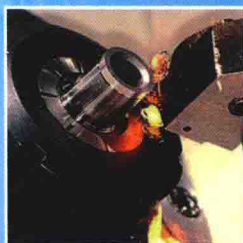


切削加工表面完整性的 理论和方法

陈 涛 著



科学出版社

切削加工表面完整性的 理论和方法

Theory and Methods of Surface Integrity in Machining

陈 涛 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是在作者多年对切削加工表面完整性研究的相关成果基础上完成的,书中系统地阐述了切削加工表面完整性的理论和方法、最新发展及应用。

全书共 8 章,主要包括:切削表面完整性总论,切削表面形貌的表征与测试,切削表层微观结构特征及检测,切削表面残余应力及测试,切削试验设计与数据分析,难加工材料切削加工表面完整性,切削加工过程的有限元模拟,切削表面完整性的预测优化与评价等。

本书可供从事切削理论与技术的研究人员、相关企业的技术人员参考,也可作为高等学校相关专业研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

切削加工表面完整性的理论和方法/陈涛著. —北京:科学出版社, 2015.12
ISBN 978-7-03-046743-0

I. ①切… II. ①陈… III. ①金属切削-金属表面处理 IV. ①TG506

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 302547 号

责任编辑:刘信力 李 慧/责任校对:彭 涛

责任印制:张 伟/封面设计:陈 敬

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 8 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2016 年 8 月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:301 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

切削加工是机械制造业中最主要和最常用的零件加工方法。随着现代制造技术的飞速发展,高端装备制造对切削加工表面完整性的要求与日俱增。表面完整性是表征加工过程中被加工零件表面层特征的变化及其对表面工作性能影响的综合指标。自表面完整性的概念提出以来,国外已开展了系统的研究,并将取得的成果推广和应用于航空航天、能源、机械装备等工业领域,使其成为先进制造技术中一项不可替代的重要基础技术。而国内对表面完整性的研究缺少足够的重视和投入,目前仍处于探索阶段,由于研究缺乏系统性,所取得的成果非常有限。因此,发展我国自主的表面完整性技术对学术界和工业界都是十分紧迫和现实的历史使命。

作者参阅了大量的国内外相关文献,对切削加工表面完整性问题进行了系统、详实的分析研究。书中在汇集了作者近年来的研究成果基础上,又吸收了在国际上发展较快、使用价值较高的表面完整性检测技术。该书内容包括切削表面完整性的基础理论、应用技术、数值分析和优化评价等多个方面,是一本能及时反映切削加工表面完整性发展的著作,综合了国内外在切削加工表面完整性方面的最新研究成果,坚持理论方法与工业应用相结合,具有很强的理论性和实践性。

该书是国内少有的对切削加工表面完整性技术进行系统研究的学术专著,是作者在国家自然科学基金和国家科技重大专项等相关课题研究过程中,对切削加工表面完整性进行了深入系统的研究而形成的研究成果。同时,切削加工表面完整性是衡量高品质的切削加工过程的效果和意义的标志,随着切削加工技术的进一步发展,将会变得越来越重要,这也将成为哈尔滨理工大学高效切削及刀具国家地方联合工程实验室的重要研究方向。

书中内容丰富,新颖先进,基础理论和技术实践相结合,学术和技术内容代表了切削加工表面完整性的前沿和发展趋势,并兼有学术研究专著和技术参考书的特点,具有较好的可读性和借鉴性。该书体现了切削加工表面完整性研究的基础性、系统性、先进性和应用性等特点,其出版将有助于扩大和提高国内在切削加工表面完整性方面的研究和应用。

刘南元

前 言

随着科学技术的迅速发展,尤其是航空、航天、装备制造等领域的发展,零件常工作在高温、高压、高速、交变载荷等极端复杂环境下,对零件的抗疲劳、磨损和腐蚀的性能提出了更高要求。这些性能均取决于零件表面层的状态和性能,即表面完整性。改善和提高零件切削表面完整性,对于预防零件失效、延长使用寿命、减少经济损失、提高装备的安全可靠性都非常重要,已引起机械制造界的广泛关注。

早在 20 世纪 70 年代,国外就开始研究加工表面完整性对零件疲劳性能的影响,提出了不同等级的表面完整性数据组,为后续加工表面完整性理论研究奠定了基础。历经几十年的发展,加工表面完整性技术正推动着机械加工制造向“高性能制造”方向转变,控制零件的表面完整性,使零件的性能满足设计要求,是实现高性能切削的理论基础,也是高品质零件加工制造的实际需要。

