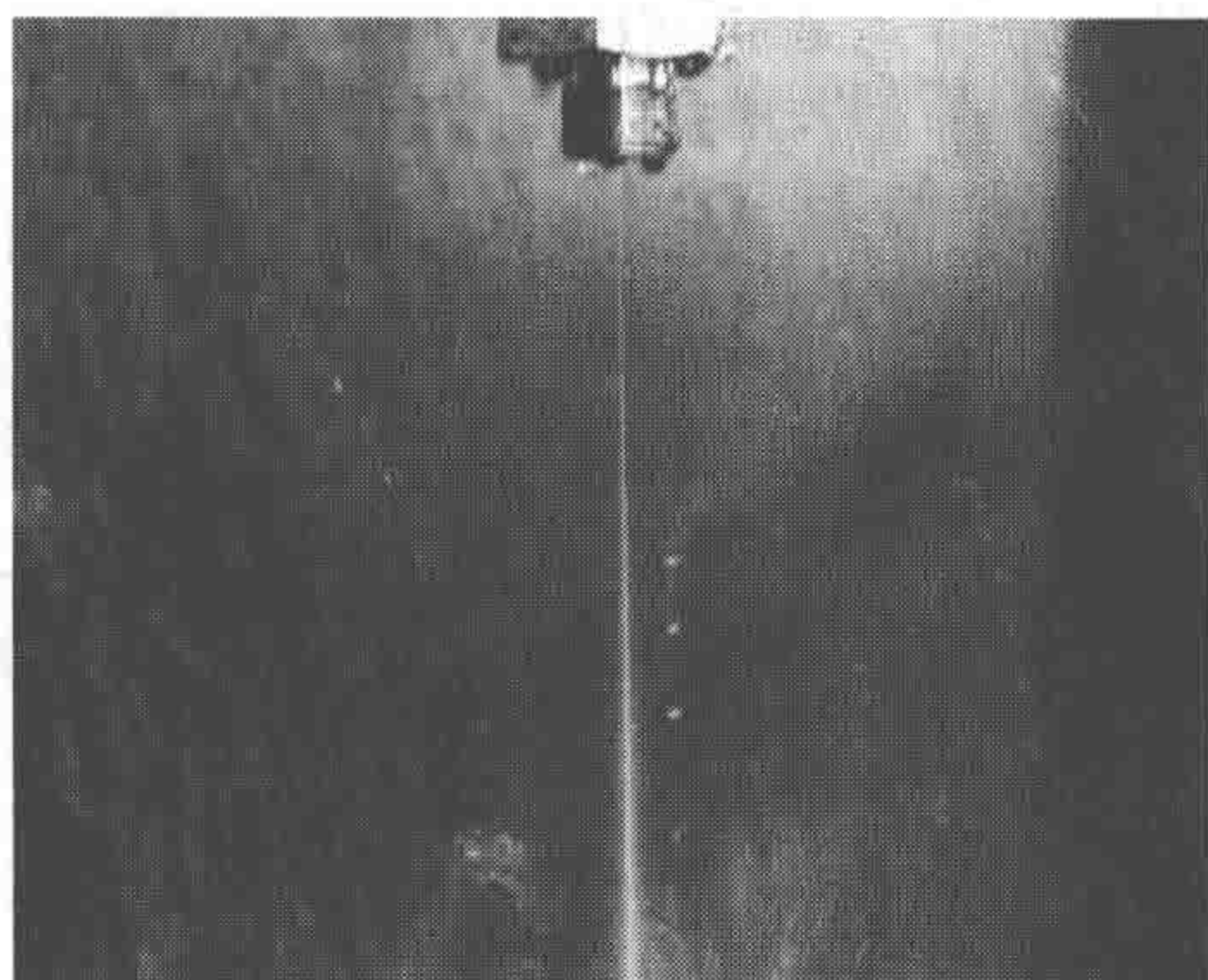


图 1-1 高速水射流束

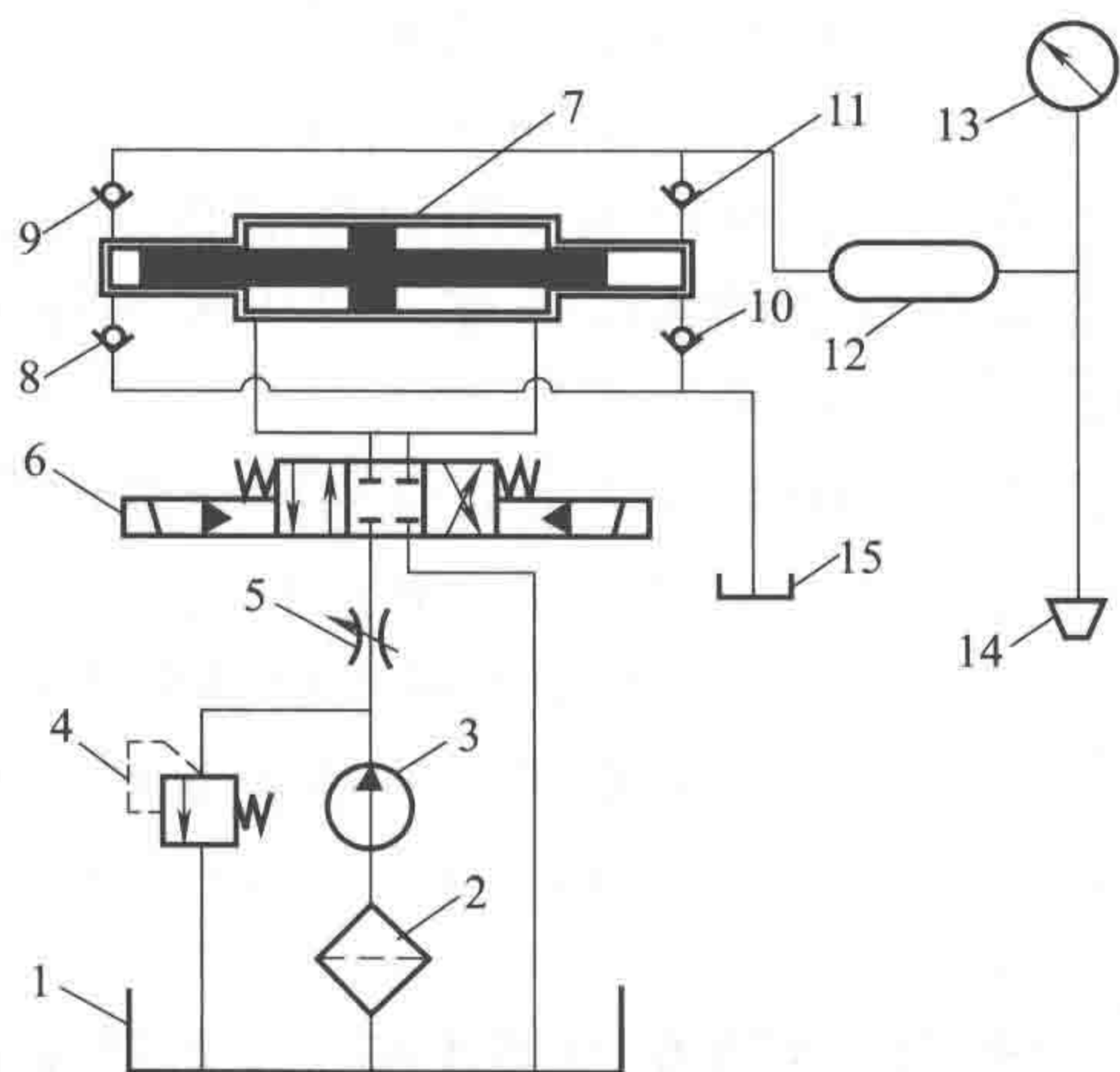


图 1-2 超高压水射流切割机床的水射流系统组成
1—油箱; 2—过滤器; 3—液压泵; 4—调压溢流阀; 5—节流阀;
6—三位四通电磁换向阀; 7—增压缸; 8~11—单向阀;
12—超高压蓄能器; 13—压力表; 14—喷嘴; 15—水箱

超高压水经单向阀 11 进入超高压蓄能器 12, 然后从喷嘴 14 喷出, 形成高压水射流; 与此同时, 水箱 15 内的水介质在压力作用下经由单向阀 9 注入增压缸左侧的柱塞腔内。当活塞

右行至行程终点时，霍尔接近开关发出电信号，电磁换向阀 6 换向，增压缸活塞反向（向左）运动，并对左侧柱塞腔内的水介质进行增压，高压水经单向阀 8 进入超高压蓄能器 12 并从喷嘴 14 喷出；同时水箱 15 内的水介质经由单向阀 10 注入增压缸右侧的柱塞腔内。如此往复，则可形成连续高压水射流。如果三位四通电磁换向阀 6 处于中位，此时增压缸活塞停止运动，液压泵输出的全部液压油经电磁换向阀 6 中位流回油箱，液压泵卸载，水射流亦停止射出。

超高压发生系统是水射流的动力源，它为普通水介质提供压力能。如果增压缸增压比（面积比）为 14:1，则当液压泵输出油压为 30MPa 时，增压缸的输出水介质压力可达 420MPa。为了保持输出压力恒定，一般采用恒功率变量液压泵作为动力源。这种泵可以使超高压发生器输出流量与喷嘴在一定压力下所需的流量相匹配。图 1-3 是典型液驱超高压发生系统。

喷嘴是一个换能元件，它把水介质的压力能转换为水射流的动能，是水射流的关键部件之一。由于水射流经喷嘴后会迅速扩散，因此，通常在水喷嘴的后面安装一聚焦管（focusing tube），从而对水射流束进行校直和聚焦，形成喷嘴组件，如图 1-4 所示。

