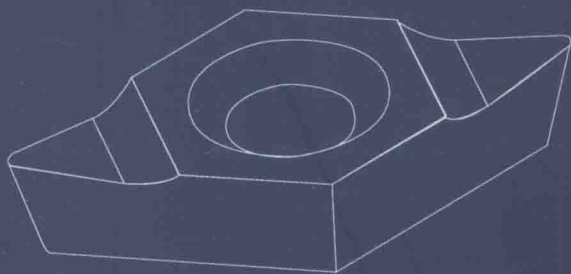


高速铣削淬硬钢技术

姜 彬 著



科学出版社

高速铣削淬硬钢技术

姜 彬 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

高速、高效铣削技术是国家重点支持的研究领域之一,高速铣刀是实现高效、精确铣削加工的重要工艺装备。本书面向汽车淬硬钢模具制造企业需求,针对高速铣刀切削淬硬钢中存在的 key 问题,综合运用多学科理论与技术,并与工艺实验紧密结合,分析多特征量强耦合作用对淬硬钢高速铣削过程的影响,阐述高速铣刀切削淬硬钢的工艺方法。

本书主要包括高速铣削淬硬钢工艺方法及存在的问题分析、高速铣刀切削淬硬钢的振动特性、高速铣削淬硬钢曲面的刀具稳定性、高速铣刀切削淬硬钢的安全可靠性、高速铣刀切削淬硬钢的磨损特性、高速铣刀切削淬硬钢加工表面形貌、高速铣刀切削淬硬钢工艺设计方法七个部分。

本书以高速铣削汽车大型覆盖件模具为例,按高速铣削淬硬钢的刀具性能评价与工艺设计流程进行内容编排。本书可作为从事高速铣削工艺设计与淬硬钢模具制造的工程技术人员的参考书,也可作为高等院校相关专业研究生的专业课教材。

图书在版编目(CIP)数据

高速铣削淬硬钢技术 / 姜彬著. —北京: 科学出版社, 2015.7
ISBN 978-7-03-044592-6

I. ①高… II. ①姜… III. ①钢—铣削—研究生—教材 IV. ①TG142
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 126224 号

责任编辑: 毛 莹 王正飞 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京科印技术咨询服务公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 7 月第一次印刷 印张: 15 1/4

字数: 384 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

近年来,随着中国汽车工业的快速发展,被称为“汽车工业之母”的汽车模具制造业进入高速增长阶段。为提高汽车大型覆盖件淬硬钢模具的生产效率,国内汽车模具制造企业均大规模地引进和应用了高速铣削加工技术。

高速球头铣刀是一种典型的加工复杂曲面高速铣削刀具,在汽车大型覆盖件淬硬钢模具型面高速精加工中应用广泛。高速铣削淬硬钢过程中,铣刀与工件发生碰撞、冲击使其产生高速激烈应变。受淬硬钢硬度分布与型面特征多变和铣刀结构、材料、组件结合状态与切削参数等因素影响,刀具变形、振动、磨损、破损等问题导致的铣刀服役性能衰退已成为制约淬硬钢高速铣削效率提高的瓶颈,多场场耦合作用下高速铣刀服役行为的演变规律和科学实质有待揭示。

采用球头铣刀切削淬硬钢时,工件表面硬度达到 HRC60 以上,且存在较大的弹性回复,切削力、切削热、切削振动引起的刀具变形和剧烈磨损,极易导致淬硬钢关键零部件尺寸超差和成形表面损伤。同时,为了保证大型淬硬钢模具表面的完整性,一道工序内,不同硬度的加工区域需要由同一把铣刀完成,对高速铣刀切削淬硬钢复杂曲面的加工效率和铣刀使用寿命等服役性能提出了更高的要求。

本书在高速切削理论和相关研究成果基础上,以阐明高速铣刀服役性能衰退动因与模型参数控制机制,实现高速铣刀安全、稳定、高效切削和工艺优化设计为目的,采用灰色系统理论、切削动力学理论、系统安全工程理论、摩擦学理论、系统工程理论、最优化设计方法和价值分析方法,着重讨论高速球头铣刀切削淬硬钢动态服役行为及其工艺设计方法。

全书共 7 章,具体内容如下:

第 1 章 针对高速铣削技术在淬硬钢模具加工中的应用状况,分析汽车大型覆盖件模具高速铣削工艺,讨论淬硬钢高速铣削过程中存在的问题,以明确高速铣削淬硬钢技术研究的主要内容和研究思路。

第 2 章 在高速铣刀切削淬硬钢实验及其服役性能灰色关联分析基础上,研究高速球头铣刀瞬态切削力特性,建立高速铣刀切削稳定性判据,提出高速铣刀减振性能分析方法,分析球头铣刀结构参数对其振动的影响特性。

第 3 章 讨论多硬度分布对高速铣削淬硬钢振动的影响特性,结合高速铣削淬硬钢凸凹曲面振动实验与振动特性,分析高速铣削淬硬钢典型曲面高效稳定切削工艺条件,提出淬硬钢复杂曲面高效切削稳定性控制方法。

