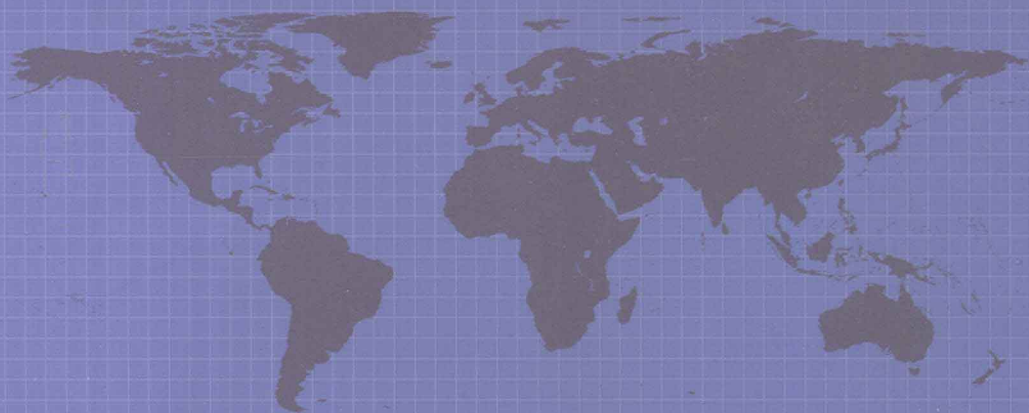




普通高等教育“十二五”机电类规划教材

精品推荐



MACHINERY



精密与特种加工技术

明平美 主编

杨志波 郑建新 副主编

- 精品课程配套教材
- 采用最新国家标准
- 配套习题、答案、课件等丰富资源
- 教学资源请登录华信教育资源网 (www.hxedu.com.cn) 免费获取



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十二五”机电类规划教材

精密与特种加工技术

明平美 主 编
杨志波 郑建新 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书涵盖了原机械制造类专业教学中精密与超精密加工、特种加工、微细加工等课程的教学内容,以系统讲述精密与特种加工工艺为目的,以加工过程的主要能量形式为主线,以实现物理、化学和复合加工的综合交叉和融合为重点,全面构建出集精密加工、特种加工和复合加工等技术为一体的课程内容体系,阐明了现代加工技术的基本原理与方法,注重培养和激发学习者的创新思维 and 创新能力。全书共9章,主要内容包括:精密、超精密切削与磨料加工,热、电化学、化学、机械等能量作用的特种加工及其复合、组合加工等。

本书可作为高等工科院校机械设计制造及其自动化专业的教材,也可供从事机械制造业的工程技术人员学习使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

精密与特种加工技术 / 明平美主编. —北京: 电子工业出版社, 2011.5
普通高等教育“十二五”机电类规划教材
ISBN 978-7-121-13491-3

I. ①精… II. ①明… III. ①精密切削—高等学校—教材②特种加工—高等学校—教材 IV. ①TG506.9
②TG66

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第084539号

责任编辑: 朱清江 特约编辑: 罗树利

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司
装 订:

出版发行: 电子工业出版社
北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 14.5 字数: 372千字

印 次: 2011年5月第1次印刷

定 价: 32.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

为满足高等院校机械制造类专业宽口径的培养要求和适应高等教育课程体系更加系统化和综合化的发展趋势，我们结合现代加工技术发展及近年来专业教学改革与探索的实践，把目前众多机械制造类专业常开的特种加工、精密加工等课程的内容系统性综合，编写了《精密与特种加工技术》一书。

本书在编写中具有以下特点。

1. 集成性

现代机械制造技术的发展呈现出高度综合集成趋势，各学科、专业之间不断渗透、交叉和融合，其界限逐渐模糊。在内容构建方面着力突出其系统集成性，以拓宽知识视野和树立通识教育观。

2. 逻辑性

各种加工方法的根本区别是其加工机理，现代加工技术分类的主要基础是其能量来源及其作用形式。本书按加工方法的能量作用形式，从常规机械能到非常规能，从单一能量、复合能量到组合能量，来串接各种加工技术，以便于理解各加工技术的本质特点。

3. 先进性

各式各样的新的应用需求，新产品、新材料的出现，不断推动现代加工技术的创新与发展。在内容取舍方面，在确保其基础内容系统完整的基础上，尽可能吸收本领域及相关领域的最新发展成果，使本书具有鲜明的时代特征。

4. 实用性

精密加工、特种加工和复合加工都是现代机械制造业生产中常用的最重要的加工技术，也是先进制造工艺技术的重要组成部分。本书突破了传统模式，将精密加工、特种加工和复合加工有机地整合为一体，并按能量来源及其作用形式来编排，是教材建设与改革的新尝试。此外，各项技术的讲述均力求结合实际应用进行，最大限度凸显其实用性。

本书涵盖了原机械制造类专业教学中精密与超精密加工、特种加工、微细加工等课程的教学内容。以系统讲述精密与特种加工工艺为目的，以加工过程的主要能量来源及其作用形式为主线，以阐明现代加工技术的基本原理与方法为基础，以实现物理、化学和复合加工的综合交叉和融合为重点，以激发和培养学生创新意识、创新思维和创新能力的目标，力图构建出集精密加工、特种加工和复合加工技术为一体的现代精密与特种加工技术体系。