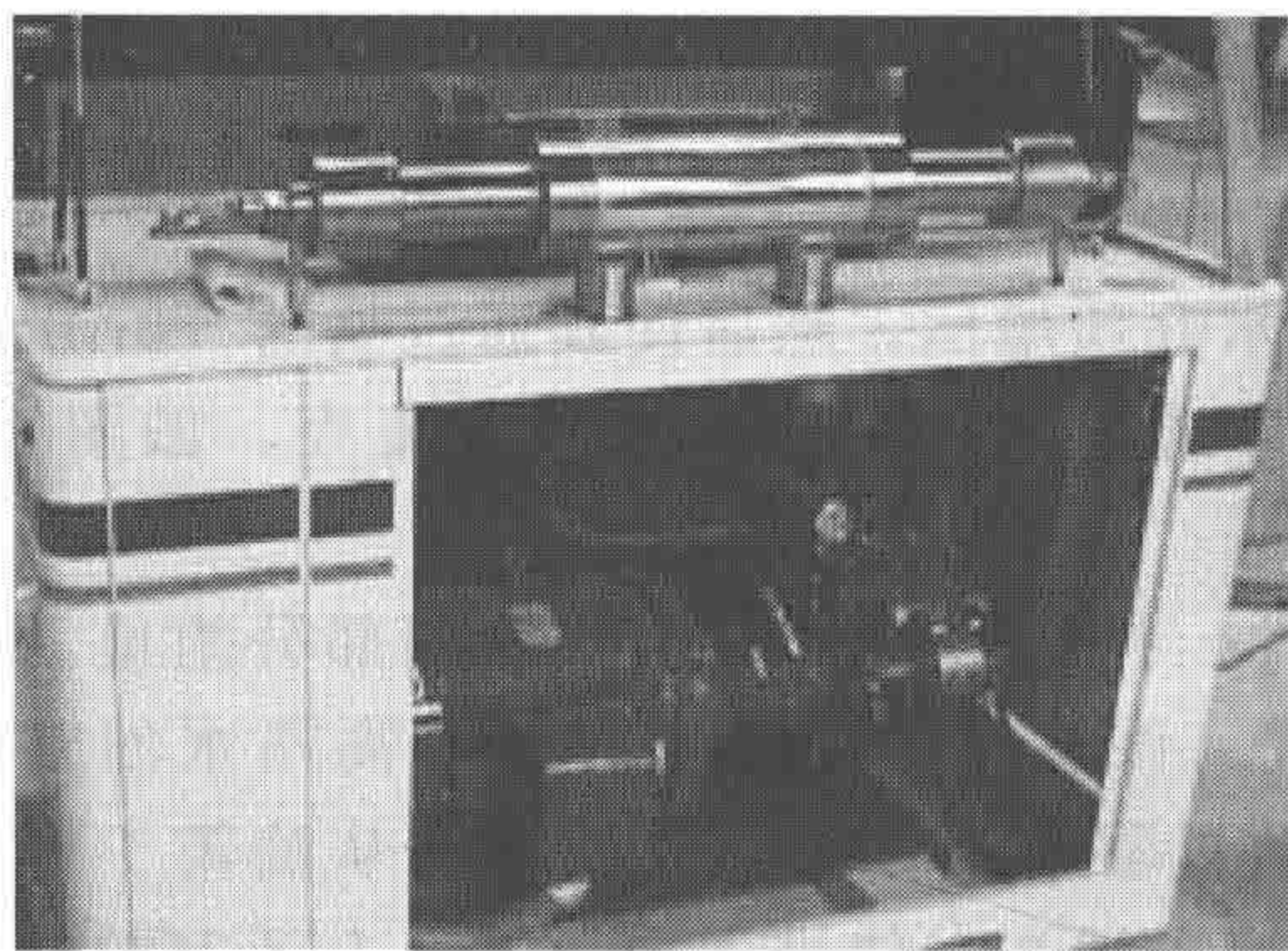


图 1-3 典型液驱超高压发生系统

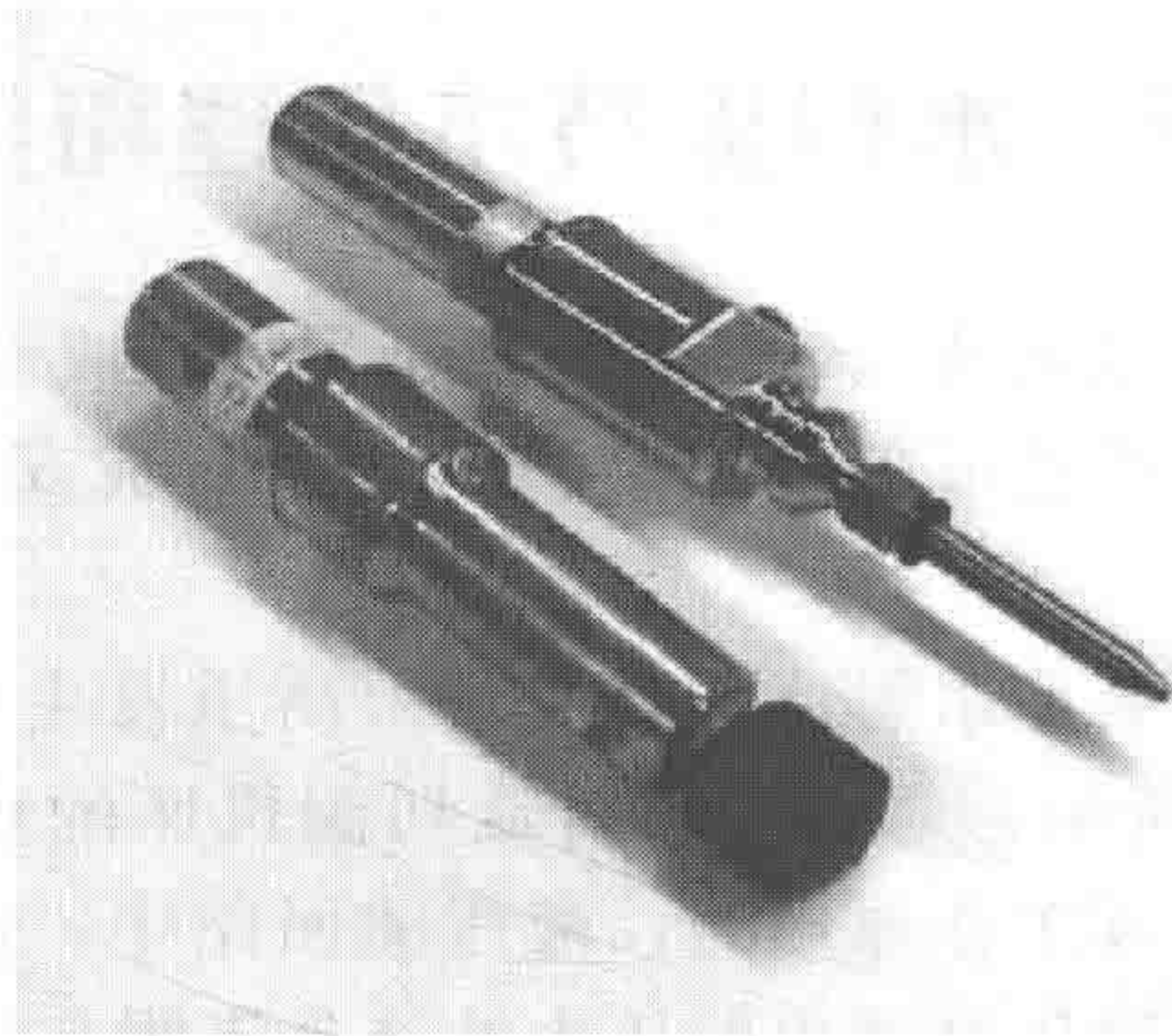


图 1-4 喷嘴组件

水射流系统的控制阀组，包括溢流阀、安全阀、卸荷阀、截止阀、单向阀等，主要控制压力水的流向、通断或泄压，从而保证系统安全运行。高压管件包括硬管、高压软管、接头、三通等，它们将压力水供给喷嘴组件。在水射流系统中，阀组和管件通常采用高强度不锈钢制造；软管则采用含强化钢丝层的聚酰胺制造，其最高使用压力可达 400MPa。

具有很高动能的水射流束可以用来进行工业清洗、材料切割等各种作业。为了增强水射流的威力，一般采用两种办法来强化：一是在水中加入可溶性添加剂，如高分子聚合物（Polymeric），通过增加水分子表面张力来降低射流的扩散，从而提高射流的穿透能力。这就是超水射流（super-water jet）；另一种办法是在水中添加固体粒子（即磨料），从而形成磨料水射流（abrasive water jet）。由于磨料水射流具有切割加工高硬度、高脆性和高韧性材料以及复合材料的能力，因此已经逐步成为一种新型机械加工工具，在航空航天、机械制造、汽车、国防、军工和核工业等工业领域得到愈来愈广泛的应用。

1.2 水射流技术的产生和发展过程

水射流技术的应用可以追溯到 19 世纪中叶，主要用来冲洗矿石中的泥土、矿石的筛选或直接冲刷煤层。由冲刷到破碎实际上是水射流的一个质变过程。前者是低压大流量，后者则是高压小流量。20 世纪 30 年代，采用水射流技术开采煤矿（即水采），给采矿业带来了巨大的经济效益。水采开始是用 10MPa 以下的水射流回采中硬以下煤层，至 20 世纪 70 年代已发展到用 20~30MPa 的水射流慢速切割煤体，再后来就是用高压（至 100MPa）、超高压（大于 200MPa）的水射流辅助采煤机、掘进机用于破碎落煤和破岩。

19世纪中叶(1870年前后),美国在加利福尼亚州的金矿中第一次用增压后的水射流开采非固结的矿床。20世纪50年代初,苏联和我国在煤矿利用30~50MPa的水射流进行水力采煤。随着水力采煤技术的逐渐推广,人们认识到提高水的压力和适当减小喷嘴直径,可以明显地提高水力采煤的效率,因而不少专家学者着手研究较高压力的压力源。20世纪60年代制造出了大批高压柱塞泵和增压器,日本研制出了1700MPa的增压器,苏联和美国研制出了5600MPa的脉冲射流发生器,这些高压设备的问世大大推动了水射流技术的研究工作。到20世纪70年代末期,水射流技术开始转向研究如何提高水射流的冲击力,于是出现了脉冲射流、低温射流和磨料射流。这些射流的水压虽然不高,但它们的作用效果远远高于同等压力下的普通连续水射流。进入20世纪80年代,随着各国学者对各种射流理论及其应用技术的深入研究,使磨料射流、空化射流、气水射流和自振射流得到了进一步发展。水射流技术的应用范围也由单纯的采矿工业扩大到冶金、石化、航空、建筑、建材、交通运输、市政建设、化工、机械、轻工业及医学等领域。水射流作为一种良好的切割、破碎和清洗除垢的新技术,已被人们所公认,大量水射流技术的产品如水射流切割机、水射流辅助采煤机、水射流辅助掘进机、水射流打桩机以及不同用途、不同形式的清洗机已先后投入市场。

20世纪80年代,超高压水射流切割(俗称水刀)飞速发展。自1972年美国Ingersoll-Rand公司400MPa水切割机的研发成功,继之美国Flow Industries公司的水切割机(350MPa、3.51L/min)问世,为超高压水射流切割工艺的研究奠定了坚实的理论与试验基础。在20世纪80年代末、90年代初期,超高压水射流切割设备朝着批量化、商品化方向发展,同时通过机械手控制切割头的产品日趋完善,达到了全自动、高智能化的水平。

进入21世纪后,针对工业领域的新要求,研究者成功研制了微磨料水射流。相比传统的磨料水射流,该技术具有结构简单、元件数目少、可靠性高、磨料消耗少的优点。

目前,水射流领域已经形成一个以压力、功率为纵坐标、以射流形式为横坐标的技术与产品的平面型谱。高压水射流技术已经从单纯的采矿业渗透到各个应用领域,如工业清洗、河道疏浚、除锈除磷、油井腐蚀防护、水力切割、超细粉碎、喷射注浆、煤层钻孔、水力采煤、无针注射器、喷丸与抛光、快速成形与表面处理、刀具钝化、半导体晶圆切割与清洗、射流手术刀、水刺织布、除尘灭火、煤矿瓦斯防治等。

回顾水射流技术的发展过程,大致可分为以下五个阶段。

① 第一阶段:试验探索、设备研制阶段。20世纪60年代,以研究低压水射流采矿为主,同时以静压试验和化工流程为主要目的的高压泵、增压器 and 高压管件(统称高压设备)的研制取得较多商品化成果(它们的介质主要不是水)。这为高压水射流技术的产生奠定了基础。

