

仇启源 庞思勤 编著

现代金属切削技术

机械工业出版社

现代金属切削技术

仇启源 庞思勤 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了机械、仪表制造业现代金属切削技术及其理论以及研究方法。

全书共分八章。除系统论述切屑变形、切削力与切削温度、切削摩擦学、刀具破损及已加工表面完整性等理论外，还详细阐述了近年来飞速发展的各类新型刀具材料及其应用、提高工件材料切削加工性的方法以及切削过程的优化理论与计算等。

本书参考了大量国内外权威著作及论文，以新颖的方法系统编写，全书论点明确、文笔流畅、深入浅出、通俗易懂。

本书主要供从事机械制造、仪器仪表制造的技术人员，从事金属切削技术的科研人员、大学有关师生及研究生等参考。

(京)新登字054号

现代金属切削技术

仇启源 庞思勤 编著

责任编辑：孙本绪 版式设计：王颖

封面设计：郭景云 责任校对：董一平

责任印制：尹德伦

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制第一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32 · 印张 19⁵/₈ · 字数 432 千字

1992年1月北京第一版·1992年1月北京第一次印刷

印数：0,001—4,800 · 定价：14.30元

ISBN 7-111-02373-0/TG·566

前 言

现代科学技术的发展，不断地开发着新产品，并采用为数众多的新型工程材料。为适应这种情况而发展的机械制造技术也必然要求运用各种新的切削加工方法、新型机床以及一系列新型刀具来提高其切削加工生产率及自动化程度。

现代切削加工技术的发展，必然要求人们掌握更多的金属切削理论以指导切削加工的实践，否则就不可能提高切削加工的生产率和降低生产成本。

进入80年代以来，金属切削理论与实验技术的研究，有了飞速的发展。特别是由于一系列近代先进科学仪器的应用，使得许多在若干年前对某些金属切削现象的认识还仅仅是停留在假设阶段上，而上升到了已通过实验找到了根据的阶段。因此，作为切削加工的技术工人，就有必要进一步了解近年来金属切削理论与实验研究领域的新观点、新成果和新方法，并用之来指导实际生产。然而纵观近年来所出版的金属切削方面著作，有不少著作的内容仍停留在20世纪初的切削条件和试验手段的基础上，与当前飞速发展的金属切削技术并不相适应。

作者有鉴于此，在本书中汇集了国内外最新的金属切削理论及试验研究成果，对某些并不成熟或尚有争议的问题，尽可能多地罗列了各派权威专家的观点。为使读者能从书中得到启发而得出正确的、能指导生产的结论，本书中还提供了相当数量的在生产中应用的实例。

由于金属切削是一门涉及面广泛的技术，限于作者学术水平及实践经验，对本书中有谬误与不当之处，恳请读者不吝指正为盼。

作者向在本书中所引用的著作及论文的所有作者，表示衷心的感谢，感谢他们为金属切削技术所付出的辛勤劳动。

中国高校金属切削研究会副理事长、上海工业大学喻怀仁教授于百忙中认真、仔细地审阅了全书并提出了宝贵的意见，作者在此表示深切的感谢。

仇启源 庞思勤
1989年于北京理工大学
切削技术研究室

本书常用符号的意义和单位对照表

符 号	意 义	单 位
A_a	名义接触面积	mm^2
A_c	切削面积	mm^2
A_r	实际接触面积	mm^2
A_a	主后刀面	
A_a'	副后刀面	
A_r	前刀面	
a_c	切削厚度	mm
a_{st}	切屑厚度	mm
a_f	每齿进给量	$\text{mm} \cdot \text{Z}^{-1}$
a_h	冲击值	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$
a_p	切削深度	mm
a_w	切削宽度	mm
b_{a1}	后刀面上刃带(消振棱)宽度	mm
b_{p1}	前刀面上刃带(负倒棱)宽度	mm
b_s	过渡刃长度	mm
C	工序生产成本	元
C_{F_x}	切削分力 F_x 经验公式中的系数	
C_{F_y}	切削分力 F_y 经验公式中的系数	
C_{F_z}	主切削力 F_z 经验公式中的系数	
C_t	刀具成本	元/刃
C_v	切削速度公式中的系数	
c	比热	$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
d_m	已加工表面直径	mm
d_0	刀具直径	mm

(续)

