

哈尔滨理工大学
制造科学与技术系列专著



刀具几何特征对钛合金 切削性能影响研究

杨树财 著



科学出版社

哈尔滨理工大学制造科学与技术系列专著

刀具几何特征对钛合金 切削性能影响研究

杨树财 著

科学出版社

内 容 简 介

本书针对钛合金加工中存在工件表面质量差、刀具磨损严重等问题,考虑介观几何特征对刀具磨损、工件表面完整性及热-力耦合行为的影响,运用理论分析、仿真建模、试验等手段,从介观几何特征的制备入手,深入研究了刃口与微织构在切削钛合金过程中对刀具磨损、工件表面完整性及热力耦合行为的影响规律,并以此优化了介观几何特征参数,为实现钛合金高效加工及刀具优化设计提供了基础。

本书可供从事航空航天钛合金零部件高质量加工、刀具刃口结构优化设计、新型刀具设计及介观几何特征作用机理等相关领域教学、科研与开发的相关人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

刀具介观几何特征对钛合金切削性能影响研究/杨树财著. —北京:科学出版社, 2017.11

(哈尔滨理工大学制造科学与技术系列专著)

ISBN 978-7-03-054518-3

I. ①刀… II. ①杨… III. ①刀具(金属切削)-几何造型-影响-钛合金-金属切削-研究 IV. ①TG7②TG146.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 227089 号

责任编辑:裴育 陈婕 赵晓廷 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张伟 / 封面设计:蓝正

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年11月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年11月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:312 000

定价:90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

随着《中国制造 2025》的发布，航空航天领域的重点发展得到了空前的重视。实现航空航天装备的智能制造，必须要依托航空航天材料的加工。钛合金以其优良的特性广泛应用于航空航天关键件的加工中。钛合金属于典型的难加工材料，其较高的化学活性导致在加工过程中刀具表面黏结现象严重，刀具磨损较快。因此，在钛合金高效加工中，如何减少刀具磨损、改善钛合金的切削加工性能、获得较好的工件表面质量，成为现代制造业亟待解决的问题。

近年来，摩擦学领域提出了表面微结构技术。大量研究发现，微结构表面具有减摩抗磨作用，这给金属切削加工领域中刀具抗磨性研究带来了新的方向。同时，刀具刃口特征的设计对切屑形态、切屑形状以及切削过程中的力热特性都有重要影响，特别是在精密切削时，刀具刃口在一定程度上决定着切屑的形成过程。因此，对刀具刃口特征及表面微结构的研究，成为减缓刀具磨损、提高刀具切削加工性能的主要途径。

本书旨在理论建模、仿真分析及试验的基础上，以刀具介观几何特征（切削刃、表面结构）为切入点，详细阐述刀具微结构制备过程，系统研究介观几何特征对切削过程中力热特性、刀具磨损、工件表面完整性的影响规律，以此优化刀具介观几何特征参数，揭示刀具介观几何特征的减摩抗磨机理，为实现钛合金高效高质量加工提供理论依据，同时对刀具结构的优化设计提供支撑。全书共 7 章，主要内容包括：绪论；精密切削钛合金刀具刃口作用机理；微结构激光制备及其对刀具性能影响；表面微结构减摩抗磨性能；微结构刀具切削过程热-力耦合行为；高速切削钛合金表面完整性；刀具介观几何特征优化等。

本书系统研究了刀具介观几何特征对钛合金切削性能的影响，除第 1 章外，其余章节均由理论建模及分析、仿真及试验研究等部分构成。本书理论研究完备，论述详尽，通过理论、仿真及试验相结合的方式，使研究内容易于理解，应用性强。本书所研究的内容已应用于实际加工中，并且得到了较好的工件表面质量及较高的加工效率。另外，书中尽量吸收了当前有关介观几何特征的最新研究内容及相关技术，使得本书内容较新颖，具有较好的应用价值和参考价值。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目（51375126）的支持，特此对参与项目的单位和个人表示衷心的感谢。同时，感谢哈尔滨理工大学“高效切削及刀具”国家地方联合工程实验室的同事和研究生为本书的前期筹备收集、整理