② 第二阶段:工业应用阶段。20世纪70年代,主要针对采煤机、清洗机开展了水射流工业试验,这时期的主攻方向是提高以水为介质的高压设备的压力和可靠性,同时开发多种形式的射流。

③ 第三阶段:迅速发展阶段。20世纪80年代,主要特点是高压、超高压、大型化、成套化、专用化,新型水射流形式都已产品化、规模化、商品化。尤其是水射流清洗、除锈、切割应用的独特优势,使其迅速推广应用至各行各业。

④ 第四阶段:新产品开发阶段。20世纪90年代,水射流的超高压泵组、爬壁机器人清洗、六轴数控磨料水射流切割装置的成功研制以及喷头关键技术的突破,一些高难度研究,诸如机械手多维水切割、水下切割、井喷管口切割、干冰切割等问世。围绕特种精密加工技术的研究,进一步丰富和完善水射流的研究与应用,同时相关的标准诞生。

⑤ 第五阶段:创新应用时代。21世纪以来,水射流技术不断创新,诸如超高速水射流、微磨料水射流、低温射流、激光微水射流等各种新型水射流技术不断涌现,并逐步应用于生物

医疗、外科手术、微电子、微细加工、有机废水处理、食品灭菌、病毒灭活、蛋白质改性、白酒催陈等领域。

我国水射流技术的研究是从20世纪70年代开始的。经过几十年的研究与实践，取得了较大的进展，从高压到超高压，从小功率到大功率机组，从单机设备到成套设备，从通用机械到专用机械，从试验研究到商品化，研究出了一批新技术，开发出了一批新产品。近20年中国水射流技术产业取得长足进步，令美国等发达国家瞩目，中国学者几乎每年都出现在专业的国际性技术会议席位上，中国制定了相关的水射流技术与设备的标准，水射流技术已远远突破了泵与喷嘴的概念。以水射流技术为核心的相关设备制造商如雨后春笋，蓬勃发展。随着市场主导创意，创意主导发展，形成有自主知识产权的各种高技术产品。

1.3 水射流技术研究动态

水射流作为一门新兴的技术，在过去的数十年间发展十分迅速。各种新型水射流技术，如脉冲水射流 (pulsed water jet)、磨料水射流 (abrasive water jet)、空化水射流 (cavitation water jet)、低温水射流 (cryogenic water jet) 等相继诞生，并已广泛应用于工业清洗 (industrial cleaning)、材料表面处理 (surface processing) 和物料切割 (materials cutting) 等方面。

过去人们把注意力主要集中在提高水射流压力来获得更好的水射流性能，因此，水射流压力从70MPa不断提高到如今的420MPa甚至1000MPa。随着机械制造水平的提高，大批高压和超高压发生器应运而生，从而大大推动了水射流技术的进步。但是，受多种技术条件制约，通过提高压力来提高连续水射流出口速度终究受到限制，不可持续。20世纪70年代末期，学者们发现脉冲水射流的打击力大大优于连续水射流，于是脉冲水射流技术迅速发展。脉冲水射流用比普通水射流低得多的压力来完成特定的工作任务。

超高速脉冲水射，又叫水炮 (water cannon) 的研究成果，使水射流技术跃上一个新的台阶。当脉冲射流速度达到1~2km/s时，射流头部的动压可高达1~3GPa。在如此高压头作用下，几乎任何工程材料都可被穿透。这意味着超高速脉冲水射流可用于材料表面处理和切割加工。其特点在于这种水射流不需要任何添加剂，结构更简单、控制更方便、环境更友好 (friendly environment)。超高速脉冲水射流可以完成一些普通水射流无法完成的任务，例如，超高速水弹可以穿透黏土层深达20m (Kolle, 1998)。正是由于超高速脉冲水射流的卓越穿透能力，因而引起国际学术界部分学者对超高速脉冲水射流技术的研究兴趣。超高速脉冲水射流具有许多功用，如对特殊材料进行打孔、表面强化处理等。

20世纪，超高速脉冲水射流发生装置的典型代表如IV-5、MPI-2、VIS-1、VBS等面世。21世纪，一些速度更高、性能更优良的超高速脉冲水射流发生装置相继问世。参考文献 [7] 介绍了一种试验装置，利用自由落体动能驱动并配合聚能喷嘴，可以产生速度高达2000m/s的超高速脉冲水射流；瑞士特拉空间公司 (Terraspace Inc.) 研制了一种速度达2987m/s的超高速脉冲水射流发生装置，其相应的射流头部动压则高达4.46GPa；瑞士的另一家研究机构——塞拉克研究所 (CERAC S. A Institute) 设计的一台超高速脉冲水射流发生器，其理论速度可高达3500m/s。这种装置的结构特点是采用了具有指数内轮廓曲线的聚能喷嘴。英国谢菲尔德大学沃森博士 (Dr. A. J. Watson, University of Sheffield, England) 根据德国著名的纽曼效应 (或美国的门罗效应)，采用锥形装药的爆炸装置产生了速度高达9500m/s的脉冲水射流，其对应的射流头部动压则高达13.8GPa。

微细加工磨料水射流 (micro-machining abrasive water jets, MAWJ) 是一种新型、高效水射流形式，由于其射流束径远小于传统磨料水射流，因此，在半导体、微机电系统

(micro electro mechanical system, MEMS) 以及光学器件领域具有广阔的应用前景。近十年来受到如英国、美国、德国、瑞士、澳大利亚、新加坡以及日本等国的高度重视, 开始相关技术及应用研究。美国在微磨料水射流技术方面大量投入, 欧盟已将微磨料水射流加工技术列为第五框架项目, 澳大利亚也启动微磨料水射流技术前期研究, 我国一些学者也开始这方面的研究。

根据目前国际研究文献资料, 磨料水射流按高能射束的直径大小可分为三类: 传统(普通)磨料水射流 (abrasive water jet, AWJ)、精细磨料水射流 (fine abrasive water jet, FAWJ) 和微细加工磨料水射流 (micro-machining abrasive water jets, MAWJ)。传统磨料水射流的切缝宽度一般在 $500\mu\text{m}$ 以上, 精细磨料水射流的切缝宽度为 $100\sim 300\mu\text{m}$, 而微细加工磨料水射流的切缝宽度可达 $50\sim 100\mu\text{m}$ 。由于精细磨料水射流对磨料的要求较微细加工磨料水射流低, 而解决精细磨料水射流的相关技术问题对成功开发和应用微细加工磨料水射流具有借鉴作用, 因此许多学者将精细磨料水射流看成是传统磨料水射流与微细加工磨料水射流之间的一种技术过渡而得到优先研究。Hashishi (2005) 等人利用传统 AWJ 方法, 通过设计新的切割头, 产生射束直径在 $400\mu\text{m}$ 以下的精细磨料水射流 (压力 $375\sim 400\text{MPa}$, 喷嘴直径 $12\mu\text{m}$ 、 $75\mu\text{m}$, 砂管内径 $380\mu\text{m}$, 磨料粒度 $65\mu\text{m}$), 并成功应用于各种半导体材料的切割。Miller (2003) 采用纳米磨料粒子 (氧化铝磨料, 平均直径 $50\sim 300\text{nm}$) 成功开发出射流直径为 $40\mu\text{m}$ 的微磨料水射流。Miller (2005) 研究认为, 微细加工磨料水射流的束径完全可以达到激光加工的数量级。图 1-5 是 $50\mu\text{m}$ 微细加工磨料水射流。

随着微机电系统的发展, 对微细加工技术的需求越来越高, 科学家们努力研究开发新型微细加工技术和方法。于是, 一种称为激光微水射流 (laser micro jet, LMJ) 的新技术, 亦称为水射流导引激光 (water jet guided laser) 技术诞生了。它是一种将激光注入微水射流束, 从而形成一种新的复合射流, 兼具激光和水射流的诸多优点。瑞士 Synova 公司成功开发出水射流导引激光系统和切割机床, 在微电子和超精密加工领域得到应用, 如图 1-6 所示。最初, 水射流导引激光加工主要是用于减少切割区域附近的热效应, 但事实上用水射流取代传统激光切割中的辅助气体流束, 还有很多别的优点。这项技术在很多应用中, 特别在微电子和半导体制造行业, 被证明是有效且可靠的。

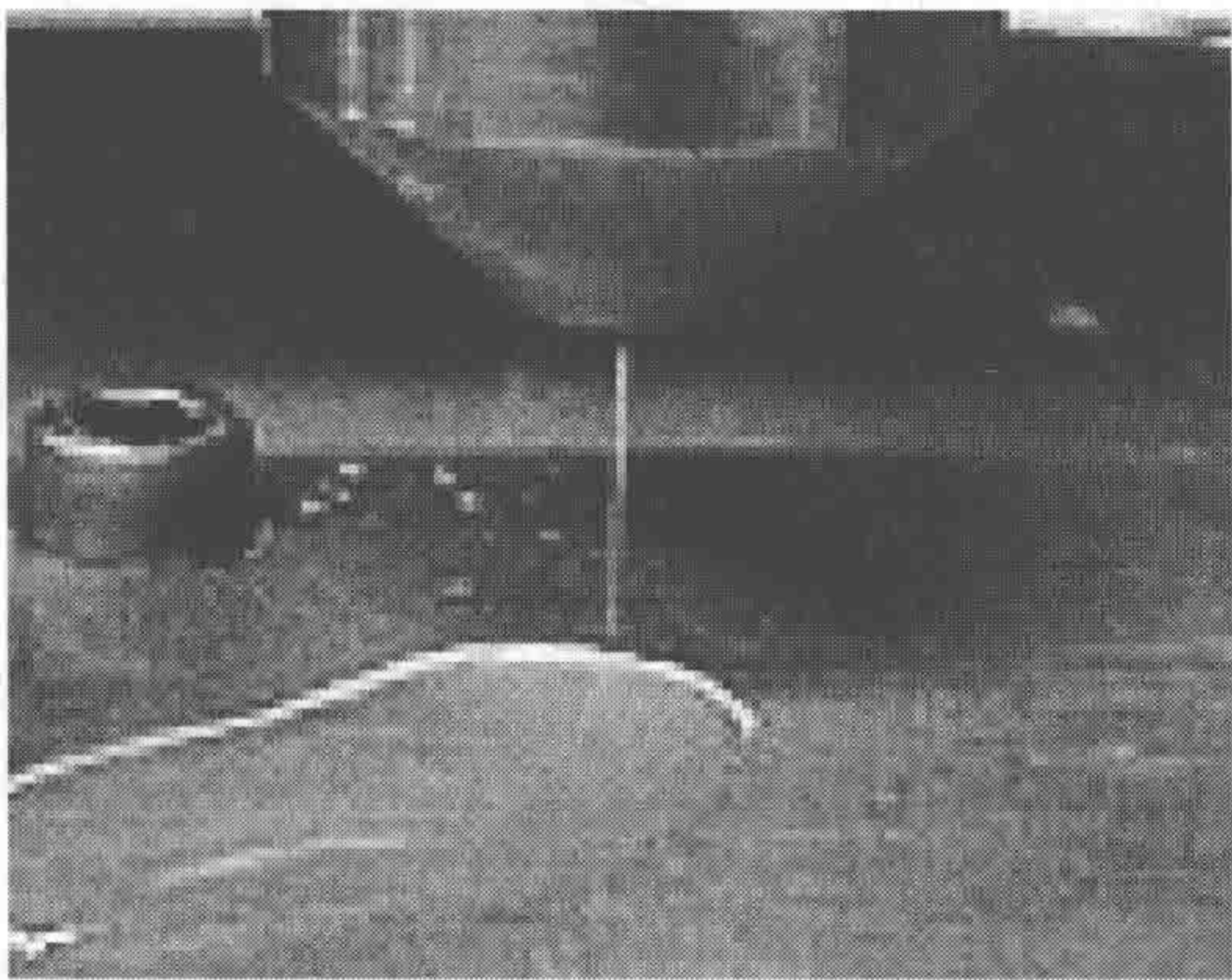


图 1-5 微细加工磨料水射流 ($50\mu\text{m}$)