本书旨在总结过去研究工作的基础上,阐述切削表面完整性的基础理论、技术方法以及应用实践,为科学研究和工业生产提供基本理论与方法。全书共 8 章,主要包括:切削表面完整性总论,切削表面形貌表征和测试,切削表层微观结构特征及检测,切削表面残余应力及测试,切削试验设计与数据分析,难加工材料切削加工表面完整性,切削加工过程的有限元模拟,切削表面完整性的预测优化与评价等。

本书系统地阐述了切削表面完整性的表征及分析研究方法。除第 1 章总论和第 6 章实例外,其余各章均由两部分组成:第一部分是理论阐述,力求系统性和完备性;第二部分是具体研究方法及应用。本书力求步骤详细,图文并茂,通过理论和应用的结合,使枯燥的内容鲜活生动,易于掌握理解,可操作性强。第 6 章中,还结合切削加工研究的热点和难点,将表面完整性理论与方法贯穿于淬硬钢和镍基合金等典型难加工材料切削加工表面完整性的分析中,具有较好的实用价值和参考价值。另外,本书还尽量地吸收了当前有关切削表面完整性的最新研究内容以及相关的新技术,以体现知识的先进性和及时性。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目(项目编号:51235003,51475125)、国家重大科技专项(项目编号:2012ZX04012021)的资助,特此向支持和关心作者研究工作的单位和个人表示衷心的感谢。哈尔滨理工大学“高效切削及刀具国家地方联合工程实验室”的同事和研究生为本书的撰写做了大量的资料整理及收集工作,在此表示感谢。书中有部分内容参考了有关单位和个人的研究成果

果，在此一并致谢。

由于切削表面完整性涉及的范围广、内容多，加之作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者提出宝贵意见。

陈 涛

2015 年 12 月

目 录

第 1 章 切削表面完整性总论	1
1.1 切削表面完整性的概述	1
1.1.1 切削表面完整性概念及内涵	1
1.1.2 切削表面完整性研究的发展历程	2
1.2 切削表面完整性分析方法	4
1.2.1 测试分析方法	4
1.2.2 有限元分析方法	5
1.2.3 预测与优化分析方法	6
1.3 影响切削表面完整性的因素	7
1.3.1 刀具参数对切削表面完整性的影响	7
1.3.2 切削用量对切削表面完整性的影响	9
1.4 切削表面完整性对零件使用性能的影响	13
1.4.1 切削表面完整性对零件疲劳性能的影响	13
1.4.2 切削表面完整性对零件摩擦磨损性能的影响	16
1.4.3 切削表面完整性对零件腐蚀性能的影响	19
第 2 章 切削表面形貌的表征与测试	23
2.1 切削表面形貌概述	23
2.1.1 表面形貌的定义	23
2.1.2 切削表面形成过程	24
2.1.3 影响切削表面形貌的因素	26
2.2 切削表面形貌的表征	28
2.2.1 切削表面形貌的二维表征	29
2.2.2 切削表面形貌的三维表征	33
2.3 切削表面形貌的测试	40
2.3.1 非光学测试方法	40
2.3.2 光学测试方法	44
第 3 章 切削表层微观结构特征及检测	49
3.1 切削表层微观结构概述	49
3.1.1 表层微观结构的特征	50
3.1.2 表层微观结构特征的形成机制	50