了大量的资料。此外，本书部分内容参考了相关单位和个人的研究成果，在此也一并致谢。

由于介观几何特征的研究起步尚早，研究内容涉及的范围广，作者水平有限，书中难免出现不足之处，敬请广大读者提出宝贵意见。

杨树财

2017年8月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 钛合金高速铣削加工技术	1
1.1.1 钛合金的切削加工特点	1
1.1.2 钛合金加工中存在的问题	3
1.1.3 刀具表面介观几何特征	5
1.2 刀具刃口对钛合金切削过程影响规律研究现状	6
1.2.1 刀具刃口特征对切削加工的影响研究现状	7
1.2.2 不同刃口形式对切削加工的影响研究现状	8
1.2.3 刃口作用下的尺寸效应对切削加工的影响研究现状	10
1.3 微织构刀具研究现状	10
1.3.1 表面微织构技术概述及研究现状	11
1.3.2 微织构刀具切削加工性能研究现状	12
1.4 高速切削钛合金刀具摩擦磨损特性研究现状	13
1.5 钛合金切削过程热-力耦合行为研究方法	14
1.5.1 钛合金切削过程切削力的研究现状	15
1.5.2 钛合金切削过程切削温度的研究现状	16
1.6 高速切削钛合金表面完整性研究现状	17
1.6.1 表面粗糙度研究现状	18
1.6.2 表面加工硬化研究现状	18
1.6.3 表面残余应力研究现状	19
1.7 本章小结	20
参考文献	20
第 2 章 精密切削钛合金刀具刃口作用机理	26
2.1 钛合金切削刀具刃口性能评价	26
2.1.1 试验条件	26
2.1.2 试验方法	27
2.2 刀具刃口对钛合金精密切削切屑形成过程影响	28
2.2.1 钛合金切削切屑形状	28

2.2.2 钛合金切削切屑微观形态与几何特征分析	29
2.2.3 同类型刀口对切削钛合金切屑形成过程分析	34
2.3 精密切削钛合金刀口作用力学特性研究	43
2.3.1 精密切削钛合金刀口作用切削力模型	44
2.3.2 考虑刀口作用的钛合金精密切削有限元分析	50
2.3.3 精密切削钛合金力学特性试验研究	53
2.4 精密切削钛合金刀具刀口刃形保持性研究	54
2.4.1 刀具材料优选	54
2.4.2 刀具刀口刃形优选	61
2.5 刀具刀口作用下钛合金精密切削加工典型应用	63
2.5.1 考虑刀口作用的钛合金精密切削极限切削深度	64
2.5.2 钛合金精密切削最小切削深度试验	67
2.5.3 刀口作用下钛合金膜盘精密加工	69
2.6 本章小结	72
参考文献	72
第3章 微织构激光制备及其对刀具性能的影响	73
3.1 微织构几何形状对刀具结构强度的影响	73
3.2 激光蚀除材料机理	77
3.2.1 激光加工技术	78
3.2.2 激光表面强化	78
3.2.3 激光蚀除机理	81
3.3 微织构刀具激光制备	82
3.3.1 微织构激光制备	82
3.3.2 微织构加工稳定性	84
3.3.3 激光加工工艺参数对微织构质量影响	85
3.4 激光烧蚀对刀具基体材料组织性能影响	91
3.4.1 基体材料颗粒细化	91
3.4.2 微织构表面元素测量	91
3.4.3 基体材料显微硬度变化	94
3.5 微织构刀具切削试验	96
3.5.1 方案设计	96
3.5.2 切削力试验结果分析	97
3.5.3 磨损形貌测量分析	98
3.6 本章小结	102

