

硬质合金刀具 断续切削破损理论

于彦波 王志勇 编著
朱忠业 刘国新

华中理工大学出版社

硬质合金刀具 断续切削破损理论

于彦波 王志勇 编著
朱忠业 刘国新

华中理工大学出版社

硬质合金刀具断续切削破损理论

于彦波 王志勇 编著
朱忠业 刘国新
责任编辑 钟小珉

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

武汉大学出版社印刷总厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 5.375 字数: 125 000

1990年11月第1版1990年11月第1次印刷

印数: 1—1 000

ISBN 7-5609-0508-O/TG·16

定价: 1.12元

前 言

破损是脆性材料（如硬质合金、陶瓷等）刀具的主要失效形式之一，尤其在断续切削加工的情况下刀具破损更为严重，因此研究刀具破损的问题就具有非常重要的意义。由于传统的切削刀具的失效理论是以刀具的磨损失效为基础而建立起来的，因此研究硬质合金刀具断续切削破损的现象、规律和机理就成为当前从事金属切削理论研究的工作者的重要课题，也是解决生产加工中出现的实际问题的需要。

本书作者在硬质合金刀具断续切削破损的失效方面作了一些研究工作，在理论与实践方面积累了一些资料，现择取工作经验和资料中的精华辑成此书。

最后，对哈尔滨工业大学袁哲俊教授所给予的鼓励以及多方面的支持（对试验研究工作提出了许多宝贵意见并亲自为本书撰写了序言）表示深切感谢；对担任本书主审工作并提出了许多宝贵意见的哈尔滨工业大学薄化川教授表示深切感谢；对为本书收集资料、协助电算并绘制大量插图的赵彦玲、韩贤国和杜伟等同志致以谢意。另外，在本书定稿前夕，谭光宇同志对第六章和第七章的内容又进行了部分修改，补充了最近作者在切出破损研究方面的一些新见解。

由于作者水平有限，书稿虽经反复修改，但错误和不妥之处仍在所难免，诚恳希望读者批评指正。

作 者

1989年12月于哈尔滨

序 言

硬质合金刀具是机械制造工业中使用量最大的刀具。由于这类刀具在实际使用中,尤其是在断续切削的情况下,大部分因破损而不能继续使用,同时,由于近年来陶瓷刀具和超硬材料刀具的应用逐步扩大,而这类刀具在使用中出现破损的机率更大,因此,研究解决这类刀具的破损问题有着重大的实际意义。近年来,随着机械制造工业中自动化程度的逐渐提高,以及数控机床、加工中心、柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)的广泛应用,要求刀具具有高度的可靠性和极小的破损率。因此,研究刀具的破损机理,提高刀具的破损性能,减少刀具在工作中非正常损坏——破损,已成为机械制造工业中迫切需要解决的重要问题。

近年来,刀具破损问题已引起人们的普遍重视,有不少人正在从事这方面的研究工作,并在理论上和实践上都取得了一定的成果。但到目前为止,系统论述刀具破损理论的文献资料还不多,系统介绍刀具破损机理和提高刀具抗破损性能方法的书籍就更缺少。因此,希望本书的出版对读者在这方面能有所帮助。

本书的作者收集和分析研究了国内、外有关刀具破损的文献资料,并进行了理论研究和试验验证,在此基础上写成了这本书。本书第一章介绍了研究硬质合金刀具断续切削时破损机理的理论基础;第二章对断续切削时的切入类型作了解析和分类;第三章分析介绍了切入破损的试验规律;第四章分析介绍了切入过程中刃区的应力状态;第五章介绍了切削过程中刃区的温度场和热应力对刀具破损的影响;第六章分析介绍了切出破损的试验规律;第七章介绍了切出过程中刃区的应力场对刀具破损的影响;第八章对刀具破损的微观机理作了分析;第九章介绍了提高硬质合金刀具抗破损性能的方法和硬质合金材料的合理选用。

本书对硬质合金刀具断续切削时的破损机理的分析介绍是比较系统、深入的,并提出了一定的方法以提高刀具的抗破损性能。因此,对从事金属切削加工研究的工程技术人员来说,这是一本比较有用的书。希望本书

