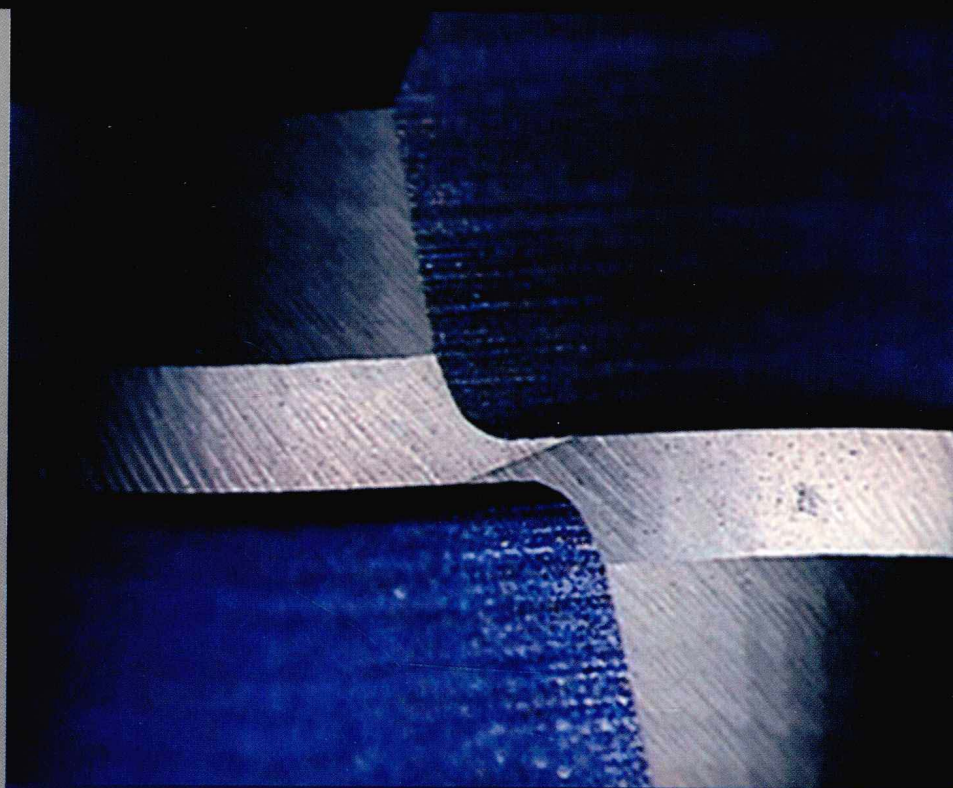




邓建新 等 著

自润滑刀具及其切削加工



科学出版社

www.sciencep.com

自润滑刀具及其切削加工

邓建新 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者结合多年来从事自润滑刀具技术研究的成果撰写而成的。在全面分析国内外润滑刀具技术发展现状的基础上,着重论述四种自润滑刀具(添加固体润滑剂的自润滑刀具、微池自润滑刀具、原位反应自润滑刀具和软涂层自润滑刀具)的设计理论、制备方法、物理机械性能、微观结构、切削性能及其减摩和抗磨机理。本书从理论和应用两方面出发,着眼于最新的内容和动向,既有理论分析,又结合实际应用,反映了自润滑刀具国内外的最新成果。

本书可供切削理论和切削刀具等领域的技术人员和管理人员参考,也可作为科研人员、高等工科院校教师的科研参考书及机械类专业研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自润滑刀具及其切削加工/邓建新等著. —北京:科学出版社,2010
ISBN 978-7-03-028676-5

I. ①自… II. ①邓… III. ①自润滑-刀具(金属切削) IV. ①TG7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 161416 号

责任编辑:耿建业 裴 育 / 责任校对:陈玉凤
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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年8月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2010年8月第一次印刷 印张:15 1/2

印数:1—3 000 字数:296 000

定价:48.00 元

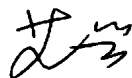
(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

高效、精密和洁净切削加工是现代加工技术发展的必然趋势,干切削加工正是满足洁净加工要求的最有效的加工方法之一,具有高效率、低成本、利于环保等突出优势。目前,在世界工业发达国家,干和准干切削技术已经成功应用到了相关生产领域。我国在干和准干切削加工领域也进行了相应的研究和一定的推广应用,但起步较晚,与国外先进水平相比还有差距。在干切削加工技术中,干切削刀具是最重要的基础之一。自润滑刀具是指刀具本身具有减摩和抗磨作用,在没有外加润滑液或润滑剂的条件下,刀具本身就具有一定的润滑功能,自润滑刀具可以改善干切削过程的摩擦润滑状态、降低切削能耗,是一种很有前途的干切削刀具。

该书作者邓建新等在多年研究成果的基础上撰写了《自润滑刀具及其切削加工》这一专著,提出了自润滑刀具的概念,并对自润滑刀具的设计、制备和应用作了全面介绍,这无疑是具有非常重要意义的工作。我相信该书不仅对于从事切削加工和切削刀具的研究开发人员及刀具制造和装备制造企业的工程技术人员是一本具有很好理论价值和实用价值的参考书,而且对于提高我国干切削刀具和机械加工技术水平也有重要的促进作用。

