

高速加工理论与应用

The High Speed Machining —
Fundamentals and Applications

〔德〕 Herbert Schulz

〔德〕 Eberhard Abele 编著



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

高速加工理论与应用

The High Speed Machining
—Fundamentals and Applications

〔德〕Herbert Schulz

〔德〕Eberhard Abele 编著

何 宁

图例(127)已编入各图

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统总结了德国达姆施塔特工业大学、南京航空航天大学以及国内外其他著名研究单位与企业在高速加工理论研究和实际应用中的研究成果。全书共分为高速加工理论基础和高速加工应用与实践技术两篇。在高速加工理论基础部分,给出了高速加工的定义,介绍了高速加工技术的发展和现状,重点论述了高速切削切屑变形机理、高速加工特性、高速加工中的刀具磨损与刀具涂层技术、高速加工安全性与刀具监控技术,以及高速切削条件下的机械加工过程模拟。在高速加工应用与实践技术部分,重点讨论了高速加工机床、高速加工中的刀具技术、高速加工 CAD/CAM 技术、高速切削加工冷却润滑技术,以及高速加工技术在航空航天制造领域和模具制造领域中的应用,并对高速钻削技术与高速切削经济性进行了简要分析。

本书可作为高等院校从事高速加工技术教学人员和机械制造专业本科生与研究生的参考书,也可作为从事高速加工技术领域研究的科研人员的参考书,并为从事高速加工技术领域应用开发的工程技术人员提供指导。

图书在版编目(CIP)数据

高速加工理论与应用/(德)舒尔茨(Schulz, H.), (德)阿贝勒(Abele, E.), 何宁编著. —北京:科学出版社, 2010
ISBN 978-7-03-028352-8

I. 高… II. ①舒…②阿…③何… III. 高速切削 IV. TG506.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 138775 号

责任编辑:陈 婕 / 责任校对:朱光兰
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

源海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

*

2010年7月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年7月第一次印刷 印张:23 1/2

印数:1—3 000 字数:460 000

定价:70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

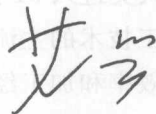
人类进入 21 世纪,作为先进制造技术的核心技术之一,高速切削技术已成为加工技术的主流,相对于传统加工技术,高速切削不仅大大提高了加工质量、加工效率和加工经济性,而且为面向绿色生态的可持续制造提供了先进的技术基础。开展高速加工理论研究,开发高速加工工艺,推广应用高速加工技术,是发展先进制造技术的重要任务,对于推动中国由制造大国向制造强国发展具有重要意义。

在高速加工从概念到实际应用的发展过程中,德国起到了关键作用:20 世纪 30 年代 Salomon 博士首先提出了高速切削概念;80 年代 Schulz 教授领导的高速机床、高速切削刀具、高速加工工艺及应用技术研究对于高速加工技术的普及应用发挥了重要作用。目前,德国的高速加工技术在国际上仍处于领先水平。Schulz 教授多年来一直关注中国的制造技术发展,曾多次访问中国,并被江苏省政府授予“江苏省友谊奖”。本人与 Schulz 教授和 Abele 教授首次于 2004 年在南京举行的首届高速加工国际会议上相见,相互进行了广泛的有关高速加工技术的学术交流。

南京航空航天大学何宁教授与 Schulz 教授和 Abele 教授已建立了 10 年的国际交流与合作关系,双方不仅多次互访交流,还联合倡议并主办了三届高速加工国际会议,联合承担中德政府间高性能加工合作研究。南京航空航天大学是我国高速加工技术领域重要研究力量之一,取得了许多有创新与有价值的研究成果。其中,中德间的国际合作交流无疑起到了非常积极的作用。这本《高速加工理论与应用》由 Schulz 教授、Abele 教授和何宁教授联合编著,这种密切的合作对于促进高速切削技术的发展,提高我国高速加工技术水平与推广应用将产生非常积极的作用。