本书各章的编者如下：河南理工大学明平美（第1章、第8章）；河南理工大学郑建新（第2章、第7章）；河南理工大学杨志波（第3章、第4章（合编）、第9章）；南阳理工学院李国慧（第4章（合编））；郑州航空工业管理学院马高山（第4章（合编）、第6章）；黄河科技学院邹景超、杨汉嵩（第5章）。全书由明平美任主编，负责审稿、统稿；杨志波、郑建新任副主编。

由于本书编写是一种探索和尝试，疏漏和不当之处在所难免，殷切地希望广大师生及读者提出宝贵意见和建议。

编 者

目 录

| | | | |
|-----------------------------|------|--------------------------------|-------|
| 第 1 章 绪论 | (1) | 3.5.2 砂带磨削机理 | (39) |
| 1.1 精密与特种加工的产生与特点 | (1) | 3.6 精密研磨与抛光 | (40) |
| 1.2 精密与特种加工的分类 | (3) | 3.6.1 研磨加工机理 | (40) |
| 1.3 精密与特种加工对机械制造工艺的影响 | (8) | 3.6.2 抛光加工机理 | (40) |
| 1.4 精密与特种加工技术的地位与发展趋势 | (9) | 3.6.3 精密研磨与抛光的主要工艺因素 | (41) |
| 1.4.1 精密与特种加工技术的地位 | (9) | 3.6.4 研磨盘与抛光盘 | (43) |
| 1.4.2 精密与特种加工技术的发展趋势 | (10) | 3.6.5 研磨剂与抛光剂 | (43) |
| 思考题 | (10) | 3.6.6 非接触抛光 | (44) |
| 第 2 章 超精密切削加工技术 | (11) | 思考题 | (45) |
| 2.1 概述 | (11) | 第 4 章 热作用特种加工技术 | (46) |
| 2.2 超精密切削加工机理 | (12) | 4.1 电火花加工 | (46) |
| 2.2.1 切削变形和切削力 | (12) | 4.1.1 电火花加工的基本原理、分类与应用 | (46) |
| 2.2.2 切削热和切削液 | (18) | 4.1.2 电火花加工机理 | (49) |
| 2.2.3 刀具磨损、破损及耐用度 | (21) | 4.1.3 加工机床 | (52) |
| 2.3 金刚石刀具 | (23) | 4.1.4 电火花加工基本工艺规律 | (67) |
| 2.3.1 金刚石的结构与性能 | (23) | 4.1.5 电火花加工的典型应用 | (76) |
| 2.3.2 金刚石晶体的定向 | (26) | 4.2 电火花线切割加工 | (84) |
| 2.3.3 金刚石刀具的结构 | (26) | 4.2.1 电火花线切割加工原理、特点及应用范围 | (85) |
| 思考题 | (28) | 4.2.2 电火花线切割加工设备 | (86) |
| 第 3 章 精密与超精密磨料加工技术 | (29) | 4.2.3 电火花线切割控制系统和编程技术 | (91) |
| 3.1 概述 | (29) | 4.2.4 影响线切割工艺指标的因素 | (96) |
| 3.2 精密和超精密磨削加工机理 | (30) | 4.2.5 线切割加工的扩展应用 | (100) |
| 3.2.1 精密磨削加工机理 | (30) | 4.3 激光加工 | (102) |
| 3.2.2 超精密磨削加工机理 | (31) | 4.3.1 加工机理 | (102) |
| 3.3 砂轮修整 | (32) | 4.3.2 主要应用 | (104) |
| 3.3.1 普通精密磨削砂轮修整 | (33) | 4.4 电子束加工 | (112) |
| 3.3.2 超硬磨料砂轮修整 | (33) | 4.4.1 设备与加工机理 | (112) |
| 3.4 精密磨削加工机床 | (36) | 4.4.2 主要应用 | (114) |
| 3.5 砂带磨削 | (37) | | |
| 3.5.1 砂带的磨削方式、特点 | (37) | | |