中国工程院院士



前 言

在全球环保意识不断增强与环保立法日益严格的大趋势下,如何发展对环境无污染、可持续发展的现代制造模式已经成为我国制造业面临的最紧迫难题。在这种绿色浪潮的冲击下,基于环保意识的干切削技术逐渐兴起,可以说干切削技术是一种环境效益和经济效益俱佳的工艺选择。干切削这种加工方法是未来金属切削加工的发展趋势之一,已在各国工业界和学术界引起广泛的关注。但是干切削也存在不足:由于缺少切削液的润滑和冷却作用,刀具与工件之间的摩擦加剧,切削温度升高,刀具的磨损严重,刀具寿命下降,加工表面质量恶化。自润滑刀具是指刀具本身具有减摩和抗磨作用,在没有外加润滑液或润滑剂的条件下,刀具本身就具有一定的润滑功能,可以改善干切削过程的摩擦润滑状态。实现刀具自润滑的意义在于:可以降低摩擦、减小磨损、省掉冷却润滑系统、克服切削液造成的环境污染、实现清洁化生产。因此,可以说自润滑刀具是一种洁净的干切削刀具。自润滑刀具的研究开发为干切削刀具的设计提供了新的思路和研究领域,为提高刀具性能开拓了新的途径。深入研究自润滑刀具及其减摩抗磨机理,对减小刀具磨损、提高刀具的寿命、降低生产成本有重要的实际意义,对丰富和发展切削刀具的设计理论具有重要的学术价值,还将对减小资源消耗、防止切削液对环境的污染和实现绿色加工起到极大的推动作用。

本书作者多年来致力于自润滑刀具的研究开发及其减摩抗磨机理的研究。本书是在总结这些研究成果的基础上撰写而成的,其内容直接取材于作者在国内外专业期刊上发表的学术论文和作者指导的博士研究生的博士学位论文,涉及四种不同类型自润滑刀具的设计理论、制备技术、性能和应用等。撰写本书的目的在于向读者介绍该领域的最新进展,并在实际应用中推广这些成果,希望能对我国刀具技术的发展和应用水平的提高起到积极有益的作用。

本书由邓建新、李彬、宋文龙、赵金龙、曹同坤撰写。恩师艾兴院士在百忙之中抽空为本书作序,并审阅了书稿全文,提出了许多指导意见。本书的研究先后得到多项科研课题的资助,包括:973计划项目(2009CB724402)、山东省泰山学者专项基金、山东省杰出青年基金(JQ200917)、国家自然科学基金(50275088,50475133,50675120)等。在此一并表示衷心的感谢!

由于自润滑刀具尚处在发展之中,以及作者的水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者提出宝贵意见,以便于进一步完善。

邓建新

2010年5月

目 录

序

前言

第 1 章 自润滑刀具的概念及其实现方法	1
1.1 干切削及其对刀具的要求	1
1.2 切削润滑原理与润滑方式	2
1.2.1 具有润滑膜表面的减摩机理	2
1.2.2 边界润滑条件下的减摩机理	4
1.2.3 切削加工润滑原理	4
1.2.4 切削加工润滑方式	5
1.3 自润滑刀具的概念及其实现方法	8
1.4 刀具表面存在润滑膜时的切削力分析	10
第 2 章 添加固体润滑剂的自润滑刀具	12
2.1 添加固体润滑剂的自润滑陶瓷刀具的设计理论	12
2.1.1 添加固体润滑剂的自润滑陶瓷刀具材料的设计原则	12
2.1.2 添加固体润滑剂的自润滑陶瓷刀具材料的化学相容性分析	13
2.1.3 添加固体润滑剂的自润滑陶瓷刀具材料的组分设计	17
2.1.4 添加固体润滑剂的自润滑陶瓷刀具材料的微观结构设计	20
2.2 添加固体润滑剂的自润滑陶瓷刀具材料的制备、力学性能与 微观结构	22
2.2.1 自润滑陶瓷刀具材料的制备	22
2.2.2 性能测试	23
2.2.3 自润滑陶瓷刀具材料的力学性能及微观结构	24
2.3 添加固体润滑剂的自润滑陶瓷刀具材料的摩擦磨损特性	30
2.3.1 摩擦磨损试验方法	30
2.3.2 固体润滑剂含量对自润滑陶瓷刀具材料的摩擦磨损特性的影响	31
2.3.3 试验条件对自润滑陶瓷刀具材料的摩擦磨损特性的影响	33
2.4 添加固体润滑剂的自润滑陶瓷刀具材料的自润滑机理	40
2.4.1 添加固体润滑剂的自润滑陶瓷刀具材料润滑膜的成分、微观结构及 形成机理	40
2.4.2 添加固体润滑剂的自润滑陶瓷刀具材料的润滑膜的转移及自润滑机理	42

