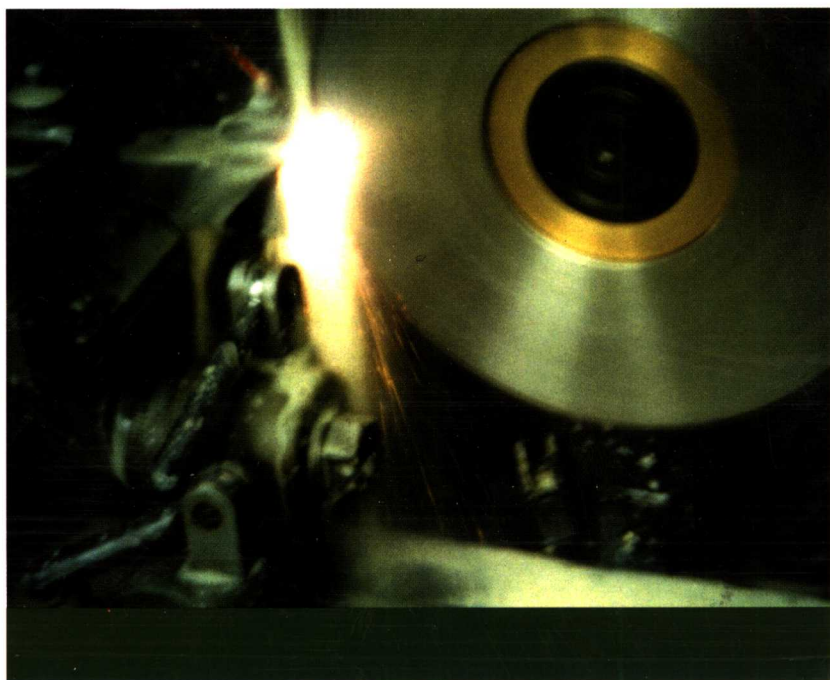


现代加工技术丛书

复合加工技术

张建华 张勤河 贾志新 编著



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

现代加工技术丛书

复合加工技术

张建华 张勤河 贾志新 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

复合加工技术/张建华, 张勤河, 贾志新编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 1

(现代加工技术丛书)

ISBN 7-5025-6492-6

I. 复… II. ①张…②张…③贾… III. 特种加工
IV. TG66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 137208 号

现代加工技术丛书

复合加工技术

张建华 张勤河 贾志新 编著

责任编辑: 段志兵

文字编辑: 宋 薇

责任校对: 吴 静

封面设计: 于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 9 $\frac{3}{4}$ 字数 227 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6492-6/TB·107

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

现代加工技术通常是指特种加工技术,即将电、磁、声、光、化学等能量或其组合施加在工件的被加工部位上,从而实现材料被去除、变形、改性或表面处理等的非传统加工方法。

各种新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现,对机械制造业提出了一系列迫切需要解决的新问题。例如,各种难切削材料的加工;各种结构形状复杂、尺寸或微小或特大、精密零件的加工;薄壁、弹性元件等刚度、特殊零件的加工等。对此,采用传统加工方法十分困难,甚至无法加工,于是产生了特种加工技术。近年来,国家非常重视制造新技术的研发,加大了投入,特种加工技术获得了很大的发展,许多特种加工设备已经投入生产应用。当前,特种加工技术正在向工程化和产业化方向发展,大功率、高可靠性、多功能、智能化的加工设备的研发是重点。

从当前的制造业的发展趋势来看,现代加工技术将具有巨大的发展潜力和应用空间。在这样一个形势下,化学工业出版社组织出版了《现代加工技术丛书》。丛书共7种,包括《超声加工技术》、《激光加工技术》、《电火花加工技术》、《电化学加工技术》、《快速成形技术》、《微细加工技术》、《复合加工技术》。本书为《复合加工技术》。

复合加工同时采用多种加工方法的复合作用,利用多种形式能量的综合作用来实现对工件材料的去除,其中包括传统加工和特种加工的复合、特种加工与特种加工的复合,进行优势互补,相辅相成。由于复合加工技术可以扬长避短,取得很好的技术和经济效果,特别受到先进工业国家的关注。随着精密加工和超精密加工技术的发展,特别是微细加工、纳米加工、微型机械等的发展,特种加工的范畴有了更大发展,复合加工在特种加工技术中所占的比例越来越大,逐渐成为特种加工领域中一个十分重要的分支,已经成为制造领域的主流技术,研究开发和推广应用前景广阔。

本书比较系统地讲述复合加工的主要内容,可作为从事制造业的工程技术人员参考书,同时也可作为机械制造及自动化专业本科生的教材。

本书编著者如下:山东大学张建华(第1章、第2章、第5章);山东大学张勤河(第3章、第4章);北京科技大学贾志新(第6章)。全书由张建华统稿。

本书在编著过程中,得到山东机械工程学会特种加工专业委员会的大力支持与帮助,山东大学机械工程学院的任升峰、徐明刚、白文峰、段彩云等帮助做了大量的辅助工作,编著者在此一并表示衷心感谢。

