



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT

“十二五”国家重点图书出版规划项目

先进制造技术与应用前沿

高速切削技术

何 宁

等 编著

上海科学技术出版社



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION

“十二五”国家重点图书出版规划项目
先进制造技术与应用前沿

高速切削技术

何 宁 等 编著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

高速切削技术 / 何宁等编著. — 上海: 上海科学技术出版社, 2012. 1

(先进制造技术与应用前沿)

ISBN 978-7-5478-1082-8

I. ①高… II. ①何… III. ①高速切削 IV. ①TG506.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 267642 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

常熟市兴达印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张: 27.25 插页: 4

字数: 500 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-1082-8/TG·52

定价: 95.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换



ynopsis

内容提要

本书系统总结了当前主要研究单位与重点企业在高速切削理论和实际应用中的先进成果。

全书共八章。第一章介绍高速切削的发展历程、定义、特点以及应用现状;第二章介绍高速切削时的切削变形、切削力、切削热与切削温度、刀具磨损,以及表面完整性等高速切削机理问题;第三章介绍高速切削机床、刀具、优化策略与数控编程技术等高速切削基础问题;第四章至第七章针对高速切削冷却润滑技术、高速切削工艺技术与应用、高速切削过程智能监测技术以及高速切削工艺知识管理与应用技术等进行了重点介绍;第八章对切削技术的现状进行了总结,并对未来切削技术的发展进行了展望。

本书可为从事高速切削技术研究的科研人员提供参考,为从事高速切削技术应用开发的工程技术人员提供指导,也可作为高等院校从事高速切削专业研究生研究和学习的参考书,同时也可作为大学本科机械工程专业高速切削技术的教材。

编撰委员会

先进制造技术与应用前沿

主 任 路甬祥

副 主 任 李蓓智 曹自强

委 员 (按姓氏笔画排序)

王庆林 石来德 包起帆 严仰光

杜宝江 李 明 李 春 李希明

何 宁 何亚飞 陈 明 阎耀保

葛江华 董丽华 舒志兵

学术专家 艾 兴 汪 耕 周勤之

前言

高速切削技术是先进制造技术群中的主流技术,已经在工业生产中得到大量应用。充分发挥高速切削技术的优势,利用高速切削机床的生产能力,更好地服务于中国的国民经济和国防安全,需要对高速切削理论和应用技术进行更为深入的研究。

南京航空航天大学对航空难加工材料的高速切削工艺研究迄今已持续30多年,2000年引进了先进的高速加工中心后,在高速铣削机理、工艺及相关技术等方面开展了深入研究,研究方向主要集中于:薄壁零件的高速切削、钛合金和高温合金的高速切削、绿色高速切削、加工变形预测与控制、智能加工和微细铣削等;研究项目得到国家科技部、工业与信息化部、国家自然科学基金委员会、江苏省、航空工业集团公司、航空航天工业企业等政府部门和单位的大力支持。

在十多年的研究与开发过程中,南航还同德国达姆施塔特工业大学PTW研究所建立了交流与合作关系。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四届。2010年南京航空航天大学成为欧洲高速加工会议(HSM Conference)的主办单位之一。近几年,在中国科学技术部和德国教育研究部共同支持下,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“基于网络和知识的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切削技术的发展及在中国工业界的普及应用起到了非常积极的促进作用。

本书由何宁教授主持编著,全书内容集结了南京航空航天大学多年来在高速切削技术方面的研究成果,以及国内外其他著名研究单位与企业在高速切削理论研究和实际应用中的研究成果。参加编著的作者有何宁教授(第一、二、八章),李亮教授(第三、六章),赵威副教授(第四、七章),杨吟飞博士(第五章);田佳、史琦、赵孟、战忠波、卞荣、李欣、苏永生、孟龙晖、张峥等博士研究生参与了本书部分章节的资料整理工作。全书由何宁教授统稿,全书文字整理工作由赵威副教授承担。本书涉及高速切削基本理论、高速切削工艺、高速切削过程监控与工艺知识管理等内容,既可作为相关专业的教材,也适用于加工行业的科技工作者。真诚地希望本书能有益于读者深入研究高速切削机理,更好地应用高速切削技术。限于作者的水平,书中的缺点和不足在所难免,诚恳希望专家和读者批评指正。