的出版，对合理使用硬质合金刀具、减少刀具的破损、提高机械制造工业的技术水平以及促进我国的四化建设能有所帮助。

由于切削加工过程是很复杂的，且影响刀具使用性能和加工过程的因素很多，因此，刀具的非正常损坏——破损过程是一个非常复杂的随机过程，破损的原因和机理还有待于继续深入研究，同时，对这方面的不少看法和观点尚有争议也是难免的。本书的出版是希望能引起更多的人对刀具破损问题的重视，特别是在生产中对这个问题的重视，并希望能有更多的人研究这个问题。

袁哲俊

1989年12月

目 录

第一章	总论	(1)
§ 1-1	硬质合金刀具断续切削的研究进 展	(1)
§ 1-2	研究刀具破损的 意义	(3)
§ 1-3	研究破损机理的理论 基础	(4)
第二章	断续切削时切入类型的解析及分类	(21)
§ 2-1	M. Kronenberg方法 概述	(21)
§ 2-2	端铣切削系统的分析及切入类型的 解析	(25)
§ 2-3	九种切入类型的 解析	(30)
第三章	切入破损的试验	(39)
§ 3-1	切入破损的 概述	(39)
§ 3-2	切入破损的试验 方案	(40)
§ 3-3	切入破损的试验 规律	(41)
§ 3-4	误差 分析	(49)
第四章	切入过程中刃区的应力状态分析	(50)
§ 4-1	切入冲击力方向的 确定	(50)
§ 4-2	刃区应力状态的弹性力学 分析	(51)
§ 4-3	刃区应力状态的有限元 分析	(55)
§ 4-4	切入应力的试验 分析	(74)
第五章	切削过程中刃区的温度场及热应力分析	(78)
§ 5-1	概 述	(78)
§ 5-2	刀具刃区温度分布的 计算	(82)
§ 5-3	刀具刃区的热应力 分布	(89)
§ 5-4	刀具刃区的热 破损	(92)
第六章	切出破损的试验	(95)
§ 6-1	切出过程的 分析	(95)
§ 6-2	切出过程的负 剪 切	(97)

§ 6-3	切出破损的试验规律	(103)
§ 6-4	各种形态的切屑及刀具寿命	(108)
§ 6-5	纵向的切入、切出破损	(111)
第七章	切出过程中刃区的应力状态分析	(113)
§ 7-1	负剪切对刀尖受力状态的影响	(113)
§ 7-2	负剪切过程中刃前区的应力分析	(115)
§ 7-3	切出过程中刃区的应力场	(118)
§ 7-4	切出过程中的应力测定	(122)
第八章	刀具破损的微观机理	(126)
§ 8-1	刀具破损的断口分析	(126)
§ 8-2	断续切削中刀具破损的断裂力学分析	(129)
第九章	提高硬质合金刀具抗破损性能的方法	(137)
§ 9-1	优选切入类型及主刃各点几何角度合理值的校验	(137)
§ 9-2	刃口形状的试验研究与选用	(145)
§ 9-3	硬质合金刀具的最佳铣削法	(148)
§ 9-4	硬质合金刀具材料的试验研究与选用	(151)
§ 9-5	硬质合金刀具的刃磨	(155)
§ 9-6	不等齿距刀具的研究与应用	(157)
参考文献		(160)

第一章 总 论

§ 1-1 硬质合金刀具断续切削的研究进展

断续切削的铣刀与连续切削的车刀不同，在使用中往往因承受反复的冲击而破损。用硬质合金制成的刀具，虽然在耐磨性方面比高速钢刀具优越得多，但是，在耐冲击性方面却比高速钢刀具差得多。为了能用硬质合金制作如铣削等断续切削刀具，并使这类刀具能稳定地工作，广大的工程技术人员在铣刀类刀具的设计、制造以及铣削加工方法等方面做了大量的理论分析与试验研究工作。

在断续切削中，采用硬质合金刀具所遇到的难题是刀具的破损，即刀具刀齿的刃区部分产生的裂纹，引起崩刃，从而急剧地降低刀具的锋利性，使刀具失效而不能使用。因此，硬质合金材料在铣削等断续切削中的应用技术，是通过不断地研究刀具破损的问题而得到提高的。