由于编著者水平所限,书中难免有不足和欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

张建华

2004年10月于山东济南

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 制造业的重要性	1
1.2 制造新技术的产生和发展	5
1.2.1 特种加工技术的特点及其对制造领域的影响	6
1.2.2 加工方法及分类	7
1.3 复合加工技术	11
1.3.1 比较典型的复合加工技术	11
1.3.2 复合加工技术的研究发展方向	14
参考文献	14
第 2 章 化学复合加工	16
2.1 化学加工	16
2.1.1 化学铣削	16
2.1.2 光化学加工	17
2.1.3 化学表面处理	17
2.2 电化学加工	17
2.2.1 电解加工机理	18
2.2.2 电解加工设备	19
2.2.3 电解加工工艺	23
2.3 化学-机械复合加工	28
2.3.1 机械-化学复合抛光	29
2.3.2 化学-机械复合抛光	30
2.4 电化学-机械复合加工	31
2.4.1 电化学-机械复合加工的分类	32
2.4.2 电化学-机械复合加工的特点	32
2.4.3 常用的电化学-机械复合加工技术	33
2.5 超声电解复合抛光	41
2.5.1 超声电解复合抛光的机理	41
2.5.2 影响超声电解复合抛光质量和速度的因素	41
参考文献	42
第 3 章 磁场辅助研抛加工	43
3.1 磁性磨料浮动抛光	43

3.1.1	加工机理	43
3.1.2	磁性流体的组成及特点	44
3.1.3	磁流体的制备	45
3.1.4	磁性流体抛光装置及其应用	46
3.2	磁性磨料研磨加工	52
3.2.1	磁性磨料研磨加工机理	52
3.2.2	磁性磨料研磨加工特点	53
3.2.3	常用磁性磨料研磨加工装置	54
3.2.4	磁性磨料研磨加工的影响因素和影响规律	56
3.3	小结	63
	参考文献	63
第4章	切削复合加工	64
4.1	加热切削	64
4.1.1	加热切削的机理	64
4.1.2	加热热源应具备的条件	65
4.1.3	常用的加热切削方法	65
4.2	超声振动切削	76
4.2.1	超声振动切削的装置和原理	76
4.2.2	超声振动切削的功效	77
4.2.3	超声振动切削的应用范围	77
4.2.4	超声振动系统的安装与调整	78
4.2.5	超声振动切削用量选择	79
4.2.6	车刀刀尖高度的调整	79
4.2.7	切削液的选择	79
4.2.8	超声振动切削过程中的运动分析	80
4.2.9	超声振动切削的工艺效果	81
4.2.10	超声振动切削实例	82
4.3	小结	89
	参考文献	89
第5章	磨削复合加工	90
5.1	概述	90
5.2	基于松散或游离磨粒的复合加工技术	92
5.2.1	研磨	93
5.2.2	抛光	97
5.3	电解电火花磨削复合加工	100
5.3.1	MEEC法的基本原理	100
5.3.2	MEEC法的特点与应用	101
5.3.3	新MEEC法	101
5.4	超声振动磨削复合加工	102

5.4.1 超声振动砂带磨削	102
5.4.2 超声振动珩磨	103
5.5 在线电解修锐磨削 (ELID)	104
5.5.1 ELID 磨削技术的特点	104
5.5.2 ELID 在线电解修锐原理	105
5.5.3 ELID 磨削装置	106
5.5.4 ELID 磨削方式	107
5.5.5 ELID 精密镜面磨削分析	108
5.5.6 ELID 磨削镜面的形成机理	110
5.5.7 ELID 磨削技术的研究和应用	111
5.6 断续磨削-机械脉冲放电复合加工	112
5.6.1 断续磨削	112
5.6.2 机械脉冲放电加工	114
5.6.3 断续磨削-机械脉冲放电复合加工	116
参考文献	123
第 6 章 放电复合加工	125
6.1 超声放电复合加工	125
6.1.1 超声电火花放电复合加工	125
6.1.2 超声频间隙脉冲放电加工	126
6.2 超声频调制的超声振动-放电复合研磨技术	139
6.3 电解放电复合加工	140
6.3.1 电解放电复合加工的基本原理及特点	140
6.3.2 电解放电复合加工的应用	141
6.4 超声振动辅助气中放电加工	141
6.4.1 加工原理	142
6.4.2 试验研究	142
参考文献	148

第 1 章 概 论

物质财富是人类社会生存和发展的基础。一般认为，人类文明有三大物质支柱：材料、能源和信息。这三大支柱都离不开人类的制造活动，制造是人类创造物质财富最基本、最重要的手段。恩格斯在《自然辩证法》中讲到：“直立和劳动创造了人类，而劳动是从制造工具开始的。”