符 号	意 义	单 位
d_w	工件待加工表面直径	mm
E	杨氏弹性模量	Pa
F_f	前刀面上的摩擦力	N
F_n	前刀面上的法向力	N
F_{ns}	剪切面上的法向力	N
F_{na}	后刀面上的法向力	N
F_r	切削合力	N
F_{ra}	后刀面上的合力	N
F_{ry}	前刀面上的合力	N
F_s	剪切面上的剪切力	N
F_x	进给抗力 (轴向力)	N
F_y	切深抗力 (径向力)	N
F_z	主切削力 (切向力)	N
f	每转进给量	$\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$
G	剪切弹性模量	Pa
k_r	相对加工性系数	
K_T	月牙洼磨损深度	mm
K_I	I 型应力场强度因子	
K_{Ic}	断裂韧性 (平面应变)	$\text{MNm}^{3/2}$
k	导热系数	$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
l_c	被切削层长度	mm
l_{ch}	切屑长度	mm
l_f	刀-屑接触长度	mm
L_m	切削路程长度	mm
M	工序单位时间所分担全厂开支	$\text{元} \cdot \text{min}^{-1}$
m	刀具耐用度泰勒公式中的指数	
m'	刀具破损耐用度韦布尔分布斜率	

(续)

符 号	意 义	单 位
NB	刀具径向磨损量	mm
NB_r	刀具相对径向磨损量	
n	材料强化指数	
P_f	进给剖面(横向剖面)	
P_m	切削功率	kW
P_n	切削刃法剖面	
P_o	切削刃主剖面	
P_p	切深剖面(纵向剖面)	
P_r	基面	
P_s	切削平面	
p	单位面积切削力, 单位体积切削功	$N \cdot mm^{-2}$
p_s	单位体积剪切功	$mJ \cdot mm^{-3}$
p_f	单位体积摩擦功	$mJ \cdot mm^{-3}$
p_A	单位体积新生表面能	$mJ \cdot mm^{-3}$
p_M	单位体积运动能	$mJ \cdot mm^{-3}$
Q	切削热	J
Q_s	剪切面产生的热量	J
Q_a	后刀面产生的热量	J
Q_r	前刀面产生的热量	J
q_s	外热源表面热能密度	$W \cdot m^{-2}$
q_v	内热源界面热能密度	$W \cdot m^{-2}$
R_a	表面粗糙度算术平均偏差值	μm
R_f	刀-屑摩擦界面热能分配比	
R_s	剪切面热能分配比	
R_z	表面粗糙度十点平均高度值	μm
r_c	切削比	
r_n	刃口钝圆半径	mm

(续)

符 号	意 义	单 位
r_e	刀尖圆弧半径	mm
T	刀具耐用度	min
T_o	最低成本耐用度 (经济耐用度)	min
T_f	刀具破损耐用度	min
T_p	最大生产率耐用度	min
T_{pr}	最大利润率耐用度	min
t_{cl}	换刀时间	min
t_m	切削时间	min
t_o	辅助时间	min
t_w	工序工时	min
U_p	塑性变形功	J
VB	刀具后刀面磨损带平均宽度	mm
VC	刀尖上后刀面磨损带宽度	mm
VN	磨损缺口处后刀面磨损带宽度	mm
v	切削速度	$m \cdot min^{-1}$
v_c	最低成本切削速度	$m \cdot min^{-1}$
v_{ch}	切屑流出速度	$m \cdot min^{-1}$
v_f	进给速度	$m \cdot min^{-1}$
v_p	最大生产率切削速度	$m \cdot min^{-1}$
v_{pr}	最大利润率切削速度	$m \cdot min^{-1}$
v_s	剪切速度	$m \cdot min^{-1}$
v_T	一定耐用度下的切削速度	$m \cdot min^{-1}$
W_n	卷 (断) 屑槽宽度	mm
Z_w	金属切除率	$mm^3 \cdot s^{-1}$
α_f	进给后角 (横向后角)	°
α_n	法向后角	°
α_o	后角	°

(续)