40年代开始采用硬质合金铣刀时，技术人员所遇到的最大难题，就是断续切削时的冲击使硬质合金铣刀产生破损。因此，能否应用硬质合金刀具进行断续切削，就完全取决于能否防止刀齿的破损。当时，在铣削中使用不易产生振动的铣床，改进铣刀刀齿的形状，研制出耐冲击性好的硬质合金刀具，以及研究加工工艺条件等方法，已经用于解决刀齿的破损问题。同时，用上述方法还可以大大提高铣削的生产效率。到了50年代，西德的Opitz教授进行了大量有关铣削加工的研究工作，并指出：在硬质合金刀具的前刀面和后刀面上，除了存在通常的磨损现象以外，还存在“划痕”的现象。这种划痕对高速钢铣刀并无什么影响，但对

硬质合金铣刀却有很大的影响。在铣刀产生划痕后，随着热应力的反复作用，就会产生“热龟裂”，从而引起铣刀刀齿的破损。

以Opitz等人的热龟裂研究报告为开端，硬质合金刀具断续切削加工技术的基本问题——铣刀刀齿的破损，就逐渐成了人们研究的对象。以后世界各国的有关专家、学者就此问题进行了广泛深入的研究。除热龟裂现象以外，人们还经常看到成为刀具破损原因的其它龟裂现象。因此，铣刀的破损有好几种类型，并不是所有的破损都是由热龟裂引起的，它们是由不同的原因引起的。1963年Trent在研究切削刀具的磨损现象时，提出了关于刀具损伤的新理论。他详细研究了硬质合金刀具的塑性变形，并在论文中谈到：作为硬质合金铣刀破损的一般概念，必须包括三个不同的现象，即冲击、疲劳和热疲劳（热震）。同时，苏联的Зорев在他的论文中，介绍了在重复切削的断续切削中，热和机械的冲击使刀具产生微小的龟裂，这些龟裂引起硬质合金刀具的破损。在论文中，他还列举了导致龟裂发展的三个重要原因，即刀齿的温度变动范围大、作用在刀具上的切削力大和刀具材料的高温机械强度低。

日本的篠崎等人以及竹山、山田等人进行了热龟裂的研究，并取得了许多关于刀具破损的有价值的成果。根据竹山等人的研究可以知道，引起硬质合金铣刀崩刃的物质，是在切削结束以后仍附着在刀齿切削刃上的切屑，因为，在下一次切削开始时，切屑从刀齿上脱落会带走部分硬质合金，从而使刀齿破损。铣削奥氏体不锈钢工件时，可以明显地看到这种粘屑现象。如果在被铣削工件的侧面添加了黄铜板，即采用同时铣削不锈钢和黄铜板的“同时铣削法”，就可以防止粘屑现象的产生。试验证明，这种方法确实对防止铣刀崩刃有着非常显著的效果。

最近，国内的有关专家、学者也在刀具破损机理、铣削刀具材料的研究、不等齿距端铣刀的研制以及最佳端铣法等方面作了不少的工作，并在提高断续切削的生产效率和防止刀具破损方面

收到了一定的效果。

§ 1-2 研究刀具破损的意义

刀具材料的种类很多，但过去采用的大都是韧性材料，如碳素工具钢、合金工具钢、高速钢等。用这些材料制造的刀具，使用时失效的形式主要是磨损失效，因此以往的科技工作者集中了大量的精力去研究刀具磨损失效的规律和机理。例如，著名的 Taylor 公式就建立了刀具磨损量与切削用量之间的关系，成为当时金属切削加工的重要依据。然而，随着科学技术的飞跃发展，大量的脆性刀具材料涌入工具市场，如硬质合金、陶瓷、人造金刚石、立方氮化硼等材料部分地代替了韧性刀具材料而收到了明显的效果。特别是硬质合金材料应用在许多场合，占有绝对优势。由于这些材料具有许多韧性材料无法比拟的优点，因此采用由这些材料制成的刀具，使切削加工的生产率迅速上升，加工的范围更加广泛，如从前很难加工甚至无法加工的超硬材料、高温合金等工件也都被征服了。