该书总结了中德两国学者在高速加工及相关领域多年来的研究成果,其特点可以归纳为:**理论性**,书中论述了高速加工基础理论和加工特性;**实践性**,书中不仅探讨研究过程实践,更结合具体应用,介绍了实际技术;**系统性**,从切削机理、机床、刀具、CAD/CAM、冷却润滑、动态性能,以及加工经济性等方面,比较系统地讨论了高速加工所涉及的方方面面;**新颖性**,不仅介绍了高速加工技术新

的研究成果,还介绍了仿真模拟这一研究加工过程新方法等。该书对从事高速加工理论研究和工程应用的科技工作者来说是一本重要的参考书。因此,期待该书的出版可以为我国高速切削技术的发展、扩大国际间学术交流以及人才培养做出重要贡献。



2010年5月6日

前 言

早在 1980 年,德国达姆施塔特工业大学(Darmstadt University of Technology, TU-Darmstadt)生产工程、工艺与机床研究所(Institute of Production Management, Technology and Machine Tools, PTW, 现名为生产管理技术和机床研究所)成立了欧洲第一个致力于高速加工(HSM)的研究机构,开始系统全面地研究与高速加工相关的机床刀具与工艺技术。当时的一些专家预言该技术在经济上是不可行的。但当时 Schulz 教授仍然对这项乌托邦式的新兴制造技术充满信心,理论联系实际,开展了大量深入和系统全面的研究。20 世纪 80 年代,PTW 同步开展了高速加工工艺、新型高速加工机床、机床部件、高速刀具以及相应的 CAD/CAM 系统等研究工作。如今,PTW 以作为这种新型加工技术的开创者而自豪。

Schulz 教授的继任者 Abele 教授继续深入研究高速加工技术,并预言了该技术未来的经济效益和改善零件质量的广阔前景,特别是对于铸模和冲模,以及汽车零部件的加工质量。在 2000 年,Abele 教授联合欧洲一些专家设立了“高速加工奖”。目前,该奖项已成为欧洲衡量高速加工技术进步的标志。

自 20 世纪 90 年代以来,高速加工首先在欧美与日本的工业界得到应用,并不断普及提高,取得了巨大的经济效益。中国在 20 世纪末开始深入研究高速加工技术,到 21 世纪第一个十年的中期首先在航空航天制造业中成功应用高速加工技术,随后在模具、汽车等工业领域逐步推广应用。目前,高速加工技术不仅在学术界成为研究热点,在工业界也已形成新的发展趋势。尽管如今的高速加工已成为最新的制造技术,越来越多地应用于各种加工过程,但要更广泛地推广应用高速加工技术,必须不断总结和普及高速加工的相关理论与知识。

南京航空航天大学在 20 世纪 80 年代中期开始有关难加工材料高速切削工艺研究,2000 年引进了先进的高速加工中心,对高速加工工艺及相关技术开展了深入研究,同时与德国达姆施塔特工业大学 PTW 建立了交流与合作关系。近十年间,Schulz 教授和 Abele 教授多次访问中国。2004 年,Schulz 教授与何宁教授共同发起组织了高速加工国际会议(ICHSM),并约定该会议每两年在中国定期举行一次,至今 ICHSM 会议已在中国举办了三届。近几年,在中华人民共和国科学技术部(简称科技部)和德国教育与研究部共同支持下,达姆施塔特工业大学和南京航空航天大学联合承担了中德政府间国际合作项目“基于网络和高性能切削专家系统”,对包括高速切削技术在内的高性能加工工艺技术与应用技术进行了较全面深入的研究。中德之间密切的学术交流和科研合作对于推动高速加工技术