本书有关高速切削基础理论与应用技术的研究,得到了中国国家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 973 项目(2009CB724401)、国家科技重大专项(2009ZX04014 - 043)、国家自然科学基金项目(50175051、10477008、50775114)、国家十五预研项目(413. 18. 1. X. X)、国防基础科研重大项目(Z0500B002 - XX)、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)等国家和地方政府科技项目的资助以及一大批工业企业的支持。本书出版由国家出版基金资助,在此谨向国家科技部、工业与信息化部、国家自然科学基金委员会、江苏省科技厅、中国航空工业集团公司、上海科学技术出版社以及参与本书撰写、编辑与校对等工作的全体人员致以衷心感谢。

作者

Contents

目 录

第一章 绪论 1

第一节 高速切削发展历程	1
第二节 高速切削技术及特点	5
第三节 高速切削技术应用现状	7
参考文献	8

第二章 高速切削机理 11

第一节 高速切削变形	11
一、高速切削时的切屑形态和切屑变形特点	11
二、高速切削锯齿形切屑形成机理	14
三、绝热剪切变形的剪应变、剪应变率和本构行为	17
四、高速切削变形分析仿真与实验研究	21
第二节 高速切削时的切削力	26
一、高速铣削力的特征和测量	27
二、高速铣削力的变化规律	29
三、高速铣削力建模	33
第三节 高速切削时的切削热与切削温度	38
一、高速切削时的切削热与切削温度的特点	38
二、切削温度与切削热的测量	41
三、高速切削温度的变化规律	46
第四节 高速切削时的刀具失效形式与机理	50
一、高速切削刀具的磨损形态与失效形式	50

二、高速切削刀具磨损机理	52
三、高速切削参数对刀具磨损的影响	56
第五节 高速切削已加工表面完整性	58
一、已加工表面完整性概念	59
二、高速切削条件下的已加工表面粗糙度	62
三、高速切削条件下的已加工表层加工硬化	63
四、高速切削条件下的已加工表层金相组织	64
五、高速切削条件下的已加工表层残余应力	66
参考文献	70

第三章 高速切削基础 75

第一节 高速切削机床	75
一、高速电主轴	75
二、高动态进给驱动	76
三、危险源、安全防护装置与状态监控	80
四、高速切削机床的选购	86
第二节 高速切削刀具	88
一、高速切削刀具材料	88
二、高速切削刀具涂层	96
三、高速切削刀具连接系统	105
四、高速切削动态精度	113
五、高速切削刀具安全标准与测试	114
第三节 高速切削技术优化策略	119
一、高速切削参数优化策略	119
二、高速切削刀具的优化选择	122
三、高速切削用量的优化选择	127
四、高速切削冷却润滑方式的优化选择	142
第四节 高速切削数控编程技术	145
一、高速切削数控编程策略	145
二、面向工艺特征的高速切削走刀方式的优化选择	153
参考文献	158

第四章 高速切削冷却润滑技术 164

第一节 高速切削冷却润滑技术的分类及特点	164
一、干式切削技术	164
二、自润滑刀具在高速切削中的应用	167
三、绿色湿式高速切削技术	170
四、微量润滑高速切削技术	171
第二节 高速切削冷却润滑机理	174
一、切削介质的冷却作用机理	174
二、切削介质的润滑作用机理	178
第三节 绿色冷却润滑技术与应用	182
一、绿色冷却润滑技术的基本概念及其特点	182
二、低温微量润滑技术及其应用	183
三、基于微量润滑与表面微织构双重效应的高速切削 冷却润滑技术	191
四、基于微量润滑的切削环境空气质量安全测试与分析	198
参考文献	218

第五章 高速切削工艺技术与应用 222

第一节 高速硬切削技术	222
一、硬切削技术的特点	222
二、高速硬切削对刀具的要求	223
三、高速硬切削试验与分析	225
第二节 高速插铣技术	240
一、插铣法的特点与应用	240
二、高速插铣法的研究现状	242
三、难加工材料高速插铣的基础试验与分析	243
第三节 高速大进给切削技术	252
一、大进给切削技术的特点与应用	252
二、高速大进给切削技术的研究现状	255
三、减薄切屑的大进给粗铣加工技术	257