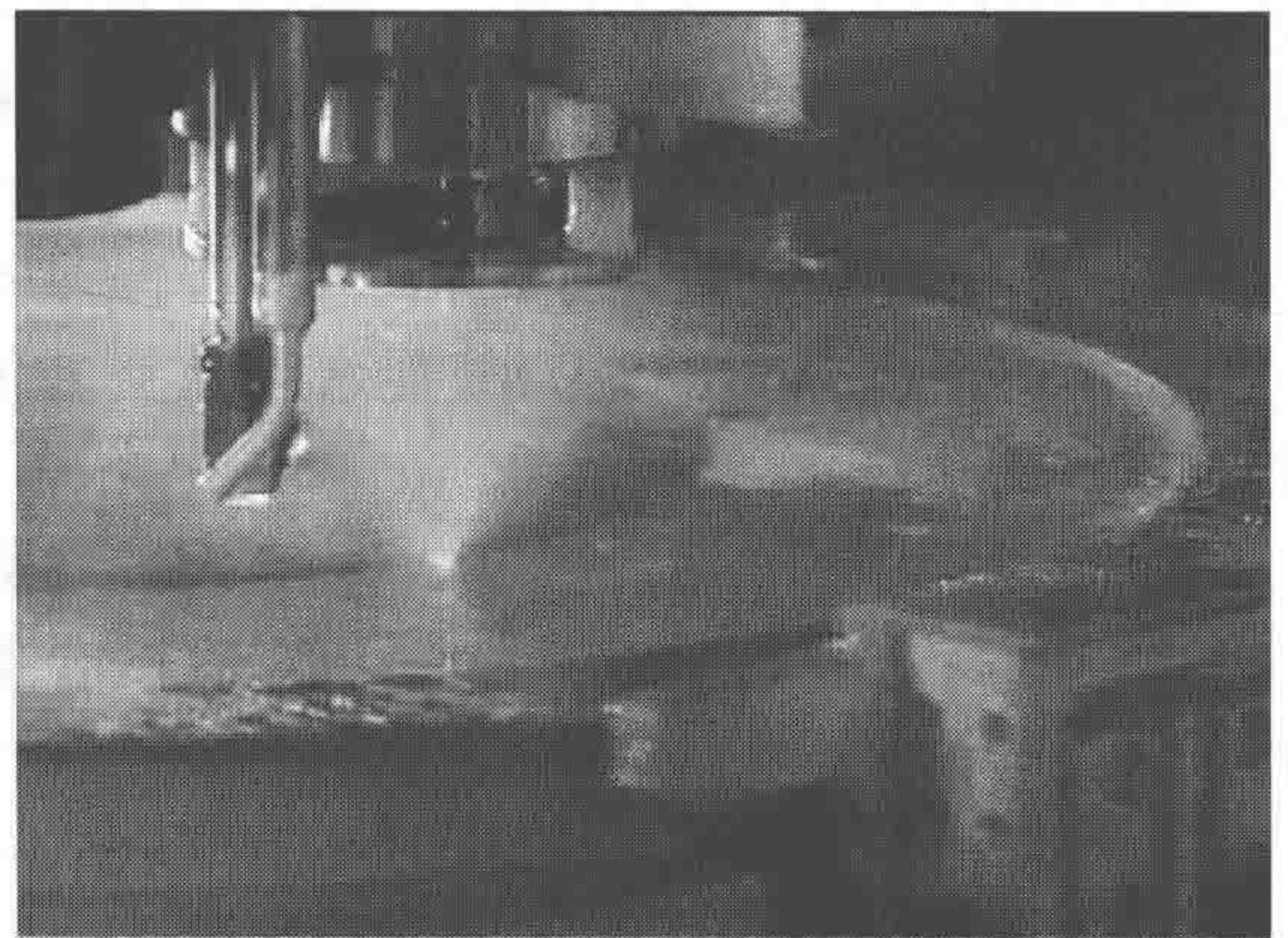


图 1-6 水射流导引激光切割

低温射流 (cryogenic jet) 又叫做冷射流 (cold jet), 是 20 世纪末发展起来的一种新型射流之一。20 世纪 90 年代初, Kannol 和 Szijcs 等人提出了用喷射冷冻固体颗粒来处理敏感材料表面的技术。他们通过在高速空气射流中添加制冷剂, 如液态氮 (N_2)、固体二氧化碳 (CO_2) 或氟利昂 (freon) 等, 从而使射流中的液体冷凝形成冰粒射流。此后, 国际上对冰粒射流技术的研究和应用表现出极大兴趣。最近几年, 冰粒射流技术在冰粒子形成方法、冰粒射

流喷嘴、冰粒射流喷射系统及其应用等方面取得重要进展。

低温射流 (cryogenic jet) 包括液态二氧化碳射流 (CO_2 jet)、液氮射流 (LN_2 jet)、固态二氧化碳 (干冰) 射流以及冰粒射流 (ice jet)。同普通水射流相比, 低温射流具有独特的优势。

① 消除液体残存。液态二氧化碳和液氮这类物质, 在常温、常压下即成为气态, 因此, 低温射流工作后迅速蒸发, 无液体残留。这在两种情况下特别有用: 一是要求清洁环境或工件; 二是工件含有剧毒或放射性物质。对于第一种情况, 低温射流可确保工件污染降到最低。对于第二种情况, 可大大减少危险的加工废弃物料的处理。

② 扩展水射流的潜在应用范围。由于低温射流的液态物质离开喷嘴以后不断扩散和蒸发, 从而使低温射流沿轴向的切割功率随靶距的增加而快速衰减。因此, 低温射流可用于一些压力敏感材料或易碎材料的切割。

③ 用可挥发的低温固态粒子 (如固态 CO_2 粒子) 作为磨料来增强切割 (或清洗) 能力, 从而可大大减少加工废弃物的处理。

④ 当温度降至材料的韧性/脆性过渡温度以下, 从而可能改善工件材料的失效形式。

根据国际研究动态, 水射流技术的研究方向可以概括为以下几个方面。

① 新型高效射流技术。包括高速和超高速水射流技术的理论; 超高速水射流、空化水射流、脉冲水射流、冰粒射流的产生方法和设备。

② 水射流切割的智能化控制技术。包括高能水束对各种工程材料的穿透性能、冲蚀机理; 高速水射流各参数与加工精度的映射关系; 高能水束对工程材料的机械和热影响; 高能水束的能量有效利用和优化等。

③ 水射流集成制造系统与装备。将高速水射流技术与机械、电子、液压、气动、数控、计算机 CAD/CAM 集成于一体, 形成多功能、柔性化和智能化的清洗与制造设备。

④ 继续拓展水射流技术的工程应用。特别是在材料工程、医疗机械、环保工程和微加工等领域的应用研究。如材料表面处理、医用手术刀、微细加工等。

1.4 水射流技术的分类及特点

水射流技术的种类很多, 分类的方法也不一样, 现结合工程实际应用, 介绍几种常用的分类方法。

(1) 根据射流介质分类

① 单一液体介质射流。如纯水射流、液氮射流、液态 CO_2 射流、超水射流和其他液体射流。

② 液-固两相介质射流。如前混合磨料水射流、冰粒射流等。

③ 液-固-气体三相介质射流。如后混合磨料水射流、气压输送磨料水射流、干冰气射流等。

(2) 根据射流流体力学特性分类

① 定常射流。射流各个断面上的流体力学特性不随时间变化, 仅为其所处位置的函数, 该射流一定是连续射流。

② 非定常射流。射流各个断面上的流体力学特性随时间和位置变化, 该射流可以是连续射流, 也可以是非连续射流。

(3) 根据射流驱动压力等级分类

射流驱动压力等级是设计射流工艺系统的主要参数, 与工艺系统的经济合理性、工艺设备的复杂性密切相关, 具体分类如表 1-1 所示。

表 1-1 射流的压力等级

射流压力等级	压力范围/MPa	压力源类型
低压水射流	0.5~10	多级离心泵、低压往复泵、柱塞泵等
中压水射流	10~200	柱塞泵、增压器
高压水射流	200~250	高压往复泵、增压器
超高压水射流	>250	超高压往复泵、增压器

(4) 根据射流工作环境介质分类

按环境介质的不同,结合射流的流体动力学结构与动力特性,射流可划分为以下两类。

① 淹没射流。射流的工作介质与环境介质相同,属于单一介质的流动,如水或其他液体中喷射的水射流、空气中喷射的气体射流。

② 非淹没射流。射流的工作介质与环境介质不同,属于两相或多相介质的流动,如水射流在空气中喷射。

(5) 根据固壁条件分类

射流的工作环境中是否有固体壁面的限制,直接影响射流的形成和动力特性。射流在固体壁面的约束下称为非自由射流;若无固体壁面约束,则为自由射流。有些文献认为自由射流不仅不受固壁限制,而且认为其环境介质的流速很小,甚至静止。

不受固壁限制的淹没射流,称为淹没自由射流;反之,称为淹没非自由射流。同理,不受固壁条件约束的非淹没射流,称为非淹没自由射流;反之,称为非淹没非自由射流。

(6) 根据射流对材料的施载特性分类

按射流对物料的施载特性,水射流可分为连续射流、脉冲射流、空化射流和磨料射流四种,其中空化射流和磨料射流统称为混合射流。

① 连续射流。连续射流对物料施载开始时有一个短时的冲击峰值压力,随后压力急剧下降并趋于稳定,主要利用该射流峰值压力过后的稳定压力进行物料切割和清洗。

② 脉冲射流。脉冲射流是非连续射流,以脉冲的形式将水射流作用在靶体上,其施载特性是产生持续时间极短的峰值压力,连续不断地冲击靶体。脉冲射流对靶物表面的冲击力,远远超过一般连续射流的滞止压力,加速材料破坏裂纹的扩展,水射流的切割与破碎能力得到显著增强。常见的脉冲射流有阻断式、激励式和挤压冲击式。

③ 空化射流。空化射流是一种在射流中自然产生空化气泡的连续射流,其施载特点是冲击压力和稳定压力相结合。当水在高速流动时某处的局部绝对压力降到当地温度下的饱和蒸汽压时,溶解在水中的空气会释出,形成许多空泡。空泡溃灭将引起巨大的水力冲击,增强了射流的清洗和破碎能力。