脆性材料刀具在切削加工中的失效机理与韧性材料刀具的相比有很大的不同。虽然它们在使用时都会发生磨损，但是前者发生破损现象却极为严重，尤其是在断续切削加工中，破损几乎成为刀具失效的主要原因，因而成为生产中迫切需要解决的重大课题。特别是在自动化生产中，如果人们没有掌握刀具破损的规律，根本就无法确定换刀的时间，也难以保证加工的质量，更无法做到优选切削条件，使切削加工达到最优化。

生产实践的迫切要求，促进了金属切削理论的进一步完善。正如前文所述，现有的金属切削理论主要是以韧性材料刀具为研究对象发展起来的。人们以各种磨损为主要失效形式进行了深入、系统的研究，建立了金属切削的基本理论，并对刀具的磨损机理、磨损规律有了比较深刻的认识。然而对刀具破损的现象、

规律、机理的认识却很不完善，还处在探索的阶段，甚至对破损作出的定义也很不一致。因此，关于刀具破损问题的理论研究就成为一个亟待填补的空白，成为在新形势下发展完善金属切削理论的一个重要方面。

对刀具破损问题的研究已经成为世界上的一大热门课题。美国、加拿大、法国、英国、日本、苏联、德国、荷兰等许多国家的专家、学者，如M. C Shaw、J. Tully、J. Pekelharing、Зорев、Optize、Поладце、白井英治、星铁太郎等人对断续切削刀具破损问题进行了广泛的研究。可以预见，在不远的将来，刀具破损理论一定会有新的突破，金属切削理论和生产加工水平将会因此而得到一次巨大的提高，达到一个崭新的水平。

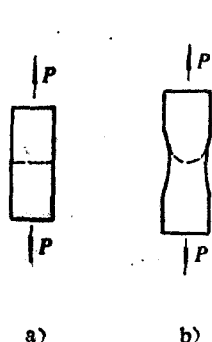
§ 1-3 研究破损机理的理论基础

刀具通常有两种类型的破损——塑性破损和脆性破损。塑性破损是在明显的塑性变形之后发生的，其判据通常为屈服应力准则。脆性破损是在应力值低于屈服应力值（纯脆性材料）或者相对地接近屈服点应力值（半脆性材料）的状态下发生的，其判据通常采用最大拉应力准则。因此，这表明脆性破损发生在垂直于最大拉应力 σ_1 方向的平面上，这时最大拉应力达到临界值（ $\sigma_1 = \text{常数}$ ）。在塑性破损的场合下，一般来说破损面是在最大剪应力的方向上。

在某些场合下，两种破损同时发生。例如，在塑性金属的拉伸试验中，试样的初期破损发生在颈部中间，这里的静水拉应力为最大值。当载荷进一步增加时，这一初期破损裂纹将沿径向向外扩展，直到剩余面积不足以承受剪应力为止，破损便会沿着与试样轴线大约成 45° 角的圆锥面上发生。

图1-1表示了不同的材料试样在拉伸状态下的破损：图a)为纯脆性材料，例如高碳钢；图b)为半塑性材料，例如低碳

钢，破损前试样的颈部变细；图c)为纯塑性材料，例如多晶体的铅。



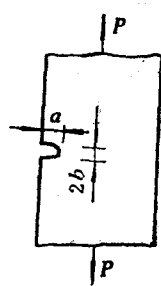
a)

b)

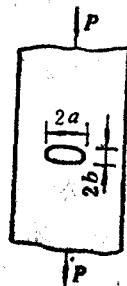


c)

图 1-1 破损的形式



a)



b)

图 1-2 椭圆形裂纹

一、Griffith理论

关于材料破损问题的计算始于Griffith (1924年) 对纯脆性材料的研究。Griffith认为,所有材料都含有微裂纹或微裂纹等效区域,这些裂纹随拉应力的增加而增加,当裂纹端部聚集的弹性应变能变得足够大时,提供了随着裂纹增长而生成新表面的表面能,这时裂纹将自发地扩展。Griffith所说的微裂纹等效区域,对于薄板上的边缘裂纹来说,为图 1-2 a) 所示的半椭圆形;对于薄板上的内裂纹(平面应力状态)来说,为图 1-2 b) 所示的椭圆形。如此裂纹端部的应力集中系数为 $(1 + a/b) \approx a/b$, 则图 1-2 b) 所示裂纹端部聚集的每单位宽度的弹性能为 $\pi a^2 \sigma^2 / E$ (E 是金属的弹性模量), 而涉及两个裂纹区域的表面能为 $2(2a \times 1)T$ (T 是金属的表面能)。与裂纹增长有关的能量变化为