| | | | |
|----------------------------------|--------------|-------------------------------|--------------|
| 4.4.3 优点与局限性 | (116) | 6.4.2 加工原理 | (149) |
| 4.5 离子束加工 | (117) | 6.4.3 工艺过程 | (150) |
| 4.5.1 加工系统 | (117) | 6.4.4 应用举例 | (155) |
| 4.5.2 加工机理 | (117) | 思考题 | (157) |
| 4.5.3 加工精度与表面质量 | (118) | 第7章 机械作用特种加工技术 | (158) |
| 4.5.4 主要应用 | (119) | 7.1 超声加工 | (158) |
| 4.5.5 优点与局限性 | (119) | 7.1.1 概述 | (158) |
| 思考题 | (120) | 7.1.2 加工原理 | (159) |
| 第5章 电化学反应特种加工技术 | (122) | 7.1.3 加工设备 | (162) |
| 5.1 概述 | (122) | 7.1.4 主要工艺指标的影 响因素 | (168) |
| 5.1.1 基本原理 | (122) | 7.1.5 主要应用 | (170) |
| 5.1.2 分类与特点 | (123) | 7.2 水射流加工 | (172) |
| 5.1.3 电化学反应的适 用范围 | (123) | 7.2.1 概述 | (172) |
| 5.2 电解加工 | (123) | 7.2.2 加工设备 | (174) |
| 5.2.1 加工过程及工艺特点 | (123) | 7.2.3 工作参数 | (176) |
| 5.2.2 加工设备 | (125) | 7.2.4 主要应用 | (176) |
| 5.2.3 电解加工主要工艺指标 及其影响因素 | (128) | 7.3 离子束加工 | (177) |
| 5.2.4 主要应用 | (130) | 7.3.1 加工原理、分类 与特点 | (177) |
| 5.3 电铸、电刷镀及复合镀加工 | (134) | 7.3.2 主要应用 | (179) |
| 5.3.1 电铸加工 | (135) | 7.4 挤压珩磨加工 | (182) |
| 5.3.2 电刷镀加工 | (138) | 7.4.1 加工机理 | (182) |
| 5.3.3 复合镀加工 | (140) | 7.4.2 工艺系统 | (183) |
| 思考题 | (141) | 7.4.3 主要应用 | (185) |
| 第6章 化学作用特种加工技术 | (142) | 7.5 磁性磨料加工 | (186) |
| 6.1 化学铣切加工 | (142) | 7.5.1 加工机理 | (186) |
| 6.1.1 加工原理、特点及应用 范围 | (142) | 7.5.2 磁性磨料 | (187) |
| 6.1.2 工艺过程 | (143) | 7.5.3 磁性磨料研磨装置 | (187) |
| 6.2 化学抛光 | (145) | 7.5.4 应用举例 | (188) |
| 6.2.1 化学抛光的机理 和特点 | (145) | 思考题 | (189) |
| 6.2.2 化学抛光的工艺条件 及应用 | (146) | 第8章 复合能量作用特种加工技术 | (190) |
| 6.3 化学镀加工 | (148) | 8.1 概述 | (190) |
| 6.4 光化学腐蚀加工 | (149) | 8.2 电化学反应 | (190) |
| 6.4.1 概述 | (149) | 8.2.1 电解磨削加工 | (190) |
| | | 8.2.2 电解珩磨加工 | (197) |
| | | 8.2.3 电解研磨 | (197) |
| | | 8.2.4 电化学机械抛光 | (198) |

| | | | | | |
|--------------|-----------------------|-------|-------------------|-----------------|-------|
| 8.2.5 | 超声辅助电化学加工 | (200) | 9.3 | 选择性激光粉末烧结成型 ... | (217) |
| 8.2.6 | 激光辅助电解加工 ... | (201) | 9.3.1 | 工艺原理 | (218) |
| 8.2.7 | 电解电火花复合加工 | (201) | 9.3.2 | 特点与成型材料 | (218) |
| 8.3 | 热作用复合加工 | (203) | 9.3.3 | 基本设备 | (218) |
| 8.3.1 | 磨削放电加工 | (203) | 9.3.4 | 应用举例 | (219) |
| 8.3.2 | 超声辅助电火花加工 | (205) | 9.4 | 薄片分层叠加成型 | (219) |
| 8.4 | 化学复合加工 | (206) | 9.4.1 | 工艺原理 | (219) |
| 8.4.1 | 机械—化学复合抛光 | (206) | 9.4.2 | 特点和成型材料 | (220) |
| 8.4.2 | 化学—机械复合抛光 | (208) | 9.4.3 | 基本设备 | (220) |
| 8.5 | LIGA 和准 LIGA 技术 | (209) | 9.4.4 | 应用举例 | (221) |
| 8.5.1 | LIGA 技术 | (210) | 9.5 | 熔丝堆积成型 | (221) |
| 8.5.2 | 准 LIGA 技术 | (211) | 9.5.1 | 工艺原理 | (221) |
| 思考题 | | (213) | 9.5.2 | 特点及成型材料 | (222) |
| 第 9 章 | 快速成型技术 | (214) | 9.5.3 | 基本设备 | (223) |
| 9.1 | 概述 | (214) | 9.5.4 | 应用举例 | (223) |
| 9.2 | 光敏树脂液相固化成型 | (215) | 9.6 | 快速成型技术发展 | (224) |
| 9.2.1 | 工艺原理 | (215) | 思考题 | | (225) |
| 9.2.2 | 特点与成型材料 | (215) | 参考文献 | | (226) |
| 9.2.3 | 基本设备 | (216) | | | |
| 9.2.4 | 应用实例 | (217) | | | |

第1章 绪 论

“直立与劳动创造了人，劳动是从制造工具开始的”。加工技术历史悠久，内容丰富，它伴随着人类社会发展的脚步，走过了漫长的发展历程。尽管机械切削加工技术在快速发展中不断完善和创新，但面对丰富多彩的加工任务和各式各样的加工要求，单纯依靠基于机械能作用的常规机械加工方法显然难以完全胜任。为此，巧妙利用自然界其他能量形式（如电能、热能、化学能等）来实现材料的去除、叠加或变形的非传统加工方法逐渐被开发出来，并与常规机械加工方法一起，构成了现今各具特色、包罗万象的现代加工技术群。同时，制造技术从一般精度加工、精密加工逐步发展到现代的超精密加工与纳米加工。