四、难加工材料高速大进给切削技术的基础试验与分析	260
第四节 薄壁结构高速切削技术	262
一、薄壁结构的工艺特点分析	262
二、薄壁结构的加工变形建模	263
三、薄壁结构的加工工艺研究	267
第五节 基于振动控制的高速切削工艺技术	276
一、铣削加工的稳定性预测与影响因素研究	276
二、薄壁零件加工试验与颤振控制研究	289
三、不等距铣刀刀齿优化设计及抑振的试验研究	296
第六节 面向整体应力变形控制的高速切削工艺技术	306
一、整体结构件的加工变形	306
二、零件整体加工变形控制的基本思路	307
三、基于内应力的整体结构件的加工变形控制	308
参考文献	313

第六章 高速切削过程智能监测技术 316

第一节 高速切削过程监控对象与一般监测过程	316
一、监控的主要对象	316
二、监控系统的组成	317
第二节 高速切削过程智能监测策略	318
一、加工监控中的智能技术	318
二、加工过程智能监控关键技术	319
第三节 高速切削过程智能监测系统的自动化构建	323
一、基于典型刀具磨损曲线分析的智能监测系统	323
二、自动敏感特征提取	326
三、基于马氏距离法的刀具磨损状态识别	331
四、刀具磨损状态监测试验	333
第四节 监测系统与专家系统的融合	343
一、专家系统与知识获取	343
二、神经网络规则提取技术	345
三、基于模糊神经网络模型的规则提取应用	346

四、基于知识网络模型的规则提取应用	353
参考文献	358

第七章 高速切削工艺知识管理及其应用技术 363

第一节 高速切削工艺知识管理基本概念	363
一、加工工艺知识及其管理	363
二、加工工艺知识管理的必要性及其管理手段	365
第二节 高速切削工艺数据库系统	367
一、数据库系统基本概念与现状分析	367
二、高速切削工艺数据库基本架构	370
三、高速切削工艺数据库系统设计与开发	372
第三节 高速切削工艺专家系统	385
一、专家系统基本概念与现状分析	385
二、高速切削工艺专家系统基本架构	388
三、高速硬铣削工艺专家系统设计与开发	389
第四节 高速切削工艺知识管理的应用	407
一、与其他软件集成	407
二、高速切削工艺数据库与专家系统的应用	409
参考文献	413

第八章 展望 416

第一节 制造技术的发展与挑战	416
第二节 未来切削技术发展展望	418
一、传统切削方式仍占有一席之地	418
二、高速切削技术将更加普及	418
三、高性能切削技术将引领现代切削加工的发展	419
四、微细切削将是实现微小型零件加工的最佳途径之一	420
五、提升先进切削工艺技术服务水平迫在眉睫	421
参考文献	422

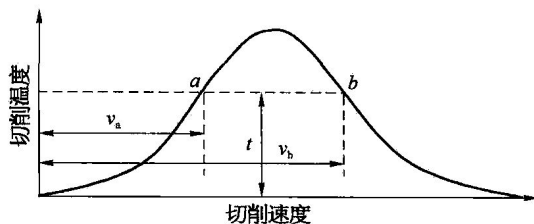
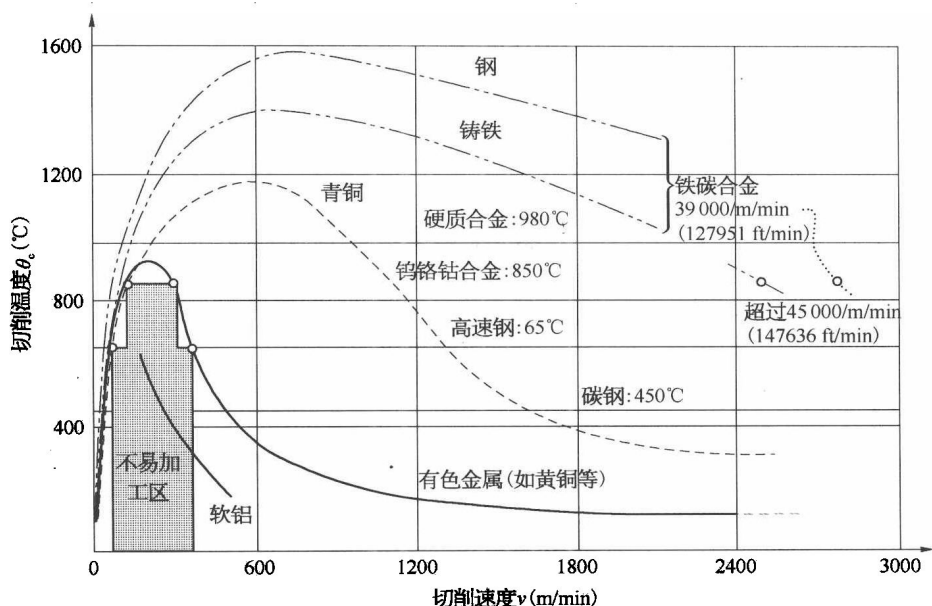
高速切削(High Speed Cutting, HSC)技术已经在航空、航天、汽车和模具等行业得到广泛应用,持续受到学术界和工业界的重视,高速切削技术既是机械加工领域学术界的一项前沿技术,也是工业界的实用技术。