④ 磨料射流。磨料射流就是将一定数量的磨料(如碳化硅、石榴石、金刚砂、石英砂等)与高压水混合,形成液固两相射流。通过将高压水的部分动能传递给磨料,改变了射流对靶体的作用方式。将纯水水射流对靶体的持续冲击,改变为磨料对靶体的冲击、磨削,射流的品质和工作效率明显提高。根据磨料的加入方式不同,磨料射流又有后混合式与前混合式之分。

(7) 根据射流用途分类

① 雾化射流(降尘、喷灌等)。

② 造型射流(喷泉、人造瀑布、水幕等)。

③ 真空射流(水射流抽吸)。

④ 圆柱射流(消防、清洗等)。

⑤ 细射流(清洗、切割等)。

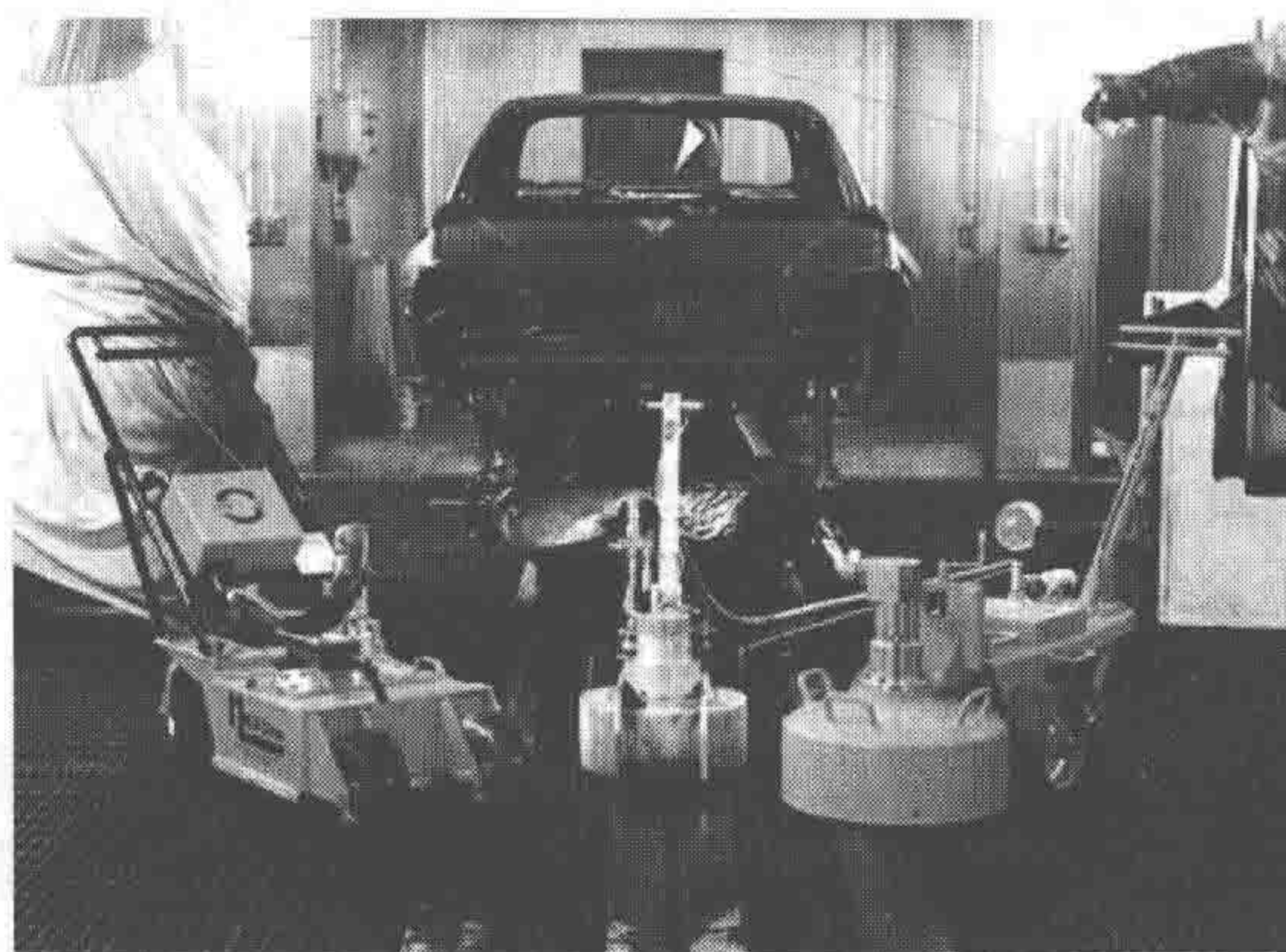
1.5 水射流技术的应用概况

最近几十年，水射流技术及装备发展迅猛，其应用遍及各行各业以及人们生活的各个方面。水射流技术成功应用的行业领域包括机械制造、汽车、航空航天、军工、电子电力、石油化工、轻工、船舶航运、食品、医疗、环保、建筑建材、市政工程等。概括起来讲，水射流技术主要应用在：工业清洗（industrial cleaning）、材料切割（material cutting）和材料表面处理（surface preparation）等方面。

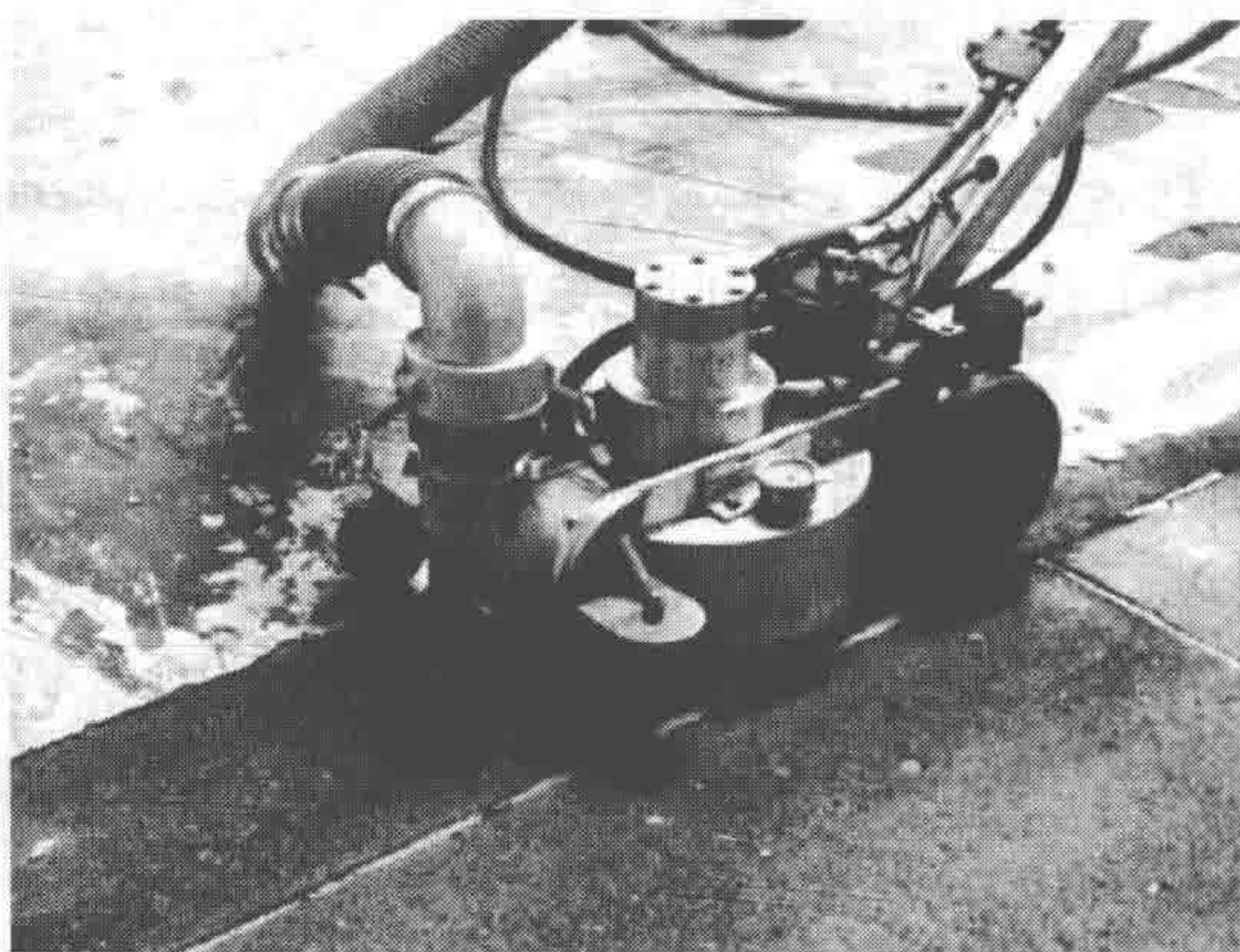
1.5.1 水射流工业清洗

水射流清洗利用高速水射流的冲击动能，可以实现清除各种污垢的目的。由于使用普通水介质，不添加任何化学物质，清洗效果和效率大大优于人工清洗、机械清洗或化学清洗等，且环境友好、成本低、不伤基体，易于实现机械化、自动化和智能控制等，广泛应用于冶金、石油、化工、电力、交通、国防、市政环卫、矿山等行业各类管线、热交换器、容器、船舶、车辆及大型设备的内外清洗。