第 4 章 建立高速铣刀失效判据与安全裕度模型,通过高速球头铣刀模态特性、切削淬硬钢物理场分布特性与铣刀疲劳寿命分析,研究淬硬钢加工表面形状特征与硬度特征及铣刀结构、切削路径和切削参数对铣刀冲击、疲劳、强度、刚度安全裕度的影响,提出高速铣刀安全可靠控制方法,并进行工艺可靠性实验。

第 5 章 建立高速球头铣刀切削淬硬钢高副滑动磨损模型和振动磨损模型,研究高速

球头铣刀切触应力分布特性与磨损特性；采用高速铣刀后刀面磨损应力特征与动态切削力特征模型，研究高速铣削淬硬钢曲面刀具磨损与切削力响应特性；进行高速铣刀切削淬硬钢振动磨损耦合作用分析，建立高速铣刀切削淬硬钢效率寿命模型，提出高速铣削淬硬钢刀具破损与效率寿命控制方法。

第6章 研究铣刀振动对加工表面形貌的影响特性，构建高速球头铣刀加工表面残留单元，分析铣刀悬伸量和振动作用下的残留单元敏感性，依据加工表面残留单元变形和分布特性，提出高速球头铣刀加工表面形貌的模型分析方法，并采用多工艺方案进行高速铣削淬硬钢加工表面形貌仿真和实验。

第7章 建立高速铣刀切削淬硬钢服役性能评价模型与控制变量层次结构模型，研究铣刀使用寿命、切削效率与加工表面质量之间的功能耦合关系与关键控制变量，提出高速铣刀切削淬硬钢工艺优化设计方法，并进行高速铣削淬硬钢工艺验证实验。

本书以实际应用为主，图文并茂、深入浅出，设计实例与工程实践结合紧密，设计思路清晰，研究步骤符合刀具设计与模具制造工艺设计人员的思维习惯，相关方法和数据可供从事高速铣削及刀具技术研究和工艺开发人员参考，也可作为大专院校相关专业学生的教材。

本书相关内容的研究得到了国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题“航空发动机典型件与汽车淬硬钢模具高速切削工艺研究(2009ZX04014-042)”、国家高科技研究发展计划重点项目“高强度钢、淬硬钢大型零件高效切削技术及应用(2009AA044302)”、国家自然科学基金“高速铣刀安全性衰退机理及其跨尺度关联设计方法(50975067)”和“高能效铣刀波动力学损伤机理及其多尺度协同设计方法(51375124)”，以及中国博士后科学基金项目“基于跨尺度关联的高速铣刀安全性衰退机理研究(20090450131)”的支持。

在本书撰写过程中得到了刘献礼、郑敏利、杨印金、齐长兴、李红岩、陈广超、夏丹华、宋继光、张帅、徐彤、赵娇等的指导和热情帮助，在此表示衷心的感谢！

本书出版得到哈尔滨理工大学机械工程“高水平大学”特色优势学科建设项目资助！

希望本书能对您的工作和学习有所帮助，并衷心希望您能对本书中存在的缺点和错误提出宝贵意见！

作 者

2015年1月15日

目 录

前言

第 1 章	高速铣削淬硬钢工艺分析	1
1.1	高速铣削淬硬钢模具的工艺状况	1
1.1.1	淬硬钢模具生产状况	1
1.1.2	淬硬钢模具高速铣削工艺	2
1.1.3	淬硬钢模具加工中刀具服役状况	3
1.2	汽车覆盖件模具高速铣削工艺分析	5
1.2.1	车门内板 A 柱模具加工特征	5
1.2.2	模具半精加工工艺分析	5
1.2.3	模具精加工工艺分析	6
1.2.4	模具加工中的铣刀失效分析	8
1.3	淬硬钢模具加工质量检测方法	9
1.3.1	淬硬钢模具的型面检测方法	9
1.3.2	淬硬钢模具的静态检测方法	9
1.3.3	淬硬钢模具的动态检测方法	11
1.4	高速铣削淬硬钢加工中存在的问题	13
1.4.1	切削效率与加工表面质量冲突	13
1.4.2	切削效率与安全可靠性交互作用	14
1.4.3	高速铣削振动与铣刀不稳定切削	15
1.4.4	高速铣削淬硬钢中的关键问题	15
1.5	高速铣削淬硬钢模具的关键技术	16
1.5.1	高速铣削淬硬钢基础技术	16
1.5.2	高速铣削淬硬钢刀具技术	18
1.5.3	高速切削硬度离散型模具铣刀	18
1.5.4	大长径比模具铣刀高速铣削稳定性	19
1.5.5	大型覆盖件模具高速铣削工艺技术	20
1.6	本章小结	21
第 2 章	高速铣刀切削淬硬钢振动特性	23
2.1	高速铣削淬硬钢实验及其加工特性关联分析	23
2.1.1	实验目的与实验方案	23
2.1.2	高速铣削淬硬钢加工特性实验结果	23
2.1.3	高速铣削淬硬钢加工特性关联矩阵	25
2.1.4	淬硬钢高速铣削加工特性关联分析	26

