

青 ★ 年 ★ 科 ★ 学 ★ 家 ★ 文 ★ 库

THE SERIAL BOOKS WRITTEN
BY YOUNG SCIENTISTS

金属切削毛刺

王贵成 著

青年科学家文库

金属切削毛刺

王贵成 著

吉林科学技术出版社

【吉】新登字 03 号

金属切削毛刺

王贵成 著

责任编辑:成与华

封面设计:杨玉中

出版 吉林科学技术出版社 850×1168 毫米 32 开本 5.125 印张

发行 吉林省新华书店 插页 8 112 000 字

1997 年 11 月第 1 版 1997 年 11 月第 1 次印刷

印数 1—1100 册 定价:10.00 元

印刷 吉新月历公司印刷分公司

ISBN 7-5384-1868-7/TG·4

内 容 提 要

本书系统地阐述了金属切削毛刺的特性、生成机理及其变化规律，指出了控制毛刺的技术途径。全书由绪论（第1章）、切削运动——刀具切削刃毛刺分类体系（第2章）、两侧方向毛刺（第3章）、进给方向毛刺（第4章）、切削方向毛刺（第5章）、结论（第6章）和发展与展望（第7章）组成。

本书供从事金属切削学理论和精密加工工程学理论研究及其应用的科技工作者使用，也可供研究生和大学高年级学生参考。

《青年科学家文库》评审委员会

顾	问:	王大珩	杨振宁	
主	任	委	员:	高景德
副	主	任	委	员:
		高	潮	刘东生
		丁	石	孙
		鲍	奕	珊
委	员:	按姓氏笔画排列		
		王	寿	仁
		王	泽	九
		石	元	春
		叶	耀	先
		田	光	华
		许		翔
		杨	笑	清
		吴		博
		何	耀	绅
		张	锐	生
		陆	道	培
		陈	运	泰
		陈	佳	洱
		陈	章	良
		罗		伟
		赵	玉	秋
		赵	柏	林
		俞	鸿	儒
		姜	东	华
		顾	方	舟
		高	为	炳
		阎	隆	飞
		雷	天	觉
		黎	乐	民

祖国的希望 未来的曙光

——寄语青年科技工作者

王大珩

翻开吉林科学技术出版社送来的《青年科学家文库》书目及作者名单，一个个自强好学，勇于探索创新的青年人仿佛就在眼前，使我欣慰，感到后生有望。所以在《文库》编辑出版之际，我很乐于借此机会，同广大青年科技工作者讲几句共勉的话。

这些年来，一大批在五星红旗下诞生、成长起来的年轻科技工作者崭露头角，在面向国民经济主战场的应用研究和在基础科学以及高技术研究等诸多方面取得优异成就，有的跻身国际领先地位，或达到国际先进水平，有的填补国内空白，这些成果对推动科学技术进步，发展国民经济起到了重要作用。为鼓励青年科技工作者的科学研究和发明创造，中国科学技术协会、中国科学院分别设立了青年科技奖和青年科学家奖，规定每两年评选一次。首届青年科技奖评出 94 名，首届青年科学家奖评出 25 名，他们是从全国数以百万计的青年科技工作者中层层遴选出的佼佼者。

在此基础上，经过中国科协和中国科学院的推荐，吉林科学技术出版社编辑出版首届部分获奖者的著作，

并获得长白山学术著作出版基金的资助，这对广大青年科技工作者是很大的鼓舞。出版社关心青年科技工作者的成长是值得赞扬的。

当今，在激烈的国际竞争中，重要的是看一个国家的综合国力，而其中重要的一个方面是科学技术的进步，所以各国都把科学技术作为推动经济发展和社会进步的重要手段。我国是一个拥有十一亿人口的大国，经济还很落后。但是我们有志气、有能力振兴中华，立足于世界民族之林。实现这样的宏愿，要靠我们几代人的艰苦奋斗。中国科学技术的兴旺发达要靠我们老中青科技工作者团结合作，但归根到底要靠你们青年人。长江后浪推前浪，一代更比一代强。党和人民把国家的前途、民族的命运寄托在你们青年人身上，正如江泽民同志所说：“你们是祖国希望所在，是中国未来的曙光。”