制造业是现代文明的支柱之一，是工业的主体，是现代化的动力源之一，提供了制造工具、生活资料、国防装备等的手段并成为它们进步的依托。

1.1 制造业的重要性

(1) 世界经济大国兴起的奥秘

纵观世界各国经济发展的进程，可以得出这样一个结论：几乎所有经济大国都是借助工业起步的，没有工业，特别是制造业的支撑，就不可能有经济大国和强国的崛起。

第一个世界工厂——英国的兴起 在产业革命形成以前的 1760 年，英国的人口为 800 万左右，拥有造纸、玻璃器皿、造船和手工纺织等行业。英国在当时的世界各国中并不是十分强大，人口数量和资源储备都相当有限。尽管作为工具机的纺纱机在当时已经普及，但从英国国民财富部门分类资料来看，农业占 77%，工商业仅占 5%，在当时的英国，农业仍占统治地位。至产业革命开始之前，英国的经济发展缓慢而平静。产业革命改变了这一状况，激起了资本主义经济的强劲冲力，形成了人类历史上的第一次大跨越。1766 年第一台商业性的蒸汽机投入生产使用，蒸汽机的应用结束了人类生产对畜力和人力的依赖，产生了真正的工业动力，使以农业为基础的自然经济转变为以工业为主导的动力经济。在产业革命时期，英国蒸汽机的生产和使用量逐步增加。蒸汽机的应用改变了工场手工业经济时期经济迟缓发展的状况，推动经济发展，使之进入真正的狂飙猛进时期。18 世纪末，英国的纺织业基本上已经由机器代替了手工操作，英国的棉布无论数量还是质量都得到了极大的提高，并从此行销世界市场。蒸汽机的出现不仅促进了纺织业的改变，而且促进了冶金业、采矿业和机械制造业的繁荣，完全改变了英国的经济面貌。19 世纪 50 年代，英国取得了世界工业和贸易的垄断地位，成为真正的世界工厂。实际上，1760~1870 年的 110 年间，英国的工业生产增长了 23 倍，国民收入增长了 10 倍，19 世纪的前 70 年里，英国的进出口额分别由 1801 年的 3180 万英镑和 3490 万英镑，增进到 1870 年的 25880 万英镑和 19960 万英镑。在这段时间里，占世界人口 2% 的英国人一直把世界工业生产的 $\frac{1}{3}$ ~ $\frac{1}{2}$ 以及世界贸易的 $\frac{1}{5}$ ~ $\frac{1}{4}$ 掌握在自己手中，英国也因此成为当

时的世界经济霸主。

作为当时的世界工厂，英国是世界各国工业品的主要供应者，世界各国则在相当程度上成了英国的原料供应地。例如，英国棉纺织品的出口值占总产值的比重 1819～1821 年为 66.6%，1829～1831 年为 67.4%，1844～1846 年上升到 71.4%，而英国所消费的棉花则完全从美国、埃及、印度、巴西和西印度洋群岛等地进口。另一方面，当时的英国既是世界各国消费品的供应者，又是生产资料的供应者。19 世纪上半叶，英国向美国和欧洲大陆国家输出了大量煤炭、铁和机械装备，并由此开启了这些国家的工业化进程。

在近代，英国的世界工厂效应扩展到德国、法国、意大利和整个欧盟，德国的机器与汽车工业、法国的飞机与军事工业、意大利的机械工业均已成为世界工厂，现在欧盟已发展成一个强大的区域经济、政治、军事、外交组织，与其制造业的强大是分不开的。

第二个世界工厂——美国的崛起 在日不落帝国辉煌了一百年之后，随着第二次科技革命的来临，美国超越英国，成为了世界经济史上的第二个世界工厂。一时间，美国的产品充斥全球，其制成品的总量在 1860 年还居世界第四位，但到了 1894 年，美国制造业的总产值等于英国的 2 倍。1895～1914 年间，美国制造业的产量翻了一番，同一时期的工业制成品出口上升了近 5 倍。到 1913 年，美国的工业生产产量已经相当于英、德、日、法 4 国的总和，占全世界的 1/3 以上。

美国政府对制造业非常重视，汉密尔顿发展制造业的理论基本贯穿了美国工业史的始终。1900 年以前，美国主导产业的构成变化比较小，到 1920 年，十大主导行业发生了较大的变化，其中农副产品及以此为原料的加工业已经完全被排除出前 10 名；汽车制造业在 1900 年尚不存在，但 1920 年其增加值已经达到 3.47 亿美元；造船业 1900 年还没有排进前 25 名，但 1920 年造船业的增加值已经上升到第 5 名；电气机械业在 1900 年只是一个很小的行业，但 1920 年已经排名第 9。

美国制造业霸主地位的确立带动了北美自由贸易区的发展，北美自由贸易区是目前世界上最大的制造业基地，北美自由贸易区的产业与技术转移，带动了南美和亚太地区制造业的发展，于是出现了亚洲四小龙和亚太经济圈。

第三个世界工厂——日本的成长 日本主要是通过引进西方技术形成强大的制造能力，明治维新的基本理念就是要学习西方发达国家的工业革命经验，建立并强化日本的工业基础。

20 世纪 50 年代后期，日本的制造业不仅实现了经济恢复，而且在许多行业，甚至是一些新兴行业也迅速实现了规模化生产。1956 年日本的造船业跃居世界前列，当年接受外国油船订货量位于世界第一位；标志着日本汽车产业的丰田皇冠轿车问世，并迅速实现了批量生产。松下电器在 1955～1960 年的几年中保持了 30% 以上的增长速度。

1968 年，日本的 GDP 超过德国，成为仅次于美国的第二资本主义强国，在钢铁、化工、机电、汽车等制造行业迅速建立了在全世界的优势地位。

日本之所以能在 20 世纪初就跻身世界强国行列，并在第二次世界大战战败后迅速成为世界第二经济强国，关键在于其在制造业领域的长足进步。

（2）背弃制造业的教训

许多研究表明，自第二次世界大战以来，世界各国经济的高速增长均源于制造业的蓬

勃发展：当一个国家制造业获得快速发展时，该国的整体经济增长同时高涨；当一个国家制造业开始衰退时，该国的整体经济增长则相应低迷。

今天，人们更有兴致讨论的是新经济、网络信息产业这样的时髦话题，而制造业则被一些人称之为夕阳产业，不仅大量的资本倾向于从制造业流出而不断虚拟化，人们对制造业的关注也降低到了让人忧心的地步。