2.2	高速球头铣刀瞬态切削力特性	28
2.2.1	高速球头铣刀切削刃设计模型	28
2.2.2	高速球头铣刀瞬态切削力模型	29
2.2.3	铣刀加工倾角与转速对瞬态切削力影响	31
2.2.4	高速球头铣刀结构参数对瞬态切削力影响	33
2.3	高速铣刀切削稳定性判据与分析方法	34
2.3.1	高速铣刀切削力与离心力振动模型	34
2.3.2	高速铣刀切削稳定性判据	35
2.3.3	高速铣刀切削稳定性分析方法	36
2.4	高速球头铣刀切削淬硬钢振动特性	37
2.4.1	直径对铣刀切削振动影响特性	37
2.4.2	悬伸量对铣刀切削振动影响特性	39
2.4.3	刀具误差对铣刀切削振动影响特性	41
2.4.4	凸凹曲面对高速球头铣刀切削振动影响特性	44
2.5	本章小结	46
第 3 章	淬硬钢复杂曲面高效切削稳定性	48
3.1	工件硬度分布对高速铣刀切削稳定性影响	48
3.1.1	实验条件及工件硬度分布测试结果	48
3.1.2	淬硬钢硬度分布对高速铣刀切削振动影响特性	49
3.1.3	高速铣削多硬度拼接件铣刀振动特性分析	49
3.2	淬硬钢凹曲面高速铣削稳定性分析	52
3.2.1	淬硬钢凹曲面试件及分析方法	52
3.2.2	高速铣削淬硬钢凹曲面铣刀振动特性仿真分析	53
3.2.3	高速铣削淬硬钢凹曲面振动实验	54
3.2.4	淬硬钢凹曲面高效稳定切削条件	55
3.3	淬硬钢凸曲面高速铣削稳定性分析	56
3.3.1	淬硬钢凸曲面试件及分析方法	56
3.3.2	高速铣削淬硬钢凸曲面铣刀振动特性仿真分析	57
3.3.3	高速铣削淬硬钢凸曲面实验与稳定切削条件	58
3.4	高速铣刀加工淬硬钢复杂曲面切削稳定性控制方法	59
3.4.1	高速铣削淬硬钢切削力与离心力交互作用分析	59
3.4.2	机床振动特性对淬硬钢高速铣削稳定性影响	60
3.4.3	淬硬钢复杂曲面高效稳定切削条件求解方法	64
3.4.4	汽车内覆盖件淬硬钢模具高效切削稳定性分析	66
3.5	本章小结	67
第 4 章	高速铣刀切削淬硬钢安全可靠	69
4.1	高速铣刀失效判据与安全裕度模型	69

4.1.1	高速铣刀切削载荷分析	69
4.1.2	高速铣刀切削淬硬钢失效判据	70
4.1.3	高速铣刀可靠性分析与安全裕度模型	71
4.2	高速球头铣刀模态特性分析	72
4.2.1	高速球头铣刀模态振型分析	72
4.2.2	铣刀悬伸量对模态振型影响	74
4.2.3	高速球头铣刀模态参数识别与分析	76
4.3	高速球头铣刀物理场安全可靠性能分析	77
4.3.1	高速球头铣刀切削淬硬钢热力耦合场分析	77
4.3.2	高速球头铣刀切削淬硬钢实验及切削载荷分析	78
4.3.3	高速球头铣刀切削淬硬钢物理场及安全裕度分析	80
4.3.4	铣刀磨损对淬硬钢高速铣削安全可靠性能影响	82
4.4	高速球头铣刀切削淬硬钢疲劳特性	83
4.4.1	高速球头铣刀切削淬硬钢实验	83
4.4.2	高速铣刀疲劳寿命分析结果	84
4.4.3	切削力与切削振动对铣刀疲劳寿命影响	86
4.5	高速球头铣刀切削淬硬钢复杂曲面安全裕度分析	87
4.5.1	淬硬钢复杂曲面高速铣削实验	87
4.5.2	高速铣削淬硬钢侧立面安全裕度分析	89
4.5.3	高速铣削淬硬钢过渡曲面安全裕度分析	90
4.6	高速铣刀安全裕度控制方法与工艺可靠性实验	92
4.6.1	高速球头铣刀切削淬硬钢冲击应力分析	92
4.6.2	高速铣刀安全裕度控制方法	94
4.6.3	高速铣削多硬度分布凸凹曲面安全裕度分析	95
4.6.4	高速铣削多硬度拼接曲面工艺可靠性分析与实验	97
4.7	本章小结	98
第 5 章	高速铣刀切削淬硬钢磨损特性	100
5.1	高速球头铣刀切削淬硬钢切触模型与应力分布特性	100
5.1.1	高速球头铣刀切削淬硬钢切触模型	100
5.1.2	高速球头铣刀切削淬硬钢曲面切触应力分布特性	101
5.1.3	加工倾角对高速球头铣刀切触应力影响	102
5.2	高速球头铣刀切削淬硬钢磨损模型与基本磨损特性	103
5.2.1	高速球头铣刀切削淬硬钢高副滑动磨损模型	103
5.2.2	切触应力分布对铣刀磨损影响特性	104
5.2.3	涂层硬质合金球头铣刀切削淬硬钢初期磨损特性	105
5.2.4	铣削方式对涂层硬质合金球头铣刀磨损影响特性	107
5.2.5	加工倾角对涂层硬质合金球头铣刀磨损影响特性	109