2.4.3	添加固体润滑剂的自润滑陶瓷刀具材料的润滑膜的损坏机理	44
2.5	添加固体润滑剂的自润滑陶瓷刀具切削过程中的减摩机理	55
2.5.1	试验条件	55
2.5.2	添加固体润滑剂的自润滑陶瓷刀具切削过程中的减摩机理	56
2.5.3	切削过程中自润滑膜的减摩模型及磨损过程的演变规律	61
2.5.4	添加固体润滑剂的自润滑陶瓷刀具后刀面的磨损机理	69
2.6	本章小结	71
第3章	微池自润滑刀具	73
3.1	微池自润滑刀具的概念及其设计模型	73
3.1.1	微池自润滑刀具的概念	73
3.1.2	微池自润滑刀具的设计模型	74
3.2	微池自润滑刀具的结构设计	76
3.2.1	微池自润滑刀具微孔位置的确定	76
3.2.2	微池自润滑刀具微孔结构参数的确定	78
3.3	微池自润滑刀具的制备	83
3.4	微池自润滑刀具试样的摩擦磨损特性及其减摩机理	85
3.4.1	试验方法	85
3.4.2	微池自润滑刀具试样的摩擦磨损特性	87
3.4.3	不同微孔结构参数的微池自润滑刀具试样摩擦磨损特性	90
3.4.4	填充不同固体润滑剂的微池自润滑刀具试样摩擦磨损特性	91
3.4.5	微池自润滑刀具试样的减摩机理	92
3.5	微池自润滑刀具的切削性能	95
3.5.1	试验方法	95
3.5.2	微池自润滑刀具的切削性能	97
3.5.3	微池自润滑刀具磨损形貌	101
3.5.4	微池自润滑刀具切削过程的润滑机理	107
3.6	本章小结	109
第4章	原位反应自润滑刀具	110
4.1	原位反应自润滑陶瓷刀具的设计理论	110
4.1.1	原位反应自润滑陶瓷刀具的设计原则	110
4.1.2	原位反应自润滑陶瓷刀具材料体系的确定	111
4.1.3	原位反应自润滑陶瓷刀具材料的化学相容性分析	112
4.1.4	原位反应自润滑陶瓷刀具材料的物理相容性分析	113
4.2	原位反应自润滑陶瓷刀具材料的制备、力学性能与增韧机理	116
4.2.1	原位反应自润滑陶瓷刀具材料的制备工艺	116

4.2.2	原位反应自润滑陶瓷刀具材料的力学性能	119
4.2.3	原位反应自润滑陶瓷刀具材料的微观结构	123
4.2.4	原位反应自润滑陶瓷刀具材料的增韧机理	128
4.3	原位反应自润滑陶瓷刀具材料的高温氧化特性	130
4.3.1	原位反应自润滑陶瓷刀具材料高温氧化机理	130
4.3.2	原位反应自润滑陶瓷刀具材料的高温氧化特性	133
4.3.3	原位反应自润滑陶瓷刀具材料氧化后的微观结构	138
4.4	原位反应自润滑陶瓷刀具材料的摩擦磨损特性及减摩机理	142
4.4.1	摩擦磨损试验方法	142
4.4.2	原位反应自润滑陶瓷刀具材料的摩擦磨损特性及减摩机理	144
4.5	原位反应自润滑陶瓷刀具的切削性能	154
4.5.1	原位反应自润滑刀具切削加工试验	154
4.5.2	原位反应自润滑刀具的切削力与平均摩擦系数	156
4.5.3	原位反应自润滑刀具的切削温度	159
4.5.4	原位反应自润滑刀具加工工件的表面粗糙度	161
4.5.5	原位反应自润滑刀具切削加工时的磨损特性及减摩机理	162
4.6	本章小结	171
第5章	软涂层自润滑刀具	173
5.1	MoS ₂ 涂层材料与基体材料的匹配	173
5.1.1	MoS ₂ 涂层材料与基体材料的化学相容性分析	173
5.1.2	MoS ₂ 涂层材料与基体材料的物理相容性分析	174
5.1.3	基于残余热应力的 MoS ₂ 涂层刀具基体材料的优选	179
5.1.4	MoS ₂ 涂层刀具的结构设计	182
5.1.5	涂层刀具最大残余热应力随沉积温度的变化	186
5.2	MoS ₂ /Zr 软涂层自润滑刀具的制备	187
5.2.1	MoS ₂ /Zr 软涂层自润滑刀具的制备工艺	187
5.2.2	MoS ₂ /Zr 软涂层自润滑刀具的性能测试方法	188
5.2.3	MoS ₂ /Zr 软涂层自润滑刀具的制备工艺参数	190
5.3	MoS ₂ /Zr 软涂层自润滑刀具的性能与微观结构	202
5.3.1	MoS ₂ /Zr 软涂层的形貌和成分	202
5.3.2	MoS ₂ /Zr 软涂层的物理机械性能	205
5.3.3	MoS ₂ /Zr 软涂层的界面结合机制	209
5.4	MoS ₂ /Zr 软涂层自润滑刀具材料的摩擦磨损特性	212
5.4.1	摩擦磨损试验条件	212
5.4.2	MoS ₂ /Zr 软涂层自润滑刀具材料的摩擦磨损性能	213