从曾经的日不落帝国英国，到当今世界惟一的超级大国美国，从挑起两次世界大战的德国，到创造第一个东亚奇迹的日本，无一不是依靠制造业崛起的。即使后来者如亚洲四小龙、东盟诸国，也同样是靠制造业的强劲扩张提升自己的国际地位的。

大国的兴衰印证的是制造业的兴衰，没有强大的制造业，就不可能有经济大国和强国。

20 世纪 70~80 年代，制造业在美国曾被视为“夕阳工业”，力图将经济发展中心由制造业转向以服务业为中心的第三产业。在这种思潮影响下，美国制造业的国际竞争力被严重削弱，1990 年前后，美国制造业的竞争力降低到第二次世界大战以来的最低点，汽车、机床等传统强项让位于他国，对外逆差猛增。据统计，1981~1987 年美国机床企业从 1400 家减少到 500 家，一半的产品需要进口。1955 年进口汽车仅占美国汽车销售额的 1%，而在 1987 年上升至 31%。消费电子类产品几乎全军覆没，日本产品称霸美国市场。日本在第二次世界大战以后凭借制造业的技术与质量优势，生产出各类技术含量高、质量好的产品并迅速占领国际市场，成为世界经济强国。

20 世纪 80 年代后期，人们意识到，70%~80% 的社会财富是由制造业创造的，制造业的前景依然广阔，并且大有可为。由此，各工业国家又开始重视和振兴制造业。

20 世纪 80 年代末到 90 年代初，美国在对本国制造业面临的挑战和机遇进行深刻反省后，首先提出了发展“先进制造技术”（AMT）。先进制造技术就是传统制造技术不断吸收机械、电子、信息、能源及现代化管理领域新成果，将其综合应用于产品生产、设计、制造、检测、管理和售后服务全过程的技术。当时美国每隔 2~3 个月召开一次由政府和大公司参加的制造业研讨会。1994 年被美国政府定名为“先进技术制造年”。欧洲、日本及亚洲一些新兴工业化国家不甘落后，纷纷制定本国振兴制造业和发展先进制造技术的计划。比较著名的有日本的“智能制造技术”，德国的“面向未来的生产”，英国的“国家纳米计划”，韩国的“G-7 计划”以及欧洲共同体的“尤里卡计划”等。与此同时，各国加强了在科研、教育等领域的竞争。

为了振兴制造业，美国采取了一系列措施，其中最主要的就是广泛应用先进制造技术和信息技术。其核心是采用计算机辅助设计和辅助制造（CAD/CAM）技术加快新产品的开发和生产速度，提高产品的质量，对缩短产品设计和制造周期起到了决定性的作用。功能齐全、速度超强的计算机在各种产品设计中广泛运用，大大提高了工作效率。美国通用汽车公司 20 世纪 90 年代初需要五六年才能完成的新一代车型设计，采用信息技术后仅需要 3 年多的时间即可完成，节省时间近一半。振兴制造业，发展知识经济，使美国经济摆脱了困境，制造业重新获得国际竞争的优势，推动了长达 9 年的经济高速增长。到目前为止，美国 68% 的财富来源于制造业。

实践证明，没有发达的制造业，就不可能有国家的真正繁荣与强大；国家与国家之间的相互竞争主要是制造业的竞争，一个没有制造能力的民族是没有希望的民族；高度发达

的现代制造业是一个国家综合国力和国际竞争力的集中体现。

在当今世界，制造业既是高新技术的重要载体，又是高新技术发展的助推器，制造业的发展水平决定着整个国民经济的发展水平，担负着为国民经济和国防安全提供装备的重要任务，是国民经济持续发展的基础。先进制造关系到国家的命运和前途，是国家实力的表征，是国防安全的保障，也是 21 世纪国际竞争中发达国家的战略发展优势领域。“失去制造就失去未来”已经成为全球共识。

（3）制造技术的永恒性

社会发展与制造技术密切相关 现代制造技术是目前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济的今天，它更占有十分重要的地位。

人类的发展过程就是一个不断的制造过程。在原始社会，人类制造了石器；到了封建社会，出现了陶器、铜器和铁器；到了资本主义社会，出现了大工业生产，使人类的物质生活和社会文明有了很大的提高；现代社会对精神和物质有了更高的要求，科学技术有了更快更新的发展，与制造技术的关系更为密切。蒸汽机制造技术的问世带来了工业革命和大工业生产，内燃机制造技术的出现和发展促成了现代汽车、火车和舰船，喷气涡轮发动机制造技术促进了现代喷气客机和超音速飞机的发展，集成电路制造技术的进步不断提升计算机技术，超精密制造技术和纳米技术的出现开创了微型机械的先河。

人类的活动离不开制造，人类活动和生活的水平与制造水平密切相关。

制造技术是科学技术物化的基础 从设想到现实，从精神到物质，都是靠制造来转化的，制造是科学技术物化的基础，科学技术的发展反过来又提高了制造的水平。人类的制造技术大体上可以分为以下三个阶段。

