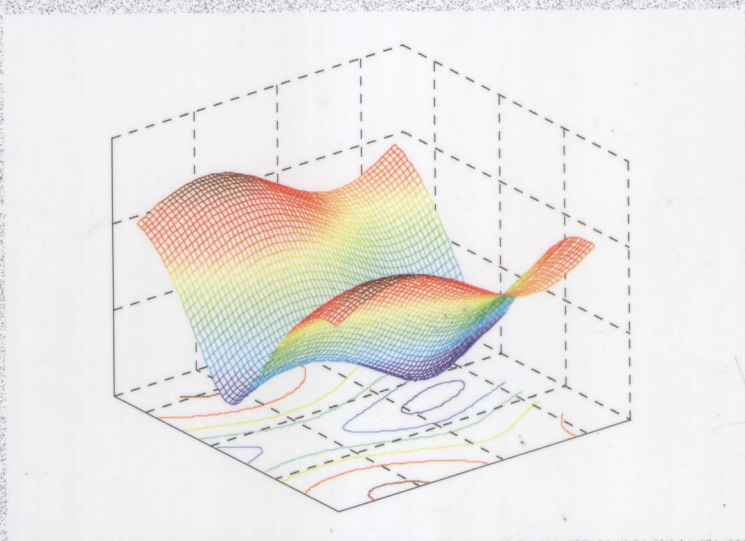


# 表面光整加工 理论与新技术

Surface Finishing  
Theory and New Technology

杨胜强 李文辉 陈红玲 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 表面光整加工理论与新技术

## Surface Finishing Theory and New Technology

杨胜强 李文辉 陈红玲 等著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

表面光整加工理论与新技术 / 杨胜强, 李文辉, 陈红玲 著.  
—北京: 国防工业出版社, 2011.5  
ISBN 978-7-118-07173-3

I. ①表... II. ①杨... ②李... ③陈... III. ①表面精整 IV.  
①TG176

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 018942 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 26 $\frac{1}{4}$  字数 502 千字

2011 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 98.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

## 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

# 国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟  
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

# 前 言

太原理工大学进行表面光整技术研究与应用已有 25 个年头了,自 20 世纪 80 年代,在国内较早开展了自由磨具光整加工技术与开发,先后获得多项成果和发明专利,列入国家级科技成果重点推广计划项目 1 项,获得省级科技进步奖 2 项、国家科技进步奖 1 项。在总结成果的基础上,2000 年杨世春教授主编出版了机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目《表面质量与光整技术》,该书出版后,得到了相关高等院校、科研院所和生产应用单位等社会各界的好评,一些高校将此书作为研究生或本科生的教材,一些企业采用了书中介绍的新工艺和新装备。可以肯定地说,10 年前的编著初衷得以实现。

近 10 年来,太原理工大学光整技术研究所针对企业生产中的技术难题,在国家自然科学基金、科技部中小企业技术创新基金、山西省自然科学基金、山西省科技攻关计划、山西省高校科技研究开发计划和留学归国人员基金等的支持下,以 4 篇博士论文分别论述了大型轴类滚磨光整、磁性磨粒光整、液体磁性磨具光整、两相流光整等自由磨具光整加工的新理论、新技术和新工艺,并与中国兵器工业集团公司第七〇研究所廊坊分所(廊坊市北方天宇机电技术有限公司)等共同开发出适应市场需求的光整加工新装备。研究成果已在军工企业、民用企业和外资企业得到广泛应用,取得了较好的经济效益和社会效益。在学术交流和面向教学、科研、生产的实践中,作者深刻体会到编撰本著作的必要性。本书编写的指导原则是,重点介绍编著者直接进行的科学研究和科学试验成果,充分注意理论、试验、模拟和应用的系统性和完整性,并全面概括地介绍国内外各种实用的光整加工方法,以适合从事机械制造及相关工程领域的技术人员、科研人员 and 高校师生参考使用。

全书共分 6 章:第 1 章介绍表面质量和光整技术的内涵和光整加工技术的发展;第 2 章至第 5 章分别论述滚磨光整、磁性磨粒光整、液体磁性磨具光整、两相流光整等自由磨具光整加工新技术的加工机理、加工设备、影响因素、加工效果及应用实例;第 6 章介绍其他实用的表面光整加工方法。