的发展及其在中国工业界的普及应用起到了非常积极的促进作用。

基于这种交流与合作,希望通过总结各自在高速加工领域的研究成果和工业界应用经验,出版本书以进一步促进高速加工的发展与应用。与本书相关的高速加工基础理论与应用技术的研究项目有:中国方面,科技部中德政府间科技合作项目(2008DFA71750),国家科技支撑项目(2008BAF32B09),国家自然科学基金项目(50175051、10477008、50775114),江苏省国际合作项目(BZ2006053)、江苏省自然科学基金项目(BK2007198),航空科技支撑项目(61901090302),航空科学基金项目(00H52068、20071652013),以及两项国家航空航天领域重点项目;德国方面,则汇集了德国达姆施塔特工业大学在德国政府和工业界的支持下三十多年在高速加工技术领域的研究成果。

本书由 Schulz 教授、Abele 教授和何宁教授共同主持编著,汇集了德国达姆施塔特工业大学和南京航空航天大学,以及国内外其他著名研究单位与企业在高速加工理论研究和实际应用中的研究成果。具体参加编著的人员有 Schulz 教授(第 1、7、11 章)、何宁教授(第 2、3、11 章)、Abele 教授(第 4、14 章)、Alexander Versch 博士(第 5 章)、Jürgen Fleischer 教授(第 6 章)、李亮教授(第 8、13 章)、Klaus Schützer 教授(第 9 章)、赵威副教授(第 10 章)和 Jens Elzenheimer 博士(第 12 章)。此外,Bechle 与 Schmidt 也参与了第 6 章的撰写工作,Helleno 与 Stroh 参与了第 9 章的撰写工作,Hohenstein 与 Tschannerl 参与了第 12 章的撰写工作,史琦、田佳、卞荣、包杰等参与了本书英文章节的翻译与校对工作。全书中文版由何宁教授统稿。全书文字整理工作由赵威副教授承担。本书涉及高速加工领域的三类内容:第一类总结了高速加工的基本理论和最新知识;第二类重点介绍如何实现高速加工;第三类介绍高速加工在生产中的实际应用。本书既可作为相关专业的教材,也可作为加工行业的科技工作者的参考书。真诚地希望通过本书的介绍,让读者掌握高速加工的基本原理和技术,更深入地研究高速加工机理,更好地应用高速加工技术。

本书出版获得中国科学院科学出版基金资助。在此谨向科技部、国家自然科学基金委员会、中国科学院、江苏省科学技术厅、中国航空工业集团公司、德国教育与研究部、科学出版社,以及参与本书撰写、编辑、翻译与校对等工作的全体人员致以衷心的感谢。

限于作者的水平,书中难免有不妥之处,诚恳希望专家和读者批评指正。

Herbert Schulz,PTW

Eberhard Abele,PTW

何宁,南京航空航天大学

2010 年 5 月

目 录

序

前言

第一篇 高速加工理论基础

第 1 章 导论	3
参考文献	10
第 2 章 高速切削切屑变形机理	13
2.1 高速切削时材料的变形特点	13
2.1.1 切屑变形的一般规律	13
2.1.2 高速切削条件下的切屑形态	15
2.1.3 高速切削难加工材料的切屑变形特点	18
2.2 集中剪切滑移的形成模型分析	21
2.2.1 镍基高温合金塑性变形的基本机理	21
2.2.2 镍基高温合金的集中剪切滑移机理	22
2.2.3 集中剪切滑移的形成模型分析	27
2.3 集中剪切滑移切削模型与切削方程式	33
2.3.1 典型切削模型	33
2.3.2 集中剪切滑移的切削模型假设	36
2.3.3 集中剪切滑移的切削方程式	37
2.4 高速切削切屑变形的有限元模拟分析	40
2.4.1 钛合金切削过程建模	41
2.4.2 锯齿状切屑形成过程的有限元模拟与分析	44
参考文献	52
第 3 章 高速加工特性	54
3.1 高速切削的切削力	54
3.1.1 铣削力的特征和测量	54
3.1.2 铣削速度对铣削力的影响	59
3.1.3 每齿进给量对铣削力的影响	61

