



高效铣削 技术与应用

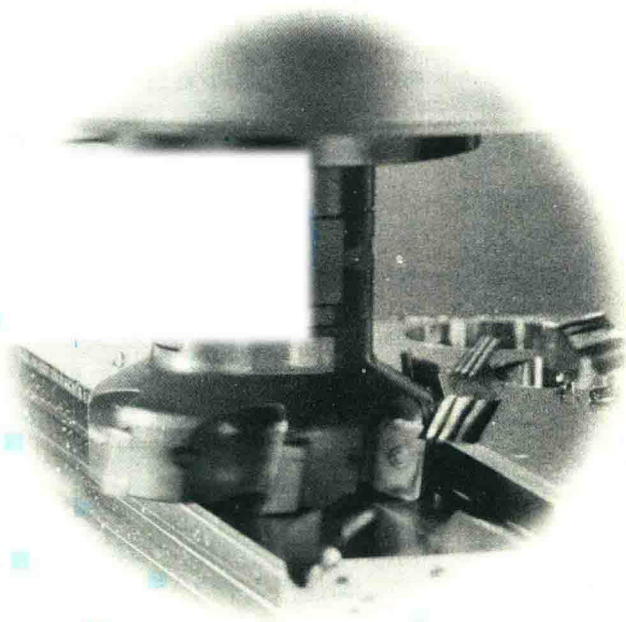
赵国英 编著



高效铣削

技术与应用

赵国英 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

全书深入浅出地介绍了高效铣削的基本理论知识和实用技术,融先进性和实用性于一体。

全书一共五章,第一章介绍了高效铣削技术的基础知识。第二章介绍了多种常用材料的铣削加工方法,覆盖了航空航天、军工、切削机床、精密机械、化工、仪器仪表、建筑、石材、工程陶瓷、塑料制品等行业;第三章和第四章分别介绍了精铣和超精密铣削技术等,包括国内外高、精、尖铣削技术;第五章介绍了几种典型零件的高效铣削方法,包含螺纹、齿轮等常加工、难加工的典型零件。全书图文并茂,既有理论分析,又有非常详细的具体操作方法。

本书适合在普通铣床、数控铣床/加工中心上工作的铣削工人和工艺技术人员阅读,也可以作为技工学校、职业技术学院的学生和老师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高效铣削技术与应用/赵国英编著. —北京:机械工业出版社, 2015. 2

ISBN 978-7-111-52494-6

I. ①高… II. ①赵… III. ①铣削—金属加工 IV. ①TG54

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第315429号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王晓洁 责任编辑:王晓洁

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:张静 责任印制:常天培

涿州市京南印刷厂印刷

2016年5月第1版第1次印刷

169mm×239mm·22.75印张·464千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-52494-6

定价:59.8元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前言

“高效铣削”即高速、高进给、高质量和低成本铣削的总和。高效切削技术涉及材料工程、机床技术、刀具技术、摩擦技术、工夹具技术、测量技术、金属切削理论以及加工工艺等，是一项复杂的系统工程。高速切削和高进给才能实现高效率；高质量才是有效的铣削，没有质量的切削加工是无效加工。低成本的切削加工是实现高效切削的目的，高消耗的生产加工是无效益的生产；只有高速度、高进给、高质量和低成本的生产加工，才能获得高效益的切削加工。

怎样才能实现高效铣削：首先要了解加工工件材料的特性，根据加工材料的化学、物理性能，选择相适应的刀具材料；并根据工件材料和刀具材料的特性，选择合理的铣刀几何角度和刀具结构，以及合理的切削用量，才能实现高效铣削加工。进行切削加工刀具就要磨损，怎样才能延长刀具使用寿命、降低生产成本，这是每个生产者必须认真对待的。什么情况采用高速铣削；具备什么条件才能使用“超高速铣削”；怎样才能对高锰钢、不锈钢、钛合金、高温合金、颗粒增强铝基复合材料、玻璃钢等材料进行高效铣削加工；怎样才能铣削出如镜面一样的平面；0.01mm 宽的窄槽是怎样铣出来的；以及为什么铣削圆柱螺旋面时会产生“凹心”，又怎样才能解决；渐开线模板和椭圆模板怎么铣……本书就是这样一步一步地介绍高效铣削技术的。