3.2	白层的结构特征和影响因素	52
3.2.1	白层微观结构特征分析	52
3.2.2	白层的影响因素	53
3.3	微观结构特征检测试样的制备	54
3.3.1	试样的截取和镶嵌	54
3.3.2	试样的磨光和抛光	57
3.3.3	试样的显微组织显示	61
3.3.4	硬切削白层试样制备	61
3.3.5	微观结构显微硬度和硬化层测试	65
3.3.6	硬切削加工表层显微硬度测试	68
第 4 章	切削表面残余应力及测试	73
4.1	切削表面残余应力的概述	73
4.1.1	残余应力的分类	74
4.1.2	切削表面残余应力的产生	75
4.2	影响切削表面残余应力的因素	78
4.3	切削表面残余应力测试	79
4.3.1	表面残余应力的 X 射线衍射测试	79
4.3.2	表面残余应力的机械测试法	87
4.3.3	硬切削表面残余应力测试	91
第 5 章	切削试验设计与数据分析	94
5.1	试验设计方法	94
5.1.1	单因素试验设计	94
5.1.2	全因素试验设计	95
5.1.3	正交试验设计	96
5.2	试验数据分析	103
5.2.1	试验数据的方差及极差分析	103
5.2.2	试验数据的回归分析	108
5.2.3	回归方程的显著性检验	112
5.3	精密硬切削表面粗糙度正交试验	114
5.3.1	硬切削表面粗糙度正交试验设计	115
5.3.2	硬切削表面粗糙度正交试验数据分析	116
5.4	精密硬切削表面粗糙度全因素试验	118
5.4.1	硬切削表面粗糙度的全因素试验设计	118
5.4.2	表面粗糙度预测模型的建立与显著性检验	119
5.4.3	表面粗糙度预测模型仿真与验证	121

第 6 章 难加工材料切削加工表面完整性	123
6.1 淬硬钢切削加工表面完整性	123
6.1.1 硬切削加工试验设计	123
6.1.2 硬切削加工表面形貌	126
6.1.3 硬切削加工表面白层特征	134
6.1.4 硬切削加工表层残余应力特征	141
6.2 高温合金切削加工表面完整性	145
6.2.1 高温合金切削试验	145
6.2.2 高温合金切削表面粗糙度	146
6.2.3 高温合金切削表面加工硬化	148
6.2.4 高温合金切削加工表层残余应力特征	149
第 7 章 切削加工过程的有限元模拟	151
7.1 切削有限元的基本理论	151
7.1.1 有限元法的基本思想	151
7.1.2 高速切削过程的特征	153
7.1.3 弹塑性热力耦合模型及大变形控制方程	154
7.2 有限元仿真的关键技术	156
7.2.1 材料的本构模型	156
7.2.2 刀屑接触摩擦模型	158
7.2.3 材料失效准则	159
7.3 基于正交切削模型的硬切削加工模拟	160
7.3.1 正交切削有限元模型的建立	160
7.3.2 绝热剪切行为的数值模拟	161
7.3.3 倒棱参数对硬态切削过程的影响	165
7.3.4 表层残余应力有限元模拟	171
7.4 高速硬切削三维有限元模拟	173
7.4.1 高速硬切削有限元模型的建立	173
7.4.2 高速硬切削加工有限元模型的验证	175
7.4.3 高速硬切削过程仿真分析	177
7.4.4 高速硬切削加工表面白层特征有限元模拟	178
第 8 章 切削表面完整性的预测优化与评价	181
8.1 预测与优化方法简介	181
8.1.1 响应曲面法	181
8.1.2 人工神经网络	187
8.1.3 模糊综合评价	191

8.1.4 遗传算法	194
8.2 切削加工表面完整性的预测	199
8.2.1 切削表层残余应力的预测	200
8.2.2 切削表面白层的预测	204
8.3 切削加工表面完整性的优化	206
8.3.1 优化设计方法	207
8.3.2 硬切削加工表面完整性多目标优化	210
8.4 切削表层特征性能评价	213
8.4.1 切削表层特征疲劳性能试验	213
8.4.2 疲劳样件测试与分析	215
参考文献	221
索引	230

第1章 切削表面完整性总论

切削加工是机械制造中最主要的加工方法，其所制造的零件广泛地应用于各行各业。零件的质量，尤其是零件的表面及其亚表层的状态及性质，即表面完整性，对零件的使用性能具有决定性的影响。众所周知，零件的疲劳破坏起源于表面或内部缺陷，但表面的疲劳破坏更为常见，在航空发动机叶片疲劳失效中，80%以上裂纹均起源于表面缺陷^[1]；零件的磨损和腐蚀全部发生在表面。因此，切削表面完整性对于预防零件失效、延长使用寿命、减少经济损失、提高装备的安全可靠性十分重要。

本章围绕切削表面完整性理论与方法的发展现状进行阐述，主要内容包括表面完整性的概念、内涵及其研究发展历程，表面完整性的测试分析方法和影响因素，切削表面完整性对零件使用性能的影响等。