参考文献	102
第4章 表面微织构减摩抗磨性能	105
4.1 微织构摩擦磨损过程仿真分析	105
4.1.1 摩擦磨损有限元模型的建立	105
4.1.2 边界条件与载荷	105
4.1.3 不同形状微织构表面接触应力分析	107
4.1.4 光滑摩擦副和微坑织构摩擦副摩擦过程应力分析	108
4.2 硬质合金刀具材料摩擦磨损试验	109
4.2.1 摩擦磨损试验原理和方法	109
4.2.2 硬质合金微织构表面摩擦性能试验研究	111
4.2.3 硬质合金微织构表面干摩擦性能分析	114
4.2.4 表面微坑织构参数对摩擦系数影响	116
4.3 微织构表面磨损形貌分析	118
4.3.1 盘试件磨损形貌分析	118
4.3.2 球试件磨损形貌分析	121
4.4 微坑织构减摩抗磨性能分析	124
4.5 硬质合金球头铣刀微织构参数优化	127
4.5.1 硬质合金球头铣刀微织构参数优化模型建立	127
4.5.2 微织构参数优化	128
4.6 本章小结	129
参考文献	129
第5章 微织构刀具切削过程热-力耦合行为	131
5.1 微织构硬质合金球头铣刀铣削钛合金试验	131
5.1.1 微织构激光制备	131
5.1.2 铣削钛合金试验	137
5.1.3 试验结果分析	141
5.2 微织构硬质合金球头铣刀应力场研究	146
5.2.1 铣削力模型	146
5.2.2 刀-屑接触面积试验式	148
5.2.3 受力密度函数数学模型	149
5.2.4 应力场仿真分析	152
5.3 微织构球头铣刀铣削钛合金温度场研究	156
5.3.1 热源分析	156
5.3.2 热流密度函数	157

5.3.3 微织构球头铣削钛合金铣刀温度场模型	162
5.3.4 微织构球头铣刀温度场的有限元仿真	168
5.4 微织构球头铣刀热-力耦合有限元仿真研究	172
5.4.1 刀具热应力仿真	173
5.4.2 微织构球头铣刀热-力耦合仿真	175
5.4.3 仿真结果分析	176
5.5 本章小结	178
参考文献	178
第6章 高速切削钛合金表面完整性	181
6.1 表面完整性概述	181
6.1.1 表面完整性概念及内涵	181
6.1.2 已加工表面完整性形成过程	182
6.1.3 影响表面完整性的因素	183
6.1.4 表面完整性对零件使用性能的影响	183
6.2 微织构刀具切削钛合金表面粗糙度测试	184
6.2.1 切削表面粗糙度正交试验	184
6.2.2 切削表面粗糙度正交试验数据分析	185
6.2.3 微织构刀具切削表面粗糙度影响规律	186
6.3 微织构刀具切削钛合金表面加工硬化测试	189
6.3.1 加工硬化评价标准及测试方法	189
6.3.2 切削表面加工硬化测试结果	191
6.3.3 微织构刀具切削表面加工硬化影响规律	192
6.4 微织构刀具切削钛合金表面残余应力测试	195
6.4.1 切削表面残余应力产生的原因	195
6.4.2 切削表面残余应力测试结果	196
6.4.3 微织构刀具切削表面残余应力影响规律	199
6.5 已加工表面变质层分析	203
6.5.1 已加工表面变质层显微组织分析	203
6.5.2 已加工表面变质层能谱分析	204
6.6 本章小结	205
参考文献	206
第7章 刀具介观几何特征优化	209
7.1 刀具介观几何特征优化方法	209
7.1.1 遗传算法	209

7.1.2 神经网络	211
7.1.3 回归分析	215
7.1.4 多目标优化	218
7.2 表面完整性预测模型	219
7.2.1 表面完整性模型的建立	219
7.2.2 回归模型的显著性检验	221
7.3 微织构刀具磨损预测模型	223
7.3.1 刀具磨损模型的建立	223
7.3.2 回归模型的显著性检验	224
7.4 微织构刀具参数优化	226
7.4.1 设计变量	226
7.4.2 目标函数	226
7.4.3 微织构参数多目标优化结果	227
7.4.4 优化结果的试验验证	232
7.5 本章小结	233
参考文献	233

第 1 章 绪 论

本章对高速切削钛合金理论与方法的发展现状进行阐述,主要针对钛合金的切削加工特点、特性及钛合金加工中存在的问题进行分析,并从刀具几何特征入手解决以上问题;分别从刀具刃口特征、刃口形式、刃口作用下的尺寸效应、表面微织构技术、微织构刀具的切削加工性能、高速切削钛合金刀具摩擦磨损特性、工件表面粗糙度、表面加工硬化、表面残余应力、钛合金切削过程热-力耦合行为等方面进行刀具刃口对钛合金切削过程影响规律、切削加工性能、表面完整性等研究现状的分析,为微织构球头铣刀铣削钛合金的切削性能研究提供重要的理论依据。