3.1.4 径向切深对铣削力影响	63
3.1.5 刀具磨损对铣削力的影响	64
3.2 高速切削的热力学问题	68
3.2.1 高速切削时的切削热与切削温度的特点	68
3.2.2 切削温度的测量	71
3.2.3 难加工材料的高速切削温度实验与分析	77
3.2.4 切削温度对加工过程的影响	83
3.3 高速切削的加工表面完整性	84
3.3.1 高速切削条件下的已加工表面粗糙度	84
3.3.2 高速切削条件下的已加工表层加工硬化	87
3.3.3 高速切削条件下的已加工表层金相组织	90
3.3.4 高速切削条件下的已加工表层残余应力	91
参考文献	92
第4章 高速加工中的刀具磨损与刀具涂层技术	94
4.1 高速加工参数对刀具磨损的影响	94
4.2 高速加工中刀具磨损的测定与分析	96
4.3 高速加工应用中的刀具涂层	100
参考文献	104
第5章 高速加工安全性与刀具监控技术	107
5.1 高速加工安全性基本概念	107
5.2 高速加工安全性分析	108
5.3 高速加工危险源分析	109
5.4 高速加工安全装置	111
5.4.1 主动安全防护装置	112
5.4.2 被动安全防护装置	113
5.5 高转速刀具的安全性分析	117
5.5.1 基于安全技术的刀具分类及危险分析	117
5.5.2 高速铣削刀具的安全标准	119
5.5.3 高速切削刀具安全标准测试方法	120
参考文献	121
第6章 高速切削条件下的机械加工过程模拟	123
6.1 加工过程的分析模拟	123
6.1.1 描述加工过程的解析法	123

6.1.2 分析模拟在齿轮刮削过程的应用	124
6.2 高速加工数值模拟	128
6.2.1 切削过程有限元模拟研究现状	130
6.2.2 有限元仿真模型	131
6.2.3 切削加工模拟	132
6.2.4 刀具磨损有限元模拟	138
参考文献	143

第二篇 高速加工应用与实践技术

第7章 高速加工机床	151
7.1 高速加工机床设计的关键要素	151
7.2 高速切削机床关键部件	153
7.2.1 高频电主轴	153
7.2.2 高动态进给驱动	154
7.2.3 直线电机设计原理	156
7.2.4 安全性要求	159
7.3 高速加工机床的选购	160
7.3.1 调研	160
7.3.2 订购准备工作	161
7.3.3 交货期间的工作	164
7.3.4 安装和生产启动	164
参考文献	165
第8章 高速加工中的刀具技术	166
8.1 高速切削刀具面临的挑战	166
8.2 高速切削刀具材料	167
8.2.1 高速切削刀具材料的类型	167
8.2.2 高速切削刀具材料的合理选择	183
8.3 高速切削刀具连接技术	187
8.3.1 高速切削刀具系统	187
8.3.2 机床主轴与刀具系统的连接	188
8.3.3 刀柄与刀具的连接	196
8.4 高速切削刀具的其他技术	200
参考文献	203

第9章 高速加工 CAD/CAM 技术	207
9.1 NC 编程	207
9.2 NC 程序对高速切削技术的影响	209
9.2.1 CAD/CAM 系统间的数据传输	211
9.2.2 CAM 系统公差	214
9.2.3 NC 程序刀具轨迹插补方法	217
9.3 NC 程序的数据传输	232
参考文献	234
第10章 高速切削加工冷却润滑技术	236
10.1 高速切削过程中冷却润滑方式的分类	236
10.1.1 外冷/内冷切削	236
10.1.2 气/液/固单态及多态混合冷却润滑切削	237
10.1.3 高温/常温/低温/超低温冷却润滑切削	238
10.1.4 干式/微量润滑/湿式切削	239
10.2 高速切削过程中切削介质的作用机理	240
10.2.1 切削介质的冷却作用	240
10.2.2 切削介质的减摩润滑作用	245
10.2.3 切削介质的其他作用	249
10.3 新型高速切削冷却润滑方法及其应用	249
10.3.1 低温风冷切削技术	249
10.3.2 微量润滑切削技术	253
10.3.3 低温微量润滑切削技术	260
10.3.4 其他新型冷却润滑技术	266
参考文献	270
第11章 高速加工经济性分析	272
11.1 高速切削经济性分析概述	272
11.2 高速切削经济性目标函数	276
11.3 高速切削经济效益分析实例	278
参考文献	284
第12章 高速钻削及其动态特性分析	286
12.1 高速钻削加工简介	286
12.2 高速钻削加工的主要影响因素	288
12.2.1 高速钻削刀具	288