① 手工业生产阶段。制造的手段和水平都比较低，进行个体和小作坊生产，体现了体脑结合，设计与制造一体，技术水平取决于制造经验，大多为单件、小批量生产方式，基本上适应了当时人类发展的需求。

② 大工业生产阶段。由于经济发展和市场的需求，以及科学技术的进步，制造手段和水平有了很大的提高，形成了大工业生产方式，其特点是单一品种大批大量生产、严格的分工和生产进度形成了流水生产线、自动线，但也带来了设计与制造分家、体脑分离的局面。由于人类生活水平不断提高和科学技术日新月异的发展，产品更新换代的速度不断加快，快速响应、多品种单件小批量生产产品的市场需求成为一个突出的矛盾。

③ 虚拟现实工业生产阶段。要快速响应市场需求，进行高效率的单件小批量生产，可以借助于信息技术、计算机技术、网络技术，采用集成制造、并行工程、计算机仿真、虚拟制造、动态联盟、电子商务等举措，将设计与制造高度结合，进行计算机辅助设计、计算机辅助装配、计算机辅助工艺和数控加工，使产品在设计阶段就能发现在制造中的问题，并改进设计。同时，可集中全球的制造资源进行世界范围的合作生产，缩短上市时间，提高产品质量。这一阶段充分体现了体脑的高度结合，对手工业生产阶段的体脑结合进行了螺旋式的上升和发展。

制造技术是所有工业的支柱。

制造技术的涉及面非常广，冶金、建筑、水利、农业、机械、电子、信息、运载、航空、航天、军工等各个行业都需要制造业的支持。冶金行业需要冶炼、轧制等设备，建筑行业需要塔吊、挖掘机和推土机等工程机械。

制造业是一个支柱产业，在不同的历史时期有不同的发展重点，但需要制造技术的支持是永恒的。当然，各个行业都有其自身的主导技术，例如农业需要生产粮、棉等农产品，有丰富的农业生产技术问题，但现代农业少不了农业机械的支持，制造技术已经成为其重要的组成部分。因此，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面。例如，机械制造工程学是具有普遍性的学科，而汽车制造工程学、燃气轮机制造工程学、集成电路制造工程学等则带有强烈的专业性，它们有很多独特的制造技术。

制造技术既具有共性，又具有个性。20 世纪 50 年代，我国机械工业就分为通用、核能、航空、电子、兵器、船舶、航天和农业 8 个部门。

制造系统是制造技术发展的新里程碑 制造技术的发展经历了漫长的历史过程，从工匠手艺、设计工艺到制造系统，可分为三个重要的里程碑。

起初，制造主要靠工匠的手艺完成，由于工具比较简单、加工方法比较单纯，多为手工、畜力或极其简单的机械，例如凿、劈、锯、碾和磨等，有简单的图样，也可能只有构思，基本上是体脑结合，设计与制造一体。

生产发展与社会进步使制造业进行了大分工，首先是设计与工艺分开，单元技术急速发展又形成了设计、装配、加工、检测、试验、供销、维修、设备、工具和工装等直接生产部门和间接生产部门，加工方法丰富多彩，除了传统的加工方法，例如车、钻、刨、铣和磨等外，特种加工方法，例如电火花加工、超声波加工、电子束加工、离子束加工、激光束加工等均有了很大发展。同时，出现了以零件为对象的加工流水线和自动生产线，以部件或产品为对象的装配流水线和自动装配线，适应大批量生产的需求。这一时期比较长，但十分重要，从 18 世纪开始至 20 世纪中叶，它奠定了现代制造技术的基础，对现代工业、农业、国防工业等的成长和发展影响深远。

信息技术的发展及其在制造业中的应用，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学，从此制造就以系统的新概念问世，它由物质流、能量流和信息流组成。物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制。制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论相结合形成新的制造学科，即制造系统工程学。

1.2 制造新技术的产生和发展

制造技术的发展已经有几千年的历史，从石器时代、铜器时代、铁器时代到现代的高分子塑料时代；从手工制作、机器制作到现代的智能控制自动化制作；同时，从一般精度加工、精密加工到现代的超精密加工及纳米加工。

由于现代科学技术的迅猛发展，机械工业、电子工业、航空航天工业、化学工业等，尤其是国防工业部门要求尖端科学技术产品向高精度、高速度、大功率、小型化等方向发展，以及需要在高温、高压、重载荷或腐蚀等环境下长期可靠地工作。为了适应这些要求，各种新结构、新材料和复杂形状的精密零件大量出现，其结构和形状越来越复杂，材料的性能越来越强韧，对精度的要求也越来越高，对加工表面粗糙度和表面完整性的要求越来越严格，使机械制造业面临着一系列严峻的任务。

(1) 解决各种难切削材料的加工问题

例如硬质合金、钛合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、金刚石、石英以及锗、硅等各种高硬度、高强度、高韧性、高脆性的金属、非金属材料以及新型复合材料的加工。