我们这些人都已年逾古稀，要你们接好班，要有理想、有志气。一个人也好，一个民族也好，都要有一点精神，要有使命感，要有民族自强心，要为国家、为民族争口气，奋发向上，勇于进取；作为优秀的青年科技人才，除业务上有突出成就外，还要有不计名利、无私奉献的高尚精神，现在尤其要提倡这种精神，还要有求实的科学态度，尊重知识，尊重他人的劳动；你们还要发扬中华民族的美德，那就是要有集体主义精神，要团结协作，自力更生，艰苦奋斗，不折不扣地去拼搏，满怀希望，开拓未来！

1990年2月

序

金属切削毛刺是切削加工中产生的特殊现象之一，它直接影响到被加工产品的尺寸精度和形位精度，特别是对于精密或超精密加工，金属切削毛刺往往成为影响产品质量的关键因素。深入系统地研究金属切削毛刺的发生机理，科学地揭示出毛刺生成及变化的基本规律，开发出抑制或减小金属切削毛刺的技术和方法，对于提高现代机械制造技术水平，具有重要意义。

有关金属切削毛刺的系统研究，始于70年代初期，美日等国家从事金属切削理论研究的学者们认为，金属切削毛刺是影响精密、超精密加工的关键性问题。当时的历史背景是，进入70年代以后，新兴科学技术迅速发展，诸如宇航、原子能、激光、红外等学科领域。其中，一些特殊的机械装置，如宇航飞行器、原子锅炉、激光器等，都要求在一定时间内，工作绝对可靠性，而这些装置的构件必须具有高精度、高性能、高寿命。这对机械制造学科提出了新的研究课题。

金属切削毛刺既是金属切削中的一种特殊现象，而它几乎出现于所有切削加工的工件的边、角、棱部位上。它直接影响着构件的装配质量和整机的工作稳定性、可靠性和使用寿命。即使今天，机械制造技术有了长足的进步，机械加工过程的自动化、智能化、精密化仍然是机械制造技术的主攻方向。因此，可以说，金属切削毛刺的控制与去除是实现精密加工和自动化加工的关键技术之一。

金属切削毛刺的形成是以切屑形成及切屑与工件的分离为基础的，是金属切削理论中的一个重要组成部分。金属切削毛刺生成机理的研究，涉及到材料科学，弹、塑性力学，机械动

力学以及精密加工工程学等多个学科领域。

王贵成博士长期从事金属切削理论的教学与科研工作。他的论著《金属切削毛刺》一书，在我国金属切削学的研究中尚属首著。无疑，本书的出版，对促进金属切削理论和精密加工理论的发展，具有重要学术价值，所开发的抑制或减小毛刺的技术、工艺和方法等，在精密加工、柔性制造系统（FMS）和其他自动化加工中，具有广阔的应用前景。

本书内容丰富，论述新颖，反映出作者的渊博知识和他在金属切削学领域内的深厚造诣。本书的出版，也表明了一个青年科技工作者，只要他在某一学科领域内，孜孜不倦，勤奋努力，经过长期的辛勤耕耘，必然获得丰硕的劳动成果。

我们欣喜地看到，一大批有作为的青年科技工作者正在脱颖而出，他们为繁荣祖国的科技事业贡献出了自己的聪明才智，他们在攀登科学高峰的道路上不屈不挠地勇于拼搏奋斗。

最后，祝愿王贵成博士在金属切削学领域的研究中，再接再厉，创造更多新成果。

中国科学院院士 杨叔子
华中理工大学教授

1995. 12. 20

前 言

随着科学技术的发展,现代机械制造技术朝着精密化、智能化和自动化方向迈进,对机械加工精度的要求越来越高,甚至对工件棱边形态也提出了一些明确的要求。这就使得在加工精度要求不太高时认为工件边、角、棱等处形成的毛刺的影响可以忽略的传统认识受到了挑战。毛刺是金属切削过程中产生的特殊现象之一,它的尺寸和形状直接影响到工件的尺寸精度和形位精度。尤其是在精密与超精密加工、柔性制造系统和其它自动化加工中,去除毛刺作业常常成为降低系统生产效率、增大加工成本的直接原因之一。因此,深入地研究金属切削中毛刺的生成机理及其变化的基本规律,开发抑制或减小毛刺的新技术、新工艺和新方法,对于丰富和发展精密加工工程学和金属切削学理论,提高现代机械制造水平,促进机械工业技术进步具有重要意义。