符 号	意 义	单 位
α_o'	副后角	°
α_{oe}	工作后角	°
α_{opt}	合理后角	°
α_p	切深后角 (纵向后角)	°
β	摩擦角	°
β_o	刀楔角	°
γ	单位面积新生表面能	J·mm ⁻²
γ_f	进给前角 (横向前角)	°
γ_n	法向前角	°
γ_o	前角	°
γ_{oe}	工作前角	°
γ_{opt}	合理前角	°
γ_p	切深前角 (纵向前角)	°
δ	延伸率	%
ε	剪应变, 相对滑移	
ε_r	刀尖角	°
η_m	机床传动效率	
θ	切削温度	℃, K
$\bar{\theta}$	平均切削温度	℃, K
θ_o	环境温度	℃, K
$\bar{\theta}_T$	前刀面平均温度	℃, K
κ_r	主偏角	°
κ_r'	副偏角	°
λ_s	刃倾角	°
μ	摩擦系数	
ν	泊松比	
ξ	变形系数	

(续)

符 号	意 义	单 位
ρ	材料密度	$\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3}$
σ	正应力	Pa
σ_s	屈服应力	Pa
σ_c	断裂应力	Pa
τ_s	剪切屈服强度	Pa
ϕ	剪切角	°
χ	切削合力方向与剪切面的夹角	°
ψ_λ	流屑角	°

目 录

绪论.....	1
第一节 金属切削理论及研究方法的进展.....	2
第二节 现代金属切削理论的研究动向.....	6
第一章 切屑变形理论.....	15
第一节 切屑变形基本概念.....	15
第二节 传统切屑变形理论.....	34
第三节 切屑变形塑性力学理论.....	46
第四节 切屑变形位错理论.....	67
第五节 切屑变形的影响因素及其影响机理.....	79
第六节 切屑控制理论与方法.....	89
第七节 切屑变形试验研究方法.....	104
第二章 切削力和切削温度.....	115
第一节 概述.....	115
第二节 切削力的理论研究.....	121
第三节 切削力的试验研究.....	138
第四节 切削温度的理论研究.....	167
第五节 切削温度的试验研究.....	185
第六节 切削力、切削温度影响因素综合分析.....	203
第三章 切削摩擦学理论.....	217
第一节 摩擦学理论基础.....	217
第二节 金属切削摩擦及其有关现象.....	238
第三节 刀具磨损和刀具耐用度.....	254
第四节 切削液及其选用.....	296
第四章 刀具破损理论.....	324

第一节	概述.....	324
第二节	刀具破损理论基础.....	330
第三节	刀具破损规律的研究.....	345
第四节	刀具破损的预防和预报.....	360
第五章	已加工表面完整性理论	371
第一节	概述.....	371
第二节	已加工表面的形成过程.....	374
第三节	已加工表面微观几何形状.....	378
第四节	加工硬化.....	395
第五节	残余应力.....	402
第六节	表面完整性的测定法.....	410
第六章	新型刀具材料的切削性能	425
第一节	刀具材料的发展与切削加工	425
第二节	刀具材料必须具备的性能.....	433
第三节	高速钢.....	436
第四节	硬质合金.....	447
第五节	涂层刀具.....	455
第六节	陶瓷刀具材料.....	460
第七节	金刚石.....	476
第八节	立方氮化硼.....	481
第七章	工件材料的切削加工性	490
第一节	概述.....	490
第二节	影响工件材料加工性的因素.....	493
第三节	难切削材料的切削加工性.....	500
第四节	改善工件材料切削加工性的途径.....	513
第五节	非传统切削在切削加工中的应用.....	518
第八章	切削过程优化理论.....	549
第一节	概述.....	549
第二节	切削过程优化的数学模型.....	554

第三节	切削用量的优选.....	564
第四节	刀具几何参数的合理选择.....	579
第五节	计算机在切削过程优化中的应用.....	597

绪 论

金属切削加工是指用刀具从工件表面切除多余的金属材料，从而获得在几何形状、尺寸精度、表面粗糙度及表面层质量等方面均符合要求的零件的加工方法。与机械制造工艺中的其它加工方法相比，切削加工能最经济地达到其它加工方法所达不到的尺寸精度、几何形状和表面粗糙度。因此，切削加工一直作为机械制造工艺中一种主要的加工方法而长期存在着。