1.1 精密与特种加工的产生与特点

第一次世界大战以后，车削、镗削和铣削等机械切削加工技术已经比较广泛地应用于机械制造中，机械化、半自动化装备开始进入车间，机械制造实现了工业化规模生产。从20世纪30年代末开始，许多工业部门，尤其是国防工业部门对产品的要求逐渐向高精度、高速度、高温、高压、大功率、小型化等方向发展。为了适应这些要求，各种新结构、新材料和复杂形状的精密切割零件大量出现，其形状越来越复杂，材料的强韧性越来越高，零件精度、表面粗糙度、完整性和某些特殊要求也越来越高，对机械制造部门提出了新的要求如下：

① 解决各种难切削材料的加工问题。如硬质合金、钛合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、金刚石、宝石、石英及锗、硅等各种高硬度、高强度、高韧性、高脆性的金属及非金属材料的加工。

② 解决各种特殊复杂表面的加工问题。如喷气涡轮机叶片、整体涡轮、发动机机匣及锻压模和注塑模的立体成型表面，各种冲模、冷拔模上特殊截面的型孔，炮管内膛线，喷油嘴、栅网、喷丝头上的异形小孔、窄缝等的加工。

③ 解决各种超精密、光整零件的加工问题。如对表面质量和精度要求很高的航天航空陀螺仪、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，表面粗糙度要求在 $Ra0.01\mu\text{m}$ 以上。

④ 解决特殊零件的加工问题。如大规模集成电路、光盘基片、复印机和打印机的感光鼓、微纳米级特征尺度零件、细长轴、薄壁零件、弹性元件等低刚度零件的加工。

要解决上述加工问题，仅依靠传统的切削加工方法是很难实现的。于是，人们一方面深入研究和揭示机械能在切削加工中的新的作用形式及其机理，以大幅度提高加工精度和表面质量；另一方面探索机械能以外的电能、化学能、声能、光能、磁能等能量形式在加工中的应用，以开发出新的加工方法。精密和特种加工技术就是在这种环境和条件下产生和发展起来的。例如，为解决国防装备用大型光学零件的高精度镜面加工问题，美国开发了基于金刚石刀具的超精密切削技术。又如，1943年苏联拉扎林柯夫妇在研究开关触点遭受火花放电腐蚀损坏的有

害现象和原因时,发现电火花的瞬时高温可使局部的金属熔化、气化而被蚀除掉,开创和发明了电火花加工方法,并用铜丝在淬火钢上加工出小孔,实现了用软的工具进行硬金属材料的加工,首次摆脱了传统的切削加工思想,直接利用电能和热能来去除金属,获得“以柔克刚”的效果。由于这些加工方法不使用常规刀具对工件材料进行切削加工,为了区别于金属切削加工,人们将这类加工统称为特种加工,国外称为非传统加工(Nontraditional Machining, NTM)或非传统机械加工(Nonconventional Machining, NCM)。

精密与特种加工是一门多学科融合的综合加工技术,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、工作环境和人的技艺水平等。精密与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,促成了精密与特种加工系统工程的形成。

精密与超精密加工,不是指某一特定的加工方法,也不是指比某一给定的加工精度高一个量级的加工技术,而是指在机械加工领域中,某一个历史时期所能达到的高一个量级或最高加工精度的各种精密加工方法的总称。精密与超精密加工的精度界限,不同的时代与科学发展阶段,有不同的标准。例如,在瓦特时代发明蒸汽机时,加工汽缸的精度是用厘米来衡量的,所以能达到毫米级的精度即为超精密加工。从那以后,大约每50年加工精度便提高一个量级,进入20世纪以后,大约每30年提高一个量级,如图1-1所示。目前,如果从零部件的加工精度来划分的话,通常将加工精度在 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 、加工表面粗糙度在 $Ra0.02\sim 0.1\mu\text{m}$ 之间的加工方法称为精密加工,而将加工精度高于 $0.1\mu\text{m}$ 、加工表面粗糙度小于 $Ra0.01\mu\text{m}$ 的加工方法称为超精密加工。也可以从被加工部位发生破坏和去除材料大小的尺寸单位来划分各种加工。物质是由原子组成的,从机械破坏的角度看,最小则是以原子级为单位(原子颗粒的大小为几埃(\AA))($1\text{\AA}=10^{-8}\text{cm}$)的破坏。如果在加工中能以原子级为单位去除被加工材料,即是加工的极限,从这一角度来定义,可以把接近于加工极限的加工技术称为超精密加工。如果用去除材料的大小尺寸单位来区分各种加工,可分为四种情况(龟裂、位错、晶格破坏、原子级破坏等),如图1-2所示。精密加工的范畴包括微细加工、光整加工和精整加工等,与特种加工的关系十分密切。

与切削加工不同,特种加工不是依靠比工件材料更硬的刀具、磨具和主要借助机械能作用来实现材料去除的,而是有自己内在的本质特点:

① 不是主要依靠机械能,而是主要用其他能量形式(如电能、化学能、光能、声能、热能等)去除材料。

② 工具硬度可以比被加工材料低。

③ 加工过程中工具和工件之间无明显的切削力作用。

总体而言,特种加工可以加工任何硬度、强度、韧性、脆性的金属或非金属材料,且擅长于加工复杂、微细和低刚度等特殊几何或性能特征的结构与零件。此外,不少特种加工方法还是超精加工、镜面光整加工和纳米级(原子级)加工的重要手段。

特种加工技术不仅可以采取单独的加工方法,还可以采用复合加工方法。近年来,复合加工的方法发展迅速,应用十分广泛。目前,许多精密和超精密加工方法采用了激光加工、电子束加工、离子束加工等特种加工工艺,开辟了精密和超精密加工的新途径。一些高硬度、高脆性的难加工材料和刚度差、加工中易变形的零件等,在精密加工和超精密加工时,特种加工已经成为必要的手段,甚至是唯一的手段,形成了精密特种加工技术。

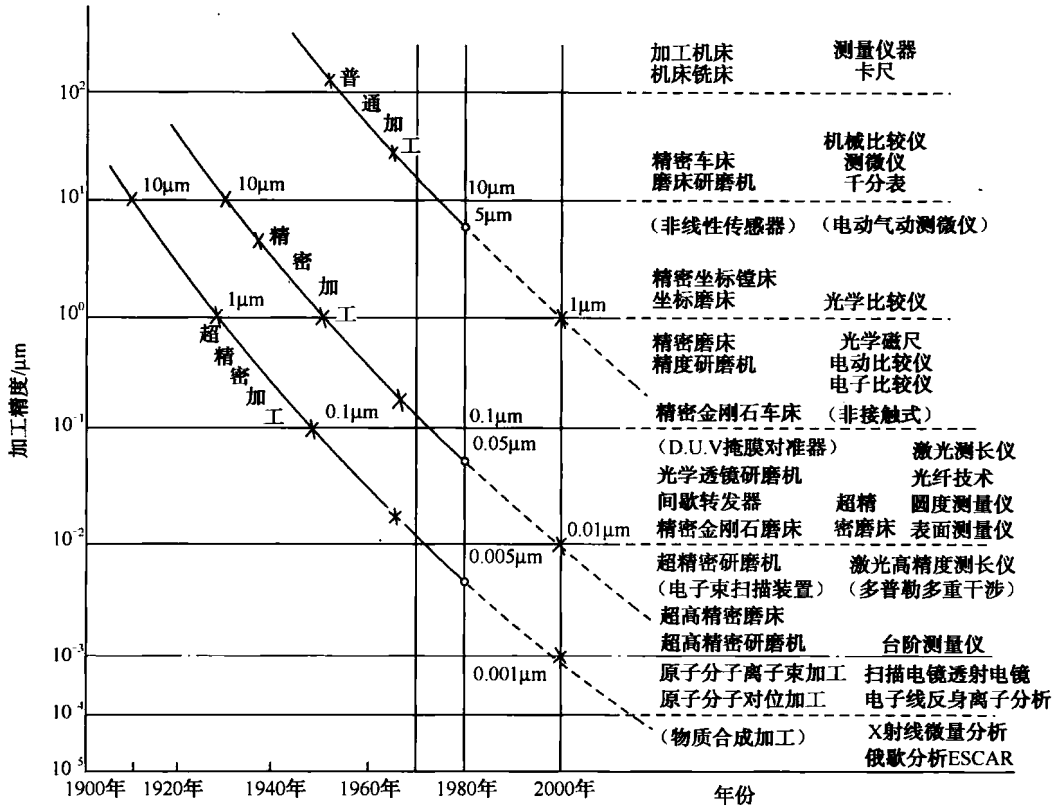


图 1-1 加工精度的发展趋势

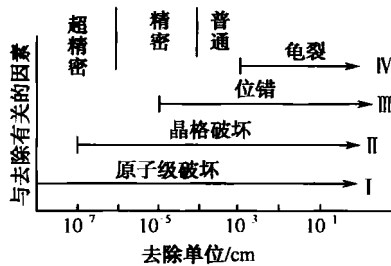


图 1-2 去除单位与其相关因素

随着精密与特种加工技术的发展，尤其是电加工、光学刻蚀加工等技术的长足发展，促进了硅加工技术的出现，从而使加工技术也进入一个新纪元，逐渐形成了以“高速、高效、精密、微细、自动化、绿色化”为特征的现代加工技术体系。

1.2 精密与特种加工的分类

特种加工方法的分类至今还没有明确的规定，常常根据需要，有多种分类方法。精密与特种加工从加工成型的原理和特点来分类，可以统分为去除加工、结合加工、变形加工三大类。

根据应用目的不同，精密与特种加工的基本分类如图 1-3 所示。从加工方法的机理来分类，精密与特种加工可以分为传统加工、非传统加工、复合加工。传统加工是指使用刀具进行的切削加工以及磨削加工；非传统加工是指利用机、光、电、声、热、化学、磁、原子能等能量形式来进行加工的特种加工方法；复合加工是指采用多种加工方法的复合作用，其中包括传统加工和非传统加工的复合、非传统加工与非传统加工的复合，进行优势互补、相辅相成的加工。目前，在制造业中，占主要地位的仍然是传统加工方法，而非传统加工和复合加工是极其重要的发展方向。表 1-1 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精密加工方法，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。