5.4.3 MoS ₂ /Zr 软涂层自润滑刀具材料的磨损形貌	215
5.4.4 MoS ₂ /Zr 软涂层自润滑刀具材料的减摩机理	218
5.5 MoS ₂ /Zr 软涂层自润滑刀具的切削性能	220
5.5.1 试验条件	220
5.5.2 MoS ₂ /Zr 软涂层自润滑刀具的切削性能	221
5.5.3 MoS ₂ /Zr 软涂层自润滑刀具的磨损特征	223
5.6 本章小结	230
参考文献	232

第 1 章 自润滑刀具的概念及其实现方法

1.1 干切削及其对刀具的要求

金属切削加工中使用的切削液对提高加工效率与加工质量均具有重要作用,但是切削液在制造、使用、处理和排放的各个时期均会对环境造成严重污染。步入 21 世纪,各国的环境战略经历了一场新的转折,全球性的产业结构调整呈现出绿色战略趋势,资源利用朝对环境无污染、少污染的方向发展。在这种绿色浪潮的冲击下,基于环境意识的绿色干切削技术逐渐兴起,成为目前的研究热点。实现干切削的意义在于:形成的切屑干净、无污染,易于回收和处理;省去了与切削液有关的传输、过滤、回收等装置,节省了与切削液及切屑处理有关的费用;不产生环境污染及与切削液有关的安全与质量事故。因此,可以说干切削技术是一种环境效益和经济效益俱佳的工艺选择。干切削这种新型加工方法是未来金属切削加工的发展趋势之一,已在各国工业界和学术界引起广泛的关注。目前,工业发达国家干切削技术已经成功应用到了生产领域,并且取得了良好的经济效益。

在切削加工过程中,刀具的前、后刀面不断与切屑和工件接触,并发生剧烈摩擦,接触区处于高温、高压状态。发生在刀具上的摩擦与磨损会造成刀具损坏而失效,使切削无法进行;发生在工件上的剧烈摩擦则会使加工表面质量恶化。为减轻切削加工时的摩擦与磨损,目前普遍采用的方法是在切削加工中使用具有润滑作用的切削液。切削液的主要作用是改善切削过程的摩擦润滑状态,降低切削温度,从而延长刀具寿命、提高工件加工表面质量。但在切削(尤其是高速切削)高温作用下,采用切削液润滑存在以下问题:在切削高温作用下,切削液中的添加剂难以与刀具表面发生作用而形成接触充分的边界膜;随着切削温度的升高,切削液的黏性呈指数性下降,加上切削压力的作用,易造成微凸体直接接触;高温环境下易发生液态润滑(润滑油、脂)性能衰减。因此,对于高速切削等存在切削高温的加工场合,传统的切削液减摩润滑方法已难以满足加工要求。与传统的湿切削相比,干切削存在以下不足:由于缺少切削液的润滑和冷却作用,刀具前刀面-切屑、刀具后刀面-工件之间的摩擦加剧,切削温度急剧升高,刀具的磨损严重,刀具寿命下降,加工表面质量恶化。因此,干切削对刀具提出了更高的要求。

(1) 刀具应具有优异的耐高温性能。

干切削要求刀具材料具有极高的红硬性和热韧性,还必须有良好的耐磨性、耐

热冲击和抗黏结性。新型刀具材料的出现,为干切削提供了可能。目前,应用于干切削加工的刀具材料主要是:超细硬质合金、TiC(N)硬质合金、涂层硬质合金、陶瓷和 PCBN 等,这些刀具具有足够的耐高温和耐磨损性能,可在无切削液条件下使用。例如,超细硬质合金具有很好的耐磨性和耐高温性,可制作大前角的深孔钻头 and 刀片,用于铣削和钻削的干式加工;PCBN 刀具、 Al_2O_3 基和 Si_3N_4 基陶瓷刀具具有很好的高温力学性能,也适合于干切削。

(2) 刀具与切屑之间的摩擦系数要尽可能小。

干切削时,由于切削区的高温产生化学不稳定性,刀具与切屑之间的摩擦增大。因此,必须减小切屑和刀具之间的摩擦系数,采用软涂层刀具可显著降低刀-屑间的摩擦系数。例如, MoS_2 、 WS_2 等软涂层刀具,与工件材料的摩擦系数很低,能有效减少切削力和降低切削温度。瑞士开发的 MOVIC 涂层丝锥,刀具表面涂覆有一层 MoS_2 。切削试验表明:未涂层丝锥只能加工 20 个螺孔;用 TiAlN 涂层丝锥时可加工 1000 个螺孔;而 MoS_2 涂层的丝锥可加工 4000 个螺孔。涂层刀具也可用于干切削,它产生一层保护层,把刀具与切削热隔离开,使热量很少传到刀具。因此,在干切削中,刀具涂层将发挥越来越重要的作用。

(3) 优化刀具几何参数与结构。

刀具的结构要能快速排屑,使传入工件和刀具的热量大大减少。生产实践证明,尽管在干切削中还不能将切削区产生的热量完全随切屑排出,但只要合理选择刀具几何形状和切削参数,将有可能使绝大部分切削热随切屑排出。例如,对车刀结构,可针对不同刀具材料和不同切削用量,开发出相应的通用断屑槽系列,提高对切屑折断和流动方向的控制能力。采用一些特殊结构的刀具可降低刀具温度,提高刀具寿命。例如,热管刀具可获得较理想的干切削效果,其结构与普通车刀基本相同,所不同的是在刀杆体内部制成了热管。热管内的工作介质一般为丙酮、乙醇和蒸馏水三种。热管刀具是一种自冷却刀具,故无需再从外部浇注切削液,尤其适合于在数控机床、加工中心和自动生产线上应用。