1.1 切削表面完整性的概述

1.1.1 切削表面完整性概念及内涵

切削零件表面是零件与外界或其他零件相接触的交界面，承受着外界载荷和环境的作用，材料的硬化、粘结、腐蚀等都与之有关，因此优化切削加工工艺，根据零件应用工程环境要求选择、控制或优化零件表面完整性尤为重要。

1964年，在美国金属切削研究协会召开的一次技术座谈会上，Field等^[2]首次提出了“表面完整性”的概念，定义为：由受控制的加工方法的影响，导致成品中表面状态没有任何损伤或有所强化的结果。1976年，Liu等^[3]给出了比较直观的定义：表面完整性通常可用其力学、冶金学、化学和表面形貌状态等来定义。1986年，美国国家标准 AISI B211.1—1986给出了与机械加工相关的表面完整性定义：表面完整性是描述、鉴定和控制加工过程在加工表面层内可能产生的各种变化及其对该表面工作性能影响的技术指标。

从广义上说，表面完整性包括外部效应和内部效应两个组成部分^[4]，其内涵如

图 1.1 所示。两个组成部分如下：

(1) 与零件表面纹理变化有关的部分，称为外部效应或表面特征：表面粗糙度、波纹度、刀痕方向和宏观缺陷（如裂纹、压痕、划伤、杂质等）。其中，粗糙度算术平均值是表面纹理构形要素中最主要的表征参数。

(2) 与零件表面层冶金物理特性变化有关的部分，即内部效应或表层特征：显微结构变化、再结晶、晶间腐蚀、热影响区、显微裂纹、硬度变化、塑性变形、残余应力、材料非同质性和合金贫化等。

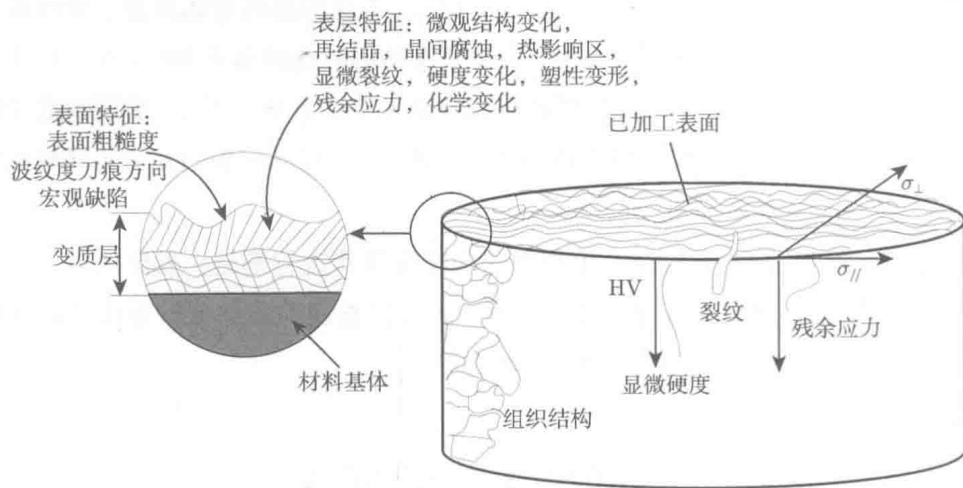


图 1.1 切削表面完整性的内涵

1.1.2 切削表面完整性研究的发展历程

美国从 1948 年开始研究铝合金 2024、钛合金 Ti6Al4V、超高强度钢 4340、高温合金 Inconel 718 等高强度合金的抗疲劳机械加工，并于 1970 年发布了《机械加工构件表面完整性制造指南》，基本实现了向“表面完整性抗疲劳制造”的转变^[5]。自 Field 等于 1964 年首次提出表面完整性概念后，表面完整性问题引起了世界机械制造业的注意，后续又对其进行了进一步的深入研究：1971 年，概述了当时表面完整性研究中所面临的各种问题，并强调了无论是采用传统还是非传统加工方式，合金的表层及亚表层均发生了冶金转变，如塑性变形、微观裂纹、相变、显微硬度、撕裂和褶皱、残余应力分布等典型的表面改变^[6]；1972 年，详细总结了可用于表面完整性检测的测量方法，并提出了表面完整性评价的试验方法，用表面完整性最小数据组、表面完整性标准数据组和表面完整性扩展数据组三个不同