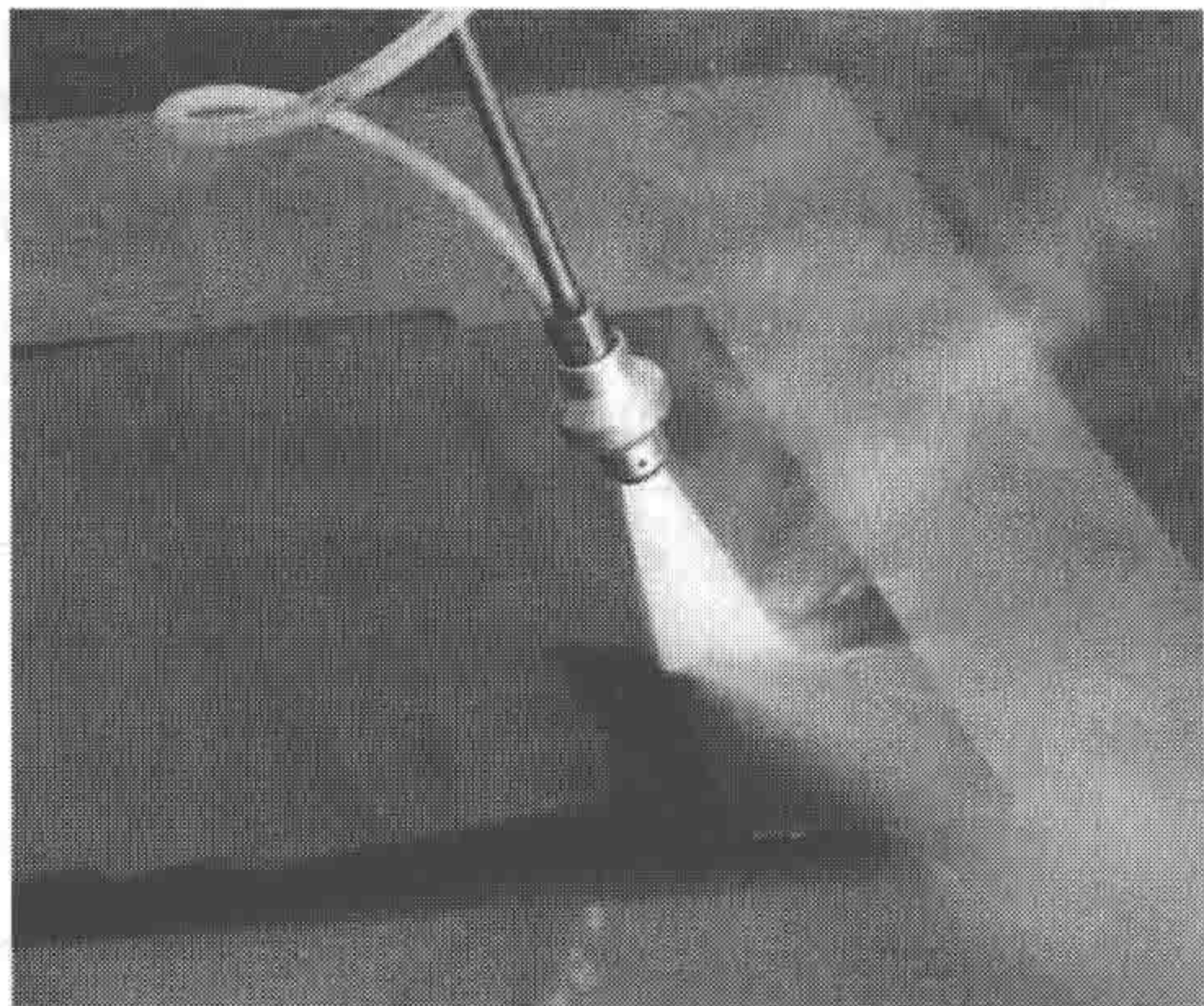
水射流工业清洗主要用于去除水垢、尘垢、锈层、油垢、烃类残渣、各种涂层、混凝土、结焦、树脂层、颜料、橡胶、石膏、塑料、微生物污泥、高分子聚合物垢等。通过研发专用设备，可清洗形状和结构复杂的零部件，能在空间狭窄、复杂环境、恶劣有害的场合进行作业。此外，通过设备改型，还可用于脱漆、金属构件除锈、飞机跑道的除胶、船舶船体除藻、管道疏通、海上钻井平台清洗、核电反应堆的除垢除污、特殊钢厂的铸件清砂、轧件除磷等工作。图 1-7 是水



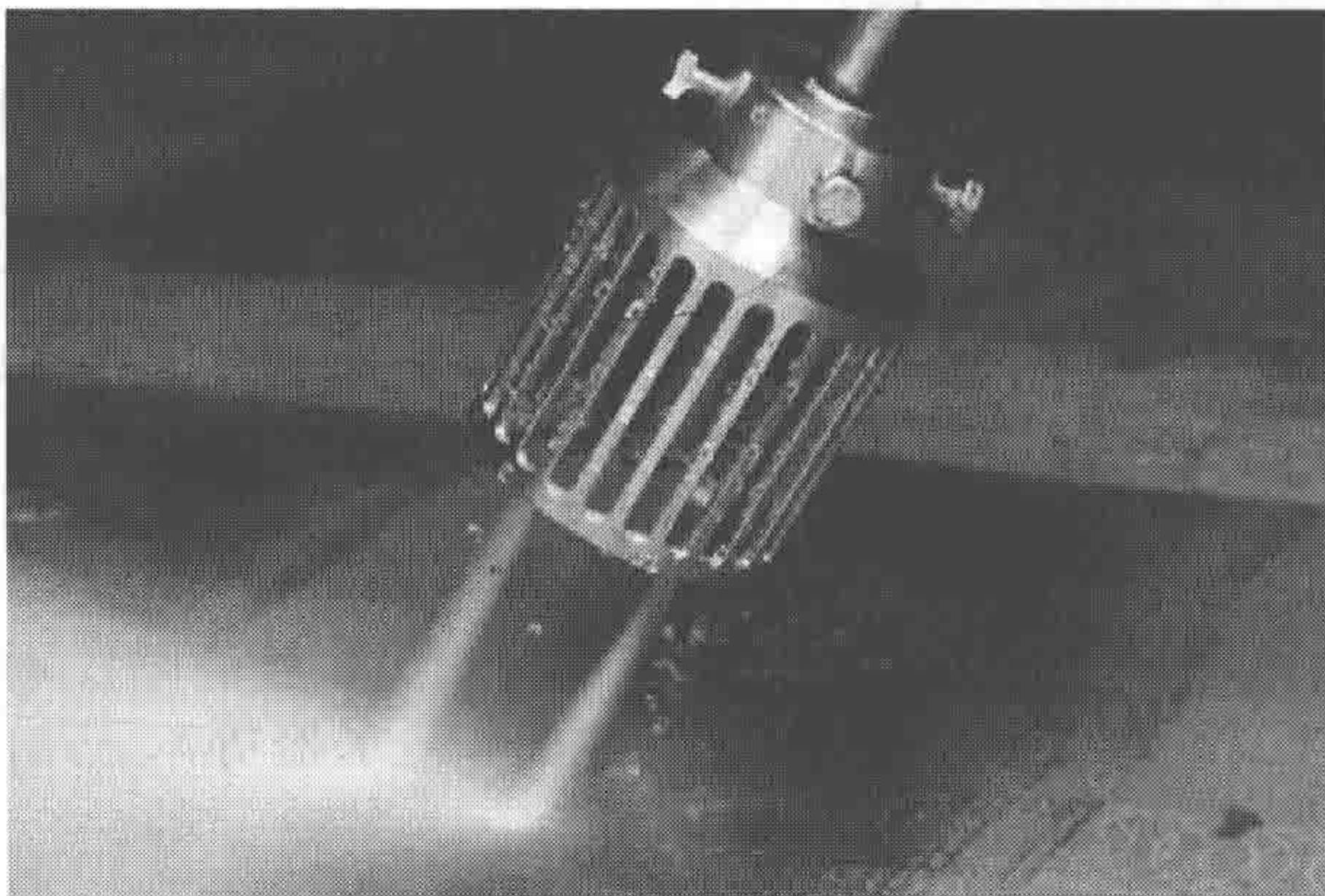
(a) 水射流清洗车间地面



(b) 水射流除垢



(c) 水射流除锈工程



(d) 水射流脱漆工程

图 1-7 水射流工业清洗的典型应用实例

射流工业清洗的一些典型应用实例。

作为一种先进的物理清洗方法，水射流清洗有以下特点。

① 环境友好。清洗介质为清水，对环境没有任何污染，对被清洗件无腐蚀性损伤。

② 适用范围广泛。可在各种条件下进行清洗作业，对被清洗设备、设施大小、形状、材质及垢物种类均无特殊要求。

③ 清洗质量好、效率高。水射流对各种污垢的除垢率可达 95% 以上，且效率高、成本低。

④ 节能、节水。水射流清洗耗水量小，且用过的水可以回收处理，循环使用。

⑤ 安全性好。水射流清洗可在有毒、放射性、易燃、易爆条件下安全作业。

水射流清洗技术在发达国家如美国、德国和日本广泛应用，美国的水射流清洗已占清洗业的 80%，主要用于热交换器、工业锅炉、大型容器和罐体、物料输送管道、设备表面等清洗作业。美国在 20 世纪 30 年代开始将水射流清洗技术应用于半导体、电子行业，20 世纪 60 年代，水射流电子清洗机在日本发展起来；在韩国，水射流清洗占整个水射流应用的 73%，其中在半导体和电子行业中的应用占水射流清洗应用的 50.3%。我国从 20 世纪 80 年代开始应用水射流清洗技术，应用行业主要是石油化工、医药、轻工、食品、冶金、电力电子、汽车、半导体、造船业、海上航运、交通、建筑业、机械行业、钢铁制造业以及其他行业。随着水射流技术的不断进步，各种水射流清洗机和清洗设备相继问世，并大量投放市场，水射流清洗技术将越来越广泛地应用于我国经济建设的各个行业，应用前景广阔。

1.5.2 水射流切割材料

水射流技术的研究和进步，尤其是磨料水射流技术的发展，使其逐渐成为一种现代新型切割工具。水射流介质成本低、清洁，切割过程中无尘、无毒、无火花，噪声小，环境友好，因此属于绿色环保工艺；水射流切割属于无机械接触“冷切割”，绝无机械应力、热变形，无受热影响区域（HAZ）产生，不会改变被切割物质的物理和化学特性，因而成为对热敏感物质的最佳切割工具；水射流切割适应性好、切割品质优良、切缝窄、材料损耗少；水射流切割可以方便地与计算机辅助制造系统结合起来，使其进一步拓展成为一种全新的特种加工工具。

目前，水射流可切割各种材料已达 500 余种，如各种纸（板）、聚酯、塑料、纤维、橡胶、皮革、食品、玻璃、石材、混凝土、陶瓷、硬质合金、钨钼钴合金、耐热合金、钛合金、耐蚀合金、高速钢、模具钢、淬硬钢、不锈钢、白口铸铁、可锻铸铁等工程材料，切割厚度最高可达 8in（203mm）。

水射流切割以无与伦比的适应性、多样性和环保性去扩充火焰、激光、等离子体、电火花（线切割）或传统机械加工所达不到的能力。根据美国市场调研机构 Frost And Sullivan 的研究报告，水射流切割是世界上成长最快的切割工艺之一。水射流特种加工快速成长的原因之一是加工品质高，不需二次处理，大部分水射流切割工件即为最终产品。图 1-8 是磨料水射流切割的一些典型应用示例。