1.2 切削润滑原理与润滑方式

1.2.1 具有润滑膜表面的减摩机理

固体润滑是指在摩擦表面形成固体润滑膜,以降低摩擦副间的摩擦系数,从而减小磨损的一种润滑方式。由摩擦学原理可知,摩擦过程中的实际接触面积只占表观接触面积的很小部分,在外加载荷的作用下,摩擦表面间的接触状态可看成由若干粗糙凸峰相互接触的组合,摩擦表面接触状态如图 1-1 所示。假设基体材料的极限剪切强度为 τ_s ,根据强度理论的一般规律,对于摩擦副开始滑动的条件是

$$\sigma^2 + \alpha \tau_s^2 = \sigma_b^2 \quad (1-1)$$

式中, σ 为法向载荷产生的压应力; σ_b 为基体材料的抗压屈服极限; α 为与基体材料性能有关的常数, 且 $\alpha > 1$ 。其中

$$\sigma = \frac{P}{A_r} \quad (1-2)$$

$$\tau_s = \frac{F}{A_r} \quad (1-3)$$

式中, P 为法向载荷; F 为摩擦力; A_r 为实际接触面积。

将式(1-2)和式(1-3)代入式(1-1)可得

$$\left(\frac{P}{A_r}\right)^2 + \alpha \left(\frac{F}{A_r}\right)^2 = \sigma_b^2 \quad (1-4)$$

由黏着摩擦理论及式(1-4)可知, 当摩擦力 F 不断增大时, 实际接触面积 A_r 也随之增加, 而 σ_b 和 P 保持不变, 这样, 相对于 F/A_r 而言, P/A_r 的数值很小, 则由式(1-1)和式(1-4)得

$$\sigma_b^2 \approx \alpha \tau_s^2 \quad (1-5)$$

假设在法向载荷作用下的粗糙凸峰黏着点处, 有一薄层润滑膜, 其剪切强度极限为 τ_i , 假设 $\tau_i = c\tau_s$ (c 是小于 1 的常数), 由式(1-1)可得有润滑膜的摩擦副开始滑动的条件为

$$\sigma^2 + \alpha \tau_i^2 = \sigma_b^2 \quad (1-6)$$

根据式(1-5)求得

$$\sigma_b^2 = \alpha \tau_s^2 = \alpha \tau_i^2 / c^2 \quad (1-7)$$

将式(1-7)代入式(1-6), 进而可求得表面有润滑膜的摩擦副摩擦系数为

$$\mu = \frac{\tau_i}{\sigma} = \frac{c}{[\alpha(1-c^2)]^{1/2}} \quad (1-8)$$

显然, 如果 c 趋近 1, 则 μ 趋向于无穷大, 这说明纯金属表面在真空中产生极高的摩擦系数。而当 c 值减小时, 摩擦系数 μ 降低, 可减小摩擦副间的摩擦。当 c 值很小时, 摩擦系数 μ 可表示为

$$\mu = \frac{c}{\alpha^{1/2}} \quad (1-9)$$

式中, $\alpha^{1/2} = \frac{\sigma_b}{\tau_i}$, 代入式(1-9), 可得摩擦系数为

$$\mu = \frac{c\tau_i}{\sigma_b} = \frac{\tau_i}{\sigma_b} \quad (1-10)$$

由于 τ_i 为润滑膜的剪切强度极限, σ_b 为基体材料的抗压屈服极限, 故有

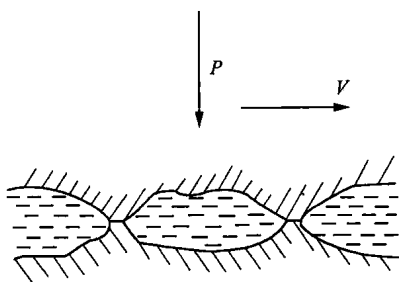


图 1-1 摩擦表面接触状态示意图

$$\mu = \frac{\tau_f}{\sigma_b} = \frac{\text{润滑膜表面的剪切强度极限}}{\text{基体材料的屈服强度极限}} \quad (1-11)$$

具有润滑膜表面的摩擦副滑动时,黏着点的剪切发生在膜的内部,其剪切强度较低。因此,在载荷 P 一定的条件下,当基体材料相同,摩擦面之间存在剪切强度较低的润滑膜时,能够有效降低摩擦过程的摩擦系数。