$$\Delta u = 4aT - \frac{\pi a^2 \sigma^2}{E} \quad (1-1)$$

其中,吸收的能量为 (+), 裂纹增长时释放的能量为 (-)。根据Griffith理论,为使裂纹增长,必须增大拉应力。令

$$\frac{d\Delta u}{da} = 0$$

$$\text{即 } \frac{d(4aT - \pi a^2 \sigma^2 / E)}{da} = 4T - \frac{2\pi a \sigma^2}{E} = 0 \quad (1-2)$$

可得破损时临界拉应力为

$$\sigma = \sqrt{\frac{2TE}{\pi a}} \quad (\text{平面应力状态}) \quad (1-3)$$

这一公式与玻璃一类的纯脆性材料的试验结果非常吻合，但是与半脆性材料的试验结果只是定性地相符。例如，对于半脆性材料， $\sigma \approx 1/\sqrt{a}$ 。

对于平面应变状态，破损时

$$\sigma = \sqrt{\frac{2TE}{(1-\mu)^2 \pi a}} \quad (1-4)$$

式中， μ ——泊松比。

Orowan (1950年) 曾指出，半脆性材料试样的裂纹端部的材料将发生塑性变形，因而裂纹增长的能量 T ，比表面能 γ 大得多。所以，根据Orowan的观点，对于半脆性材料，式(1-3)应为

$$\sigma = \sqrt{\frac{2T, E}{\pi a}} \quad (\text{平面应力状态}) \quad (1-5)$$

二、材料的一般破损机理

本世纪50年代，Irwin (1957年) 及其同事建立了破损机理的理论基础，他们通过试验提出了称之为应力强度因子的材料常数 K 。这一常数从脆性裂纹增长的角度，表征了在材料中有缺陷存在，从而影响了材料的抗破损性能的这样一个重要观点。应力强度因子按如下公式定义：

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1-6)$$

式中， σ ——破损应力，

a ——裂纹长度的1/2。

根据式(1-5)和式(1-6),显然有

$$K = \sqrt{2T, E} \quad (1-7)$$

因此,事实上 K 只是Griffith和Orowan分析脆性材料破损时的 T ,的度量。但是破损机理理论提出了对于给定材料度量 K 值的标准,而 T ,仅仅是一个定性的概念。 K 值的确定涉及到图1-3所示的若干个对应于试验中半裂纹长度的载荷 P -挠度 δ 曲线的斜率。裂纹的起始端类似在薄试样上锯的锯口,该锯口受载后疲劳锐化。图1-3中的钳规用来测量对应于不同 P 值的挠度。

如式(1-6)所示,对于给定的材料,一旦确定了应力强度因子 K ,即可确定破损应力的变化。

上面描述的应力强度因子所对应的裂纹模型为张开型裂纹(图1-4中的模型I),通常注明为 K_{Ic} 。这是为了将这一应用最为广泛的 K 值同其它载荷模型的 K 值区别开来(如图1-4所示,Ⅰ表示垂直于裂纹端面的剪切载荷,Ⅱ表示平行于裂纹端面的剪切载荷)。

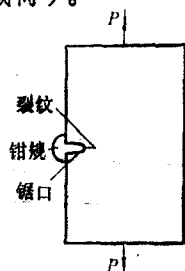


图1-3 确定应力强度因子的试验

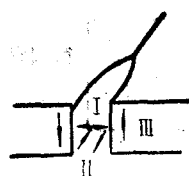
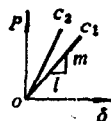


图1-4 不同的应力强度因子(K_{Ic} 、 K_{IIc} 、 K_{IIIc})的载荷模型

三、受压时脆裂的产生

根据最大拉应力准则,脆性材料受拉时会发生破损。那么,当诸如岩石、混凝土、石膏、玻璃等材料承受单向压缩时,将如何发生脆性破损呢? Griffith在很多年以前就已经回答了这个问题。Griffith认为,所有材料,尤其是脆性很大的材料,都