全书既有高效的粗加工技术，又有高速的超精密铣削和微细的铣削技术，以及凸轮等一些典型零件的加工技术，还介绍了许多新技术，如“插铣”“坡走铣与螺旋插补铣”“摆线铣削法”“加热铣削技术”“超声波铣削技术”“车铣技术”“绿色切削技术”等。每项技术都争取写得翔实、深入、具体，从理论分析到实际操作，每一步都有很详细的说明，用理论指导实际，用实际操作得来的结果反过来验证理论的正确性。使读者可从书中学到实实在在的技术，既知道这“活”怎么加工，又清楚为什么要这么加工，怎样才能提高加工质量，以及出现质量问题和刀具磨损了又如何解决。使读者既知其然，又知其所以然，达到授之以渔的目的。

作者长期工作在生产第一线，对铣削技术进行了比较深入的学习和研究，

同时担任沈阳市技协铣削专业组组长 15 年，积累了较丰富的高速切削技术和经验。本书是作者根据个人 30 余年的工作经验编写而成的。在编写过程中，参考了国内外有关著作和研究成果，还得到了沈阳市技协的大力支持和帮助，在此向有关参考资料的作者和提供帮助的单位表示最诚挚的敬意和衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中肯定还会存在不足和疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编 者



作者于 1976 年 5 月 20 日为三机部 460 厂解决“发动机机匣”
密封面精加工技术问题。

目 录

前言

第一章 高效铣削基础知识	1
第一节 高速加工概述	2
一、高速切削的优点	2
二、超高速切削的优点	2
三、实现超高速切削应具备的条件	3
四、超高速切削技术的应用	5
第二节 侧面铣削法	5
一、逆铣	6
二、顺铣	7
三、立铣刀直径与伸出长度的选择	7
四、侧面铣削法	8
五、圆角铣削法	10
六、铣侧面的表面粗糙度	13
第三节 端面铣削法	14
一、对称铣削法	14
二、不对称顺铣法	14
三、不对称逆铣法	15
四、倾斜铣削法	16
五、阶梯铣削法	17
六、铣削进给路径的选择	18
七、刀齿切入形式的选择	18
第四节 切断与切槽法	19
一、切断与切槽的特点	20
二、锯片铣刀	22
三、切削用量的选择	24
第五节 曲面铣削法	25

一、球头铣刀的种类	25
二、球头铣刀铣削方式	25
三、球头铣刀加工表面粗糙度	27
第六节 插铣法	31
一、插铣的特点与应用	31
二、插铣刀	32
三、插铣切削用量的选择	33
第七节 高进给铣削法	34
一、高进给铣削的优点	34
二、高进给铣刀的结构	35
三、高进给铣削方法	36
第八节 坡走铣削法	36
一、坡走铣削的特点	36
二、切削用量	37
三、坡走铣削的倾斜铣削法	39
第九节 圆周铣削法	40
一、圆周铣刀	40
二、铣削方法	40
三、切削用量	41
第十节 螺旋插补铣削法	42
一、数控螺旋插补铣孔	42
二、螺旋铣孔机铣孔	45
实例 1 铝合金 7075 板孔的铣削	49
实例 2 钛合金 TC6 板孔的铣削	50
第十一节 摆线铣削法	50
一、全宽铣削	50
二、摆线铣削原理	50
三、摆线铣削的特点与应用	51
四、次摆线铣削计算	52
实例 1 摆线铣削淬硬钢槽	53
实例 2 摆线铣削不锈钢槽	53
第十二节 车铣法	54
一、车铣技术的特点	54
二、轴向车铣法	55
三、正交车铣法	59
实例 1 溢流壳体的车铣加工	62