级别的数据组去研究和评价已加工表面的特征，如表 1.1 所示^[7]。Field 及其合作者的开创性成就获得了世界范围的认可，对于表面完整性的研究具有永久的价值，并为美国国家表面完整性标准 (ANSI B211.1-1986) 的建立奠定了基础。美国国家标准 ANSI B211.1-1986 仅采用了最小数据组和标准数据组，并在表征参数方面进行了一定的简化，而将扩展数据组作为脚注项供参考，但该标准已于 1996 年作废，至今仍无替代的标准。

高温合金、钛合金、淬硬钢、超高强度钢等被广泛应用于航空航天、舰船、能源、生物医学、汽车等领域，如在飞机、发动机的主结构或主承力构件中的用量已达 70%~80%^[8]。因其在加工制造过程中切削力大，切削温度高，加工硬化现象严重，刀具易磨损等，常被称为“难加工”材料，如何提高这些典型难加工材料切削加工表面完整性，进而提高零件的使用性能，已受到国内外研究机构广泛的关注。

表 1.1 不同级别的表面完整性 (SI) 数据组

(a) 最小 SI 数据组			
表面粗糙度	微观结构 (10 倍以下)	微观结构 (10 倍以上)	微观硬度
	微观裂纹、宏观裂纹	微观裂纹、塑性变形、相变、晶间腐蚀、凹陷、撕裂、褶皱、凸起、积屑瘤、熔融和重沉积层、选择性腐蚀	
(b) 标准 SI 数据组			
最小 SI 数据组	疲劳试验 (筛选)		
	应力腐蚀试验、残余应力和扭曲		
(c) 扩展 SI 数据组			
标准 SI 数据组	疲劳试验 (扩展到获得所需设计数据)	补充的力学试验	其他指定的试验
		拉伸、应力破坏、蠕变	承载能力、滑动摩擦评价、表面密封性质

国内相关研究起步较晚，从 20 世纪 80 年代以来，相关研究机构对关键结构件的制造表面完整性进行了一些研究。90 年代国内部分行业成立了表面质量研究机构，提出了“无应力集中”抗疲劳制造的概念，即控制表面完整性、以疲劳性能为主要判据和提高疲劳强度的制造技术。2000 年后，部分高校、研究机构及相关企业也逐渐开展了零件表面完整性及其对零件使用性能的研究工作。例如，山东大学^[9-11] 对高温合金的表面完整性进行了研究；哈尔滨理工大学^[12-15] 对淬硬钢的表面完整性进行了研究；南京航空航天大学^[16] 在新型损伤容限钛合金表面完整性

方面开展了研究工作；西北工业大学^[17-19]对钛合金和镍基高温合金的表面完整性进行了研究；沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司^[20]从 2009 年开始，针对产品表面完整性中相关几何纹理、表面层组织状态两大方面初步开展了应用研究工作；北京航空材料研究院^[21]进行了高强度合金表面完整性抗疲劳制造技术研究。

1.2 切削表面完整性分析方法

切削表面完整性对零件的使用性能具有决定性的影响，零件在服役中所表现的使用性能又体现了切削表面完整性，因此，人们对于表面及其亚表层加工后发生的变化产生了强烈的好奇心，并希望能够对其进行提前的预测，进而对其进行优化，所以人们不断探求各种物理或化学方法，用高分辨率的显微镜、高精密的测试分析技术、数值模拟方法来预测、优化和测试分析切削表面的完整性，从而定性、定量地分析工艺系统关键因素对切削表面完整性的影响，设计经济、合理的切削加工试验方案，得出对生产实践具有实用性的理论和工艺方案。

1.2.1 测试分析方法

随着数据处理、图像分析、计算机技术等飞速发展，越来越多的测试技术被应用于描述和评价切削表面完整性。目前，主要集中在对切削表面形貌、表面及表层残余应力、表层微观结构等的测试分析。