5.3	高速球头铣刀切削淬硬钢振动磨损特性	110
5.3.1	高速铣刀振动磨损模型	110
5.3.2	高速球头铣刀切削淬硬钢初期振动磨损实验	111
5.3.3	高速球头铣刀切削淬硬钢振动冲击磨损实验	114
5.4	高速铣削淬硬钢刀具磨损的动力学特征	118
5.4.1	高速铣刀后刀面磨损应力特征及其磨损特性演变过程	118
5.4.2	高速铣刀磨损的动态切削力特征模型	119
5.4.3	高速球头铣刀切削淬硬钢磨损振动特性	121
5.4.4	高速铣削淬硬钢刀具磨损识别方法	122
5.5	高速铣削淬硬钢曲面刀具磨损与切削力响应特性	124
5.5.1	高速铣削淬硬钢曲面刀具磨损实验	124
5.5.2	高速球头铣刀磨损特性与使用寿命分析	126
5.5.3	高速球头铣刀磨损过程中的切削力响应特性	127
5.6	高速铣刀切削淬硬钢效率寿命及其控制方法	129
5.6.1	高速铣刀切削淬硬钢振动磨损耦合作用分析	129
5.6.2	高速铣刀切削淬硬钢磨损形态演变特性与使用寿命实验	130
5.6.3	高速铣刀切削淬硬钢相对滑动系数及其影响特性	134
5.6.4	高速铣刀切削淬硬钢效率寿命模型	135
5.6.5	高速铣刀切削淬硬钢效率寿命功能分析	136
5.6.6	高速铣刀切削多硬度拼接淬硬钢曲面效率寿命实验	137
5.6.7	高速铣削淬硬钢刀具破损与效率寿命控制方法	140
5.7	本章小结	143
第6章	高速铣刀切削淬硬钢加工表面形貌	145
6.1	高速铣削淬硬钢加工表面形貌特征	145
6.1.1	切削参数对加工表面形貌的影响	145
6.1.2	不同硬度分布的加工表面形貌	148
6.1.3	多硬度拼接件的加工表面形貌	150
6.2	高速铣削加工表面形貌特征的模型分析方法	153
6.2.1	高速铣刀振动对淬硬钢加工表面形貌的影响	153
6.2.2	高速铣刀切削运动轨迹的修正	153
6.2.3	高速铣刀加工表面形貌分析与实验验证	155
6.2.4	淬硬钢加工表面形貌仿真及实验验证	156
6.3	高速铣削淬硬钢平坦面的加工表面形貌	158
6.3.1	加工表面形貌仿真与实验结果	158
6.3.2	加工表面形貌仿真结果修正	161
6.3.3	加工表面形貌特性与影响因素	163
6.3.4	仿真与实验结果讨论	163

6.4	高速铣削淬硬钢曲面加工表面形貌	164
6.4.1	实验方法与实验条件	164
6.4.2	垂直切削淬硬钢曲面加工表面形貌	165
6.4.3	斜切淬硬钢凹曲面加工表面形貌	167
6.4.4	斜切淬硬钢凸曲面加工表面形貌	168
6.4.5	平行切削淬硬钢曲面加工表面形貌	170
6.5	高速铣削多硬度拼接曲面加工表面形貌	172
6.5.1	实验方法与实验条件	172
6.5.2	垂直切削拼接曲面加工表面形貌	173
6.5.3	斜切拼接式凹曲面加工表面形貌	175
6.5.4	斜切拼接式凸曲面加工表面形貌	176
6.5.5	平行切削拼接曲面加工表面形貌	178
6.6	高速铣削淬硬钢拐角清根加工表面形貌	180
6.6.1	实验方法与实验条件	180
6.6.2	淬硬钢拐角侧立面加工表面形貌	180
6.6.3	淬硬钢清根加工表面形貌	182
6.7	本章小结	183
第7章	高速铣刀切削淬硬钢工艺设计方法	185
7.1	汽车覆盖件模具加工特征与铣削工艺	185
7.1.1	汽车覆盖件模具结构特点	185
7.1.2	典型汽车覆盖件模具加工特征	186
7.1.3	汽车覆盖件淬硬钢模具铣削工艺策略	188
7.1.4	高速铣削淬硬钢模具的加工机床	190
7.1.5	高速铣削淬硬钢模具的刀具	190
7.2	典型汽车覆盖件模具铣削工艺分析	191
7.2.1	淬硬钢模具铣削工艺特点	191
7.2.2	车门模具铣削工艺分析	192
7.2.3	内板立柱模具铣削工艺分析	193
7.2.4	汽车顶棚模具铣削工艺分析	194
7.2.5	汽车覆盖件模具铣削加工中存在的问题	195
7.3	高速铣刀切削淬硬钢服役性能评价模型	195
7.3.1	高速铣刀切削温度与切削速度求解模型	195
7.3.2	高速球头铣刀切削淬硬钢临界切削厚度	198
7.3.3	高速铣刀切削淬硬钢加工表面质量特性	200
7.3.4	高速铣刀切削淬硬钢服役性能评价模型	204
7.4	高速铣刀切削复杂曲面控制变量层次结构模型	205
7.4.1	高速球头铣刀切削运动姿态	205