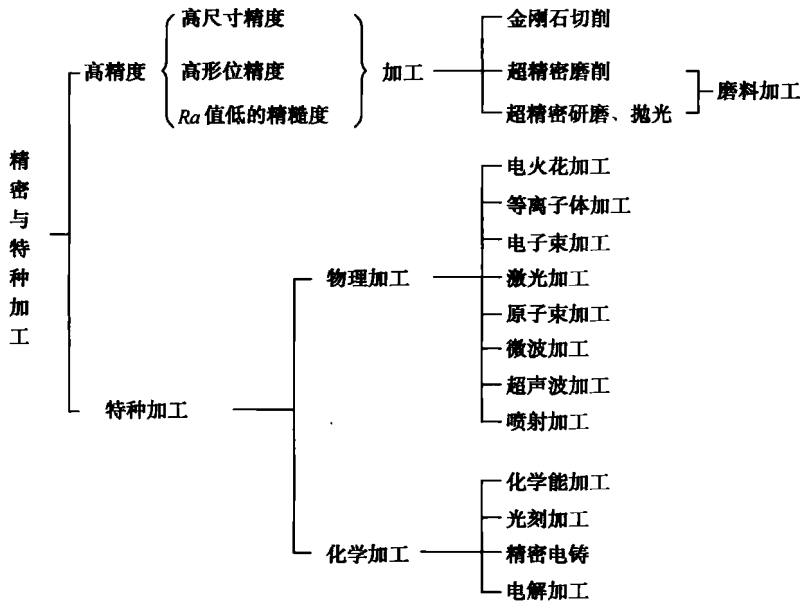


图 1-3 精密与特种加工的基本分类

表 1-1 精密加工方法

| 分类 | 加工方法 | 加工工具 | 精度/ μm | 表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$ | 被加工材料 | 应用 |
|----------------|----------|---|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------|
| 刀具 切削 加工 | 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 | 1~0.1 | 0.05~0.008 | 金刚石刀具 有色金属及其合金 | 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 | 印制线路板、石墨模具、喷嘴 |

续表

| 分类 | 加工方法 | | 加工工具 | | 精度/ μm | 表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$ | 被加工材料 | 应用 |
|------|------|------------|-------------------------------|-----------|-------------------|---------------------------|-----------------|---------|
| 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 | 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 | | | | | | 砂带 |
| | 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 | | | | | |
| | | 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、化学或电解作用的液体 | | | | 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 | |
| | | 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 | |

续表

| 分类 | 加工方法 | | 加工工具 | 精度/ μm | 表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$ | 被加工材料 | 应用 |
|-------|-------|---------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|--------------|--------------|
| 磨料加工 | 超精加工 | 精密超精加工 | 磨条 磨削液 | 1~0.1 | 0.025~0.01 | 黑色金属等 | 外圆 |
| | 珩磨 | | | | | | |
| 特种加工 | 电火花加工 | 电火花成型加工 | 成型电极、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、钢丝、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 | 成型小零件 |
| | 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、成型加工 |
| | 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、钨丝)、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、镀膜、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 | 成型表面、刃磨、蚀刻 |
| | | 粒子束附着加工 | | | | | 镀膜 |
| | | 粒子束结合加工 | | 1~0.1 | 0.02~0.01 | | 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 | 精密电解磨削 | 工具极、电解液、砂轮 | 20~1 | 0.08~0.01 | 导电黑色金属、硬质合金 | 轧棍、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 |

续表

| 分类 | 加工方法 | | 加工工具 | 精度/ μm | 表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$ | 被加工材料 | 应用 |
|------|------|--------|-----------------------|-------------------|---------------------------|------------|------------|
| 复合加工 | 超声 | 精密超声车削 | 超声波发生器、换能器、变幅杆、车刀 | 5~1 | 0.1~0.01 | 难加工材料 | 外圆、孔、端面、型面 |
| | | 精密超声磨削 | 超声波发生器、换能器、变幅杆、砂轮 | 3~1 | 0.1~0.01 | | 外圆、孔、端面 |
| | | 精密超声研磨 | 超声波发生器、换能器、变幅杆、研磨剂、研具 | 1~0.1 | 0.025~0.008 | 黑色金属等脆材料 | 外圆、孔、端面 |
| | 化学 | 机械化学研磨 | 研具、磨料、化学活化研磨剂 | 0.1~0.01 | 0.025~0.008 | 黑色金属、非金属材料 | 外圆、孔、平面、型面 |
| | | 机械化学抛光 | 抛光器、增压活化抛光液 | 0.01 | 0.01 | 各种材料 | 外圆、孔、平面、型面 |
| | | 化学机械抛光 | 抛光器、化学活化抛光液 | 0.01 | 0.01 | | 外圆、孔、平面、型面 |