1.2.2 边界润滑条件下的减摩机理

实际摩擦条件下材料一般处于边界润滑状态。边界润滑是指摩擦副界面上只存在一层极薄的润滑膜,这层极薄的润滑膜称为边界膜,它可以是液体或气体组成的流体膜,也可以是固体膜。由于边界膜太薄,不足以使摩擦副两表面分隔开。在边界润滑条件下,摩擦力 F 可看成是剪断表面黏着部分的剪切力 $F_{\text{黏}}$ 与剪断边界润滑膜的剪切力 $F_{\text{膜}}$ 之和:

$$F = F_{\text{黏}} + F_{\text{膜}} \quad (1-12)$$

即

$$F = A_r[k\tau_b + (1-k)\tau_f] \quad (1-13)$$

式中, k 为接触面 A_r 上发生固体接触部分所占比例; τ_b 为基体黏着处的剪切强度; τ_f 为润滑膜的剪切强度。当润滑膜完好时, $k \approx 0$, 则摩擦力 $F_1 = A_r\tau_f$; 当完全没有润滑时, $k \approx 1$, 则摩擦力 $F_2 = A_r\tau_b$ 。由于润滑膜的剪切强度比基体的剪切强度低得多(即 $\tau_f < \tau_b$), 故 $F_1 < F < F_2$, 即边界润滑下的摩擦力居于流体润滑下的摩擦力和干摩擦力之间。

边界润滑时的摩擦系数为

$$\mu = F/P = A_r[k\tau_b + (1-k)\tau_f]/(A_r\sigma_{\text{平}}) \quad (1-14)$$

式中, $\sigma_{\text{平}}$ 为法向平均压应力。当 k 很小时, 即摩擦副处于边界润滑状态时

$$\mu \approx \frac{\tau_f}{\sigma_{\text{平}}} \quad (1-15)$$

可见,边界润滑状态下的摩擦系数同样与润滑膜的剪切强度 τ_f 有关,当 $\tau_{\text{平}}$ 为一定值时,润滑膜的剪切强度越低,摩擦系数越小。

1.2.3 切削加工润滑原理

在切削过程中始终存在两个摩擦副,即由刀具前刀面与切屑组成的摩擦副和由后刀面与工件组成的摩擦副。刀具前刀面、后刀面不断与切屑和工件接触并发生强烈的摩擦,切削温度可高达 1000°C 以上。采用合理的润滑技术可以有效地减轻切削过程中的摩擦,其具体作用包括减小摩擦力和摩擦系数、减小切削变形和切削力、减小切削热量从而降低切削温度、减小刀具磨损从而提高刀具寿命、减轻切屑与刀具的黏结从而抑制积屑瘤的产生和改善加工表面质量。因此,实现高效润

滑对提高切削加工生产率、减小刀具磨损、改善加工表面质量具有十分重要的理论和实际意义。切削加工润滑的主要目的是减小切削过程中刀具与工件之间的摩擦。实现润滑的基本原理是在刀具前刀面和切屑之间形成具有润滑作用的润滑薄膜,润滑薄膜一方面可以防止刀具前刀面与切屑面的直接接触,另一方面可以减小接触金属薄层的剪切强度,从而显著减小摩擦系数。

在切削加工过程中,具有润滑作用的薄膜主要包括物理吸附膜、化学吸附膜、化学反应膜、氧化膜、涂层润滑膜及自润滑膜等。油性添加剂能够与金属表面形成牢固的物理吸附薄膜;极性添加剂的极性分子能够同金属表面经由化学吸附形成化学吸附膜;某些润滑剂分子可以同金属表面发生化学反应而形成化学反应膜;刀具或工件材料中的某些元素在切削高温作用下产生氧化而形成氧化物润滑膜;利用涂层涂覆技术可在刀具表面形成软涂层润滑膜;通过对刀具材料进行合理的组分设计可以使刀具材料本身在切削加工过程中形成具有润滑作用的自润滑膜。

在切削力较小的情况下,润滑膜比较容易保持并起到减摩作用;随着切削力增大,润滑膜不断磨损并脱落,切削加工摩擦副处于边界润滑或混合润滑状态;若切削力进一步增大并导致边界润滑膜发生破裂失效,则切削加工摩擦副将处于无润滑的干切削状态。通常将切削加工润滑归属于边界润滑,摩擦力 F 可以用式(1-13)表示。当刀具表面润滑膜完好时, $k \approx 0$, 则摩擦力 $F_1 = A_r \tau_1$; 干切削时, $k \approx 1$, 则摩擦力 $F_2 = A_r \tau_0$ 。由于润滑膜的剪切强度比工件材料的剪切强度低得多(即 $\tau_1 \ll \tau_0$), 故 $F_1 < F < F_2$, 即边界润滑条件下的刀具表面摩擦力居于流体润滑下的摩擦力和干切削摩擦力之间。

由上述分析可知,当刀具表面存在一层具有润滑作用的润滑膜时,无论是在表面润滑膜完好的状态,抑或在边界润滑状态下,刀具在切削加工时的摩擦力和摩擦系数均可降低。

1.2.4 切削加工润滑方式

(1) 切削液润滑。

利用切削液对切削加工进行润滑是最传统的方法,在生产实际中应用最为广泛。切削液可以划分为油基和水基两大类,由基础油(液)和各种添加剂(油性添加剂、极压添加剂和固体润滑剂等)组成。切削液的润滑性能与其渗透性和形成吸附薄膜的牢固程度有关,并受切削速度影响。切削速度越高,润滑效果越低。在切削的边界摩擦过程中,切削液进入切削区的途径有如图 1-2 中所示的 A、B、C、D 四种。从外部供给的切削液要渗透到切削区是比较困难的,现在比较普遍的观点认为,在使用切削液时,在后刀面磨损不严重的情况下,B 方向有可能成为切削液的渗透路径;其次,由于切屑与前刀面之间存在着微小的间隙,将形成毛细管的现象,使切削液主要从侧面(即 D 方向)渗入切削区;再次,切削刃区附近的工件表面上