7.4.2	高速球头铣刀切削淬硬钢加工元素集及关系集	207
7.4.3	高速球头铣刀切削淬硬钢加工要素层次结构	210
7.5	高速铣刀切削淬硬钢工艺优化设计方法	212
7.5.1	高速铣刀切削淬硬钢工艺设计与综合评价方法	212
7.5.2	高速铣刀切削淬硬钢加工表面质量控制方法	214
7.5.3	高速铣削淬硬钢刀具切削路径优选方法	218
7.5.4	高速铣削淬硬钢刀具优选方法	219
7.6	高速铣刀切削淬硬钢模具工艺实验	221
7.6.1	多硬度拼接淬硬钢凸模的铣削工艺实验	221
7.6.2	多硬度拼接淬硬钢凹模的铣削工艺实验	223
7.6.3	车门模具铣削工艺验证实验	225
7.6.4	内板立柱模具铣削工艺实验	227
7.6.5	顶棚模具铣削工艺实验	228
7.6.6	内板模具铣削工艺实验	230
7.7	本章小结	230
参考文献		232

第 1 章 高速铣削淬硬钢工艺分析

采用高速铣削技术可以显著提高模具生产效率、模具型面精度及模具寿命,因此高速铣削工艺及刀具在模具制造企业得到广泛应用。大型淬硬钢模具具有结构尺寸大、型面形状复杂、尺寸精度和表面精度要求高的特点,是汽车大型覆盖件制造的重要工艺装备。此类模具凸、凹模和刃口部分多采用整体和镶块式淬硬钢加工而成,其加工区域存在大比例的高硬度表面,对高速铣刀在长行程模具型面加工过程中的切削稳定性提出了更高要求,高性能的高速铣刀及其设计技术成为高速铣削加工淬硬钢中重点研究和发展的关键技术之一。

1.1 高速铣削淬硬钢模具的工艺状况

1.1.1 淬硬钢模具生产状况

随着汽车制造行业的不断发展,汽车改型与更新换代日趋频繁,汽车换型时约 80%以上模具需要更换,主要为汽车大型覆盖件模具,如图 1-1 所示。据统计,一个车型约需大中型覆盖件模具 260 套,年需 936 万个工时的制造能力,国内模具制造企业只有 500 万个工时的能力,缺口近一半,且主要集中在大型淬硬钢模具半精加工和精加工工序。现阶段,汽车覆盖件淬硬钢模具产品的需求越来越大,其结构更加复杂,合同交货期越来越短,对其加工表面质量、加工精度的要求则越来越高。

为适应汽车覆盖件淬硬钢模具的上述要求,国内汽车模具制造企业在已有的基础上,采用国际主流的 CAD/CAE/CAM 技术,利用大型龙门数控加工中心和先进检测设备,建立起轿车整车模具制造工艺平台,已经全面实现了模具、夹具一体化,具备为用户提供完整的白车身工装产品能力,可为国内外汽车厂商的车身模具开发提供服务。其中,技术实力雄厚的模具骨干企业,其员工人数均超过 1000 人,技术人员占员工总数 70%以上,拥有世界先进水平的软硬件条件和优秀的技术人员队伍,其企业经营上的“产品品牌化”、“国际化”理念和模具制造的“技术信息化”、“管理数字化”、“设备现代化”程度显著增强。从事汽车模具生产的大型专业公司普遍具备每年 1500 标准套以上模具的设计制造能力,不仅常年承接国内数十家汽车生产企业的订单,而且先后承揽了美国、瑞士、英国、德国等欧美市场的大量订单。

近年来,国内最具核心竞争力的生产车身模具、焊接夹具和检验夹具的骨干企业,通过开发模具新产品,优化和提高大型精密模具制造技术,能够制造轿车整车制造所需要的大型复杂精密模具。例如,可设计制造难度最大的整体侧围外板和前翼子板的模具,以及精度要求同样很高的发动机盖内外板、顶盖、前后车门外板、后翼子板、后行李箱外板、后翻门等汽车覆盖件模具,如图 1-2~图 1-4 所示。

