

沉淀硬化不锈钢的切削 与数值模拟

盛精 唐友名 周水庭 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TG5
362

本书获厦门理工学院学术专著出版基金资助

沉淀硬化不锈钢的 切削与数值模拟

盛 精 唐友名 周水庭 编著



机械工业出版社

本书主要介绍了沉淀硬化不锈钢的切削加工技术,首先对沉淀硬化不锈钢的力学性能进行研究和实验,获取了 Johnson-Cook 本构方程;然后构建了在一定切削条件下的切削力、切削温度的数学模型;通过基于 MSC. Marc 的参数化建模方法,构建了车削、铣削加工的有限元模型,并对切削过程进行了模拟;最后分析了刀具磨损的机理及工件表面完整性,并对最佳切削温度下的切削参数进行了优化研究。

本书可供机械制造、航空航天、兵器、汽车、化工、能源、船舶等领域从事金属切削技术研究和应用的师生或科技工作者阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

沉淀硬化不锈钢的切削与数值模拟/盛精,唐友名,周水庭编著. —北京:机械工业出版社,2016.6

ISBN 978-7-111-53860-8

I. ①沉… II. ①盛… ②唐… ③周… III. ①沉淀硬化钢—不锈钢—金属切削—数值模拟—研究 IV. ①TG506.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 115085 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:黄丽梅 责任编辑:黄丽梅 刘本明

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹

封面设计:陈沛 责任印制:李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2016 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 11.25 印张 · 165 千字

0001—1000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-53860-8

定价:59.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

据统计,我国国内生产总值中约有 1/4 直接来自于机械制造业。在机械制造中,绝大部分的机械加工工作量是由切削加工来完成的。虽然一些特种加工技术(如电加工、激光加工、超声加工等)也在不断发展,但迄今为止,切削加工在大多数情况下仍然是能耗最低、效率最高、经济性好的加工方法。

随着机械制造、航空航天、兵器、汽车、化工、能源、船舶等工业的迅猛发展,对结构材料性能的要求越来越高。具有不同性能的新材料,如高强度钢、超高强度钢、高锰钢、淬硬钢、耐磨合金铸铁、不锈钢、高温合金、钛合金、热喷涂材料及高熔点材料等不断涌现。但是,这些材料都很难进行切削加工,被称为难加工材料。

在计算机集成制造系统中,合理地设计切削参数,对提高零部件的加工效率、加工质量和降低生产成本起着十分重要的作用。由于切削加工制造精度高,并且是机械制造领域零部件最主要的加工方式之一,如今正朝着绿色、高效、超精密的方向发展,所以与其相关的理论和技术一直是精密加工、优化设计、信息技术、集成制造等研究领域关注的热点。

金属零部件在切削过程中伴随着机械、热、化学和物理等诸多因素的相互作用。如何结合企业具体加工需求,确定一组最优切削参数,以控制这些因素引起的综合效应,是研究人员最主要的目标之一。同时,最优切削参数的采集、优化与工艺数据/信息的共享和重用是集成制造系统的瓶颈问题。

国内外研究机构一直进行最优切削参数理论和方法的研究工作。在加工质量、成本、机床能耗、刀具磨损等方面,研究人员取得了许多成果。切削参数优化的首要问题是切削参数的采集、处理,而采集所运用的实验方法、数据分析方法的正确与否直接影响切削参数最优解的准确性。

在研究过程中,以下两个问题一直困扰着研究者:

- 1) 切削参数优化与刀具磨损特性的关系。刀具的磨损特性与切削力、切削温度的关系虽然有一定的研究,但由于切削加工时刀具与工件之间的物理、化学作用,致使刀具的磨损与切削力、切削温度之间的变化规律的探讨有待深入。另外,对刀具磨损机理的研究往往比较单一、孤立,刀具是否存在最低磨损状态,以及刀具处于最低磨损状态下的磨损机理也需要进一步研究。