切削表面形貌在微观上是由凹凸不平的峰谷组成的，这些峰谷的高低、宽窄程度与零件的使用特性具有直接关系。通过合理的测试方法能正确反映表面形貌，使其以图像和具体数值的形式表现出来，一般来说，表面形貌的测试方法可分为光学测试法和非光学测试法。光学测试方法以非接触式为主，其具有效率高、对被测表面无损伤、易实现在线检测等特点，包括扫描共焦显微测试法、离焦误差测试法、干涉测试法、全积分散射法等，其中扫描共聚焦显微测试法和白光干涉测试法较为常用。非光学测试方法以接触式为主，通过探针和表面之间接触进行测量，包括机械探针测试法和扫描探针测试法：机械探针测试法的探针与被测表面完全接触，且操作简单、技术成熟、应用广泛，但其效率低，易损伤被测表面，触头的状态影响测量的结果；扫描探针测试法的探针与被测表面的距离通常为几纳米或数十纳米，常用扫描探针式测试仪器有扫描隧道显微镜 (STM) 和原子力显微镜 (AFM)。关于表面形貌的二维表征，国内外均有系统完善的评定标准，但由于切削表面形貌的三

维特性,应用二维参数不能全面地表征切削表面的形貌信息,因此国内外研究人员在二维表征的基础上开展了对表面形貌的三维表征及其测量技术的研究。目前,表面形貌三维表征参数很多,但还没有统一的国内外评定标准。

切削表层残余应力的存在状态将会严重影响材料的物理力学性能,残余拉应力能促使疲劳裂纹的形成与扩展,降低疲劳强度;残余压应力能阻碍裂纹扩展,提高疲劳强度,因此测量分析切削表面及表层残余应力十分重要。残余应力测试技术包括具有一定机械损伤的应力释放测量方法和无损伤的物理测量方法。机械有损测量方法顾名思义就是会对工件造成一定程度的损伤或破坏,但其技术成熟,应用较为广泛,通过机械加工的方法,对被测构件进行部分加工或完全剥离,使被测构件上的残余应力部分释放或完全释放,利用电阻应变计测出残余应力^[22],包括切条法、逐层薄层法、小孔法等,其中盲孔法在工程中应用较为广泛。无损物理测量法不会损伤工件,有 X 射线衍射法、中子衍射法、电磁法等,其中 X 射线衍射法在科学研究和工业生产各领域中的应用最为广泛。但由于 X 射线穿透深度较小,只能测量一定层深应力,其垂直于表层方向上的应力分量为零,因此它所测量的是二维应力,并且只有通过样品逐层剥离,再测量剥离后表层的应力,才能测量材料内部各深度的残余应力,所以研究人员致力于如何测定三维残余应力及其沿层深的分布的研究。

1.2.2 有限元分析方法

切削过程涉及弹塑性力学、断裂力学、热力学和摩擦学等学科,是一个复杂的弹塑性大变形、高应变率、动态变化的过程,具有高度的非线性,并且由于刀具与切屑、刀具与工件加工表面的接触非常复杂,利用传统的解析方法很难对切削变量及其对表面完整性的影响进行定量分析。随着计算机仿真技术在机械制造业中应用范围的不断扩展,很多学者将有限元模拟技术引入切削加工领域,来分析切削过程中的弹塑性大变形动态过程。与传统方法相比,该方法有效地减少了反复试验的次数,降低了研究成本,提高了分析精度。

有限元法就是将要求解的连续区域离散成有限个单元 (element),并通过节点 (node) 将各单元连接起来,对连续体进行近似计算的一种数值方法。对切削过程进行有限元分析时,材料流动应力本构模型的建立是进行模拟的基础。Guo 和 Liu^[23]运用 Zener-Hollorn 方程建立了硬态切削淬硬钢 52100 的有限元切削模型,得到的

切削力和切削热有限元模拟结果与试验结果具有较好的一致性。Shi 和 Liu^[24] 还运用该材料模型预测了硬态切削淬硬钢 52100 过程中产生的锯齿形切屑和白层。另外, 刀具与切屑接触摩擦模型的建立也是有限元模拟的关键。常用的刀屑接触表面摩擦模型有 Coulomb 摩擦模型, Bowden 摩擦模型, Zorev 摩擦模型, 非线性指数摩擦模型和基于应力的多项式摩擦模型。Özel^[25] 研究了不同刀屑摩擦模型在有限元切削模拟中的应用, 其研究表明: 刀屑接触摩擦模型在切削过程中有着重要的作用, 尤其是基于应力多项式摩擦模型表达了切削试验测量的前刀面正应力和剪应力的关系, 其预测结果相对更准确。Filice 等^[26] 的研究结果表明: 运用不同刀屑摩擦模型得到的切削力和刀屑接触长度变化较小, 而对于切削温度模拟的结果有较大差异, 其中基于应力多项式摩擦模型得到的预测温度与试验数值最接近。目前, 一些商用有限元软件 (如 Deform, Abaqus, Marc 等) 在切削加工模拟中得到了广泛的应用。