目前,国内进口的大型精密淬硬钢模具仍占进口模具总量的 25%以上。虽然我国汽车

模具制造企业在模具设计方法和手段方面已基本达到了国际水平，模具结构方面也接近国际水平，在高档汽车模具国产化进程中前进了一大步，但在大型淬硬钢模具整体制造质量和制造周期等方面，与国外相比尚存在较大的差距，大型、精密汽车覆盖件模具主要依赖进口。在此背景下，进行淬硬钢模具高速铣削技术研究，对提高国内汽车模具制造企业整体技术水平，促进汽车模具制造行业发展具有积极推动作用。

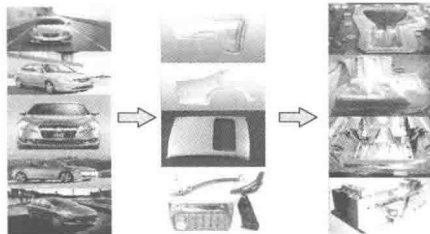


图 1-1 汽车覆盖件及其模具



图 1-2 汽车覆盖件模具生产

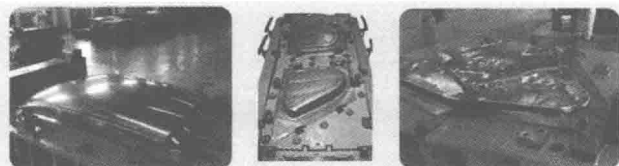


图 1-3 典型汽车覆盖件模具

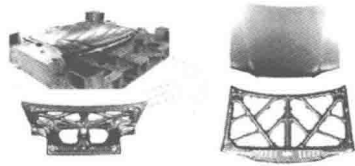


图 1-4 汽车前机盖模具

1.1.2 淬硬钢模具高速铣削工艺

汽车大型覆盖件模具材料主要采用合金铸铁 7CrSiMnMoV (HRC40~55) 和淬硬钢 Cr12MoV (HRC55~64)。其中，7CrSiMnMoV 主要用于汽车外板、侧围等对加工表面质量要求高的模具；Cr12MoV 主要用于车门内板、翼子板等型面复杂、强度要求高的模具。

为了避免过切，保证工艺和编程可靠性，在汽车大型覆盖件模具型面粗加工工序，通常选用直径 50mm 球头铣刀，在半精加工和精加工工序通常选用直径 20~30mm 球头铣刀，其铣削工艺和刀具如表 1-1、表 1-2 和图 1-5 所示：

表 1-1 汽车覆盖件模具铣削工艺

工 序	铣刀直径/mm	切削速度 $v/(m/min)$	进给速度 $v_f/(mm/min)$	切深 a_p/mm	行距 a_e/mm
粗加工	50	300~450	1500~1800	0.5~1.0	5
半精加工	30	280~470	2000~3000	0.5~0.7	2.5
精加工	30	280~470	2000~3000	0.3	0.5~1.0
清根	16~20	50~125	1000~4000	0	0.02
清根	12	38~75	1000~4000	0	0.02
清根	10	35~62	1000~4000	0	0.02
清根	8	30~50	1000~4000	0	0.02

表 1-2 汽车覆盖件模具各工序铣刀

工 序	刀 具	刀 具 材 料	刀 具 类 型	直径/mm	齿 数
粗加工	订购	硬质合金涂层	斯文球头铣刀	50	2
半精加工	订购	硬质合金涂层	镜面球头铣刀	30	2
		硬质合金涂层	镜面球头铣刀	30	2
精加工	订购	硬质合金涂层	镜面球头铣刀	30	2
清根	自制	硬质合金涂层	整体球头铣刀	16	2
清根	自制	硬质合金涂层	整体球头铣刀	12	2
清根	自制	硬质合金涂层	整体球头铣刀	10	2
清根	自制	硬质合金涂层	整体球头铣刀	8	2

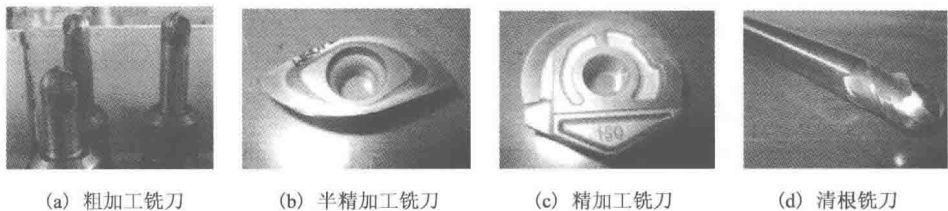


图 1-5 汽车覆盖件模具加工中选用的铣刀

采用上述工艺和刀具进行模具型面加工时，由于毛坯尺寸误差较大，切削余量难以控制，粗加工中的切削余量不均，铣刀极易损坏，并影响机床主轴加工精度。因此，该工序对刀具轨迹控制要求严格，工艺编程复杂。

模具半精加工和精加工中，一把铣刀的使用寿命无法满足大型面加工长行程和长时间持续加工的要求，需在铣刀磨损、破损严重影响加工质量时及时停机检查换刀。为了减少换刀引起的接刀痕，在工艺设计和刀路规划时，通常根据铣刀平均寿命，折算成走刀路线长度，并尽量在模具型面拐角、棱线等特征处换刀，以保证模具型面加工的连续性。其中，模具生产企业采用的精加工工艺如表 1-3 所示。