早在1971年，国际生产工程研究学会（CIRP）用德尔斐法对“未来的制造工程”预测的结果认为：“尽管工件材料的平均强度将会不断提高，但切削加工仍然是制造成品所广泛应用的一种方法……到1990年，能够用精确的科学和系统的方法，按照预定的性能发展新刀具材料，用于切削高强度钢的新刀具材料，其许用的切削速度将5倍于目前的陶瓷刀具，将能用科学方法实现对一定的刀具、工件材料和机床的复合的加工性能进行预测（包括刀具耐用度、加工精度、表面质量和生产率等）。到2000年，对95%以上的各种切削加工工序，其尺寸精度和表面质量，将比获得高的切除率更为重要^[1]”。因此，为求得高效地生产出高质量的产品，世界各国仍不惜耗费巨资，投入大量人力物力，采用最先进的技术手段，不遗余力地不断深入研究与探讨切削加工方法及其理论。

第一节 金属切削理论及研究方法的进展

从切削加工发展史中可见，每当切削加工生产中出现新的不平衡时，必然引起了对切削理论的进一步深入研究；而金属切削理论的研究成果，也必将促进切削加工生产发展到更高的水平。1860年以后，当钢迅速代替了铸铁、熟铁等成为工业中的主要结构材料时，首先遇到的问题是高碳钢刀具的不耐磨而不得不采用很低的切削速度来加工，这样就大大增加了切削加工费用，迫切要求提高刀具的切削速度，研究影响刀具耐用度的诸因素。如1864年，法国乔塞尔(Joessel)就发表了刀具几何角度对切削力影响的论文。1870年，俄国的基麦(Тиме)研究了切屑形成过程，认为切屑是由切削层金属沿剪切平面破坏而成的。1877年，法国工程师特雷斯卡(Tresca)认为，切屑的长度只有切削长度的 $1/2$ 至 $1/3$ 。1893年，俄国的慈伏雷金(Зворыкин)提出了在切削区里力和应力的分析。1907年，美国的泰勒(F. W. Taylor)经过了26年5万多次的试验后，提出了沿用至今的耐用度公式；他的另一项重要贡献是，于1898年和怀特(White)一起研制成功高速钢及其热处理方法。1925年，罗森海恩(W. Rosenhain)和斯特恩尼(A. C. Sturney)提出用金相法研究切屑形成，并认为切屑类型随工件材料和切削条件而变化；科克尔(E. G. Coker)用光弹法研究刀具和工件里的应力状态，得出切屑形成是一种发生在近似一平面的区域里的剪切过程的结论。1937年，芬兰皮斯潘耐(V. Piispanen)提出了剪切平面式的切削模型。1944年，麦钱特(M. E. Merchant)提出了有关切削力学的论文，这是首次只用几何学和应力-应变条件，成功地用数学模型来表达切削力和切削过程。尽管

有人指出 Merchant 的切削模型过于简化,但他的这一贡献在金属切削理论发展史中仍然具有重要意义。

近30多年来,随着航空、航天和计算机等高精度、超精密加工工业的诞生;数控机床、加工中心和自适应控制机床的出现,尤其是最近十几年来计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)和柔性制造系统(FMS)的发展和应用,已推动着人们进一步开发工厂自动化(FA)和计算机集成制造系统(CIMS)。随着高科学技术在各个领域的不断发展和应用,出现了不少特殊的金属与合金材料,它们之中有很多是切削加工性特别低下的耐热、抗蠕变材料或是带放射性和稀土金属材料等,这就必须深入研究其切削过程的规律。另一方面,近年来,由于许多工业发达国家的工资上升率大于劳动生产率上升率,又促使各企业家不惜大量投资采用近代极为先进的仪器设备来研究金属切削理论,以便迅速提高劳动生产率,来补偿所支付的高额工资。如自60年代末开始,美、英、日等国普遍采用高压透射电子显微镜(HTEM)、扫描电子显微镜(SEM)、俄歇电子光谱仪(AES)、电子探针显微分析仪(EPMA)、离子探针质谱仪(IPMS)、能散射X线分析仪(EDXA)和X线衍射仪等来研究金属切削过程中的切屑变形、刀具磨损和已加工表面质量。目前已发展到能在扫描电子显微镜里在控制温度的条件下,直接对切削过程进行动态观察研究。再加上电子计算机、录象机的应用和各种动态测力仪、光测弹性应变仪、红外测温技术、高速摄影机和快速落刀技术等进一步完善,使国外从70年代开始,金属切削的研究已从宏观观察进入微观的定性定量分析研究;从静态研究进入动态研究;从单项因素的研究进入多项因素的综合研究。再由于新兴学科的相互渗透,例如,