(2) 解决各种特殊复杂型面的加工问题

例如喷气涡轮机叶片、整体涡轮、发动机机体、锻压模等的立体成型表面，各种冲模、冷拔模等特殊断面的型孔，炮管内膛线、喷油嘴、喷丝头上的小孔、窄缝等的加工。

(3) 解决各种超精密、光整零件的加工问题

例如对表面质量和加工精度要求很高的航天、航空、航海陀螺仪、精密光学透镜、激光核聚变用的曲面镜、高灵敏度的红外传感器等零件的精细表面加工，形状和尺寸精度要求在 $0.1\mu\text{m}$ 以上，表面粗糙度 R_a 要求在 $0.01\mu\text{m}$ 以上。

(4) 特殊零件的加工问题

例如大规模集成电路、光盘基片、复印机和打印机的感光鼓、微型机械和机器人零件、细长轴、薄壁零件、弹性元件等低刚度零件的加工等。

要解决上述一系列问题，仅仅依靠传统的切削加工方法很难实现，有些则根本无法实现。在生产的迫切需求下，人们通过各种渠道，借助于多种能量形式，不断研究和探索新的制造技术和方法。

1.2.1 特种加工技术的特点及其对制造领域的影响

特种加工是指利用机、电、声、光、热、化学、磁、原子能等能量形式来进行加工的非传统加工方法 (Non-traditional Machining)，它是一门多学科综合的高级技术。要获得高精度和高质量的加工表面，不仅要考虑加工方法本身，而且涉及被加工的工件材料、加工设备及工艺装备、检测方法、工作环境和操作人员的技艺水平等。特种加工技术与系统论、方法论、计算机技术、信息技术、传感器技术、数字控制技术的结合，促成了特种加工系统工程的形成。

特种加工与传统切削加工的主要不同点包括如下几方面。

① 不是主要依靠机械能，而是主要用其他的能量（如电能、热能、光能、声能以及化学能等）去除工件材料。

② 工具的硬度可以低于被加工工件材料的硬度，在有些情况下，例如激光加工、电子束加工、离子束加工等加工过程中，根本不需要使用工具。

③ 在加工过程中，工具和工件之间不存在显著的机械切削力作用，工件不承受宏观机械力，特别适合于精密加工低刚度零件。

由于具有上述特点，就总体而言，特种加工技术可以加工任何硬度、强度、韧性、脆性的金属、非金属材料或复合材料，而且特别适合于加工复杂、微细表面和低刚度的零件，同时，有些方法还可以用于进行超精密加工、镜面加工、光整加工以及纳米级（原子级）加工。

特种加工技术不仅可以采取单独的加工方法，更可以采用复合加工的方法，近年来发展迅速并且应用广泛。复合加工技术将几种加工方法融合在一起，发挥各自所长，相辅相成，可以提高加工精度、加工表面质量和加工效率，并且扩大了加工应用的范围。

特种加工技术的特点及其逐渐广泛应用，已经引起了机械制造领域内的许多变革，例如对工件材料的可加工性、工艺路线的安排、新产品的试制过程、产品零件结构设计、零件结构工艺性好坏的衡量标准等产生了一系列重要的影响。

(1) 提高了工件材料的可加工性

一般情况下, 金刚石、硬质合金、石英、玻璃、陶瓷等是很难加工的。现在已经广泛采用的金刚石、聚晶金刚石、聚晶立方氮化硼等制造的刀具、工具、拉丝模等, 可以采用电火花、激光等多种方法进行加工。工件材料的可加工性不再与其硬度、强度、韧性、脆性等直接的关系。对于电火花、线切割等加工技术而言, 淬火钢比未淬火钢更容易加工。

(2) 改变了零件的典型工艺路线

在传统的加工领域, 除了磨削加工以外, 其他的切削加工、成型加工等都必须安排在淬火热处理工序之前, 这是工艺人员不可违反的工艺准则。特种加工技术的出现改变了这种一成不变的程序格式。由于基本上不受工件材料硬度的影响, 而且为了免除加工后再引起淬火热处理变形, 一般都是先淬火热处理, 后进行加工。最为典型的是电火花线切割加工、电火花成型加工、电解加工等。

特种加工的出现还对以往工序的“分散”和“集中”产生了影响。以加工齿轮、连杆等型腔锻模为例, 由于特种加工过程中没有显著的机械作用力, 机床、夹具、工具的强度、刚度不是主要矛盾, 即使是较大的、复杂的加工表面, 基本上都可以使用一个复杂工具、简单的运动轨迹, 经过一次安装、一道工序加工出来, 工序比较集中。

(3) 加快新产品的开发

试制新产品时, 采用特种加工技术可以直接加工出各种标准和非标准直齿轮、微电机定子、转子硅钢片, 各种变压器铁心, 各种特殊、复杂的二次曲面体零件, 可以省去设计和制造相应的刀具、夹具、量具、模具以及二次工具, 大大缩短新产品的试制周期, 并显著降低成本。

(4) 对产品零件的结构设计产生了影响

例如, 为了减少应力集中, 花键孔、轴以及枪炮膛线的齿根部分最好做成小圆角, 但拉削加工时刀齿做成圆角对排屑不利, 容易磨损, 刀齿只能设计与制造成清棱清角的齿根。而采用电解加工技术时, 由于存在尖角变圆的现象, 非采用小圆角的齿根不可。各种复杂冲模, 例如山形硅钢片冲模, 以往由于难以制造经常采用拼镶式结构, 现在采用电火花、线切割等加工技术, 即使是硬质合金的模具或刀具, 也可以制成整体式结构。喷气发动机涡轮由于电解加工技术的出现也可以采用整体式结构了。