1.1 钛合金高速铣削加工技术

在当今科技飞速发展的时代环境下,各国面临新一轮科技革命和产业变革,美国、德国等制造强国纷纷提出了制造业升级的思路和规划。对此,中国发布了《中国制造 2025》,其中智能制造是主攻方向,是未来制造业发展的重大趋势和核心内容,也是我国制造业由大变强的根本路径。在众多领域中,航空航天是智能制造的重点发展领域,要实现航空航天装备的智能制造,必须要依托航空材料的加工。

钛合金呈银灰色,化学性质极其活泼。由于钛合金有重量轻、比强度高、塑性好、耐腐蚀性好等众多优良特性而被广泛用于制造军用飞机机身、航空发动机、液压系统、飞机起落架等关键结构的零部件,并且其使用比重正在逐年增长。据统计,航空航天方面应用的材料 70%以上都是钛合金。

高速切削是一个复杂的系统工程,涉及机床、刀具、工件、加工工艺过程参数及切削机理等诸多方面。高速切削的核心是有很高的切削速度,其最突出的优点是:有较高的生产效率、加工精度与表面质量,并能降低生产成本。高速铣削是指主轴转速高于 15000r/min 的高速切削加工。

1.1.1 钛合金的切削加工特点

1. 钛合金的主要物理力学性能

钛合金的主要物理力学性能为:熔点高,可达到 $(1668 \pm 10)^{\circ}\text{C}$;导热系数低,为 $8.79 \sim 12.58\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$,传热性能较差,在切削加工中切削热易集中;比热容

小，为 $545\sim 586\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ；线膨胀系数低，为 $8.5\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ；密度小，工业纯钛密度为 $(4.507\pm 0.005)\text{g}/\text{cm}^3$ ；强度高，工业纯钛的抗拉强度为 $264.6\sim 617.4\text{MPa}$ ，钛合金的抗拉强度为 $686\sim 1176\text{MPa}$ ，最高达 1764MPa ；硬度较高，工业纯钛的硬度为 $\text{HB}200\sim 295$ ，钛合金（退火）的硬度为 $\text{HRC}32\sim 38$ ；弹性模量低，钛合金（退火）抗拉弹性模量为 $1.078\times 10^5\sim 1.176\times 10^5\text{MPa}$ ；高温和低温性能优良。在高温下，钛合金仍能保持有效的力学性能。在低温下，钛合金的强度比常温时增加，有良好的韧性，即使在 -253°C 也能保持良好的韧性；耐热性能好。钛合金的热稳定性能较好，当温度达到 500°C 时仍能保持较高的硬度和耐磨度。钛合金的耐腐蚀性能优良，这是因为钛元素的化学性质较活泼，在空气中易与氧元素发生化学反应，从而在表面形成氧化物保护薄膜，这层薄膜能够提高钛合金的抗腐蚀性。此外，钛合金的比强度高。

几种金属材料在不同温度时比强度的对比如图 1.1 所示，从图中可以看出，钛合金在比强度方面相对于其他金属材料有很大的优越性。使用钛合金，可以在保证强度的前提下减轻结构的重量，这一特性对飞机制造业有重要的意义，推动了钛合金在航空航天工业中的广泛应用。