实例2 用车铣中心加工针阀接头	64
第十三节 加热铣削法	66
一、加热切削原理	67
二、刀具切削的最佳条件	67
三、余热切削法	68
四、刀具加热切削法	68
五、激光加热切削法	70
第十四节 超声波铣削法	73
一、超声波铣削原理	73
二、超声波加工系统	73
三、磨料与工作液	74
四、超声波铣削参数的选择	75
实例 超声波铣削球面型腔	76
第十五节 铣削振动与防治	76
一、产生振动的原因	76
二、防止和减轻振动的措施	77
第十六节 绿色切削技术	80
一、环保型切削液	80
二、水蒸气冷却技术	80
三、微量润滑 (MQL) 切削技术	80
四、低温液氮冷却技术	81
五、干式切削技术	81
第二章 常用材料的高效铣削	82
第一节 铸铁的铣削	82
一、铸铁的加工特点	82
二、铣刀的选择	82
三、切削用量的选择	83
四、铸铁铣削的原则	84
五、铸铁铣削刀具的磨损	85
实例1 高速铣发动机缸体	85
实例2 高速铣变速箱连接面	86
实例3 铣汽车发动机缸体	87
第二节 模具钢的铣削	88
一、模具钢的加工特点	88
二、高速加工模具的关键技术	89
三、切削用量的选择	93

四、铣削方法	94
五、刀具的磨损	101
实例 1 淬火模具钢的铣削	104
实例 2 遥控器前壳模具的高速铣削	106
实例 3 曲面薄壁电极模的数控加工	108
第三节 高锰钢的铣削	110
一、高锰钢的加工特点	110
二、铣刀的选择	111
三、切削用量的选择	113
四、铣削方法	114
五、刀具的磨损形式	115
实例 1 铣削 ZGMn13 高锰钢辙叉件	117
实例 2 “自滚切面铣刀”铣削 ZGMn13 高锰钢	118
第四节 不锈钢的铣削	119
一、不锈钢的加工特点	119
二、铣刀的选择	120
三、切削用量的选择	121
四、铣削方法	122
五、加强冷却延长刀具寿命	123
实例 1 螺旋槽筒的铣削	123
实例 2 不锈钢薄壁件的铣削	125
实例 3 在数控铣床上加工不锈钢弧形件	127
第五节 钛合金的铣削	129
一、钛合金的加工特点	129
二、铣刀的选择	130
三、切削用量的选择	132
四、铣削方法	133
五、刀具磨损与提高刀具寿命的措施	140
实例 1 ARJ21 钛合金飞机滑轨的加工	143
实例 2 航空 TC21 钛合金的加工	146
实例 3 超薄钛合金腹板类零件的加工	148
第六节 高温合金的铣削	149
一、高温合金的加工特点	149
二、铣刀的选择	151
三、切削用量的选择	153
四、加强冷却提高刀具寿命	153

实例 1 飞机发动机叶片高效加工	154
实例 2 机匣的高效加工	155
实例 3 铸造钴基高温合金圆环件的加工	157
第七节 铜合金的铣削	159
一、铜合金的加工特点	159
二、铣刀的选择	159
三、切削用量的选择	160
实例 1 “铜排”的铣面	161
实例 2 薄壁的铜合金零件加工工艺	162
第八节 镁合金的铣削	163
一、镁合金的加工特点	163
二、铣刀的选择	163
三、切削用量的选择	164
四、铣削方法	164
实例 大型镁合金铸件加工技术	165
第九节 铝合金的铣削	167
一、铝合金的加工特点	167
二、铣刀的选择	167
三、切削用量的选择	170
四、铣削方法	170
五、薄壁件的铣削方法	176
实例 1 铸铝框架零件的精加工	177
实例 2 防止铝合金件加工变形的工艺方法	179
实例 3 大型薄壁零件防变形加工工艺	181
实例 4 加工薄壁壳体类零件的防变形技术	185
实例 5 铝合金薄板多槽的高速加工	188
实例 6 大型薄壁深腔零件加工	190
第十节 颗粒增强铝基复合材料的铣削	192
一、金属基复合材料的加工特点	193
二、铣刀与切削用量的选择	194
三、铣削时振动的防治	196
四、刀具的磨损特性	196
五、加工表面质量	198
第十一节 碳纤维复合材料的铣削	198
一、碳纤维复合材料的加工特点	199
二、复合材料铣削加工中存在问题	200