(5) 对传统的结构工艺性好坏的衡量标准产生重要影响

以往普遍认为方孔、小孔、弯孔、窄缝等是工艺性差的典型, 是设计人员和工艺人员非常“忌讳”的, 有的甚至是机械结构设计的“禁区”。对于电火花穿孔加工、电火花线切割等加工来说, 加工方孔和加工圆孔的难易程度是一样的。喷油嘴小孔、喷丝头小异型孔、涡轮叶片上大量的小冷却深孔、窄缝、静压轴承和静压导轨的内油囊型腔等, 采用电火花加工技术以后都变难为易了。过去在淬火热处理以前忘记加工定位销孔、铣槽等工艺, 淬火热处理后的工件就只能报废, 现在则可以使用电火花加工技术打孔、切槽等进行补救。相反, 现在有时为了避免淬火热处理产生开裂、变形等缺陷, 故意把钻孔、开槽等工艺安排在淬火热处理之后, 使工艺路线安排更为灵活。

1.2.2 加工方法及分类

1.2.2.1 加工成形的原理

加工成形从原理和特点来分类, 可以分为去除加工、结合加工、变形加工三大类。

去除加工又称为分离加工, 是从工件上去除多余的材料, 例如车削加工、磨削加工、

电火花加工、电解加工等。

结合加工是利用理化方法将不同的材料结合（Bonding）在一起，按结合的机理、方法、强弱等又可以分为附着（Deposition）、注入（Injection）、连接（Jointed）三种。附着加工又称为沉积加工，是在工件表面上覆盖一层物质，属于弱结合，例如电镀、气相沉积等。注入加工又称为渗入加工，是在工件的表层注入某些元素，使之与工件基体材料产生物化反应，以改变工件表层材料的力学性质，属于强结合，例如表面渗碳、离子注入等。连接是将两种相同或不同的材料通过物化方法连接在一起，例如焊接、粘接等。

变形加工又称为流动加工，是利用力、热、分子运动等手段使工件产生变形，改变其尺寸、形状和性能，例如锻造、铸造、液晶定向等。

表 1.1 列出了该三大类加工方法，其应用范围十分广泛。

表 1.1 加工方法

分 类	加工成形原理		主要加工方法
去除加工 (分离加工)	① 电物理加工		①电火花线切割加工、电火花成形加工
	②化学加工、电化学加工		②电解加工、蚀刻(电子束曝光)、化学机械抛光
结合加工	③力学加工		③切削、磨削、研磨、抛光、珩磨、超声加工、磨料喷射加工、 高压水射流加工
	④热物理加工(热蒸发、热扩散、热溶解)		④电子束加工、激光加工
	附着加工	①化学	①化学镀、化学气相沉积
		②电化学	②电镀、电铸
		③热物理(热熔化)	③真空蒸镀、熔化镀
		④力物理	④离子镀(离子沉积)、物理气相沉积
结合加工	注入加工 (渗入加工)	①化学	①氧化、氮化、活性化学反应
		②电化学	②阳极氧化
		③热物理(热扩散)	③晶体生长、分子束外延、掺杂、渗碳、烧结
		④力物理	④离子束外延、离子注入
变形加工 (流动加工)	连接加工	①热物理、电物理	①激光焊接、快速成形加工、卷绕成形
		②化学	②化学粘接
	①热流动、表面热流动		①锻造、塑性流动加工(气体火焰、高频电流、电子束、激光)
变形加工 (流动加工)	②黏滞流动		②铸造、液体流动加工(金属、塑料、橡胶等注塑、压铸)
	③分子定向		③液晶定向

从材料在加工过程中的流动来分析：去除加工是使工件材料逐步减少，一部分工件材料变成切屑，这种流动被称为分散流；结合加工是使工件材料在加工过程中逐步增加，这种流动被称为汇合流；变形加工是指在加工过程中工件材料基本不变，这种流动被称为直通流。

近年来，提出并研究和发展了电铸、晶体生长、分子束外延、快速成形加工等加工方法，突破了传统加工大多局限于分离去除加工和表面结合加工的概念。

快速成形加工是一种利用离散/堆积成型技术的分层制造方法，将一个三维空间实体零件分散为在某个坐标方向上的若干层有很小厚度的三维实体，由于厚度很小，可以按照二维实体成型，再叠加成为所需零件的原形。