本世纪 70 年代起,美国、日本和德国的机械工程专家和学者相继开始对毛刺进行研究,取得了很大进展。作者自 1986 年赴日留学起,一直致力于毛刺生成机理及其抑制技术方面的研究,初步创立了以切削运动——刀具切削刃毛刺分类体系为基础的金属切削毛刺生成与控制理论。现将其著成此书,希望它能对金属切削毛刺的深入研究、对少无毛刺切削加工技术的形成及应用起到推动作用。

本书以实验为基础,着重讨论了毛刺的特性、形成过程及其主要影响因素,系统地揭示出毛刺生成与变化的基本规律,指出了控制毛刺的技术途径。全书由 7 章组成。第 1 章绪论,第 2 章切削运动——刀具切削刃毛刺分类体系,第 3 章两侧方向

毛刺，第4章进给方向毛刺，第5章切削方向毛刺，第6章结论和第7章发展与展望。

学术上作者承蒙学术前辈们的教诲和指导及同事们的鼎力协助。感谢导师中山一雄教授，他指导我涉足金属切削毛刺研究领域，并一直给予热情的鼓励和指导；感谢并怀念导师童忠铤教授，他献身科学的敬业精神和诲人不倦的崇高品格使我终生受益，永志不忘；感谢导师程耀东教授和金瑞琪教授，他们渊博的学识和严谨求实的治学态度深深地影响着我，激励着我勤奋求实、勇于开拓。此外，新井实博士、王春生博士等也曾为研究工作给予了大力支持和协助，值此一并深表谢意。

感谢中国科学院院士、华中理工大学杨叔子教授为本书撰写序言；感谢中国科协、长白山学术著作出版基金会和吉林科学技术出版社等单位为本书出版给予的大力支持。

此外，研究工作曾得到机械工业部科技基金、黑龙江省教委基础研究基金和机械工业部跨世纪优秀人才专项基金等的资助，一并致谢！

王贵成

1995年12月10日

摘 要

切削毛刺的控制与去除技术是现代机械制造技术的两大发展方向——精密与超精密加工和自动化加工的关键技术之一。金属切削毛刺生成机理的研究是实现有效地控制与去除毛刺的基础性研究,它对促进精密加工理论和金属切削理论的发展具有重要的学术价值,它所开发的抑制或减小毛刺的技术、工艺和方法等在精密加工,柔性制造系统(FMS)和其它自动化加工中具有广阔的应用前景和重大的应用价值。近年来,金属切削毛刺的研究引起了国外机械工程专家和学者们的高度重视。

本书主要致力于金属切削毛刺生成机理的实验与理论研究,其目的在于科学地揭示出毛刺生成及变化的基本规律,开发出若干抑制或减小毛刺的技术和方法,进而确立出金属切削毛刺的生成与控制理论。全文由7章组成。第1章绪论,第2章切削运动——刀具切削刃毛刺分类体系,第3章两侧方向毛刺,第4章进给方向毛刺,第5章切削方向毛刺,第6章结论,第7章发展与展望。本研究的主要贡献可概述如下:

1. 首次将毛刺的生成与切削运动联系起来,建立了切削运动——刀具切削刃毛刺分类体系,把毛刺分为两侧方向毛刺、进给方向毛刺和切削方向毛刺三大类,实现了切削毛刺生成机理研究与去除毛刺技术研究的有机统一,为系统深入地研究切削毛刺奠定了坚实的理论基础。

2. 确立了二维切削中切削方向毛刺与亏缺(亦称负毛刺)的判别准则,揭示出切削方向毛刺与亏缺的界限转换条件为:剪切应变 $\epsilon \leq 3$,为亏缺区; $3 < \epsilon < 4$ 时,为过渡区; $\epsilon > 4$ 时,为毛刺区。

3. 首次提出了切削方向毛刺形成的实质为剪切滑移——断裂分离,而切削方向亏缺形成的实质为剪切滑移——导裂过切——断裂分离的观点,并得到了实验的证实。

4. 首次提出并证实了金属切削中负剪切区域和负剪切角 φ' 的存在,讨论了负剪切角 φ' 对切削方向亏缺形成及其变化的影响。

5. 找到了切削毛刺形成及变化中的若干特征明确的界限物理量——界限主偏角 k_{rl} 、界限切削深度 a_{pl} 和界限进给量 f_l ,搞清了各界限物理量

变化的一般规律,进而提出了若干控制毛刺的技术和方法。

6. 先后建立了两侧方向毛刺,进给方向毛刺和切削方向毛刺生成的切削模型,并进行了深入的理论分析和探讨。其中,运用工程力学和断裂力学等理论对进给方向毛刺根部厚度的理论计算与切削实验结果基本吻合,为系统深入地研究金属切削毛刺开辟了新的途径。