及剪切面上,存在着许多微小的裂纹,切削液分子可从这些裂纹(即 C 方向)渗透到切削区。通过上述途径渗透到切削区的切削液,在刀具与切屑和工件的接触面上形成吸附油膜即润滑油膜,起到了润滑的作用,减小了摩擦,降低了切削力。所以切削液的润滑性能取决于形成油膜的牢固程度和切削液的渗透性。研制新型极压润滑添加剂、改善切削液的渗透性、提高切削液的活性和反应速度,是提高切削液润滑性能的有效途径。

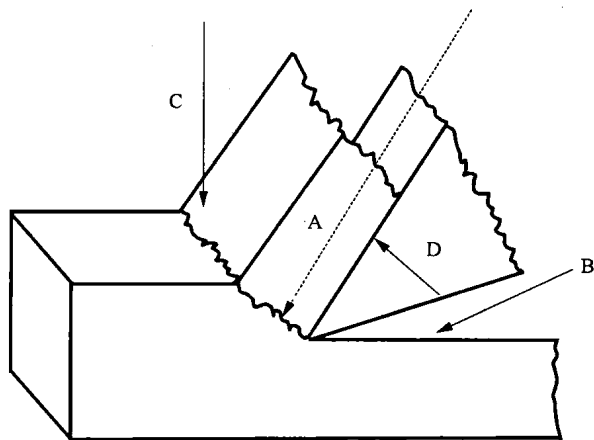


图 1-2 切削过程中切削液进入切削区的途径

切削液是由基础油或水加入添加剂组成的。因此,切削液性能的优劣主要取决于其添加剂的性能。切削液的润滑性包括两个方面:一是油性;二是极压性。油性剂在金属表面上形成的吸附膜承受温度不高,而极压剂可耐 1000°C 高温,适用于高速和重切削加工。

油性添加剂包括动植物油、油酸、脂肪酸、硫化油脂及酮类等有机化合物,其分子中含有极性基团,能同金属表面形成牢固的物理吸附膜,形成比被切削金属剪切强度低的化合物或润滑膜,从而减小前刀面与切屑、后刀面与工件接触表面的摩擦,提高加工表面质量并延长刀具使用寿命。研究表明:在切削中使用切削液时的切削力比干切削时平均可降低约 $8.0\%\sim 10.0\%$,这种物理吸附膜只能在较低温度(200°C 以内)下起润滑作用,随着温度的升高,将因薄膜破裂而失去其润滑效果。因此,它主要适合于低速精加工场合。

极压添加剂是含硫、磷和氯等元素的有机化合物,这些化合物在切削高温和高压下将发生分解,生成由无机化合物组成的化学润滑膜,这些化合物的剪切强度很低,故在极压条件下具有良好的润滑作用。例如,氯、磷和硫等元素可在刀具-切屑和刀具-已加工面上与铁元素迅速发生反应,生成氯化铁、磷化铁和硫化铁等化学润滑膜,这些化合物有很低的剪切强度及较低的摩擦系数,能在极压条件下保证良

好的润滑特性。氯化铁能在压力 $\leq 1.47\text{GPa}$ 、温度 $\leq 600^\circ\text{C}$ 的条件下保持良好润滑；磷化铁可在压力 $\leq 1.7\text{GPa}$ 、温度约为 800°C 的条件下工作；而硫化铁能在压力 $\leq 1.96\text{GPa}$ 、温度为 1000°C 的条件下保持正常润滑。近年来，硼酸酯作为一种新型抗磨添加剂得到了广泛关注并获得成功应用。在边界润滑状态下，基础油不足以形成极压抗磨润滑油膜，而含硼抗磨添加剂中的油性剂（如亚油酸和植物油）分子具有强极性基团，可以在金属表面形成具有良好润滑、抗磨和极压承载作用的化学吸附油膜；与此同时，含硼抗磨添加剂由于发生摩擦化学反应而在摩擦表面形成化学反应膜，从而起到减摩、抗磨和极压承载作用。