第一节 高速切削发展历程

从高速切削理念的提出,到工业领域的推广应用,高速切削大约经过了 60 多年的发展历程。机床、刀具技术的进步是高速切削加工技术获得成功应用的关键动力。

1931 年 4 月 27 日,Friedrich Krupp AG 被授予德国专利“Verfahren zur Bearbeitung von Metallen oder bei einer Bearbeitung durch schneidende Werkzeuge sich ähnlich verhaltenden Werkstoffen”(“具有相似切削加工特性的金属材料的加工工艺”)。该专利指出^[1]:“实验结果表明,以切削速度和切削温度分别为 x 轴、 y 轴绘制曲线,起初随着切削速度的增加切削温度呈现上升的趋势,随着切削速度的进一步增加,切削温度上升到某一峰值点后不再上升,反而出现下降的趋势,并且对应不同的材料其峰值点是不同的。”此结论被后人称为萨洛蒙假设(Salomon's Hypothesis),成为高速切削第一个里程碑。

图 1-1 所示曲线就是萨洛蒙的专利所描述的曲线。如图所示,对于同一切削温度 t ,存在两个切削速度 v_a 、 v_b 与之对应,小于 v_a 的切削速度范围为传统的切削区,大于 v_b 的切削速度范围为高速切削区,专利指出刀具在这个范围内能够实现切削,如果条件允许给出更高的切削速度,则刀具的切削能力可能会得到维持,而中间区域则是尽量避免进行切削加工的范围,俗称“死谷”(dead valley)。图 1-2 所示就是通常文献所指的萨洛蒙根据自己的实验数据绘制的不同材料的切削温度与切削速度的关系曲线^[2],其中的实线部分是实验数据所得,其余则是推论所得。

图 1-1 萨洛蒙(Salomon)曲线^[1]图 1-2 切削温度与切削速度的关系^[2]

由于萨洛蒙当年的实验资料毁于战火, 现已无法得知当年萨洛蒙的实验细节。图 1-1 所示的切削温度变化趋势如果是指已加工表面温度, 则与多数研究者的研究成果一致; 若为刀—屑接触区平均温度或剪切区温度, 则难以验证。后来的大量高速、超高速切削实验以及仿真分析结果表明: 随着切削速度的提高, 总的切削功增加, 刀具参与切削区域的温度趋上升势并逐渐趋缓, 均无证据表明存在切削温度“死谷”。

20 世纪 50 年代初期, 为提高金属切削效率, 在世界范围开展了高速切削技术的基础研究。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实验方法, 自此进入了弹射碰撞高速切削研究阶段, 如图 1-3 所

示。该实验利用空气炮装置将高速运动的样件通过静止的刀刃,从而实现了高的速度下的切削,目前这仍是进行高速、超高速切/磨削研究的主要实验手段。实验结果分析有了新发现,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^[3]。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塑性特性区,切削区材料会因脆性断裂而形成切屑^[4-6]。