- 2) 切削加工过程中各物理量变化规律之间的内在联系。通过实验建立起

各个物理量（切削温度、切削力、磨损量）与切削参数之间的关系，借助现代设计方法（如有限元法、优化设计、响应曲面法）获取最优的切削参数，或通过构建的模型预测一些物理量。然而，这些物理量之间的内在联系研究不足，譬如建立了切削温度、切削力、刀具前/后刀面磨损量与切削参数的关系模型，但对这些物理量之间的关系研究不够深入，特别是以一组最优切削参数加工时，这些物理量之间的重合度未见报道。

本书为基于刀具最低磨损的切削参数优化提供了新的方法。书中提及的参数化构建切削加工有限元模型的技术，为切削加工的模拟仿真提供了方法，同时也为最佳温度的切削机理的继续研究、最佳温度的预测、基于最佳切削温度的优化方法研究提供了方向。因此该书具有一定的学术价值，也有一定的实用价值。

此外，本书对一种难加工材料的普通车削、铣削加工过程的研究是在金属切削理论和有限元理论基础上开展的。书中基于最佳切削温度的优化方法、基于 Marc 参数化建立切削加工的有限元模型的解决方案具有一定的特色和创新性。本书融理论与实践于一体，定性、定量分析相结合，通过机理解释现象，整体性、系统性较好。

相关课题的研究得到了西北工业大学苑伟政教授、杨巧凤高级实验师，以及东风商用车有限公司工艺研究所冯继军高级工程师、张梅高级技师等的大力支持和帮助，在此向他们表示衷心的感谢！

本书得到了厦门理工学院学术专著出版基金的资助，在此表示感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在错误与不足之处，望读者批评指正。

编 者

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 金属材料切削加工研究进展	1
1.1.1 难加工材料切削研究	1
1.1.2 金属材料切削加工研究	2
1.1.3 国内外对切削参数优化技术的研究	6
1.2 金属材料切削加工研究的意义及内容	11
1.2.1 研究的意义	11
1.2.2 研究中需要解决的主要内容及难点	12
1.2.3 研究目标	13
第 2 章 沉淀硬化不锈钢的力学性能研究	14
2.1 引言	14
2.2 材料的本构关系及流动应力实验的理论基础	15
2.2.1 准静态压缩实验	15
2.2.2 冲击压缩实验	16
2.2.3 Johnson-Cook 本构方程	18
2.3 材料实验的设备与测试仪器	18
2.4 沉淀硬化不锈钢准静态性能分析	19
2.5 沉淀硬化不锈钢动态分析	20
2.6 Johnson-Cook 模型拟合结果	27
2.6.1 实验数据获取后的处理	27
2.6.2 Johnson-Cook 模型拟合	27
第 3 章 切削加工的有限元理论与有限元建模	31
3.1 概述	31
3.2 切削过程数值模拟关键技术	32
3.2.1 大变形弹塑性有限元法	32

3.2.2 切屑与工件的分离准则	34
3.2.3 刀具与工件的接触法则	36
3.2.4 单元死活技术	38
3.2.5 热传导模型	38
3.2.6 热-力耦合模型	39
3.2.7 非线性问题的求解和迭代收敛准则	40
3.2.8 材料模型	42
3.3 切削条件下有限元模拟的假设条件	42
第4章 切削力、切削温度变化规律的实践	44
4.1 概述	44
4.2 正交实验设计理论基础	45
4.2.1 正交实验设计	45
4.2.2 多元线性回归统计分析基础	46
4.3 切削加工使用的实验设备与测试仪器	49
4.3.1 测试车削力、车削温度所用的设备与仪器	49
4.3.2 测试铣削力、铣削温度所用的设备与仪器	50
4.4 车削力、铣削力的建模	51
4.4.1 车削力的建模	51
4.4.2 铣削力的建模	54
4.5 车削、铣削温度的建模	57
4.5.1 车削时切削温度的建模	57
4.5.2 铣削时切削温度的建模	59
4.6 实验结果分析	63
4.6.1 切削力结果分析	63
4.6.2 切削温度结果分析	67
第5章 有限元技术在切削加工中的应用研究	72
5.1 引言	72
5.2 切削过程数值模拟中的参数化建模技术	73
5.2.1 接口设计	73
5.2.2 参数化建模文件的生成	75
5.2.3 工件和刀具属性的参数设置	76
5.3 直角车削加工的有限元建模	77