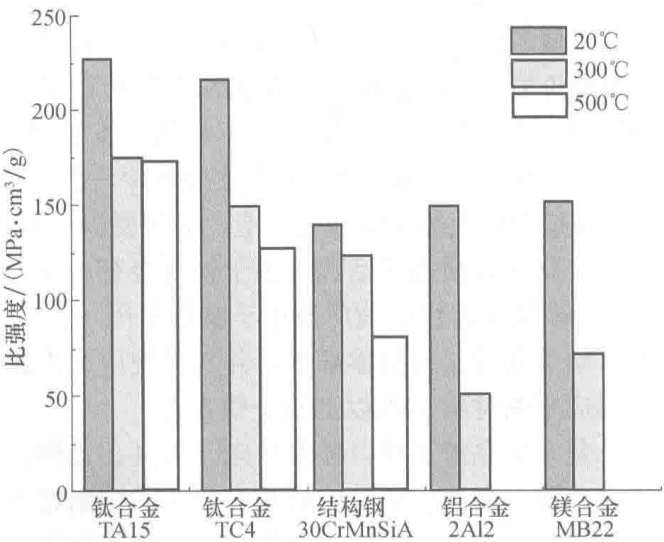


图 1.1 几种金属材料在不同温度下的比强度

2. 钛合金的切削加工特性

通常将钛合金分为 α 型、 β 型和 $\alpha+\beta$ 型。 α 型钛合金具有良好的高温性能、良好的组织稳定性以及良好的焊接性能，在耐热钛合金的组成部分中发挥着重要作用，但由于在常温下低强度和高塑性的制约，热处理强化很难实现。 β 型钛合金具有良好的塑性加工性能，在适当的合金浓度时，室温下力学性能的提高可以通

过热处理进行,是高强度钛合金发展的基础,但组织性能具有不稳定性。按照稳定状态组织类型分类, β 型钛合金可分为稳定型和亚稳定型,如图 1.2 所示。 $\alpha+\beta$ 型钛合金除了具有 α 型钛合金的优良性能,还具有 β 型钛合金的一些特有的性质。由于 $\alpha+\beta$ 型钛合金具有良好的性能和使用的普遍性,在实际生产和生活中得到了主要应用,其应用远大于 α 型和 β 型钛合金。

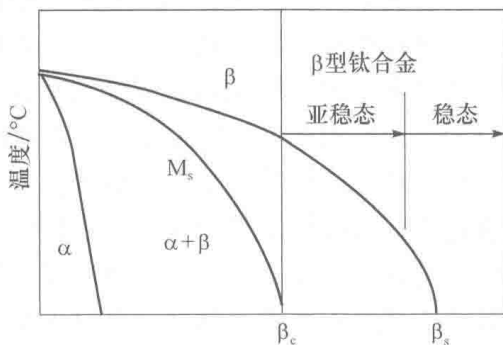


图 1.2 β 稳定剂含量和钛合金相组成的关系

钛合金的主要切削加工特性有:钛合金强度高、硬度大,要求加工设备功率大,

模具、刀具应有较高的强度和硬度;切屑与前刀面接触面积小,刀尖应力大。与 45#钢相比,钛合金的切削力虽然只有其 $2/3 \sim 3/4$,但钛合金切屑与前刀面的接触面积更小,只有 45#钢的 $1/2 \sim 2/3$,所以刀具的切削刃承受的应力更大,刀尖或切削刃容易磨损;钛合金的摩擦系数大,导热系数低,分别仅为铁与铝的 $1/4$ 和 $1/16$;这些因素使得钛合金的切削温度很高,造成刀具磨损加快并且影响加工质量;弹性模量小。在切削加工过程中,钛合金弹性模量较低,表面回弹量大,这不仅加剧了刀具后刀面与工件的接触面积,还导致了由于强烈摩擦和撕裂而造成的磨损。由于钛合金弹性模量低,切削加工时工件回弹大,容易造成刀具后刀面磨损的加剧和工件变形;化学活性高。钛合金在高温环境下,能与空气中的氧元素、氢元素、氮元素和水蒸气发生反应形成硬而脆的外皮,这层外皮可提高钛合金的表面硬度,因此当刀具切削工件时易在表面发生滑擦,加剧刀具磨损。在钛合金的切削加工中,工件材料极易与刀具表面黏结,加上很高的切削温度,刀具容易产生扩散磨损和黏结磨损,切削温度较高。

由上述钛合金的性能特点可知,钛合金传热性能差,当切屑脱离工件时,与前刀面的接触区域很小,在切削时产生的切削热集中在切削刃的较小范围内不易传出,从而会产生黏结磨损和扩散磨损;同时切屑的变形系数较小,且由于钛合金塑性较低,因此钛合金在切削加工中所得切屑的变形系数小于或接近于 1,这将会导致切屑脱离工件时在前刀面上滑动摩擦的路程有所增加,从而加速刀具的磨损。

1.1.2 钛合金加工中存在的问题

以高性能切削为代表的先进切削技术已经在航空航天、能源装备等重点发展行业中得到了迅速发展和广泛应用,并成为先进制造技术主体技术群中的关键技术。钛合金在航空工业领域主要用于制造航空发动机中的压气机盘、叶片、机箱