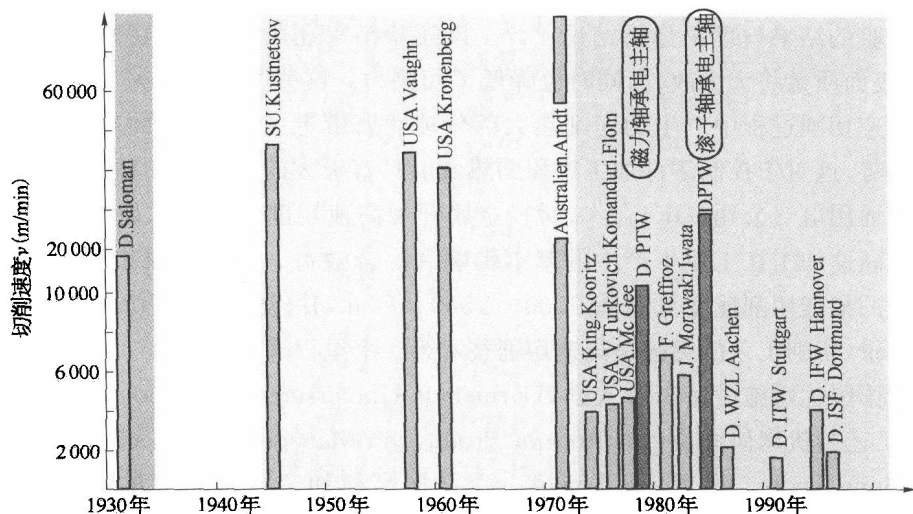


图 1-3 高速切削加工技术的发展里程碑^[2]

对于塑性金属材料而言,随着切削速度的提高,切屑形状通常会由带状切屑转变为具有绝热剪切滑移特征的锯齿状切屑;在更高的切削速度下,由于切屑的惯性力将导致切屑的锯齿节块分离成为类似崩碎切屑的分离切屑;而切削参数如切削速度、进给量等对切屑的锯齿化程度有重要影响。现有研究表明,材料的微观结构决定切屑的形态,如高速切削导热、导温性较好的切削铝合金时常产生带状切屑,但高速切削欠时效状态的 AlZnMgCu15 铝合金在切削速度为 1 000~7 000 m/min 实验范围内会形成锯齿状切屑,切削 α 相结构的纯钛时并无明显的锯齿切屑产生,而在切削 $\alpha+\beta$ 钛合金时锯齿切屑的形成频率比 β 钛合金高一倍。锯齿形切屑的产生使得金属切削过程变成一个非稳态过程,同时绝热剪切带的出现会对切削过程产生很大的影响,如切屑形态、刀/屑接触状态、加工表面完整性等,甚至会导致刀具的快速磨损。

具有高切削速度、高加速进给能力的机床以及适应高切削温度的刀具是实现高速切削应用的核心技术问题。20 世纪 60 年代早期,美国大量的研究表

明,高速切削技术必须解决切削刀具的快速磨损和机床振动等问题,才有可能提高生产效率和降低生产成本。在日本,则较多地关注切屑形成机理^[7],以及动态切削机理等^[8-11]。同期,苏联也进行了类似的超高速切/磨削的基础实验,在 100~800 m/s 的切削速度范围内,对切削变形、切削力和切削温度进行实验研究^[12]。

1977 年,美国首次通过铣削速度高达 1 980 m/min 的铣床证实了弹射碰撞实验的结果与理论分析结论^[13-20]。该实验结果还表明,随着切削速度的提高,表面质量将大大改善,同时也降低了切削力。这些实验中的另一重大发现是高速切削过程中产生的切削热大部分被切屑带走,已加工表面的温度呈下降趋势,这对于控制零件加工过程的热变形具有极大的优势。1979 年,美国空军和通用电气公司(GE)合作,对轻金属开展高速切削应用技术研究^[21],重点研究高速加工在工业生产中的基本影响和综合效益。研究结果表明,切削铝合金的最佳切削速度范围是 1 500~4 500 m/min,并建立了高速切削刀具的规格目录,切削工艺的突破是高速切削技术第二个里程碑。