(2) 切削液中添加固体润滑剂。

固体润滑剂作为润滑油的添加剂多用于高温、高负荷等苛刻的润滑条件下。在切削加工中使用的固体润滑剂主要有石墨、 MoS_2 、 WS_2 及硼酸盐等。一般可以将各种固体润滑剂均匀分散于油基或水基切削液中，以便通过液相介质将粒径适宜的固体颗粒引入切削加工摩擦副接触表面之间，在实现液相润滑的同时发挥固体润滑剂的特殊润滑和承载作用。切削韧性材料时，可用含胶体石墨或 MoS_2 的切削油；切削脆性材料时，可用含胶体石墨的乳化液。含 MoS_2 的水基润滑剂可用于车削、钻孔和铰孔加工；含 MoS_2 分散相的润滑油适用于低速重载切削。研究表明，将 MoS_2 分散到润滑油中可以改善润滑油的抗磨性能，尤其是在较高负荷下，其抗磨效果更为明显。由 MoS_2 、硬脂酸和石蜡混合制成的 MoS_2 油膏可以显著提高刀具的使用寿命。对 30CrMnSiA 材料进行攻丝加工时，不采用固体润滑剂时一个丝锥仅能攻 200 个螺孔，而涂覆 MoS_2 油膏后一个丝锥可加工 1000 个螺孔；锯割不锈钢时，采用含 0.5%~1% MoS_2 的 20 号机油润滑可以使锯条的使用寿命延长 3~4 倍。

(3) 最少量润滑技术。

切削液的冷却、润滑、排屑等作用在加工过程中并未得到充分有效地发挥，因此，人们试图不用或少用切削液，以适应降低成本、减少环境污染的要求，这就是所谓的最少量润滑技术(MQL)，也称为准干切削(near dry cutting)。它是将压缩空气与润滑液混合气化后，喷射到加工区，从而达到对加工进行润滑的目的。MQL 技术所消耗的润滑液很少，润滑效果显著，既可以降低成本，又不会对环境造成大的污染，加工后刀具、工件和切屑仍然保持干燥。以一台典型的加工中心为例，其进行湿切削加工时每分钟需要 20~100L 的切削液，而如果采用 MQL 技术，每小时只需要 0.03~0.20L 的切削液。采用 $(\text{TiAlN} + \text{MoS}_2)$ 涂层刀具对铝合金工件进行干切削时，刀具钻 16 个孔后即发生损坏，而采用 MQL 技术后，钻孔数达到 320 个钻头时刀具依然未发生明显的磨损。如果将 MQL 技术同刀具表面涂层涂覆技术相结合则效果更好。以 X90CrMoV18 合金钢加工为例，当用 TiAlN 涂层涂覆高速钢钻头进行干钻削时，钻削长度达 3.5m 后钻头即发生损坏，而采用

(TiAlN+MoS₂)复合涂层涂覆钻头和 MQL 技术后,其钻削长度可增加到 115m。

气液两相流体润滑是近年来开始应用的一项新的润滑技术。研究表明,气液两相流体润滑时的主切削力可明显减小。气液两相流体射流在两摩擦表面之间形成的润滑膜不同于纯润滑液的单相液膜,是由一定压缩空气气泡和润滑液混合形成的气液两相膜。俄罗斯专家在 1998 年首次采用蒸汽作为冷却润滑剂,与传统冷却方式相比,蒸汽冷却没有成膜阻碍新冷却介质进入冷却区现象。日本等国一些学者研制出喷气冷却系统。试验表明,喷射气体冷却有助于提高切削效率,降低切削区温度,提高刀具耐用度。使用微量润滑油润滑和冷风冷却技术与单纯使用普通切削液、冷风冷却和微量润滑油技术相比,可显著降低刀具磨损,提高加工表面质量。

1.3 自润滑刀具的概念及其实现方法

自润滑刀具是指刀具材料本身具有减摩、抗磨和润滑功能,可在无外加润滑液或润滑剂的条件下实现自润滑切削加工,可显著改善干切削过程的摩擦润滑状态。由于自润滑刀具的应用可减小摩擦与磨损,省去冷却润滑系统,减少设备投资,避免切削液造成的环境污染,实现清洁化生产,降低生产成本,因此自润滑刀具是一种高效、洁净的干切削刀具。实现刀具本身自润滑的方法有多种,可将其归纳为四种基本类型(如图 1-3 所示):①添加固体润滑剂的自润滑刀具;②微池自润滑刀具;③原位反应自润滑刀具;④软涂层自润滑刀具。

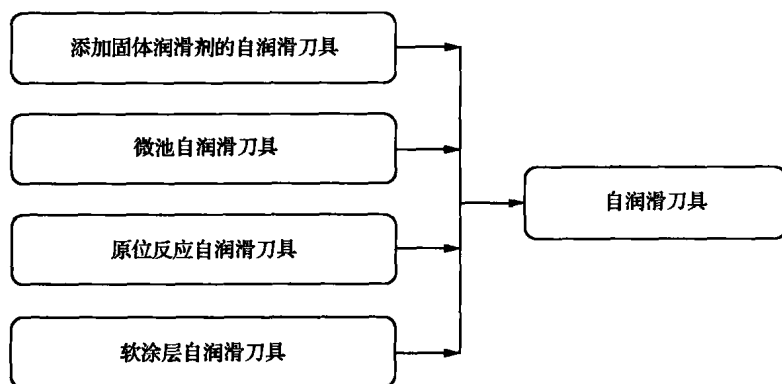


图 1-3 自润滑刀具的类型

(1) 添加固体润滑剂的自润滑刀具。

这种刀具是将固体润滑剂直接添加到刀具材料中,制备成含有固体润滑剂的复合刀具,常用的固体润滑剂有 MoS₂、h-BN、CaF₂、H₃BO₃、TaS₂ 及 WS₂ 等。切