5.3.1 刀具-工件的几何建模	77
5.3.2 刚性墙的几何建模	78
5.3.3 单元划分	78
5.3.4 直角车削加工的数值模拟运行实例	79
5.4 二维铣削加工的有限元建模	83
5.4.1 刀具的几何建模	83
5.4.2 工件的几何建模	84
5.4.3 刚性墙的几何建模	85
5.4.4 单元划分	85
5.4.5 二维铣削加工的数值模拟运行实例	87
5.5 斜角车削加工的有限元建模	91
5.5.1 刀具建模	91
5.5.2 工件建模	93
5.5.3 工件的刚性墙建模	93
5.5.4 单元划分	93
5.5.5 斜角车削加工的参数化建模运行实例	94
5.6 三维铣削加工的有限元建模	95
5.6.1 铣刀的参数化建模	95
5.6.2 工件的参数化建模	95
5.6.3 工件的刚性墙建模	96
5.6.4 单元划分	97
5.6.5 三维铣削加工的参数化建模运行实例	97
第6章 沉淀硬化不锈钢切削加工刀具磨损机理的研究	99
6.1 引言	99
6.2 刀具磨损研究所用设备与仪器	99
6.2.1 切削加工设备	99
6.2.2 测试仪器	101
6.3 刀具磨损实验及材料的选择	101
6.3.1 车削加工时刀具磨损实验及材料的选择	102
6.3.2 铣削加工时刀具磨损实验及材料的选择	104
6.4 车刀磨损机理	106
6.4.1 车刀前刀面磨损机理	106

6.4.2 车刀后刀面磨损机理	114
6.5 铣刀磨损机理	120
6.5.1 铣刀前刀面磨损机理	120
6.5.2 铣刀后刀面磨损机理	123
第7章 工件表面完整性	127
7.1 概述	127
7.2 工件表面完整性研究所用设备与仪器	127
7.3 车削沉淀硬化不锈钢的表面粗糙度变化规律研究	128
7.4 工件在车削时加工硬化的变化规律	134
7.5 铣削沉淀硬化不锈钢表面粗糙度的研究	140
7.6 铣削沉淀硬化不锈钢时加工硬化的变化规律	147
第8章 切削用量优化	152
8.1 概述	152
8.2 沉淀硬化不锈钢车削过程的优化研究	153
8.2.1 实验方案与设计	153
8.2.2 实验方法	153
8.2.3 实验结果	155
8.3 沉淀硬化不锈钢铣削过程的优化研究	156
8.3.1 实验方案与设计	157
8.3.2 实验方法	157
8.3.3 实验结果	159
附录 试件尺寸	161
参考文献	163

1.1 金属材料切削加工研究进展

随着机械设备、航空航天、兵器、汽车、化工、能源、船舶等工业的迅猛发展,对结构材料性能的要求越来越高。具有不同性能的新材料,如高强度钢、超高强度钢、高锰钢、淬硬钢、耐磨合金铸铁、不锈钢、高温合金、钛合金、热喷涂材料及高熔点材料等不断涌现。但是,这些材料都不易或很难进行切削加工,即材料的切削加工性差,这些材料被称为难加工材料。随着经济的发展,各行业、各领域都在广泛地使用这些材料,与此同时,新的工程材料也在不断问世,而每一种新型材料的采用都对切削加工提出了更高更新的要求。

2006 年国内举办的“军工难加工材料高效加工工艺与装备技术研讨会”^[1],表明军工制造业一直致力于解决科研和生产过程中各种新材料加工困难、加工工艺落后、加工效率低下等问题,促进难加工材料加工工艺与装备应用技术水平的提高,以满足制造技术快速发展的需求。

1.1.1 难加工材料切削研究

难加工材料切削时的特点有^[2,3]:切削力大、切削温度高;加工硬化严重;化学亲和力强,容易产生粘刀现象;刀具磨损快;卷屑、断屑和排屑困难。下面分别介绍国内外对难加工材料切削加工的研究现状。

1. 国外对难加工材料切削的研究

国外研究者在难加工材料的研究方面取得了很多成果^[4-10],具体表现在:

(1) 金属切削理论的研究 主要包括切削形成机理、刀具磨损机理、切削力、切削温度、表面完整性的基础理论等。

(2) 新刀具材料的研究 不论是硬质合金基体还是刀具涂层,均朝着采用新材料的研究方向发展,材料的硬度趋于更高,晶粒度趋于更细。

(3) 难加工材料切削数据的研究 美国、日本、德国、瑞典、英国等国家都建立了切削数据库,为用户提供了优化的切削数据,实现了高效切削^[11,12]。

(4) 新切削加工方法的研究 为了解决难加工材料的加工问题,除改进传统的切削加工方法之外,还研究了一些新的切削加工方法,如高速切削、激光辅助切削和振动切削等。

2. 国内对难加工材料切削的研究

我国对各种高性能刀具的材料进行了一系列研究,掌握了它们的切削性能,为提高其切削效率提供了依据^[13-16];对型号各异的难加工材料进行了车、铣等方式的切削实验,研究了刀具的磨损机理、刀具材料及其几何参数对切削加工的影响,以及温度、应力和应变与切削用量的关系,为优化切削参数提供了基础,保证了工件的加工质量^[17-19];同时,也建立了一些难加工材料的切削数据库^[20-22],供行业、企业使用。

1.1.2 金属材料切削加工研究

1. 研究金属切削加工过程的意义

切削加工过程是工件、刀具和切屑的弹、塑性的变形过程,切削质量受到刀具形状、切屑流动、温度分布、热流、切削表面残余应力和刀具磨损等方面的影响。

因此,只有在对上述现象进行研究的基础上,才能深入探索切削过程的力学、热学、刀具磨损物理因素与刀具磨损程度、工件表面质量之间的相互关系。依据对刀具磨损的物理现象的分析,找到最佳切削温度,从而可以找到合理的切削用量,以提高切削加工质量和效率。

2. 研究金属切削加工的方法

金属切削过程的分析方法大致分为三类：实验法、实验/解析法和数值法。

(1) 实验法的应用 实验研究一直在金属切削研究中占主导地位，不仅切削过程优化、优选切削参数等要靠实验研究解决，而且关于切削过程机理的研究分析，也要靠实验的验证。由于实验需要耗费时间、设备和仪器，往往成为人们从事研究工作的不利因素之一，所以不断地有人尝试采用更简单有效的研究方法来取代传统的实验方法。

(2) 实验/解析法的应用 许多工程分析问题，如固体力学中的位移场和应力场分析、传热学中的温度场分析、流体力学中的流场分析等，都可归结为在给定边界条件下求解其控制方程（常微分方程和偏微分方程）的问题。只有在方程性质比较简单，且几何边界相当规则的少数情况下，解析方法还比较适用，但对于大多数的工程技术问题，物体的几何形状都较复杂或者某些特征是非线性的，因此解决这类问题通常是引入简化假设，将方程和边界条件简化为能够处理的问题，从而得到它在简化状态的解。

(3) 数值法的应用 数值模拟技术是现代工程学形成和发展的重要推动力之一。随着计算机技术的飞速发展，数值模拟技术也已经实用化。制造业领域中切削加工数值模拟技术的应用，一方面使许多过去受条件限制无法分析的复杂问题，通过数值模拟得到满意的解答；另一方面，数值模拟使大量繁杂的工程分析问题程序化，使复杂的过程简单化，节省了大量的时间，避免了低水平重复性工作，使工程分析更快捷、更准确。

在工程技术领域常用的数值模拟方法就其实用性和应用的广泛性而言，主要还是有限元法。这里仅就切削加工有限元法数值模拟情况做简要概述。

1) 国外切削加工数值模拟概况。进入本世纪以来，非稳态切削分析成为研究的热点。Ueda 等^[23]建立了刚塑性材料的有限元三维切削模型，模拟了切屑的形成过程；Maekawa^[24]建立了弹塑性材料的流动应力与应变率、温度的函数关系，考虑了刀具-切屑间的摩擦和刀具的磨损等因素，进行了三维切削分析；Sasahara 等^[25]在金属切削的三维有限元模型上，研究了切屑和工件的应力和应变以及切屑