到目前为止,包括机械能在内的几乎所有的能量形式,如电能、光能、声能、热能、化学能、生物能等,都已经应用于加工中。这些能量形式有单独使用的,也有复合使用的。

现代加工方法的发展与创新,往往通过能量形式的复合或组合来实现的。因此,直接按承担工件“加工”任务(如去除、叠加、变形等)的主要能量形式来分类特种加工方法有助于理解某种具体加工技术的加工机理与本质,也有助于创造新的加工技术。例如,依据是否主要依靠机械能,可把加工技术分为常规加工技术与特种加工技术。又如,按能量作用形式的数量,特种加工技术可分为单一能量特种加工方法和复合能量特种加工方法,如表 1-2 所示。

表 1-2 常用特种加工方法分类表

| 特种加工方法 | | 能量来源 | 主要作用形式 | 作用原理 | 英文缩写 |
|------------|----------|------------|--------|----------|------|
| 单一能量作用特种加工 | 热作用特种加工 | 电火花成型加工 | 热能 | 熔化、气化 | EDM |
| | | 电火花线切割加工 | | 熔化、气化 | WEDM |
| | | 激光加工 | | 熔化、气化 | LBM |
| | | 等离子体加工 | | 熔化、气化 | PAM |
| | | 电子束加工 | | 熔化、气化 | EBM |
| | 电化学特种加工 | 电解加工 | 电化学能 | 金属离子阳极溶解 | ECM |
| | | 电解抛光 | | 金属离子阳极溶解 | ECP |
| | | 电铸加工 | | 金属离子阴极沉积 | EFM |
| | | 电镀加工 | | 金属离子阴极沉积 | EPM |
| | 化学作用特种加工 | 化学铣削 | 化学能 | 化学腐蚀 | CHM |
| | | 化学抛光 | | 化学腐蚀 | CHP |
| | | 光化学腐蚀加工 | | 光化学腐蚀 | PCM |
| 化学镀加工 | | 金属离子置换反应沉积 | | CHP | |

续表

| 特种加工方法 | | 能量来源 | 主要作用形式 | 作用原理 | 英文缩写 | |
|----------------------|---------------------|--|--------------------------|-------------|---------|-------|
| 机械 作用 特种 加工 | 超声加工 | 声能、机械能 | 机械能 | 磨料高频撞击 | USM | |
| | 水射流加工 | 机械能 | | 射流或高速撞击 | WJM | |
| | 离子束加工 | 电能、机械能 | | 原子撞击 | IBM | |
| | 磨料流加工 | 机械能 | | 磨料刮削 | AFM | |
| | 磁性磨料加工 | 磁能、机械能 | | 磨料刮削 | MAM | |
| 复合 能量 作用 | 电化 学复 合加 工 | 电解磨削 | 电化学能 | 阳极溶解、磨削 | ECG | |
| | | 电解珩磨 | | 阳极溶解、研磨 | ECH | |
| | | 电解研磨 | | 阳极溶解、研磨 | ECL | |
| | | 电化学机械抛光 | | 阳极溶解、研抛 | ECMP | |
| | | 电解电火花加工 | | 电化学溶解、熔化、气化 | ECAM | |
| | | 激光辅助电解加工 | | 阳极溶解、 | LAECM | |
| | | 超声辅助电解加工 | | 阳极溶解、空化 | USECM | |
| 特种 加工 | 热复 合加 工 | 电火花磨削加工 | 热能 | 熔化、气化、磨削 | EDG | |
| | | 超声辅助电火花加工 | | 熔化、气化、空化 | USEDM | |
| 工 | 化学 复合 加工 | 化学机械抛光 | 化学能 | 化学腐蚀、研抛 | CMP | |
| 组合 特种 加工 | LIG A加 工 | X射线腐蚀法 | 光化学能、电 化学能、热 能、化学能 | 光化学腐蚀、电铸、塑铸 | LIGA | |
| | | 紫外光腐蚀法 | | | UV-LIGA | |
| | | 激光腐蚀法 | | | L-LIGA | |
| | 快速 成型 加工 | 液相 固化 法 粉 末 烧 结 法 纸 片 叠 层 法 熔 丝 堆 积 法 | 光能、化学能 | 热能、化学能 | 叠加成型 | SL |
| | | | | | | 粉末烧结法 |
| | | | 纸片叠层法 | 热能 | | LOM |
| | | | 熔丝堆积法 | 热能、机械能 | | FDM |

1.3 精密与特种加工对机械制造工艺的影响

由于上述精密与特种加工的工艺特点及其广泛应用,引起了机械制造工艺技术领域内的许多变革,对材料的可加工性、工艺路线的安排、新产品试制过程、产品零件设计的结构、零件结构工艺性好坏衡量标准等产生一系列的影响。

(1) 提高了材料的可加工性

以往认为金刚石、硬质合金、淬火钢、石英、玻璃、陶瓷等是很难加工的,现在已经广泛采用的由金刚石、聚晶金刚石、聚晶立方氮化硼等材质制造的刀具、工具、拉丝模等,可以用电火花、激光等多种方法来加工。工件材料的可加工性不再与其硬度、强度、韧性、脆性等
有直接关系。对于电火花加工等加工方法而言,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