12.2.2 高速钻削的冷却	289
12.2.3 机床的影响	289
12.3 孔加工质量及钻削过程稳定性	290
12.3.1 切削参数对加工过程稳定性的影响分析	291
12.3.2 加工过程稳定性与钻孔质量的相互关系	292
12.3.3 切削参数对钻孔质量的影响分析	295
参考文献	296
第 13 章 高速加工应用技术	298
13.1 高速加工中的切削参数选择	298
13.2 高速加工数控编程策略	312
13.3 高速铣削加工中的冷却润滑方式选择	320
13.4 高速加工在模具制造业中的应用	323
13.4.1 现代模具制造的特点	323
13.4.2 模具高速加工工艺及策略	324
13.4.3 模具高速加工示例	325
13.5 高速加工在航空制造业中的应用	333
13.5.1 航空零件的结构及工艺特点	333
13.5.2 航空零件高速加工工艺及策略	337
13.5.3 航空零件高速加工示例	342
参考文献	347
第 14 章 展望	350
14.1 高速切削技术的发展前景	350
14.2 推动未来高速切削应用的关键技术	352
14.3 高速加工技术与增材加工技术的竞争	357
参考文献	358

第一篇 高速加工理论基础

第 1 章 导 论

如何将高速加工 (high speed machining, HSM) 技术或高速切削 (high speed cutting, HSC) 技术更好地应用于制造业, 长期以来一直被人们关注与探讨。直至今日, 高速切削技术仍然是机械加工领域中的一项前沿技术。

从高速加工这一新型加工理念的提出, 到其能够在工业领域得以推广应用, 大约经过了六十多年的历程。限制高速切削技术推广应用的主要原因是当时的生产设备难以满足高速加工的相关要求。

1931 年 4 月 27 日, Friedrich Krupp 因“Method of Machining Metal or Materials Behaving Similarly When Being Machined with Cutting Tools”而被德国授予专利^[1] (专利号 No. 523594)。Salomon 博士研究发现: 当切削速度提高到一定程度时, 切削温度不升反降 (见图 1.1)。实际上 Salomon 博士的最初研究目的只是为了提高材料去除率。