本书由杨胜强、李文辉、陈红玲等著。全书以集体讨论、分工撰写的方式编著而成。具体分工如下:第 1 章杨世春、杨胜强、李文辉;第 2 章李文辉;第 3 章陈红

玲;第4章孙恒五、李唯东;第5章杨胜强;第6章李秀红、李文辉、杨胜强。

本书编著过程中,得到了太原理工大学汪鸣铮教授、张银喜教授、吕明教授,北京理工大学庞思勤教授,中北大学王爱玲教授等的指导,国家自然科学基金委员会、科技部、山西省科技厅、山西省教育厅、中国机械工程学会生产工程分会光整技术委员会、山西省机械工程学会以及中国兵器工业集团公司第七〇研究所廊坊分所、山东华源莱动内燃机有限公司等给予的支持,太原理工大学光整技术研究所曹明让、姚平喜、丁艳红、侯志燕等老师给予的帮助,在此真诚表示感谢。对国防科技图书出版基金的资助深表谢意。

由于作者水平所限,难免存在不足之处,恳请读者批评指正并提出宝贵意见。

作者  
于太原理工大学  
2010年8月

# 目 录

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第 1 章 表面质量与光整技术     | 1  |
| 1.1 概述              | 1  |
| 1.2 零件的表面质量         | 2  |
| 1.2.1 产品质量          | 2  |
| 1.2.2 零件质量          | 2  |
| 1.2.3 零件的表面质量       | 3  |
| 1.3 表面光整加工技术        | 10 |
| 1.3.1 内涵            | 10 |
| 1.3.2 功能及特点         | 11 |
| 1.3.3 分类            | 12 |
| 1.3.4 光整加工效果        | 15 |
| 1.4 表面质量评价和光整方法选择   | 22 |
| 1.4.1 表面质量评价        | 22 |
| 1.4.2 评价指标的测量技术     | 38 |
| 1.4.3 光整加工方法的选择     | 42 |
| 1.5 光整加工技术发展现状及趋势   | 49 |
| 1.5.1 光整加工技术发展简史及现状 | 49 |
| 1.5.2 光整加工技术发展趋势    | 50 |
| 参考文献                | 51 |
| 第 2 章 滚磨光整加工技术      | 52 |
| 2.1 概述              | 52 |
| 2.1.1 内涵            | 52 |
| 2.1.2 类型            | 54 |
| 2.1.3 功能特点及适用范围     | 55 |
| 2.2 回转式滚磨光整加工       | 57 |
| 2.2.1 加工原理及特点       | 57 |

|       |             |     |
|-------|-------------|-----|
| 2.2.2 | 影响加工效果的主要因素 | 58  |
| 2.2.3 | 设备类型及设计     | 58  |
| 2.3   | 振动式滚磨光整加工   | 60  |
| 2.3.1 | 加工原理及特点     | 60  |
| 2.3.2 | 影响加工效果的主要因素 | 62  |
| 2.3.3 | 设备类型及设计     | 63  |
| 2.4   | 涡流式滚磨光整加工   | 67  |
| 2.4.1 | 加工原理及特点     | 67  |
| 2.4.2 | 影响加工效果的主要因素 | 68  |
| 2.4.3 | 设备类型及设计     | 69  |
| 2.5   | 离心式滚磨光整加工   | 71  |
| 2.5.1 | 加工原理及特点     | 71  |
| 2.5.2 | 影响加工效果的主要因素 | 78  |
| 2.5.3 | 设备类型及设计     | 83  |
| 2.6   | 立式主轴式滚磨光整加工 | 87  |
| 2.6.1 | 加工原理及特点     | 87  |
| 2.6.2 | 影响加工效果的主要因素 | 96  |
| 2.6.3 | 设备类型及设计     | 102 |
| 2.7   | 卧式主轴式滚磨光整加工 | 106 |
| 2.7.1 | 加工原理及特点     | 106 |
| 2.7.2 | 影响加工效果的主要因素 | 114 |
| 2.7.3 | 设备类型及设计     | 124 |
| 2.8   | 加工介质        | 128 |
| 2.8.1 | 磨块          | 128 |
| 2.8.2 | 液体介质        | 138 |
| 2.9   | 滚磨光整加工应用    | 140 |
| 2.9.1 | 概述          | 140 |
| 2.9.2 | 应用实例        | 144 |
|       | 参考文献        | 163 |
| 第3章   | 磁性磨粒光整加工技术  | 166 |
| 3.1   | 概述          | 166 |
| 3.1.1 | 基本涵义        | 166 |