的流出方向; Dirikolu 等^[26]在 Sasahara 研究的基础上进一步分析了温度和应变速率的影响,把有限元法技术用于刀具的辅助设计中; Ueda 等^[27]对刚塑性材料在铣削中螺旋卷曲切屑的形成过程进行了模拟,在切屑分离标准上,采用网格重划技术代替几何分离准则实现切屑的分离; Seah 等^[28]在模拟斜角切削过程中,使用了等效参数方法,建立了切屑流动、塑性变形、断裂的三维有限元模型; Ceretti^[29,30]对切削加工进行了大量的有限元模拟研究; Yan^[31]对一种橡胶材料切削模拟中的网格进行了讨论,材料采用了 Neo-Hookean 本构关系,通过有限元分析可以获取切削力、切削形状、应力和应变场、应变能在工件和刀具上的分布; Ee 等^[32]建立了弹黏塑性材料的切削模型,模拟了已加工面的残余应力,材料采用了修改的 Johnson-Cook 本构关系,采用网格重划分方法,考虑到热力耦合关系,对连续切屑的形成过程进行了模拟; Özel 等^[33]借助于获得的实验数据,研究了摩擦模型对数值模拟结果的影响,证实了工件材料的流动应力和摩擦模型对模拟结果的影响; Mohamed 等^[34]采用了混合的拉格朗日-欧拉方法,对四种刀尖半径(尖角、微小、适量和等于切削厚度)的刀具切削过程进行了模拟,得到了残余应力分布情况; Pantalé 等^[35]建立了二维切削模型、三维斜角切削模型和铣削模型,并采用了混合的拉格朗日-欧拉方法,模型中材料采用了 Johnson-Cook 本构关系,分别对上述模型进行了不同切削条件的模拟; Mabrouki 等^[36]研究了硬切削 AISI4340 材料时,热-力耦合对切屑形态的影响,研究指出锯齿切屑是材料软化的结果,通过模型中参数的设置,模拟了锯齿切屑的形成机理。

近年来,国外研究人员侧重于对切屑的形成过程、加工表面质量、刀具磨损方面的研究。Coelho 等^[37]对切屑形成过程用显式算法和对热量传递用隐式算法的一个混合模型进行了模拟; Safari 等^[38]对 Ti-6Al-4V 工件材料的高速球头干铣过程进行了仿真,分析了切削条件和刀具磨损对工件表面完整性的影响; Khajezadeh 等^[39]研究了涂层刀具、前角、后角和切削参数对摩擦系数的影响; Maurel-Pantel 等^[40]对精铣过程进行了模拟,获取了切削力的变化规律、切削力与切削速度的关系,分析了刀具磨损和失效的现象; Senthilkumar^[41]采用了实验与有限元分析结合的方式,对刀具的形状、尖角半径、后角对加工过程的影响进行了研究,以辅助刀