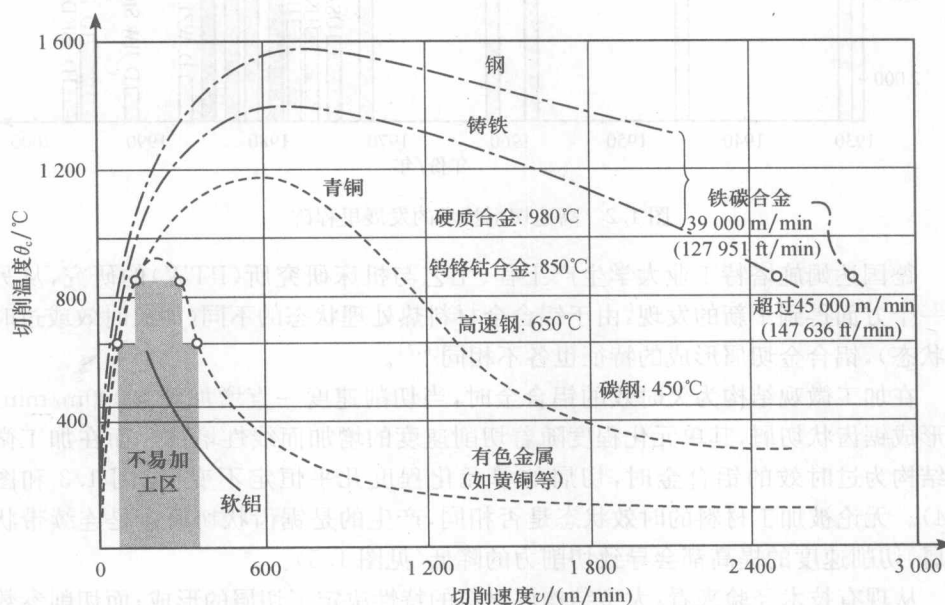


图 1.1 Salomon 博士的切削温度与切削速度理论

大约 20 年后, 即 20 世纪 50 年代初, 有关高速切削技术的研究被再一次在世

界范围内掀起。当时仍然没有高转速的高速切削机床,于是诸多研究采用了弹射碰撞试验方法,自此进入了弹射碰撞高速切削研究阶段(见图 1.2)。该试验利用空气炮装置将高速运动的样件划过静止的刀刃,从而实现高速切削。试验分析结果有了新发现,即在高的切削速度下,切屑的形成条件不同于传统的金属切削^[2]。据称,当切削速度超过一定的数值以后,塑性材料的变形超过了塑性变形特性区时,切削区材料会因脆性断裂而形成切屑^[3~5]。

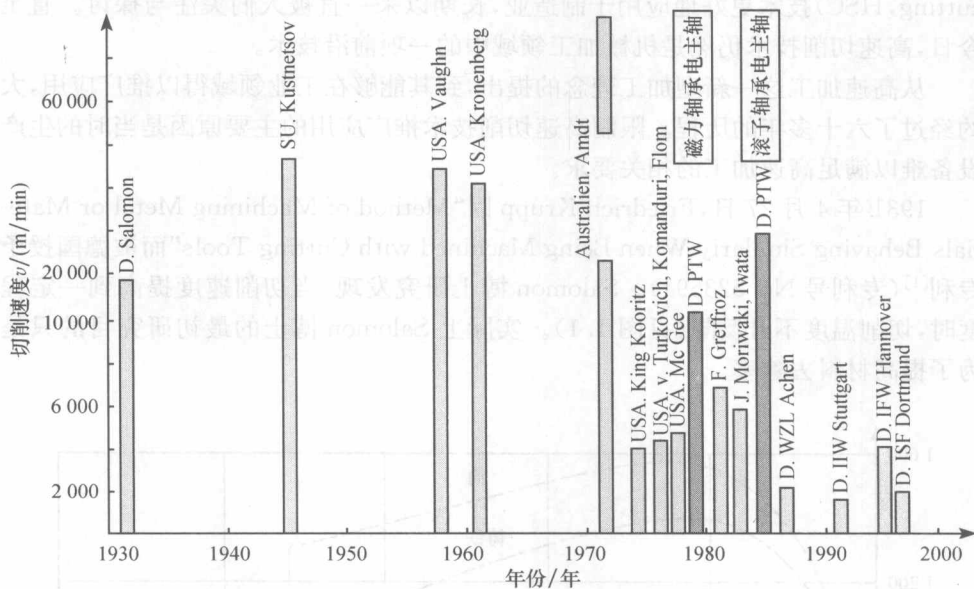


图 1.2 高速切削技术的发展里程碑

德国达姆施塔特工业大学生产工程、工艺与机床研究所 (PTW) 的研究,从另外一个方面得到了新的发现:由于铝合金材料热处理状态的不同(如欠时效或过时效状态),铝合金切屑形成的特征也各不相同^[6,7]。

在加工微观结构为欠时效的铝合金时,当切削速度一直增加到 7 000 m/min,会形成锯齿状切屑,其单元化程度随着切削速度的增加而线性增加。而在加工微观结构为过时效的铝合金时,切屑的单元化程度几乎恒定不变(见图 1.3 和图 1.4)。无论被加工材料的时效状态是否相同,产生的是锯齿状切屑还是连续带状切屑,切削速度的提高都会导致切削力的降低(见图 1.5)。