水射流切割的优点如下。

① 较其他加工便宜。

② 可实际加工任何工程材料，包括：

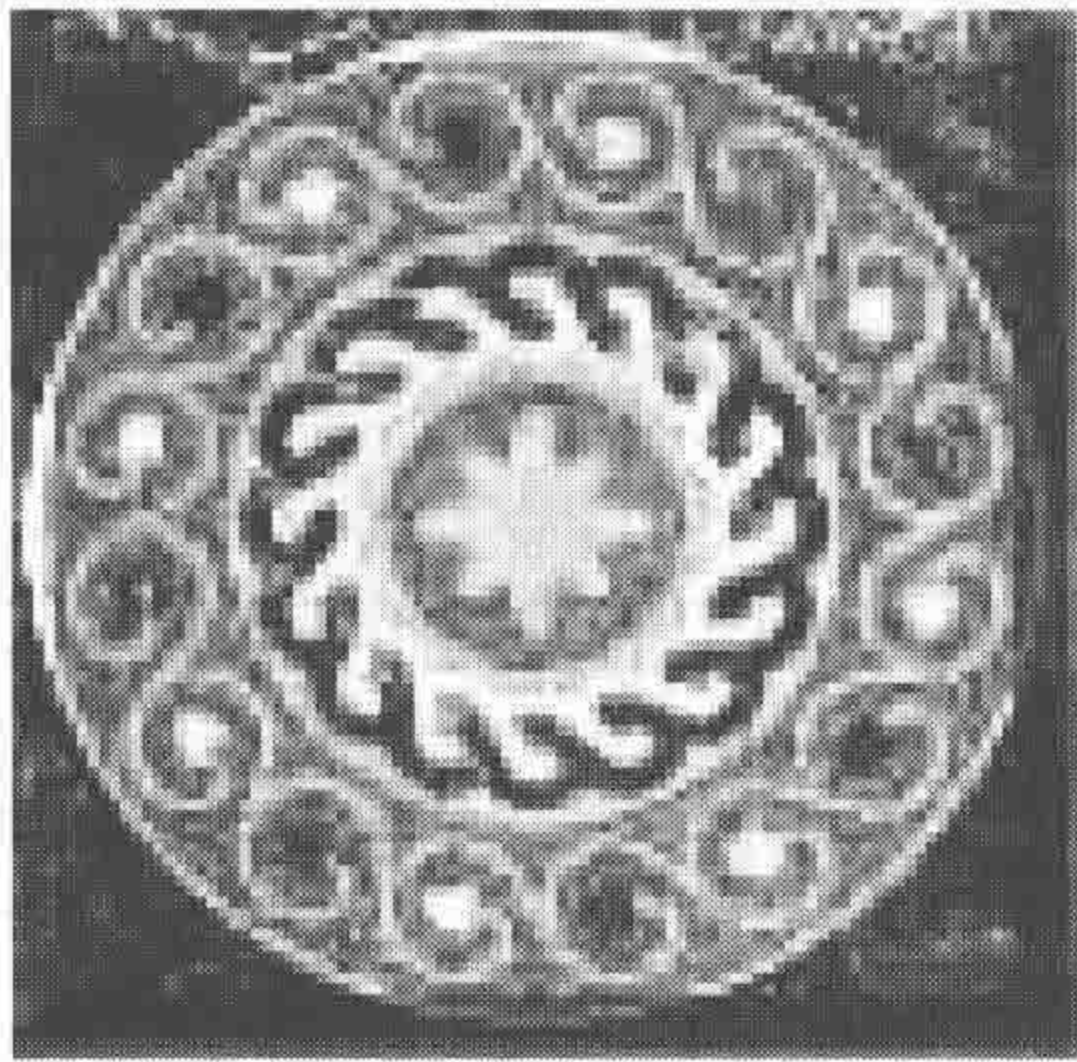
a. 淬硬钢；

b. 普通低碳钢；

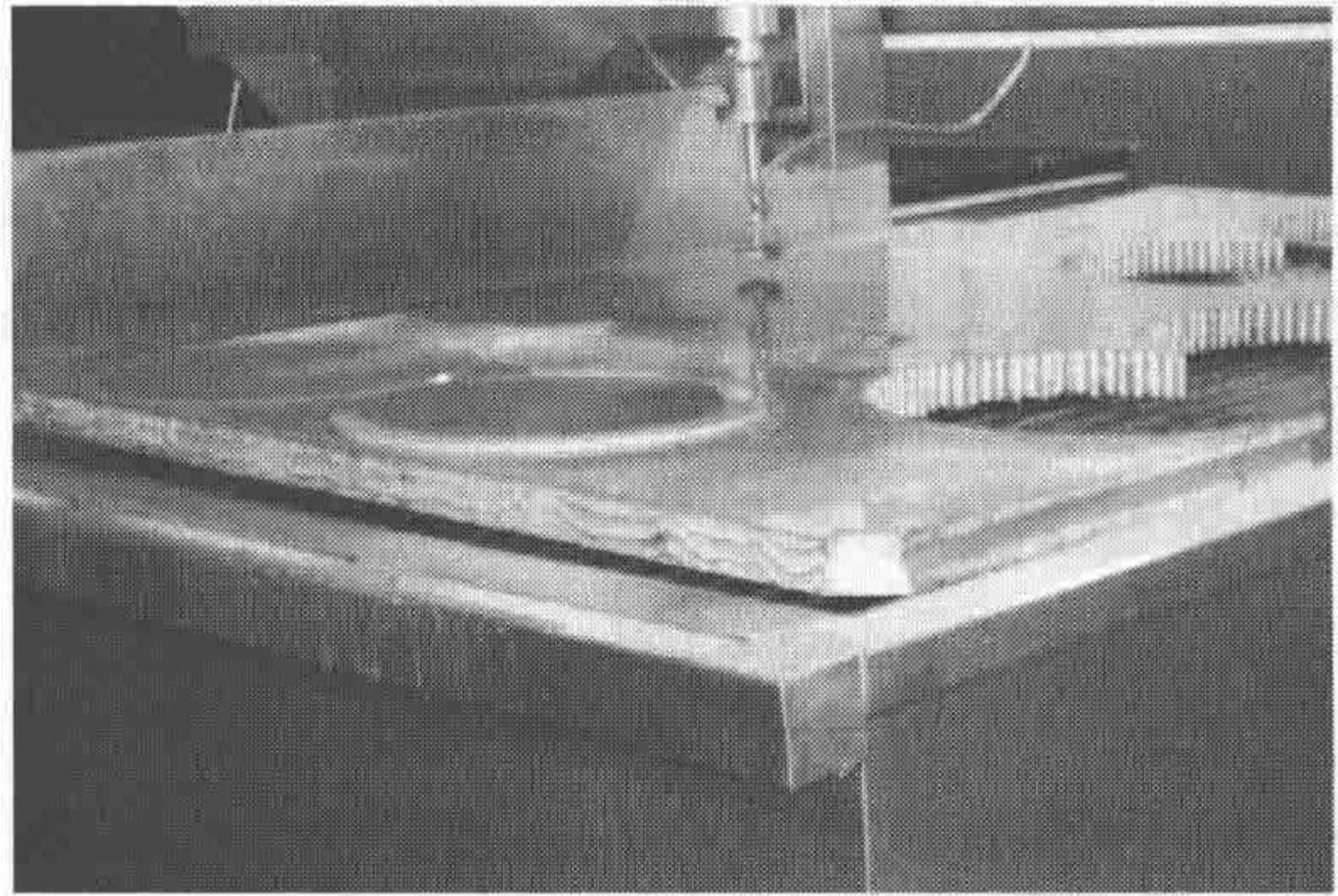
c. 特殊合金，如钛合金、镍铁合金、镍基合金；

d. 黏性 304 不锈钢；

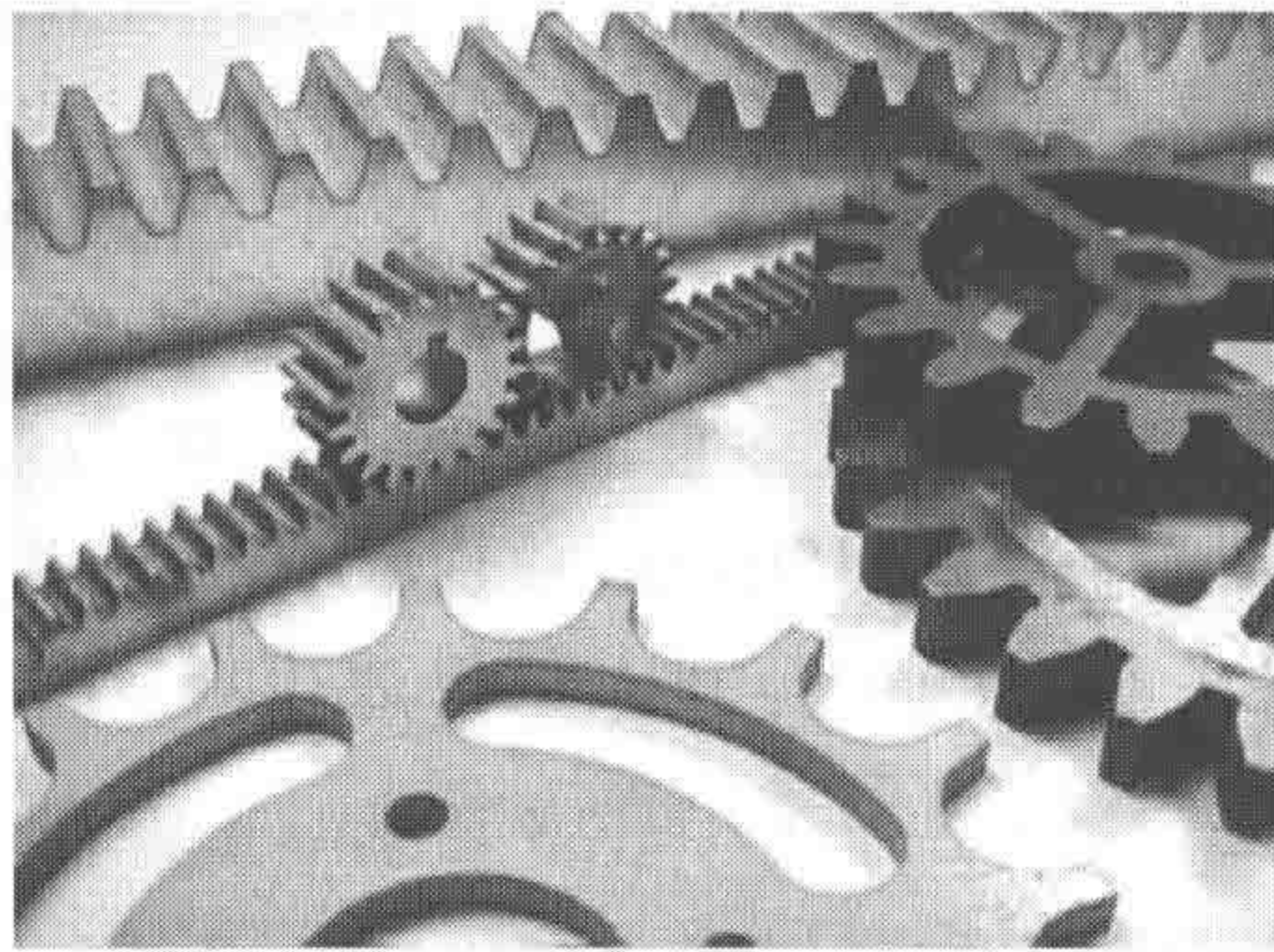
e. 对绝大多数钢材，不论淬硬与否，都能以相同速度切割；



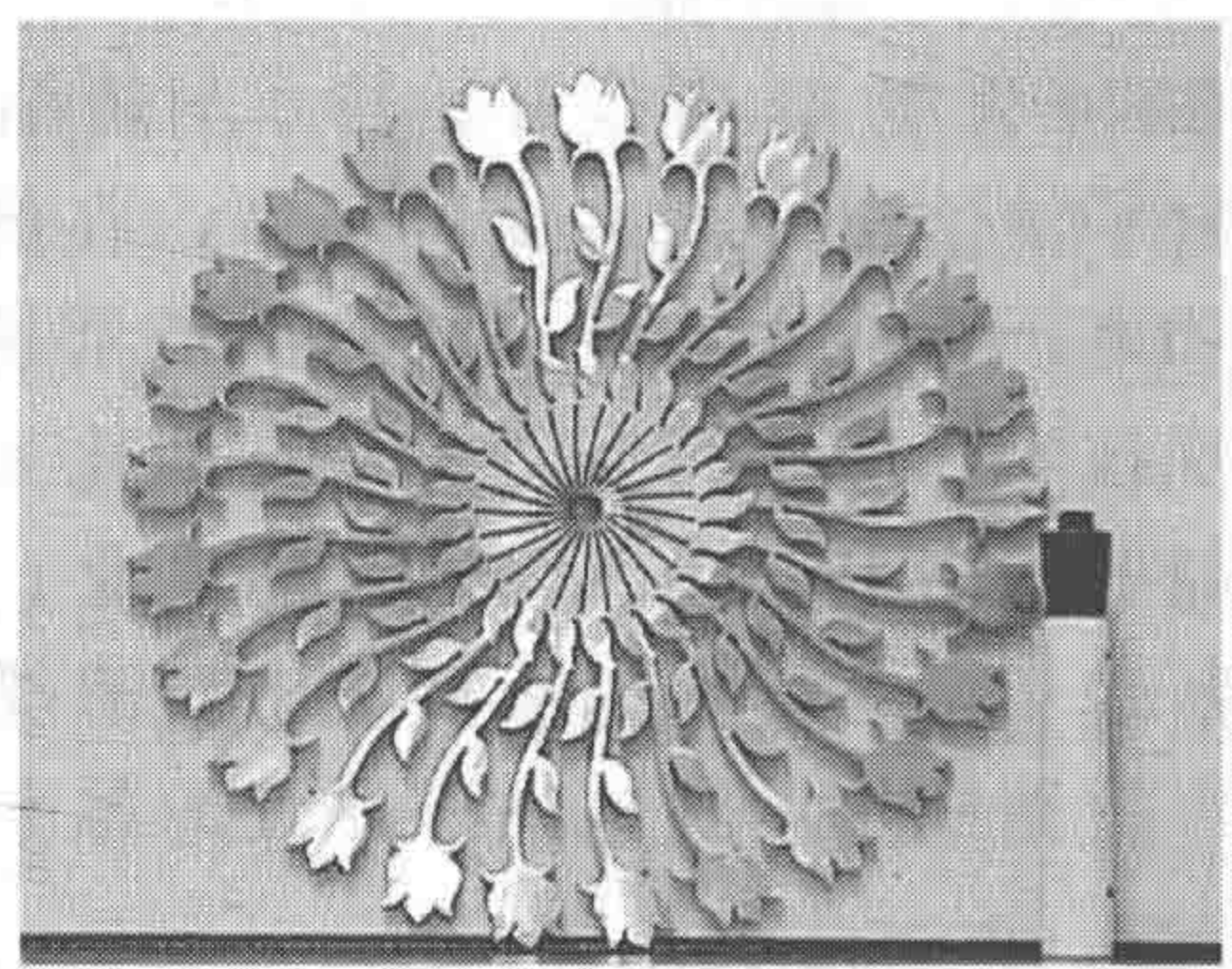
(a) 大理石拼花



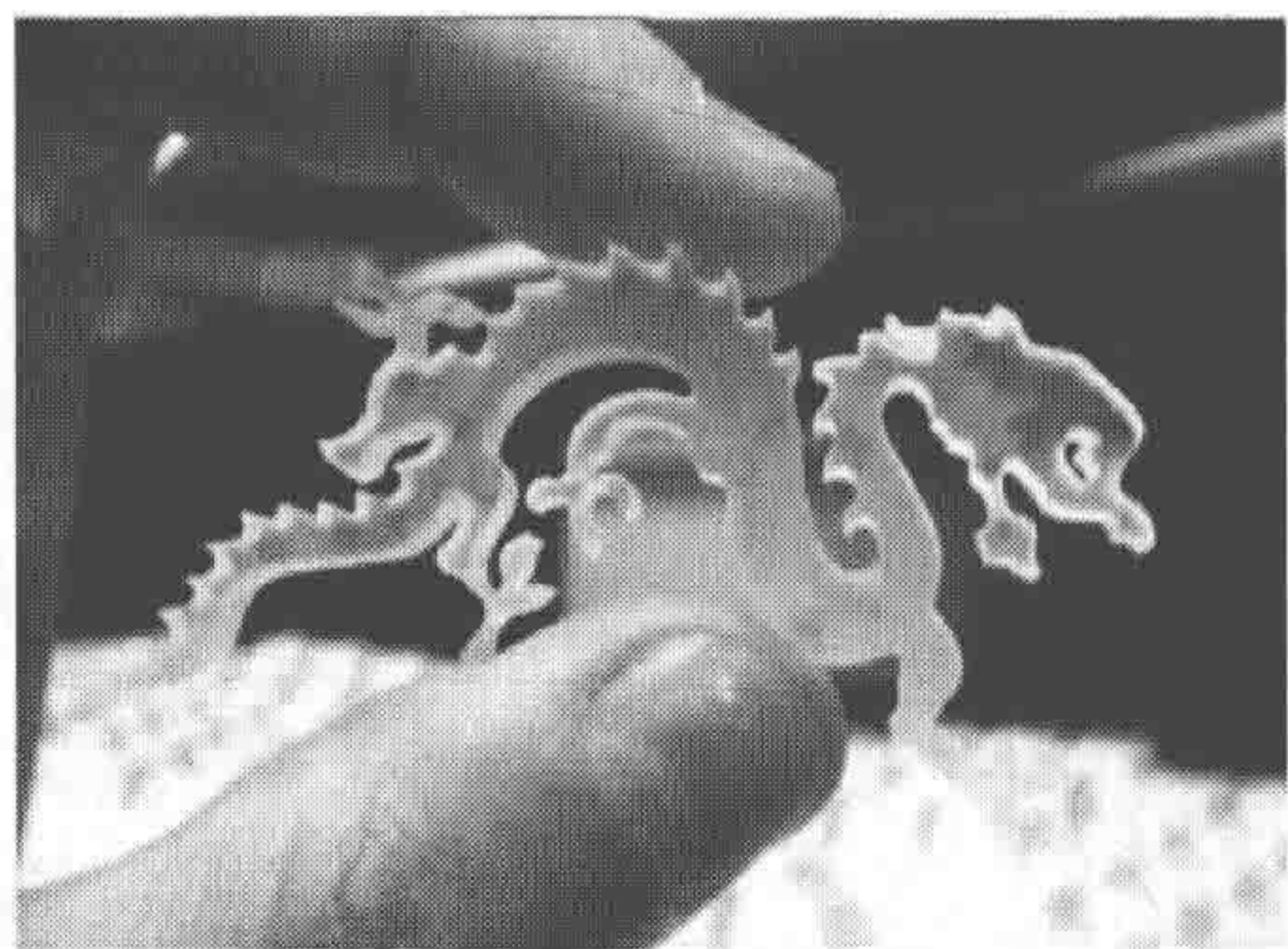
(b) 切割50mm厚硬铝板