三、刀具的选择	201
四、铣削方法	202
第十二节 玻璃钢的铣削	205
一、玻璃钢的加工特点	205
二、铣削方法	206
第十三节 工程塑料的铣削	207
一、工程塑料的加工特点	207
二、铣刀和切削用量的选择	207
三、铣削方法	208
实例 塑料薄壁盖板的数控加工	209
第十四节 石材的铣削	210
一、石材的高速切割	211
二、铣平面	215
第十五节 工程陶瓷的铣削	217
一、工程陶瓷的加工特点	217
二、陶瓷材料的常规铣削法	218
三、陶瓷材料的激光加热铣削法	218
第十六节 石墨的铣削	219
一、石墨的加工特点	220
二、刀具的选择	220
三、切削用量的选择	221
四、铣削方法	221
五、刀具的磨损特点	223
第三章 高速精铣	224
第一节 精铣刀的选择	224
一、刀具材料	224
二、几何角度的选择	225
三、对刀具表面质量的要求	227
第二节 精铣机床的选择	227
一、较高的精度	227
二、充足的功率和刚性	228
第三节 精铣切削用量的选择	229
一、每齿进给量的选择	229
二、切削速度的选择	229
第四节 降低表面粗糙度的措施	229
一、防止产生积屑瘤的措施	230

二、防止产生鳞刺的措施	230
三、防止产生扫刀的措施	231
四、减少毛刺或无毛刺的方法	231
五、提高表面质量的铣削方式	232
实例1 精铣铝合金平面	233
实例2 高速精铣铝合金变速器后盖	235
实例3 高速精铣铸铁	236
实例4 薄壁抛物面天线精加工	236
第四章 超精密铣削与微细铣削	239
第一节 超精密铣削法	239
一、超精密铣削对环境的要求	239
二、超精密铣床	240
三、金刚石铣刀	240
实例 多面反射镜面的超精密铣削	242
第二节 微细铣削法	245
一、微细机电产品的特征	246
二、微细铣床	246
三、微细铣刀	247
四、微细铣削技术的应用	249
实例 微小薄板零件的铣削	250
第五章 典型零件铣削	253
第一节 高速铣螺纹	253
一、旋风铣螺纹	253
二、螺纹铣床加工螺纹	261
三、影响螺纹加工误差的因素	264
四、影响螺纹表面粗糙度的因素	265
实例1 车铣大型多头螺杆与螺母	267
实例2 旋风铣滚珠丝杠	270
实例3 高速铣大直径内螺纹	271
实例4 高速铣波形螺杆	273
第二节 高速铣齿条	274
一、铣刀与交换齿轮的安装	274
二、工件装夹方法	275
三、加工方法	275
四、影响齿条加工精度的因素	278

第三节 圆弧锥齿轮的铣削	278
一、切齿原理	279
二、切齿工装	279
三、铣刀盘的选择	280
四、切齿计算	283
五、轮位	284
六、刀位	284
实例 圆弧锥齿轮单刀号切齿法	285
第四节 高精度球体的铣削	291
一、铣外球面	291
二、铣内球面	294
三、球体误差及计算	295
四、影响球体表面粗糙度的因素	297
实例 高精度铝合金球的铣削加工	298
第五节 平板凸轮的铣削	300
一、阿基米德曲线的形成	301
二、理论曲线夹角与实际曲线夹角	301
三、导程计算	303
四、加工方法	304
实例 车床进给凸轮的铣削	313
第六节 端面凸轮的铣削	314
一、阿基米德螺旋面形成	314
二、导程与螺旋角	315
三、加工方法	315
四、小导程凸轮的交换齿轮方法	321
实例 “移动凸爪”上螺旋面的铣削	323
第七节 椭圆型腔的铣削	325
一、椭圆的定义与方程	325
二、椭圆的形成	325
三、铣刀直径的选择	325
四、椭圆型腔的加工方法	326
五、椭圆孔的加工方法	326
实例 固体激光器聚光腔的铣削	329
六、椭圆轴的加工方法	331
实例 椭圆模具轴的铣削	331
七、锥形椭圆孔的加工方法	332

八、锥形椭圆柱的加工方法.....	335
九、椭圆曲线形状误差与检验.....	336
实例 省煤器椭圆孔的铣削.....	338
第八节 渐开线模板的铣削.....	340
一、渐开线的形成.....	340
二、铣削方法.....	341
实例 渐开线仿形板.....	342
三、影响渐开线形状的因素.....	344
参考文献	346