表 1-3 汽车覆盖件模具精加工参数及刀具

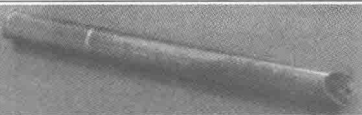
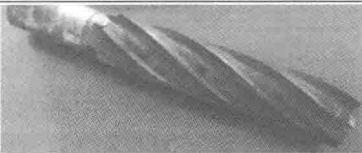
参数提供	加工机床	加工对象	铣刀直径/mm	铣刀齿数	主轴转速/(r/min)	每齿进给量/(mm/z)	切削深度/mm	铣削行距/mm
企业 1	五轴加工中心	门车内板模具	20~30	2	3000	0.3	0.2~0.3	0.4
企业 2	数控铣生产线	整体侧位模具	20~30	2	5000	0.4	0.2~0.3	0.3
企业 3	数控龙门铣床	内板立柱模具	20~30	2	3000	0.4	0.2~0.3	0.5
企业 4	五轴加工中心	内外板模具	20~30	2	4000	0.3	0.2~0.3	0.5

1.1.3 淬硬钢模具加工中刀具服役状况

汽车模具生产企业高速铣削加工中刀具状况调研发现，淬硬钢模具加工中铣刀损坏现象时有发生，某企业对模具粗加工中铣刀失效形式和原因的分析结果如表 1-4 所示。

分析该案例发现，模具粗加工中铣刀失效的主要原因为：切削参数选用不当，导致铣刀过切，承受载荷过大，出现折断、损伤；粗加工程序设计不合理，使加工中出现包角，铣刀发生干涉，导致其变形、折断；铣刀安全可靠性和较低，在出现过切、包角等问题时，抗过载能力较差。

表 1-4 模具铣刀失效案例

铣刀失效形式	铣刀失效原因
	3D 程序在连接时，误将对称的子程序也连在了一起，导致球刀撞断。 3D 编程流程存在漏洞；没有认真执行仿真流程
	2D 程序使用的模型与铸件严重不符，在加工过程中造成铣刀撞断。 工艺设计中实体模型更改不规范
	某三维点窝的 2D 程序，在编程时误操作，选择了平面以下的点，加工时快速入刀，导致铣刀报废。 编程选择点错误，螺钉孔处仿真无效
	某 3D 程序，去余量程序与仿型程序颠倒，在没去余量的情况下进行仿型，半精加工出现包角，导致半精加工球刀报废
	某 2D 程序加工没有按照最大加工量编程，层切量大(3mm)，导致刀头报废。 毛坯贴点检测存在漏洞；编程、校对、仿真没有认真核对照相点
	某 2D 程序编制完成后发现模型有问题，更改部分程序，但两处导板面只更改了粗加工，没改半精、精加工，在半精加工时导致 50 杆刀撞弯报废。 更改程序不彻底；更改程序后期校对执行不严谨

淬硬钢模具淬火后，其半精加工和精加工中铣刀失效形式和原因的分析结果如表 1-5、表 1-6 所示。分析表 1-5、表 1-6 案例发现，淬硬钢火后半精加工时，模具变形引起的加工余量不均，导致铣刀发生崩刃，在此状态下持续切削，铣刀切削刃产生了严重的磨损、破损。模具型面精加工中，铣刀以 45°斜切方式往复切削 7CrSiMnMoV 和 Cr12MoV 拼接区域，镶块间隙和工件硬度的周期性突变，使铣刀受到冲击载荷作用，振动明显，铣刀发生微崩刃，导致切削刃磨损加快，铣刀使用寿命缩短，无法满足大型面长行程切削的工艺要求。

表 1-5 模具半精加工铣刀失效案例

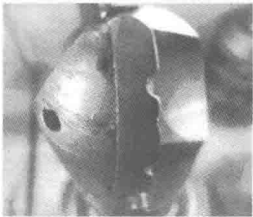
		工件	名称：汽车左右侧护板覆盖件模具	
			材质：7CrSiMnMoV 和 Cr12MoV	
			硬度：HRC50~55	
		刀具	刀体型号	BNMM-300106T-S32
			刀片型号	BNM-300, JC5015
使用结果 加工时间 4 小时 刀具情况 切削刃磨损 破损严重		切削参数	主轴转速	3500r/min
			进给速度	2100mm/min
			每齿进给量	0.3mm
			切削深度	0.5mm
			行距	1.0mm
			冷却方式	风冷

表 1-6 模具精加工铣刀失效案例

		工 件	名称：汽车左右侧护板覆盖件模具	
			材质：7CrSiMnMoV 和 Cr12MoV	
			硬度：HRC50~55	
		刀 具	刀体型号	BNMM-300106T-S32
			刀片型号	BNM-300, JC5015
使用结果		切 削 参 数	主轴转速	4000r/min
			进给速度	2400mm/min
每齿进给量	0.3mm			
切削深度	0.2mm			
行距	0.3mm			
冷却方式	风冷			
加工时间	刀具情况			
4 小时	切削刃磨损严重			