7. 揭示出两侧方向毛刺形成及变化与切屑剪切应变 ϵ 之间的关系。指出:当 $\epsilon < 3$ 时,毛刺尺寸小;当 $3 < \epsilon < 6$ 时,毛刺尺寸随 ϵ 的增大而增大;当 $\epsilon > 6$ 时,毛刺尺寸呈现饱和状态,趋近于某一常数。此外,还给出了毛刺高度尺寸随切削次数增加而增大的毛刺叠加法则等。

8. 搞清了车削加工中一次毛刺和二次毛刺的界限转换条件,提出:自动化车削加工中切削用量的优先选用顺序应为: $a_r \rightarrow f \rightarrow v$ 。

9. 除使用 6-4 黄铜做实验工件材料外,本研究还增加了 20"钢、45"钢和 HT15-33 等工程常用材料。并且,对三维车削、刨削、钻削、铣削等加工中毛刺的生成及变化进行了系统的实验研究,使其具有更高的理论价值和更为广泛的实际应用价值。

10. 结合车削、刨削、钻削、铣削和磨削等加工,开发出了斜置工件法,双主偏角刀具切削法、切削用量选择法、刀具几何参数调整法、工件叠加切削法、工件终端部材料脆化法、工件终端部倒角法、挡板切削法、刀具结构改进法和切削方式选择法等十数种抑制或减小切削毛刺的技术、工艺和方法,在精密加工、柔性制造系统和其它自动化加工中有较大的实际应用价值。

通过对两侧方向毛刺、进给方向毛刺和切削方向毛刺的系统实验与理论研究,确立了以切削运动——刀具切削刃毛刺分类体系为基础的金属切削毛刺的生成与控制理论。它为有效地控制与去除毛刺提供理论指导,对促进精密加工学和金属切削学理论的发展具有重要的学术价值,在精密加工、FMS 和其它自动化加工中有广阔的应用前景,并将带来显著的技术经济效益。

关键词:金属切削,精密加工,自动化加工,毛刺,工件缺欠,剪切应变 ϵ ,负剪切区域,负剪切角 φ' ,两侧方向毛刺,进给方向毛刺,切削方向毛刺,亏缺,界限主偏角,毛刺形态的界限转换参数,棱边质量,去除毛刺技术,抑制毛刺技术。

Abstract

The controlling and deburring technology of machining burrs is one of the key technologies of the precision or superprecision and automatic processing, which are two main developing directions of the mechanical manufacturing. The study on the mechanism of burr formation in metal cutting is a basic work to positively control and decrease burrs in size in machining. The study have important science significance academic value to promote theoritical development of the precision surface finishing and metal cutting, new technologies, processings and methods for the control of machining burrs developed in the study can be widely used to precision cutting, FMS and other automatic working. Recently years, foreign engineers and scholars of the mechanical engineering attach importance to the study of the burr formation.

This dissertation concentrates on the researches of the experiment and theory for the forming mechanism of metal cutting burrs. Firstly, main patterns of change and forming of cutting burrs is obtained. Secondly, a certain numbe of measures to control and decrease burrs in size are developed. Finally, forming and controlling theory of burrs in metal cutting is established. It consists of seven charpters. The first charppter is introduction. The second charppter is classification systems of machining burrs based on the cutting motion and cutting edges of the tool. The third charppter is sideward burrs. The forth charppter is feed direction burrs. The fifth chareter is cutting direction burrs. The sixth charppter is conclusion. The seventh charppter is developments and prospects in the field. In the paper, the main contributions are summarized as follows:

1. A new classification system of burr is built based on the cutting motion and cutting edges of the tool. It combines cutting burr formation with metal cutting motion, takes burrs divide into sideward burr, feed direction burr and cutting direction burr, bring about unification of study of burr forming principles and deburring work, and sets a solid foundation

for the further investigation of cutting burrs.

2. Distinguish criterions of cutting direction burrs and fractures in orthogonal cutting are given and the main factors which influence critical transformation of cutting direction burrs and fractures are investigated. The results show that the critical change conditions of cutting direction burrs and fractures are: shear strain of chip $\epsilon \leq 3$, fracture area; $3 < \epsilon < 4$, transformation area; $\epsilon > 4$, burr area.