从现有技术经验来看:大型结构件材料的特性决定了切屑的形成;而切削参数如切削速度 v 、进给速度 v_f 等对切屑的单元化程度也有重要影响^[8]。对于“切屑的单元化程度对切削力的影响并不显著”这一现象,直到 2000 年以后才发现了材料时效的重要性。

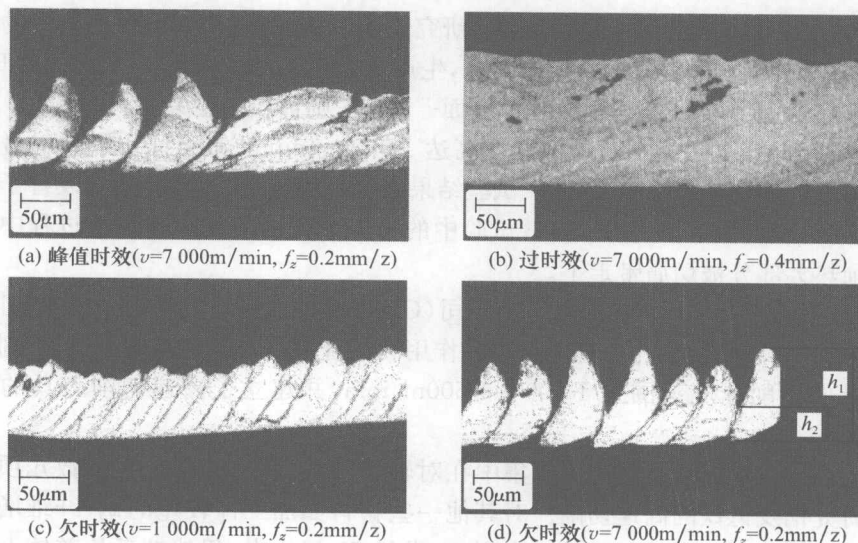


图 1.3 高速切削 AlZn-MgCu 铝合金时的切屑截面形貌

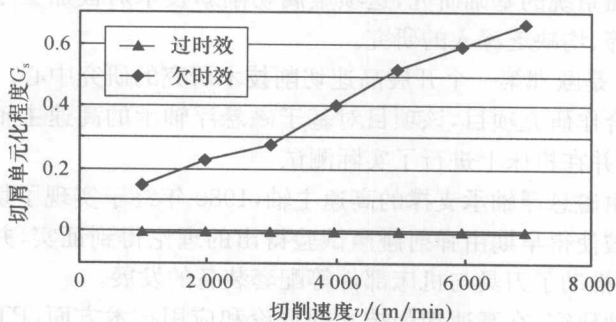


图 1.4 不同时效状态下切削速度对切屑单元化程度的影响

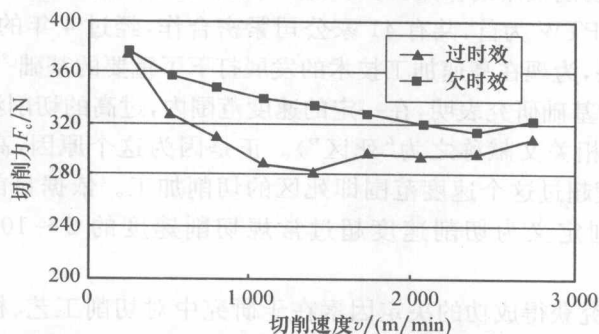
(端面铣削: $a_p=4\text{mm}$, $a_e=5\text{mm}$, $f_z=0.2\text{mm/z}$; AlZn-MgCu 铝合金)

图 1.5 不同时效状态下切削速度对切削力的影响

(外圆车削: $a_p=2\text{mm}$, $f=0.2\text{mm/r}$; AlZn-MgCu 铝合金)