1.2.2.2 加工机理

从加工机理来分类，加工技术可以分为传统加工、特种加工和复合加工。

① 传统加工是指使用刀具进行的切削加工以及磨削加工。

② 特种加工是指利用机、电、声、光、热、化学、磁、原子能等能量形式来进行加工的非传统加工方法。

③ 复合加工是同时采用多种加工方法的复合作用，其中包括传统加工和特种加工的复合、特种加工与特种加工的复合，优势互补，相辅相成。

目前，在制造业中，占主要地位的仍然是传统的加工方法，特种加工和复合加工是极其重要的发展方向。

表 1.2 列出了按刀具切削加工、磨料加工、特种加工、复合加工分类的各种常用的加工方法及其所用的工具、所能达到的精度和表面粗糙度、被加工材料及应用情况。

表 1.2 各种加工方法

分类	加工方法		加工工具		精度 / μm	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	被加工材料	应 用
刀具切削加工	切 削	精密、超精密车削	天然单晶金刚石刀具、人造聚晶金刚石刀具、立方氮化硼刀具、陶瓷刀具、硬质合金刀具等		1~0.1	0.05~0.008	有色金属及其合金、非金属	球、磁盘、反射镜
		精密、超精密铣削						多面棱体
		精密、超精密镗削						活塞销孔
		微孔钻削	硬质合金钻头，高速钢钻头		20~10	0.2	低碳钢、铜、铝、石墨、塑料	印刷线路板、石墨模具、喷嘴
磨料加工	磨 削	精密、超精密砂轮磨削	氧化铝、碳化硅、立方氮化硼、金刚石等磨料	砂轮 砂带	5~0.5	0.05~0.008	黑色金属、硬脆材料、非金属材料	外圆、孔、平面
		精密、超精密砂带磨削						平面、外圆磁盘、磁头
	研 磨	精密、超精密研磨	铸铁、硬木、塑料等研具 氧化铝、碳化硅、金刚石等磨料		1~0.1	0.025~0.008	黑色金属、硬脆材料、非金属材料	外圆、孔、平面
		油石研磨	氧化铝油石、玛瑙油石、电铸金刚石油石					平面
		磁性研磨	磁性磨料		10~1	0.01	黑色金属	外圆 去毛刺
		滚动研磨	固结磨料、游离磨料、化学或电解作用液体				黑色金属等	型腔
	抛 光	精密、超精密抛光	抛光器 氧化铝、氧化铬等磨料		1~0.1	0.025~0.008	黑色金属、铝合金	外圆、孔、平面
		弹性发射加工	聚氨酯球抛光器、高压抛光液		0.1~0.001	0.025~0.008	黑色金属、非金属材料	平面、型面
		液体动力抛光	带有楔槽工作表面的抛光器 抛光液		0.1~0.01	0.025~0.008	黑色金属、非金属材料、有色金属	平面、圆柱面
		水合抛光	聚氨酯抛光器 抛光液		1~0.1	0.01	黑色金属、非金属材料	平面
		磁流体抛光	非磁性磨料 磁流体		1~0.1	0.01	黑色金属、非金属材料、有色金属	平面

续表

分类	加工方法		加工工具	精度 / μm	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	被加工材料	应 用
磨料加工	抛光	挤压研抛	黏弹性物质 磨料	5	0.01	黑色金属等	型面、型腔去毛刺、倒棱
		喷射加工	磨料 液体	5	0.01~0.02	黑色金属等	孔、型腔
		砂带研抛	砂带 接触轮	1~0.1	0.01~0.008	黑色金属、非金属材料、有色金属	外圆、孔、平面、型面
		超精研抛	研具(脱脂木材、细毛毡)、磨料、纯水	1~0.1	0.01~0.08	黑色金属、非金属材料、有色金属	平面
	超精加工	超精加工	磨条 磨削液	1~0.1	0.025~0.01	黑色金属等	外圆
	珩磨	精密珩磨	磨条 磨削液	1~0.1	0.025~0.01	黑色金属等	孔
特种加工	电火花加工	电火花成形加工	成形电极,脉冲电源、煤油、去离子水	50~1	2.5~0.02	导电金属	型腔模
		电火花线切割加工	钼丝、铜丝、脉冲电源、去离子水	20~3	2.5~0.16		冲模、样板(切断、开槽)
	电化学加工	电解加工	工具电极(铜、不锈钢) 电解液	100~3	1.25~0.06	导电金属	型孔、型面、型腔
		电铸	导电原模 电铸溶液	1	0.02~0.012	金属	成形小零件
	化学加工	蚀刻	掩模板、光敏抗蚀剂、离子束装置、电子束装置	0.1	2.5~0.2	金属、非金属、半导体	刻线、图形
		化学铣削	刻形、光学腐蚀溶液、耐腐蚀涂料	20~10	2.5~0.2	黑色金属、有色金属等	下料、成形加工
	超声加工		超声波发生器、换能器、变幅杆、工具	30~5	2.5~0.04	任何硬脆金属和非金属	型孔、型腔
	微波加工		针状电极(钢丝、钽丝)、波导管	10	6.3~0.12	绝缘材料、半导体	打孔
	红外光加工		红外光发生器	10	6.3~0.12	任何材料	打孔、切割
	电子束加工		电子枪、真空系统、加工装置(工作台)	10~1	6.3~0.12	任何材料	微孔、镀模、焊接、蚀刻
	粒子束加工	粒子束去除加工	离子枪、真空系统、加工装置(工作台)	0.01~0.001	0.02~0.01	任何材料	成形表面、刃磨、蚀刻
		粒子束附着加工		1~0.1	0.02~0.01		镀模
		粒子束结合加工					注入、掺杂
	激光束加工		激光器、加工装置(工作台)	10~1	6.3~0.12	任何材料	打孔、切割、焊接、热处理
复合加工	电 解	电解磨削	工具极、电解液、砂轮	20~1	0.08~0.01	导电黑色金属、硬质合金	轧辊、刀具刃磨
		精密电解研磨	工具极、电解液、磨料	1~0.1	0.025~0.008		平面、外圆、孔
		精密电解抛光	工具极、电解液、磨料	10~1	0.05~0.008	导电金属	平面、外圆、孔、型面