1.2.3 预测与优化分析方法

在切削加工过程中, 往往力求在保证加工质量的前提下达到最小的制造成本或最大的生产率, 但因切削加工过程受到许多因素的影响, 如切削用量 (切削速度、进给量、切削深度)、刀具性能和几何参数、机床的刚性及精度、冷却条件等, 如果通过切削试验找到适合生产实际的最佳的加工工艺参数, 需要花费大量的人力物力, 而随着数值分析技术的发展, 可以通过建立精确的基于最优化加工过程参数的表面完整性控制和预测模型, 找到最佳的加工工艺参数。

表面完整性的外部效应和内部效应, 包括许多评定指标, 关键是表面形貌、表层组织、表面及表层残余应力, 因此对于表面完整性的预测也多集中在这几个方面, 尤其对于一些难切削材料。例如, 精密硬切削作为淬硬钢的最终精加工方式, 零件表面白层的微结构特征和残余应力分布直接影响着零件的抗疲劳、耐磨损等性能。目前, 在精密硬车加工表面完整性的预测建模方面, 研究多集中在硬车表面粗糙度的预测上, 而关于硬车白层和残余应力建模方面的研究较少; 特别是关于精密硬车加工表面完整性的综合预测模型方面的研究更少, 而表面完整性的预测模型又恰好是后续硬车加工过程中选择和优化切削参数及制定优化切削加工工艺的关键所在。

预测和优化切削加工表面完整性的算法较多, 其中人工神经网络法、响应曲面

法、遗传算法和模糊理论较为常用。

人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 是模拟生物神经系统结构, 应用并行分布形式, 可对任意非线性关系进行处理, 具有很强的鲁棒性和容错性。在切削表面完整性中, 人工神经网络在切削表面粗糙度、切削表层残余应力和切削变质层等方面获得了成功的应用。Özel 等^[27] 运用回归分析和神经网络的方法建立了硬态切削过程中表面粗糙度预测模型。Zhang^[28] 运用神经网络方法建立了表面残余应力和表面白层预报模型。Umbrello^[29] 运用神经网络并结合有限元模拟的方法预测了高速切削淬硬钢 52100 的残余应力分布。陈涛^[12,30] 运用 BP 神经网络预测了硬切削 GCr15 轴承钢表层残余应力。

响应曲面法 (response surface methodology, RSM) 结合了特定的数学与统计方法, 适用于系统特性受多变量影响状况下的分析、求解和优化。陈涛^[12,14] 用 PCBN 刀具硬车削轴承钢 GCr15, 在全因素表面粗糙度切削试验基础上, 运用响应曲面法建立了多参数条件下精密硬车表面粗糙度预测模型。Shihab 等^[31] 用硬质合金涂层刀具硬切削淬硬钢 AISI 52100, 用 RSM 对结果进行了分析, 以确定最优的切削参数。

1.3 影响切削表面完整性的因素

切削加工是切削力与切削温度综合作用的过程, 因而影响切削力及切削温度的因素, 即切削速度、进给量、切削深度、刀具参数、刀具-切屑间的摩擦系数、机床的几何运动精度、切削液和工作环境等均影响切削表面完整性。切削表面完整性对零件的使用性能具有决定性的影响, 而切削表面完整性是由被加工零件的工艺系统所决定的, 通过定性和定量分析零件加工工艺中关键因素对切削表面完整性的影响, 对切削加工中工艺参数选择具有一定的指导作用。

1.3.1 刀具参数对切削表面完整性的影响

在切削过程中, 刀具与工件之间及刀具与切屑之间相接触, 随着各接触区的相对滑动, 产生摩擦与变形。刀具切削刃的微小接触区域, 承受极大的压力、高温和剧烈的摩擦, 刀具切削部分将会产生磨粒磨损、粘结磨损、氧化磨损或者扩散磨损, 导致切削刀具形状和尺寸的变化, 从而影响零件切削表面的完整性。因此, 在保证刀具合理设计、制造质量及正确装夹下, 应正确选择刀具几何参数, 在满足切削表面完整性的条件下, 提高刀具的寿命、生产效率, 降低加工成本。