以往除磨削加工以外,其他的切削加工、成型加工等都必须安排在淬火之前,这是所有工艺人员绝对不可违反的工艺准则。精密与特种加工的出现,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淬火引起的变形,一般都先淬火后加工。最为典型的是:电火花成型加工和电解加工等都必须先淬火后加工。

(3) 改变了新产品试制的模式

过去试制新产品的关键零部件时,必须先设计、制造相应的刀、夹、量和模具,以及二次工装,现在采用数控特种加工技术可以直接加工出各种标准和非标准直齿轮(包括非圆齿轮、非渐开线齿轮),微型电动机定子、转子硅钢片,各种变压器铁芯,各种特殊、复杂的二次曲面体零件等。这样就大大缩短新产品的试制周期。快速成型技术更是试制新产品的极佳技术手段,根本上改变了过去传统的新产品试制模式。

(4) 对产品零件的结构设计产生很大影响

例如,为减少应力集中,按设计观点,花键孔、轴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,刀齿只能设计制造成清棱清角的齿根。而采用电解加工时,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,如山形硅钢片冲模,过去因难以制造,常采用镶拼式结构,现在采用电火花加工技术后,即使是硬质合金模具或刀具,也可制成整体式结构。喷气发动机涡轮也由于电加工而可采用带冠整体结构。特种加工使产品零件可更多地采用整体性结构。

(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“禁区”。精密与特种加工的出现大大改变了这一状况。对于电火花穿孔、电火花线切割加工来说,加工方孔和加工圆孔的难易程度是一样的。喷油嘴小孔,喷丝头小异形孔,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后都由难变易了。过去淬火前忘了钻定位销孔、铣槽等工艺,淬火后这种工件只能报废,现在则大可不必,可采用电火花打孔、切槽等工艺进行补救。相反,有时为了避免淬火开裂、变形等影响,特意把钻孔、开槽等工艺安排在淬火之后,使工艺路线安排更为灵活。过去很多认为可不修的“废品”,现在可用特种加工方法进行修复。例如,磨损了的轴或孔,可用电刷镀来修复。

(6) 特种加工已经成为微细、精密超精密制造领域的主要技术手段

电子束、离子束、激光、电火花、电化学等电物理、电化学特种加工是承担精细制造任务的主要技术。

1.4 精密与特种加工技术的地位与发展趋势

1.4.1 精密与特种加工技术的地位

目前,先进制造技术已经是一个国家经济发展的重要手段之一。许多发达国家都十分重视先进制造技术的水平和发展,利用它进行产品革新、扩大生产和提高国际经济竞争能力。发展先进制造技术是当前世界各国发展国民经济的主攻方向和战略决策,同时又是一个国家独立自

主、繁荣富强、经济持续稳定发展、科技保持先进领先的长远大计。精密与特种加工技术是先进制造技术的重要组成部分。

从先进制造技术的技术实质而论，主要有精密、超精密加工技术和制造自动化两大领域。前者追求加工上的精度和表面质量极限，后者包括了产品设计、制造和管理的自动化，不仅是快速响应市场需求、提高生产率、改善劳动条件的重要手段，而且是保证产品质量的有效举措。两者关系密切，有许多精密、超精密加工要依靠自动化技术才得以达到预期指标，制造自动化通过精密加工才能准确可靠地实现。两者具有全局的决定的作用，是先进制造技术的支柱。

精密与特种加工技术水平是一个国家制造工业水平的重要标志之一。精密加工所能达到的精度、表面粗糙度、加工尺寸范围和几何形状是一个国家制造技术水平的重要标志之一。例如，金刚石刀具切削刃钝圆半径的大小是金刚石刀具超精密切削加工的一个关键技术参数，日本声称已经达到 2nm，而我国尚处于亚微米水平，相差一个数量级。精密与特种加工的技术能力，直接影响一个国家的国防武器制造水平。

精密与特种加工技术已经成为在国际竞争中取得成功的关键技术，发展尖端技术，发展国防工业，发展微电子工业等，都需要精密与特种加工技术来制造相关的仪器、设备和产品。

1.4.2 精密与特种加工技术的发展趋势

产品的服役性能与工作品质不断地挑战着极限化，精密与特种加工也因此向极端化制造、智能化制造及和谐化制造方向推进。主要体现在以下几个方面：

- ① 加工对象特征尺度极端化和跨尺度化；
- ② 多种能场复合化；
- ③ 工艺控制过程数字化；
- ④ 加工、测量、控制一体化；
- ⑤ 控形控性一体化；
- ⑥ 能量作用微量化和极速化。

思考题

1. 试分析精密与特种加工技术在机械制造领域的作用和地位。
2. 精密与特种加工技术的逐渐广泛应用引起机械制造领域的哪些变革？
3. 列举出常用的特种加工方法，并指出哪些是减材加工、哪些是增材加工。
4. 试举出几种因采用特种加工工艺后，对材料的可加工性和结构工艺性产生的重大影响的实例。