具的设计或选择; Daoud 等^[42]研究了 5 种不同常数 JC 模型的工件材料对切削力、切屑厚度和刀具-切屑接触长度的影响。

2) 国内切削加工数值模拟概况。我国在金属切削加工数值模拟方面起步较晚,但取得了一定的研究成果。方刚等^[43]对金属正交切削过程的有限元数值模拟进行了研究,提出了不同材料数值模拟中的关键技术;谢峰等^[44]对在金属的直角切削中刀具的前、后摩擦进行了数值模拟,获得了切屑的形成和切削过程接触点的等效应力值,并通过实验法验证了模拟的剪切角,得到了较好的一致性;刘正士等^[45]对二维金属切削过程进行了数值模拟,据此得出研制的 TiC 基金属陶瓷刀具材料体内的受力状况,优化了刀具几何参数;姚永琪等^[46]通过模拟不同摩擦系数下的高速切削,分析了刀具-切屑间摩擦系数对剪切角的影响;成群林等^[47]在研究铣削加工中的切削层的等效简化、工件材料的流动应力模型、刀具-切屑接触面的摩擦模型和热传导控制方程等关键技术的基础上,对一种航空铝合金的高速铣削进行了有限元仿真,并进行了实证;黄志刚等^[48]分析了数值模拟中的关键技术,针对不同刀具前角、切削速度条件下的切削加工,提出了一种基于正交切削加工模拟的铣刀前角的优化方法;黄丹等^[49]通过对金属正交切削加工过程进行弹塑性有限元模拟分析,得到了不同刀具前角对切屑形状、应力分布、应变分布、残余应力和残余变形的影响,以及刀具前角值与剪切角的关系;汪小芳等^[50]通过建立多项式摩擦模型,对对照常规的 Coulomb 摩擦进行了对比模拟分析,认为有效地模拟刀具-切屑之间的摩擦,是预测工件表面残余应力分布的关键;李德宝等^[51]模拟了金属切削的动态过程,同时获得已加工表面的加工硬化变形图及其数值解;顾立志等^[52]编写的切削仿真程序,模拟了连续切削时切屑的稳态成形过程,分析了其应力场、应变场、温度场,优化了切削参数;程凯等^[53]使用多组切削参数对精密及超精密车削过程进行有限元仿真,得到了切削力的大小和应力、应变值,以及温度场的分布情况;邱克鹏等^[54]对薄壁件周铣和端铣加工进行了模拟,以分析切削变形状况;邓文君等^[55]对连续带状切屑的切削模型进行模拟,分析了高强耐磨铝青铜的正交切削加工过程;宋金玲等^[56]模拟了金属切屑形成过程,分析了切屑变形及受力过程,研究了刀具与切屑接触长度的变化规律。

近年来,我国紧跟国外金属切削加工有限元模拟技术,取得了长足的进步。孙雅洲等^[57]建立的三维非线性弹塑性有限元模型,得到了不同切削参数、刀具参数条件下的已加工表面残余应力;傅玉灿等^[58]提出了基于超硬磨粒有序排列砂轮磨削过程的建模与仿真方法;刘献礼等^[59]采用有限元仿真的方法研究重型硬质合金车刀冲击断裂产生机理及破损形式,提出了动态载荷下硬质合金疲劳断裂产生的机理,并给出了硬质合金疲劳断裂的载荷条件;刘新等^[60]结合三维切削模型和 Umbrello 本构方程,对导电加热切削的切削力和温度进行了三维有限元仿真及实验验证;郭晓光等^[61]结合 FEM 和光滑粒子动力学方法的 FEM-SPH 耦合模型,研究了切削过程中材料的去除机理;言兰^[62]利用数值仿真技术研究不同工艺参数下的单颗磨粒切削过程,得到了不同切削速度下径向、纵向切削行为转变的临界切削深度,发现了径向、纵向切削力和最高切削温度都有突变现象;王中秋^[63]采用二维有限元方法对轴承淬硬钢 AISI52100 硬车过程进行了仿真,获得了加工后材料表层残余应力值;合烨等^[64]对硬态车削淬硬轴承钢 GCr15 (62HRC) 的过程进行仿真,从切屑形态出发,结合切削力和切削温度等场量对切屑的形成过程进行研究,分析了锯齿状切屑和绝热剪切带切屑形成的条件。

我国在金属切削加工数值模拟方面的研究成绩斐然,但由于受到材料种类、金属切削实验设备、检测仪器等条件的限制,以及数值模拟理论与实际应用之间的差距等诸多因素的影响,致使金属切削加工的数值模拟技术与国外仍有一定的差距。所以,有必要不断地探讨金属切削加工的数值模拟技术及其应用。

1.1.3 国内外对切削参数优化技术的研究

1. 切削参数优化的应用研究

国内外研究者一直对最优切削参数的理论和方法进行研究,以获得最优切削参数。

在考虑加工质量方面,张明树等^[65]应用图论工具,以加工表面粗糙度、加工时间、刀具费用等为目标,采用模糊理论建立了一个评价标准;Liu^[66]、Moola^[67]和 Mangaraj^[68]分别应用灰色关联理论、方差分析方法和响应曲面法构建了预测表

面粗糙度的模型；Hamdan^[69]和 Munawar^[70]分别通过田口方法设计实验，建立了以表面粗糙度为目标的优化模型；Khamel 等^[71]构建了表面粗糙度、切削力多目标优化模型；马利杰^[17]建立了预测和控制铣刀跳动量的优化模型；李登万等^[18]以表面粗糙度、残余应力为目标，建立了多个优化模型。