等关键构架。在客机上,钛合金主要用作机身的大梁、中段以及内臂板等结构架。钛合金在汽车工业上的应用主要分为两大类:一类是用来减少内燃机中往复运动件的质量;另一类是用来减少汽车的总质量。目前钛合金主要用于制造汽车发动机元件和底盘部件。钛合金在化工领域中主要用于制造金属阳极电解槽、脱氯塔、氯气冷却洗涤塔等。钛在含有氯化物、硫化物等腐蚀性较强的热水中具有较好的稳定性,因此钛及钛合金已广泛用于制造火力发电厂中热交换器的冷却管。用薄壁钛管代替铜镍合金管,可明显提高其使用寿命,因此,电力工业也逐渐成为钛材的主要应用领域。钛合金具有无毒、质轻、耐生物体腐蚀以及生物相容性好等特点,已成为一种理想的医用金属材料,目前广泛用于人工关节、整形外科、心脏外科等医学领域。钛合金在海水中具有优异的耐腐蚀性,是所有在天然水中耐腐蚀的金属,它在海水中的耐腐蚀性是不锈钢的 100 倍,且密度小、强度高、耐热性能好,逐渐取代铜合金和碳钢在海水淡化装置上的应用。目前钛合金在海水淡化装置中的应用主要包括热交换器、盐水加热器、冷凝器和管道等。

钛合金切削加工时存在如下问题:易产生非常薄的锯齿状切屑,且使切削刃承受波动变化的机械应力;由于钛合金较差的导热性,刀-屑接触长度小,切削刃会积聚高的切削温度;在高温下,钛与刀具材料和涂层材料之间的化学反应会加剧,黏结现象严重,使刀具迅速磨损。钛合金的加工实例如图 1.3 所示。

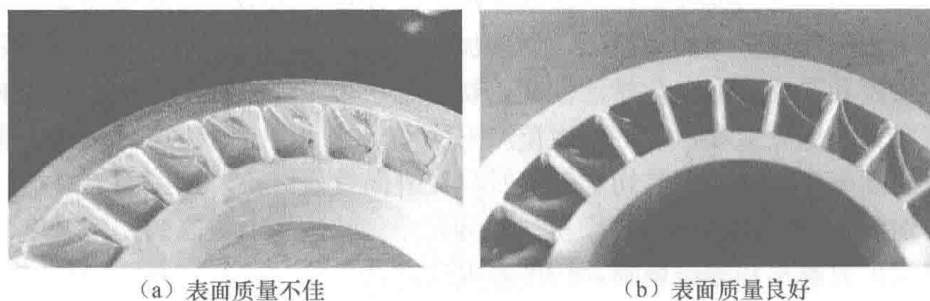


图 1.3 钛合金加工实例

由于陶瓷和聚晶立方氮化硼 (polycrystalline cubic boron nitride, PCBN) 刀具在切削钛合金时易与钛合金发生强烈的化学反应,使切削刃发生强烈磨损,造成崩刃等破损现象,降低切削性能,所以在切削钛合金时不选用陶瓷或 PCBN 刀具。当使用未涂层硬质合金刀具在切削加工钛合金时,刀-屑接触区的温度高达 1100°C ,由于加工钛合金过程中的切削力较小,因此高的切削温度是造成刀具磨损的主要原因。

飞机上的钛合金零部件除了部分可以锻造,大多数的部件为薄壁结构件,因此在实际加工中必须从整块坯料中去除大量的材料。钛合金结构件的结构特点增加了加工难度,这是因为钛合金整体结构件大都为薄壁深腔结构,切屑排出困难,

影响冷却润滑效果,并导致热量集中;刚性差,极易产生切削振动,一方面严重降低切削效率,另一方面严重影响加工表面质量完整性;加工过程中让刀、加工变形现象严重。由于薄壁结构特点,加工过程中极易产生让刀现象,影响加工精度。钛合金结构件的加工大多数都需要复杂的工艺流程,如粗加工、半精加工、精加工等。不同的加工工艺对夹具、刀具,甚至机床都提出了不同的要求,这显著提高了钛合金结构件的加工难度。在实际生产过程中,切削加工钛合金主要存在以下问题:

(1) 加工效率较低。钛合金是典型的难加工材料,故材料去除率很低。切削钛合金时通常采用高速钢或者硬质合金刀具。当高速钢刀具的切削速度超过 30m/min ,硬质合金刀具的切削速度超过 60m/min 时,刀具磨损加快,切削过程变得困难,而钛合金高速切削加工范围一般在 100m/min 以上。目前,国外铣削加工钛合金水平在 $100\sim 200\text{m/min}$ 范围,而国内仅有少数的科研单位和企业开展了初步研究,虽有一定的进展,但就钛合金切削加工的整体水平而言,切削速度依然很低,一般在 100m/min 以下,与国外相比还存在很大差距。

(2) 钛合金切削加工工艺数据库缺乏。在生产过程中,当安排具体工艺和选择切削用量时,通常是凭借经验和“试切”来确定工艺参数,因此需要商业化的工艺数据库来提供支持。

(3) 我国高速加工装备的国产化程度低下,制约了钛合金铣削加工水平的提高。

综上可知,目前钛合金高速铣削的基础研究不够深入,工艺规范不够完善,不足以指导生产实践。因此,深入研究钛合金高速铣削机理,提高钛合金高速加工工艺水平,是当前亟须解决的问题。

1.1.3 刀具表面介观几何特征

限制钛合金高速加工发展的主要原因是切削区域的剧烈摩擦和高的切削温度,为提高钛合金的加工效率,必须提高刀具的耐磨性。针对钛合金的加工难点,除了采用新型刀具材料、优化切削工艺以提高刀具的切削性能,设计刀具几何结构、开发新型刀具也能充分挖掘刀具的潜力。

刀具刃口钝圆半径(图 1.4)及表面微织构能有效提高刀具的耐磨性。常见刃口钝圆半径尺度变化范围主要集中在 $1\sim 100\mu\text{m}$ 。表面微织构尺度变化范围一般为几十到几百微米。上述两种刀具几何特征属于介观尺度范围(介观尺度介于宏观尺度、微观尺度之间,尺度范围为 $0.1\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$),可统称为刀具的介观几何特征(图 1.5)。本书以刀具介观几何特征(切削刃口圆角半径、表面微织构)为切入点,研究刀具介观几何特征抗磨损

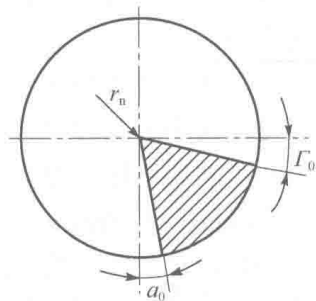


图 1.4 刃口钝圆

机理及其对钛合金高速铣削表面完整性的影响规律，为实现钛合金高效高质量加工提供理论依据，也对刀具的优化设计起到了支撑作用。

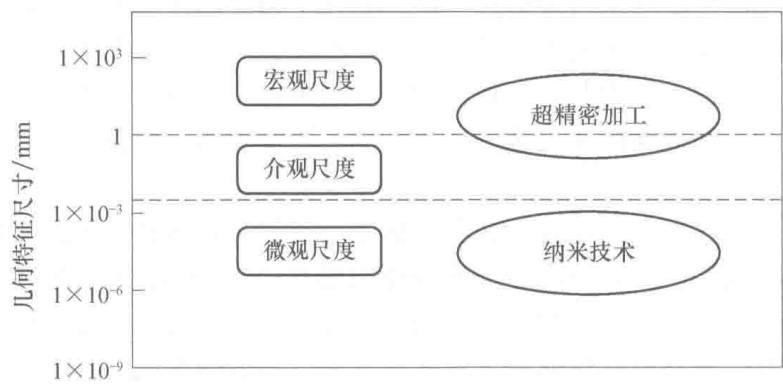


图 1.5 刀具介观几何特征

1.2 刀具刃口对钛合金切削过程影响规律研究现状

在精密切削中，由于受加工尺度与刀具特征参数的共同影响，将发生一系列特有的加工现象和机理。与常规切削条件相比，精密切削时，刀具前刀面参与切削的面积减小，刀刃附近区域将承担材料的主要去除工作，精密切削机理会发生改变，单位切削力显著上升，且刀具在切削过程中的受力、受热主要集中于切削刃处^[1]。此时刃口半径对于切削变形和材料去除的影响不容忽视。