|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| 3.1.2      | 磁性磨粒的受力分析 .....           | 167        |
| 3.1.3      | 磁性磨粒的运动轨迹 .....           | 169        |
| 3.1.4      | 磁性磨粒的加工机理 .....           | 171        |
| 3.1.5      | 磁性磨粒失效性分析 .....           | 173        |
| 3.2        | 磁性磨粒 .....                | 174        |
| 3.2.1      | 磁性磨粒的构成 .....             | 174        |
| 3.2.2      | 磁性磨粒的分类及型号编制 .....        | 176        |
| 3.2.3      | 磁性磨粒的制备 .....             | 177        |
| 3.2.4      | 磁性磨粒的主要性能参数 .....         | 187        |
| 3.3        | 磁性磨粒光整加工装置 .....          | 198        |
| 3.3.1      | 磁性磨粒光整加工装置的组成 .....       | 198        |
| 3.3.2      | 磁场发生装置的设计 .....           | 201        |
| 3.3.3      | 磁极头设计 .....               | 208        |
| 3.4        | 影响加工效果的因素 .....           | 215        |
| 3.4.1      | 运动参数 .....                | 215        |
| 3.4.2      | 工艺参数 .....                | 218        |
| 3.4.3      | 设备参数 .....                | 221        |
| 3.4.4      | 其他参数 .....                | 225        |
| 3.5        | 应用实例 .....                | 228        |
| 3.5.1      | 概述 .....                  | 228        |
| 3.5.2      | 加工效果 .....                | 228        |
| 3.5.3      | 应用实例 .....                | 230        |
|            | 参考文献 .....                | 242        |
| <b>第4章</b> | <b>液体磁性磨具光整加工技术 .....</b> | <b>246</b> |
| 4.1        | 概述 .....                  | 246        |
| 4.1.1      | 液体磁性磨具光整加工方法的提出 .....     | 246        |
| 4.1.2      | 液体磁性磨具光整加工方法的特点 .....     | 248        |
| 4.2        | 液体磁性磨具光整加工机理 .....        | 249        |
| 4.2.1      | 液体磁性磨具的流变性机理 .....        | 249        |
| 4.2.2      | 液体磁性磨具光整加工机理 .....        | 251        |
| 4.3        | 液体磁性磨具 .....              | 254        |
| 4.3.1      | 液体磁性磨具的构成 .....           | 254        |

|            |                              |            |
|------------|------------------------------|------------|
| 4.3.2      | 液体磁性磨具的制备工艺 .....            | 260        |
| 4.3.3      | 液体磁性磨具的性能参数 .....            | 262        |
| 4.4        | 液体磁性磨具光整加工装置 .....           | 277        |
| 4.4.1      | 光整加工装置的基本要求 .....            | 277        |
| 4.4.2      | 磁场设计及有限元分析 .....             | 277        |
| 4.4.3      | 装置设计 .....                   | 283        |
| 4.5        | 液体磁性磨具性能主要影响因素及加工效果 .....    | 286        |
| 4.5.1      | 液体磁性磨具光整加工工艺过程 .....         | 286        |
| 4.5.2      | 液体磁性磨具性能主要影响因素 .....         | 287        |
| 4.5.3      | 加工效果 .....                   | 290        |
|            | 参考文献 .....                   | 293        |
| <b>第5章</b> | <b>两相螺旋流内孔表面光整加工技术 .....</b> | <b>296</b> |
| 5.1        | 概述 .....                     | 296        |
| 5.1.1      | 两相螺旋流内孔表面光整加工方法的提出 .....     | 296        |
| 5.1.2      | 两相螺旋流内孔表面光整加工方法的特点 .....     | 297        |
| 5.2        | 螺旋流理论及数值模拟 .....             | 297        |
| 5.2.1      | 单相螺旋流 .....                  | 297        |
| 5.2.2      | 两相螺旋流 .....                  | 311        |
| 5.2.3      | 不同参数下气粒两相螺旋流的数值模拟 .....      | 321        |
| 5.3        | 气粒两相螺旋流光整加工机理 .....          | 325        |
| 5.3.1      | 流场的形成 .....                  | 326        |
| 5.3.2      | 受力分析 .....                   | 328        |
| 5.3.3      | 微观运动特征 .....                 | 332        |
| 5.3.4      | 光整加工机理 .....                 | 333        |
| 5.4        | 气粒两相螺旋流光整加工装置 .....          | 335        |
| 5.4.1      | 总体设计 .....                   | 335        |
| 5.4.2      | 螺旋流形成部件 .....                | 336        |
| 5.4.3      | 其他部件 .....                   | 345        |
| 5.5        | 主要影响因素及加工效果 .....            | 348        |
| 5.5.1      | 工艺过程 .....                   | 348        |
| 5.5.2      | 主要因素 .....                   | 349        |
| 5.5.3      | 加工效果 .....                   | 359        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 参考文献 .....                    | 361        |
| <b>第 6 章 其他表面光整加工技术 .....</b> | <b>364</b> |
| 6.1 非自由磨具光整加工 .....           | 364        |
| 6.1.1 光整磨削 .....              | 364        |
| 6.1.2 超精研 .....               | 368        |
| 6.1.3 珩磨、滚轮珩磨 .....           | 370        |
| 6.1.4 抛光 .....                | 373        |
| 6.1.5 动力刷加工 .....             | 376        |
| 6.1.6 无屑光整加工 .....            | 378        |
| 6.1.7 超声波光整加工 .....           | 381        |
| 6.2 其他自由磨具光整加工 .....          | 383        |
| 6.2.1 研磨加工 .....              | 383        |
| 6.2.2 挤压珩磨 .....              | 385        |
| 6.2.3 喷射加工 .....              | 389        |
| 6.3 化学电学与热能光整加工 .....         | 393        |
| 6.3.1 化学光整加工 .....            | 394        |
| 6.3.2 电化学光整加工 .....           | 394        |
| 6.3.3 热能光整加工 .....            | 397        |
| 6.4 复合光整加工 .....              | 400        |
| 6.4.1 电化学机械复合光整加工 .....       | 400        |
| 6.4.2 磁性磨粒电解研磨复合光整加工 .....    | 404        |
| 6.4.3 电解振动复合滚磨光整加工 .....      | 405        |
| 6.4.4 超声电解复合光整加工 .....        | 406        |
| 6.4.5 超声电火花复合光整加工 .....       | 407        |
| 参考文献 .....                    | 407        |