3. A new viewpoint is the forming essence of cutting direction burrs is shear strain of the material to be cut and breaking off and separating, but cutting direction fracture is shear strain of the material to be cut and crack forming and breaking off and separating. And the viewpoint is verified by experiments.

4. The negative shear area and angle φ' of negative shear plane in metal cutting are first found out and verified by experiments, and effects of angle φ' of negative shear plane on the change of cutting direction fracture formation are experimental studied in orthogonal cutting.

5. Some specific physical parameters are obtained in the forming process and changes of machining burrs. They are: critical tool cutting edge angle k_{cl} , critical depth of cut a_{pl} and critical feed per revolution f_l . The change rules of each parameter are found out. Further, a certain number of measures to restrain and decrease the burrs have been advanced.

6. The cutting models of sideward burr, feed direction burr and cutting direction burr are respectively established. One of them, theoretical calculation result on the root thickness of feed direction burr using engineering mechanics theory, is identical to the experiment data. It opens up new ways in order to further study cutting burrs.

7. The relations between sideward burrs in size and shear strain ϵ of chip are found out by experimental study. Those are: when $\epsilon < 3$, practically no burr is formed; in the range $3 < \epsilon < 6$, burr height rises with the increase of ϵ ; when $\epsilon > 6$, however burr height does not rise any more. And overlap rule of sideward burr in size is given when superposed cutting.

8. The critical transformative condition of the primary burr and secondary burr in turning is carried out. And that selecting order of cutting parameters in automatic turning is $a_p \rightarrow f \rightarrow V$ from controlling ways of burrs is pointed out.

9. In addition to 6—4 brass as workpiece, other engineering materials such as 20% and 45% carbon steel. HT15-33 cast iron and others are used. It makes the study have more theoretical significance and wide utilization value in production.

10. Along with operations of the turning, sharpening, drilling, milling and grinding, some new methods, technologies and processings such as overlap workpieces, improved cutting tool formes, workpiece charmfers, adjustment of cutting parameters and others to restrain and decrease burrs in size are developed, which have noticeable theoretical significance and wide practical value in the precision cutting, FMS and automatic machining.

By experimental study and relative theory analysis on the sideward burr, feed direction burr and cutting direction burr in metal cutting, burrs forming and controlling theory have been built based on the classification systems of cutting motion and cutting edges of tool, which present theoretical guide to effectively control and decrease burrs in machining and promote theory development of the precision machining and automatic processing technology. And the study results can be used to precision machining, FMS, precision surface finishing and other automatic working, carried out good technical economic results for production.

Key words: Metal cutting, Precision machining, Automatic processing, Cutting burr, Surface damage, Shear strain ϵ , Negative shear area, Negative angle φ' of shear plane, Sideward burr, Feed direction burr, Cutting direction burr, Fracture, Critical transformative parameters of burrs formes, Edge quality, Deburring technology. Controlling technology of burrs.

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 金属切削毛刺的危害	(2)
1.1.2 研究的必要性与迫切性	(3)
1.2 国内、外研究现状	(4)
1.2.1 二维切削中的毛刺现象	(5)
1.2.2 切削毛刺的形成及其特性	(6)
1.2.3 工件(或零件)结构形式对毛刺形成的影响	(7)
1.2.4 两侧方向毛刺生成的研究	(8)
1.2.5 存在的主要问题	(9)
1.3 本研究的主要内容	(11)
第2章 切削运动——刀具切削刃毛刺分类体系	(13)
2.1 金属切削毛刺分类体系概述	(13)
2.1.1 以毛刺形状特征为基础的毛刺分类体系(奥岛)	(13)
2.1.2 以毛刺形成机理为基础的毛刺分类体系(Gillespie)	(14)
2.1.3 以刀具切削刃和毛刺伸出方向为基准的毛刺分类 体系(中山)	(16)
2.1.4 各种切削毛刺分类体系中存在的主要问题	(17)
2.2 切削运动——刀具切削刃毛刺分类体系	(18)
2.2.1 分类体系的构成	(18)
2.2.2 分类体系的特点	(21)
2.2.3 需要研究的主要问题	(23)
2.3 切削运动——刀具切削刃毛刺分类体系的应用	