刃口的钝圆半径是表征刃口的主要参数之一。刀具刃口半径的大小，反映了切削刃的锋利程度，影响着薄层切削、精加工的切削过程。由于普通切削加工时切削深度和进给量较大，切削刃钝圆半径远小于切削深度和进给量，所以可以不考虑切削刃钝圆的切削作用。这时，切削过程主要受工件材料本身晶体结构、晶格错位等缺陷分布规律的影响，刀具切削刃的锋利性对切削过程及表面质量的影响较小。

当切削深度减小到微米级别时，刀具切削刃钝圆半径有时接近甚至大于切削深度，关于刀具完全锋利的假设将不再有效。此时切削刃钝圆对微细切削加工过程的影响将不能忽略，微细切削加工的犁切力就被认为是由切削刃钝圆引起的。Armarego 和 Brown^[2]认为切削刃钝圆的存在引起了刀具和工件之间的犁切与滑移，由于刀具与切屑之间挤压、摩擦损耗了大量的切削功，从而产生了尺寸效应。通过分析试验所得的切削力数据可知，当切削深度减小时，切削加工从以切削为主的加工状态转变成以犁切滑移为主的加工状态。因此，切削刃钝圆的存在可能是引起尺寸效应的原因之一^[3,4]。

1.2.1 刀具刃口特征对切削加工的影响研究现状

在研究刃口对切削过程影响之前,首先对刃口几何结构及相关参数进行测量,目前测量刃口的方法很多。于彦波等^[5]论述了多种刃口测量的方法,主要包括:光切式显微镜测量法;采用无损光学摄影技术获得刃口截面廓形,从而求得刃口半径值;利用光学投影将刃口截形放大,再用密切圆测得刃口半径值;使用塑料树脂将刃口的形状复印下来,再对复印的廓形显微摄影,以此测量刃口半径。当采用光学系统测量时,会由于显微镜景深较小、放大倍数较低、测试装置复杂等,测量精度较低,结果不准确。卢文祥等^[6]采用塑性较大的金属对刀具刃口进行复印-显微摄影的测量研究,并对测量结果进行了统计分析,其结果表明,复印法是可靠性较高的一种刃口半径值的测量技术。

除了刃口半径,主截面内刃口形状也是刃口的特征之一。李儒荀^[7]给出了锐刃、倒棱刃、消振棱刃和钝圆刃几种刃口形状,在设计和选用时,可根据具体情况选用一种或某几种的组合。

哈尔滨工业大学吴永孝研究了在超精机械加工中,刃口半径在微量切削中的作用和刃口半径对加工过程的影响等问题^[8],认为可以用刃口钝圆半径较大的刀具切削切削深度小于刃口半径的零件,为微量切削的应用开辟了新的途径。杨军和吴能章^[9]采用微分几何的曲率分析方法,建立了斜角切削时刀具刃口的曲率半径在法剖面、主剖面与流屑平面内的表达式,讨论了实际刃口钝圆半径与刃倾角的关系,分析了曲率半径随刃倾角的变化趋势,并通过实例验证了刃口钝圆半径与刃倾角的关系,结果可供刀具设计参考。大连理工大学、北京理工大学等分别在超硬刀具刃口设计、刀具刃口钝化技术、刀具刃口加工工艺、刀具刃口轮廓检测等方面进行了研究,并在难加工材料的精加工和超精加工领域取得了较大进展^[10]。

各国学者对于在刀具刃口附近发生的切削加工机理给予了较多关注。例如,Yuan等^[11]从表面粗糙度、显微硬度、残余应力和加工表面层位错密度的角度分析了切削刃口半径对精密切削加工表面完整性的影响。Kim等^[12]建立了一种考虑切削刃口半径和弹性回复的正交切削模型,并对耕犁和滑动效应进行了量化分析。常规尺度切削时,由于给定的切削深度远大于刀具刃口半径,可认为切削刃口是绝对锋利的,应用经典的Merchant切削模型即可对一般的切削加工机理进行解释和描述。微细切削条件下,受刀具材料和制备工艺的制约,刃口半径等刀具特征尺度不能随加工尺度的减小而同步减小,切削刃绝对锋利的假定将不再成立,切削刃的截面通常表现为圆弧形,如图1.6所示。

李旦等^[13]研究了车削切屑形成过程,并提出一种新的试验方法用以研究切屑