# Contents

|                  |                                                                  |           |
|------------------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Chapter 1</b> | <b>Surface Quality and Finishing</b>                             | <b>1</b>  |
| 1.1              | Introduction                                                     | 1         |
| 1.2              | Surface quality of parts                                         | 2         |
| 1.2.1            | Product quality                                                  | 2         |
| 1.2.2            | Parts quality                                                    | 2         |
| 1.2.3            | Surface quality of parts                                         | 3         |
| 1.3              | Surface finishing technology                                     | 10        |
| 1.3.1            | Connotation                                                      | 10        |
| 1.3.2            | Function and characteristics                                     | 11        |
| 1.3.3            | Classification                                                   | 12        |
| 1.3.4            | Finishing effects                                                | 15        |
| 1.4              | Evaluation of surface quality and selection of finishing methods | 22        |
| 1.4.1            | Surface quality evaluation                                       | 22        |
| 1.4.2            | Measurement of evaluation indexes                                | 38        |
| 1.4.3            | Selection of finishing methods                                   | 42        |
| 1.5              | Current situation and trend of finishing technology              | 49        |
| 1.5.1            | Finishing technology brief history and present situation         | 49        |
| 1.5.2            | Finishing technology development trend                           | 50        |
|                  | References                                                       | 51        |
| <b>Chapter 2</b> | <b>Barrel finishing technology</b>                               | <b>52</b> |
| 2.1              | Introduction                                                     | 52        |
| 2.1.1            | Connotation                                                      | 52        |
| 2.1.2            | Classification                                                   | 54        |
| 2.1.3            | Functional characteristics and application scope                 | 55        |
| 2.2              | Rotary barrel finishing                                          | 57        |
| 2.2.1            | Finishing principle and characteristics                          | 57        |