1.2 汽车覆盖件模具高速铣削工艺分析

1.2.1 车门内板 A 柱模具加工特征

如图 1-6 所示，车门内板 A 柱模具型面上存在大量沟槽、转角、凸起、凹陷，多采用整体和镶块式淬硬钢铣削加工而成，其加工区域存在大比例的多种高硬度表面，是一种典型的具有高硬度复杂曲面和多硬度拼接的汽车大型覆盖件模具。

该模具型面轮廓尺寸较大，由于模具材料内部组织的不均匀性及物理机械性能的各向异性，模具镶块淬火变形量达到 1.4mm，远超出了工序设计尺寸精度要求，无法通过一次加工去除变形部分，不能直接进行精加工。因此，该模具粗加工后需要将模具镶块拆下淬火后，再重新拼接装配后进行半精加工和精加工。

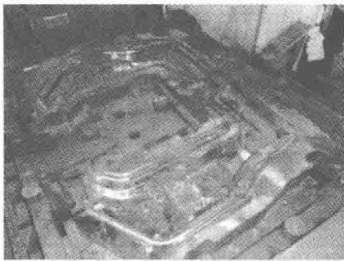


图 1-6 车门内板 A 柱模具型面

车门内板 A 柱模具材料为 Cr12MoV，淬火后硬度约为 HRC50~65，其加工机床为三轴龙门数控铣床，半精加工和精加工所使用的刀具如表 1-7 所示。

表 1-7 模具加工选用的球头铣刀

工 序	刀 具	刀 具 材 料	直 径
半精加工	BNM-300, JC5015	硬质合金, TiAlN 涂层	20~30mm
	BNM-300S, JC8008		
精加工	BNM-300S, JC8008	硬质合金, TiAlN 涂层	20~30mm

1.2.2 模具半精加工工艺分析

车门内板 A 柱模具淬火后的半精加工工序及切削参数如表 1-8 所示，其半精加工共分为三道工序，每一道工序的加工效果如图 1-7 所示。

表 1-8 内板 A 柱半精加工切削参数

工 艺 参 数	半 精 加 工		
	第一次	第二次	第三次
刀具直径/mm	30	30	30
主轴转速/(r/min)	2400	3400	3400
进给速度/(mm/min)	2000	3000	3000
切削深度/mm	0.3	0.5	0.3
行距/mm	2.5	2.5	2.5
加工时间/h	5	3.5	3.5

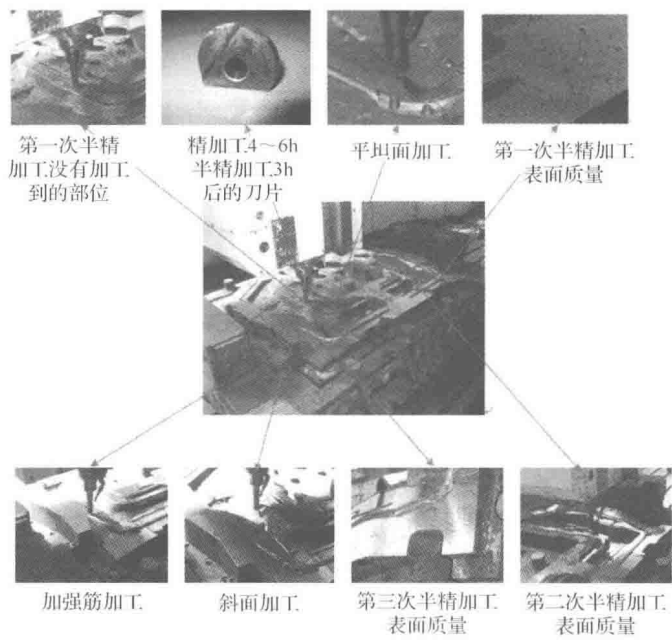


图 1-7 内板 A 柱模具半精加工

受工件淬火变形影响，第一道半精加工工序中铣刀切削冲击较大，主轴转速和进给量比工艺规范中的规定低 20%~40%，切削深度设置为 0.3mm，加工工时达到 5h，且模具型面部分加工表面没有遍历到。第二道半精加工工序中模具型面加工余量不均匀程度有所降低，对铣刀瞬态冲击减小，切削深度设置为 0.5mm，并提高主轴转速和进给量。第二道半精加工工序切削深度为 0.3mm，主轴转速和进给量保持与第二道半精加工工序相同。

该模具半精加工总工时为 12h，每道工序加工工时超过 3.5h，均高于推荐的刀具使用寿命，其每道工序的后半程加工中刀具磨损、破损严重，深腔和陡峭面加工时刀具振动较大，使得半精加工误差较大，导致精加工工序的加工余量不均。

1.2.3 模具精加工工艺分析

车门内板 A 柱模具的精加工工艺设计方案及实际切削参数如表 1-9 所示，其精加工工序的加工效果如图 1-8 所示。