高效铣削基础知识

现代高效加工包括高速加工、高进给加工、高质量加工、低消耗加工及绿色切削加工技术。高效加工不是单纯的高速加工，高速是手段，高效益是目的，不能单纯为高速而高速。高效加工是一项先进的综合加工制造技术，是一个系统工程。现代高效加工的关键技术包括：

1. 高性能加工机床

高效加工机床必须具有高转速，才能保证实现高速切削。要保证实现高速切削，必须具备高精度和高动平衡性能。高效率要由高进给加工来保证，只有高进给才能实现单位时间内高的金属切除率，因此机床必须具有高功率、大扭矩和高刚性。

2. 高性能的刀具材料和刀具结构

要实现高速或超高速切削，必须要有高强度、高硬度和耐高温的刀具材料和先进的刀具几何参数，同时要有高动平衡的铣刀结构。

3. 高效的加工工艺

高效加工工艺方法是提高加工效率的核心技术，如摆线铣削技术、高进给切削技术、螺旋插补铣技术、加热切削技术、超声波铣削技术及车铣技术等，还要有先进的加工工艺规程、数控编程方法，以及切削参数的优化等。

4. 现代组合加工技术

高效加工不仅体现加工过程的高速、高进给、高质量，还要尽可能缩短辅助时间。现代加工技术是以铣削技术为中心，将车、铣、镗、钻、螺纹加工融为一体，在一台加工中心上可以铣各种型面、车铣圆柱体、镗孔、螺旋铣孔以及铣螺纹等。零件不用转换机床即可完成全部加工，大大减少了零件的装夹、定位时间和各机床的转换时间，加上自动化检测技术，可以在线快速检测到刀具的磨损状况、加工尺寸精度，然后进行自动补偿等，这样可极大地减少辅助时间，提高加工效益。

5. 绿色切削技术

采用微量润滑 MQL（切削液雾化喷射）技术和干切削技术，可以提高刀具的

使用寿命,降低刀具的使用成本,减少环境污染,是提高加工效益的一个重要措施。

第一节 高速加工概述

硬质合金切削刀具代替高速钢刀具,切削速度至少可提高 2~5 倍,这是金属切削史上第一次切削速度的飞跃,实现了“高速切削”。

我国从 20 世纪 60 年代开始,硬质合金刀具及陶瓷、立方氮化硼刀具开始应用,目前高速切削技术广泛应用到车削、铣削、钻削、镗削,甚至铰削。

一、高速切削的优点

1. 提高了切削效率

使用高速钢刀具的中速切削 $v_c = 30\text{m/min}$,而使用硬质合金等高硬刀具材料,其切削速度可达到 $v_c = 300 \sim 600\text{m/min}$,这样使铣刀的转速提高了 10~20 倍,进给速度提高了 10 倍以上,单位时间内的金属切除率大幅提高,使生产效率大幅提高,降低了生产成本,提高了经济效益。

2. 提高了加工表面质量

采用中速切削时,加工表面粗糙度值只能达到 $Ra1.6\mu\text{m}$,而采用了硬质合金刀具,由于切削速度大幅提高,使加工表面粗糙度大幅下降,高速精铣钢、铸铁的表面粗糙度值可以达到 $Ra0.32 \sim 0.63\mu\text{m}$,高速精铣铝合金可以达到 $Ra0.25 \sim 0.32\mu\text{m}$ 。

3. 刀具寿命大幅提高

由于硬质合金的耐磨性能比高速钢高 10 倍以上,使得硬质合金铣刀的寿命大幅提高,显著降低了刀具的成本,如使用陶瓷刀具高速切削高温合金,切削速度提高了 70 多倍,加工效率提高 80 倍,刀具寿命提高了 30 倍。

二、超高速切削的优点

科学家发现:在常规切削区内切削速度提高,切削温度上升,但当切削速度升到一定值后,切削温度不升反而下降(图 1-1)。一般来讲,机床主轴转速达到 1 万 r/min 以上或切削速度比原来的切削速度高 5~10 倍以上,均称为“超高速切削”。超高速切削有以下优点:

1) 随着切削速度的大幅度提高,进给速度也大幅度提高 5~10 倍。这样单位时间内的材料切除率也可大幅提高,可比常规高 3~5 倍。同时大大地减少了空行程时间,从而极大地提高了机床的生产效率。

2) 在切削速度达到某一数值之后,切削力可降低 30%,尤其背向力的大幅减少,特别有利于提高薄壁、细肋类刚性差的工件的加工速度和加工质量。对于薄壁工件可铣出 0.2mm 薄肋。采用超高速切削

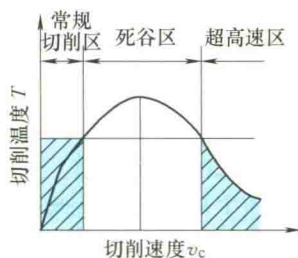


图 1-1 切削速度与切削温度的关系

法, 主轴转速可以达到 $42\,000\text{r/min}$, 进给速度可达 $15\sim 20\text{m/min}$ 。

3) 超高速切削时, $95\%\sim 98\%$ 以上的切削热来不及传给工件, 而被切屑飞速带走, 工件基本保持冷态, 因此特别适合加工容易产生热变形的零件。

4) 超高速切削时, 机床的激振频率特别高, 它避开了机床—刀具—工件工艺系统的固有频率范围, 因此切削平稳, 可以加工出非常精密、非常光洁的零件, 常常可以达到磨削的水平, 而且表面残余应力很小, 常可以省去精磨工序。

5) 超速切削可以加工各种难加工的材料, 如镍基合金和钛合金等。在普通加工中一般采用低速切削加工很困难, 而采用超高速切削加工, 切削速度可比常规切削速度高 $5\sim 10$ 倍, 不但可以大幅度地提高生产率, 还可以有效地减少刀具磨损, 提高零件的表面质量。

6) 降低加工成本。零件的单件加工时间缩短; 在一台机床上一次装夹可以完成零件所有的粗加工、半精加工、精加工, 如模具加工可以是“一次成型”。虽然高速加工机床价格是普通机床的几倍, 但综合考虑仍可以降低成本。

三、实现超高速切削应具备的条件

1. 高速加工中心机床

五轴高速加工中心如图 1-2 所示。

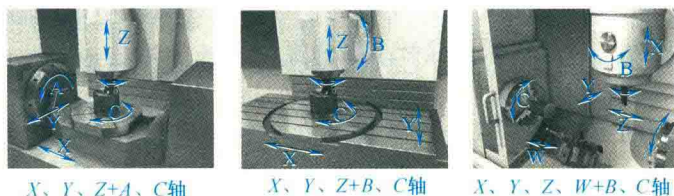


图 1-2 五轴高速加工中心

(1) 高速高精度的主轴系统 高速加工机床的主轴都是采用“零传动”的电主轴, 普通机床或数控机床主轴的传动都是通过电动机经过传动带、齿轮、联轴器等将动力传到主轴。高速加工机床的主轴的转速一般应在 $1\text{万}\sim 3\text{万 r/min}$, 目前已有主轴转速在 $15\text{万}\sim 20\text{万 r/min}$ 以上的超高速加工中心机床。在这种每分钟上万转的转速下, 起动、加减速、反向和停机时各传动件反复受到冲击、摩擦, 一般主轴存在噪声大、传动件磨损快、振动大等缺陷, 无法保证机床正常运转, 也无法保证加工精度和表面质量。所以高速加工机床都是采用电主轴, 实现了理想的“零传动”。

高速加工机床的主轴应具有比普通数控机床更高的精度, 主轴径向圆跳动小于 $2\mu\text{m}$ 。超精密高速加工机床的主轴径向圆跳动应达到 $0.03\mu\text{m}$ 。主轴上的轴承采用陶瓷轴承、磁悬浮轴承、空气轴承或液体动压轴承等, 而且轴承采用喷油润滑高新技术, 可以保证主轴在 $1\times 10^6\text{r/min}$ 以上也能正常运转。同时, 主轴还应具有高强度、高刚性、大功率等特点。