含有微裂纹。不但拉应力可使裂纹在端部扩展，而且即使是微小的压应力也可以导致裂纹的扩展。Griffith是在二维空间中进行分析的，如图1-5所示。他假设在平面应力状态下，在很细的二维微裂纹上作用有主应力 P 和 Q （ P 在数值上比 Q 大），裂纹始终沿与应力 Q 的作用方向成 θ 角的方向扩展。应用 Inglis（1913年）提出的裂纹端部应力的弹性力学解，Griffith计算了裂纹端部的最大拉应力：

当 $3P+Q > 0$ ，并且 $\theta = 0$ 时，则

$$\sigma_{max} = P$$

当 $3P+Q < 0$ ，并且 $\cos 2\theta = (P-Q) / [2(P+Q)]$ 时，
则

$$\sigma_{max} = \frac{(P-Q)^2}{8(P+Q)}$$

根据这一二维空间的弹性力学解，可以得出破损轨迹，如图1-6所示。可见在单向压缩状态下的破损应力（C点）为单向拉伸状态下的破损应力（T点）的8倍。

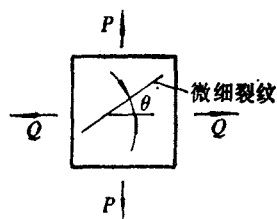


图1-5 微裂纹的方向

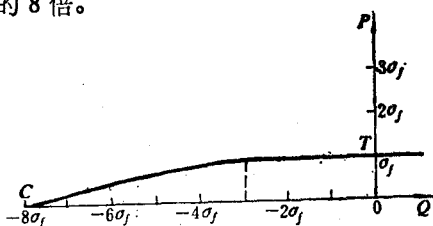


图1-6 Griffith提出的破损轨迹

Paul和Mirandy(1975年)假设很细的三维空间的微裂纹形状为椭圆形，并把Griffith的计算扩展到三维空间。与Griffith一样，他们假设了塑性材料在最大拉应力下破损的准则。假定裂纹的表面之间不接触，且裂纹之间相距足够远，不会发生互相干涉。图1-7所示为不同形状的细小缺陷引起的破损轨迹。图中， a 和 b 分别是假设椭圆的长轴和短轴， μ 是泊松比， σ_c 是破损处单

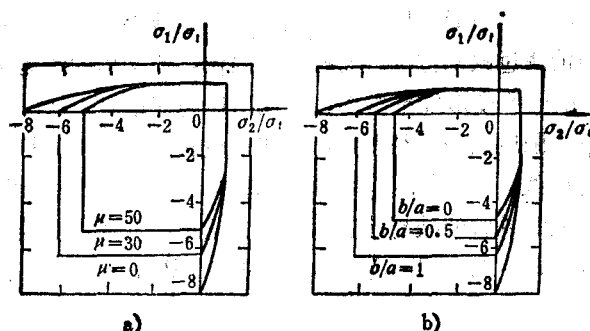


图 1-7 Paul和Mirandy提出的破损轨迹

向弹性拉应力。显然，根据 b/a 和 μ 的不同值，单向抗压强度与单向抗拉强度的比值 σ_c/σ_t 在4.5~8之间。Paul和Mirandy强调，出现的这些破损轨迹是初期破损的轨迹，并且这种形式的初期裂纹不可能自己扩展。这一分析结果与Griffith一样，是以最大拉伸破损应力为基础的，因此其结果与中间应力无关，并且只适合于平面应力和平面应变状态。

臼井英治、Ihara和Shirakashi(1979年)结合维布尔概率分析，把Paul和Mirandy的理论应用到刀具材料的研究上。为了确定维布尔常数，他们对K10(Co的含量为5.5%，WC的含量为94.5%)和P20(Co的含量为8%，混合碳化物的含量为92%)烧结钨系硬质合金材料进行了四点弯曲和单向压缩试验。单向抗压强度与单向抗拉强度的中间值的比值 σ_c/σ_t 大约为：

材料	σ_c/σ_t
K10	1.95
P20	2.64

Fisher(1953年)提出了与上述不同的计算脆性破损应力的方法。他假定脆性材料恰好在破损以前屈服，因而对于象铸铁这样的脆性材料，初始流动应力与破损应力非常接近。与Griffith一样，Fisher也假定了缺陷的自由分布。然而，他所说的缺陷不