德国达姆施塔特工业大学(Darmstadt University of Technology)生产管理、工艺与机床研究所(Institute of Production Management, Technology and Machine Tools, PTW)是欧洲第一个开展高速加工技术研究的研究中心。1979 年该中心开展一合作研究项目——高速铣削过程特点研究,研究重点是磁悬浮轴承对高速转轴发展的技术支持,并在机床上进行实际测试。通过使用由磁悬浮轴承支承的高速主轴,于 1980 年终于实现了可用切削速度的重大突破。这一突破使得早期由弹射碰撞实验得出的理论得到证实,并且推动了刀具与机床部件等配套设施的发展。1984 年开始的大型联合研究计划——“金属和非金属材料的高速铣削”对推动高速切削技术从研究到实际应用产生了巨大作用。经过四年的努力,该研究取得了系列成果,为现在高速加工技术的发展打下了重要的基础^[22]。PTW 不仅研制出世界上第一台适合高速切削的机床,而且推动了高速切削刀具的发展,同时对高速切削加工策略的设计及其与 CAD/CAM 系统的相互作用等均产生良好的促进作用,成为高速切削第三个里程碑,PTW 研究所的 H. Schulz 教授也因此被誉为“欧洲高速切削之父”。正是在 PTW 研究所的推动下,自 20 世纪 90 年代以来高速切削技术在工业生产中扮演着越来越重要的角色。

高速切削也存在缺点,即随着切削速度增加刀具寿命会相应降低,当今几乎所有努力都集中在如何提高刀具耐用度,从而解决高速条件下刀具仍须具

有适当寿命这一高速切削实用性问题。

由于高速切削过程的复杂性,直至今日科学研究仍然不能从本质上对高速切削过程中发生的一些特殊现象做出充分全面的解释。因此,有必要对高速切削过程展开更加深入系统的基础研究,推动切削技术的持续发展。

第二节 高速切削技术及其特点

德国 PTW 研究所把高速切削技术定义为切削速度超过常规切削速度 5~10 倍的切削加工,如图 1-4 所示^[22]。按照上述定义,实际高速切削的速度范围是动态的,随着机床技术与刀具技术的进步,常规切削和高速切削的切削速度都会逐渐增加。

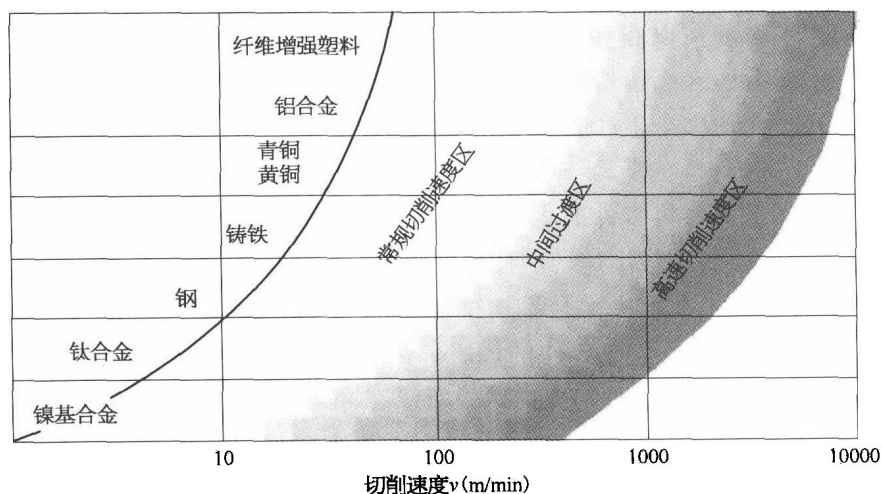


图 1-4 不同材料对应的切削速度^[22]

依据目前在工业中的应用,高速切削常指高转速切削,通常主轴转速超过 12 000 r/min 的机床被称之为高速切削机床。现在的标准铣床已经普遍实现 12 000 r/min 左右的主轴转速和 25 m/min 的进给速度,在加工钢、铸铁以及钛合金等材料时,已经能够实现高速切削。对于高速切削速度范围的界定,是一个渐近过程。从现有技术水平来看,1 200 r/min 将逐渐成为常规切削速度范围。