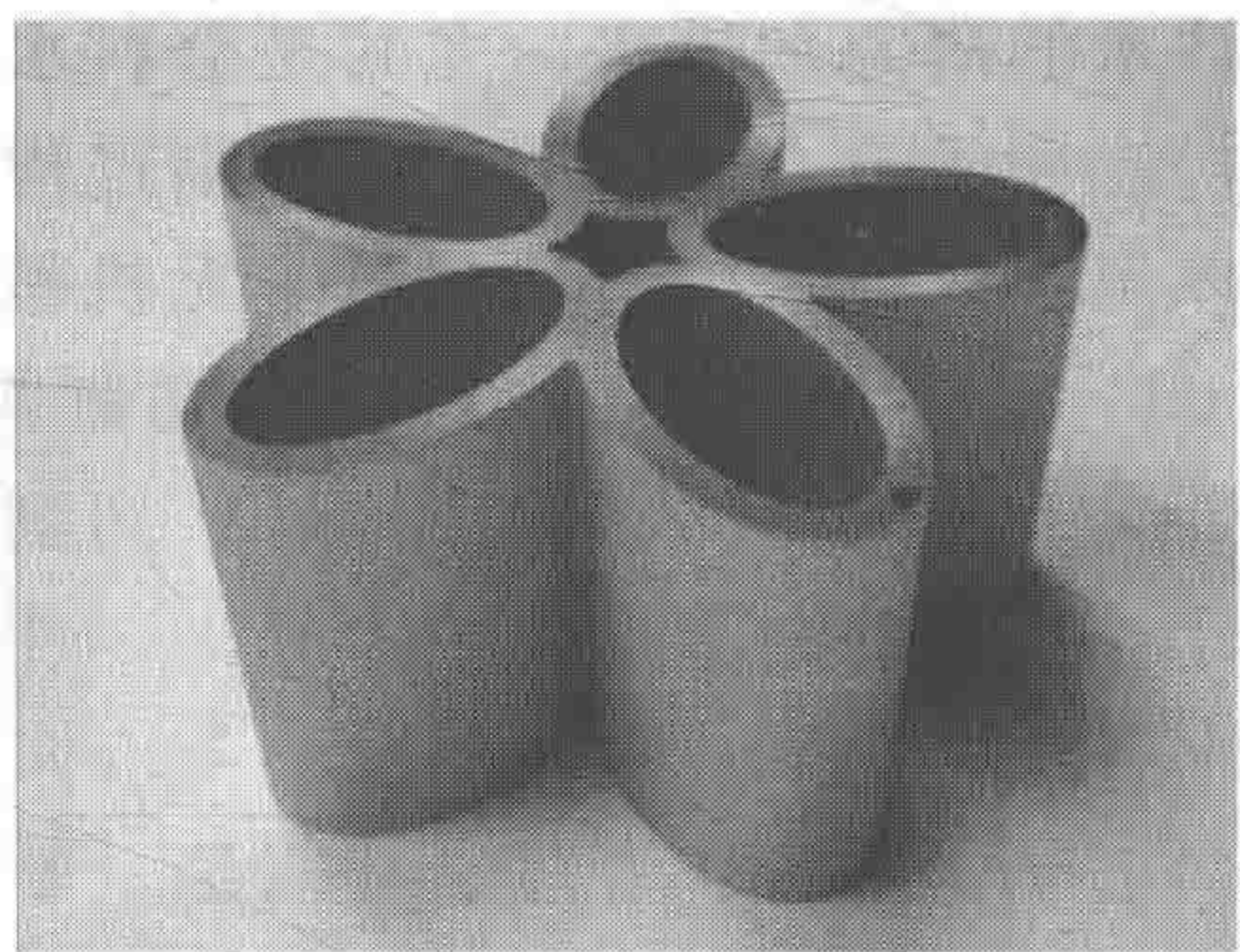
(c) 加工齿轮齿条



(d) 切割不锈钢玫瑰花



(e) 切割加工玻璃花



(f) 加工不锈钢棕榈树

图 1-8 磨料水射流切割的典型应用实例

- f. 铜、黄铜、铝材等；
 - g. 脆性材料，如玻璃、陶瓷、石英、石材等；
 - h. 层压材料（塑料、板）；
 - i. 易燃、易爆材料。
- ③ 可以切割薄材，也可以切割厚材。
 - ④ 用一种工具加工所有零件轮廓。
 - ⑤ 在适宜的尺寸公差范围内，切割厚度可达 50mm。
 - ⑥ 在尺寸公差很重要或材料较软的情况下，切割厚度可达 127mm。
 - ⑦ 冷切割，工件上绝无热影响区（HAZ）产生。
 - ⑧ 没有机械应力。
 - ⑨ 加工任何复杂形状（2D 或部分 3D）零件。
 - ⑩ 准备时间很短。