上述研究发现，切削参数优化的首要问题是切削参数的采集、处理，而采集所运用的实验方法、数据分析方法的正确与否直接影响切削参数最优解的准确性。表 1-1 列举了切削参数优化过程中常用的几种实验方法。

表 1-1 切削参数优化常用的实验方法

实验方法	适用范围	数据分析	优缺点
正交设计	因素数适当，水平数受限	极差分析、方差分析、回归分析	使用方便，实验次数少，易分析因素主效应；优选值是实验所用水平的某种组合
均匀设计	多因素多水平的实验	回归分析	实验次数少；实验表设计的灵活性差
响应曲面法	因素数少，计量值数据；水平数为 2	方差分析、回归分析	因子间交互作用影响，易获最优值，模拟时间少；适用于连续性的系统
田口方法	因素不多，水平数有限	方差分析、信噪比与灵敏度	操作简单，综合效果好；对因子间的交互作用缺少分析，数据分析较差

在考虑成本方面，谢书童等^[18]以最小加工成本为目标，采用了基于边缘分布估计算法和车削次数枚举方法相结合的优化算法；贾新杰等^[72]针对一种弧齿锥齿轮粗铣，将单件最短工序时间（最大生产率）和单件最低加工成本作为目标建立了优化模型；Li 等^[73]提出了铣削钛合金的生产成本和表面质量的多目标模型；Arif 等^[74]针对在不同的方法下加工凹凸平面，建立了以零件表面完整性和生产成本为目标的优化模型；Othmani 等^[75]构建了铣削、钻削模具的生产成本和切削时间目标函数。

然而，成本目标中的一些数据采集对企业而言是一件非常困难的工作，而以单

件工时或生产率为目标则比较符合实际。降低能耗也是减小加工成本的一种途径,文献[76-81]提出了以能耗为目标函数的优化模型。随着精密、超精密加工技术的发展,刀具寿命、磨损程度越来越被关注。赵军等^[82]通过正交实验,用 Sialon 陶瓷刀片对材料 Inconel718 进行了高速切削,建立了刀具寿命的数学模型; Aouici^[83]、Senthilkumaar^[84]和 Thakur^[85]也分别建立了刀具后刀面磨损、磨损量预测和刀具寿命的模型。以上方法均是通过建立数学模型,直接推测磨损量及切削参数中的一个或若干个数据。在间接地控制刀具磨损的研究中, Davoodi 等^[86]研究了在干、湿切削 AA5083 材料时进给力、刀尖温度与切削速度、切削厚度的关系模型;盛精等^[87]分析了刀具磨损与切削温度的关系,建立了切削参数的优化方程。

综上所述,最优切削参数采集的前期工作重点是实验设计,研究目标是获取基于优化目标的一组切削参数。切削参数优化的建模方式、优化目标、优化算法呈现多元化和多样化。

2. 切削参数的优化方法

由于金属切削加工动态过程的复杂性,确定最优或近似最优切削参数的关键,就是面向离散和连续多模态参数空间建立目标函数与确定求解方法(优化方法)。切削参数优化建模的常用方法有回归分析^[67,68]、人工神经网络^[84]、模糊集理论^[66]和专家系统等^[88],如图 1-1 所示;而切削参数的优化方法,一般分为常规和非常规两类,如图 1-2 所示。常规方法包括实验设计和数学迭代法,通常能找到一个局部最优解。实验设计是运用数理统计理论解决工程问题的一项技术,包括正交设计^[82]、响应曲面法^[85]、田口方法^[69,70]和均匀设计^[17]等;而数学迭代法则是通过优化模型或目标函数获取一个近似值,并尝试得到近似最优切削参数,包括动态规划、线性规划、非线性规划和二次规划等。非常规方法包括元启发式搜索和其它启发式搜索。启发式搜索技术是一种随机搜索寻优方法,常用的元启发式搜索有遗传算法^[84]、粒子群法^[78]等。

由上文可知,在切削参数优化过程中,建模是基础,优化算法则是必要手段。表 1-2 列出了常用的优化方法及其特点。