|                  |                                                     |            |
|------------------|-----------------------------------------------------|------------|
| 2. 2. 2          | Main factors affecting finishing effects .....      | 58         |
| 2. 2. 3          | Equipment types and design .....                    | 58         |
| 2. 3             | Vibratory barrel finishing .....                    | 60         |
| 2. 3. 1          | Finishing principle and characteristics .....       | 60         |
| 2. 3. 2          | Main factors affecting finishing effects .....      | 62         |
| 2. 3. 3          | Equipment types and design .....                    | 63         |
| 2. 4             | Whirling barrel finishing .....                     | 67         |
| 2. 4. 1          | Finishing principle and characteristics .....       | 67         |
| 2. 4. 2          | Main factors affecting finishing effects .....      | 68         |
| 2. 4. 3          | Equipment types and design .....                    | 69         |
| 2. 5             | Centrifugal barrel finishing .....                  | 71         |
| 2. 5. 1          | Finishing principle and characteristics .....       | 71         |
| 2. 5. 2          | Main factors affecting finishing effects .....      | 78         |
| 2. 5. 3          | Equipment types and design .....                    | 83         |
| 2. 6             | Vertical spindle barrel finishing .....             | 87         |
| 2. 6. 1          | Finishing principle and characteristics .....       | 87         |
| 2. 6. 2          | Main factors affecting finishing effects .....      | 96         |
| 2. 6. 3          | Equipment types and design .....                    | 102        |
| 2. 7             | Horizontal spindle barrel finishing .....           | 106        |
| 2. 7. 1          | Finishing principle and characteristics .....       | 106        |
| 2. 7. 2          | Main factors affecting finishing effects .....      | 114        |
| 2. 7. 3          | Equipment types and design .....                    | 124        |
| 2. 8             | Finishing medium .....                              | 128        |
| 2. 8. 1          | Solid medium .....                                  | 128        |
| 2. 8. 2          | Liquid medium .....                                 | 138        |
| 2. 9             | Application examples .....                          | 140        |
| 2. 9. 1          | Application introduction .....                      | 140        |
| 2. 9. 2          | Barrel finishing examples .....                     | 144        |
|                  | References .....                                    | 163        |
| <b>Chapter 3</b> | <b>Magnetic abrasive finishing technology .....</b> | <b>166</b> |
| 3. 1             | Introduction .....                                  | 166        |
| 3. 1. 1          | Basic meaning .....                                 | 166        |

|                  |                                                                   |            |
|------------------|-------------------------------------------------------------------|------------|
| 3. 1. 2          | Force analysis .....                                              | 167        |
| 3. 1. 3          | Trajectory of magnetic abrasive .....                             | 169        |
| 3. 1. 4          | Finishing mechanism .....                                         | 171        |
| 3. 1. 5          | Expiration analysis of magnetic abrasive .....                    | 173        |
| 3. 2             | Magnetic abrasive .....                                           | 174        |
| 3. 2. 1          | Composition .....                                                 | 174        |
| 3. 2. 2          | Classification and model .....                                    | 176        |
| 3. 2. 3          | Preparation .....                                                 | 177        |
| 3. 2. 4          | Main performance parameters .....                                 | 187        |
| 3. 3             | Magnetic abrasive finishing device .....                          | 198        |
| 3. 3. 1          | Composition of magnetic abrasive finishing device .....           | 198        |
| 3. 3. 2          | Design of magnetic field generator .....                          | 201        |
| 3. 3. 3          | Design of magnetic pole head .....                                | 208        |
| 3. 4             | Factors affecting finishing effects .....                         | 215        |
| 3. 4. 1          | Motion parameters .....                                           | 215        |
| 3. 4. 2          | Process parameters .....                                          | 218        |
| 3. 4. 3          | Equipment parameters .....                                        | 221        |
| 3. 4. 4          | Other parameters .....                                            | 225        |
| 3. 5             | Application examples of magnetic abrasive finishing .....         | 228        |
| 3. 5. 1          | Introduction .....                                                | 228        |
| 3. 5. 2          | Finishing effects .....                                           | 228        |
| 3. 5. 3          | Application examples .....                                        | 230        |
|                  | References .....                                                  | 242        |
| <b>Chapter 4</b> | <b>Fluid magnetic abrasive finishing technology .....</b>         | <b>246</b> |
| 4. 1             | Introduction .....                                                | 246        |
| 4. 1. 1          | Presentation of fluid magnetic abrasive finishing method .....    | 246        |
| 4. 1. 2          | Characteristics of fluid magnetic abrasive finishing .....        | 248        |
| 4. 2             | Fluid magnetic abrasive finishing mechanism .....                 | 249        |
| 4. 2. 1          | Fluid magnetic abrasive rheological properties<br>mechanism ..... | 249        |
| 4. 2. 2          | Fluid magnetic abrasive finishing mechanism .....                 | 251        |
| 4. 3             | Fluid magnetic abrasive .....                                     | 254        |

|                  |                                                                                               |            |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4. 3. 1          | Composition .....                                                                             | 254        |
| 4. 3. 2          | Preparation technology .....                                                                  | 260        |
| 4. 3. 3          | Performance parameters .....                                                                  | 262        |
| 4. 4             | Fluid magnetic abrasive finishing device .....                                                | 277        |
| 4. 4. 1          | Basic requirements of finishing device .....                                                  | 277        |
| 4. 4. 2          | Magnetic field design and finite element analysis .....                                       | 277        |
| 4. 4. 3          | Device design .....                                                                           | 283        |
| 4. 5             | Main factors and finishing effects affecting fluid magnetic abrasive<br>performance .....     | 286        |
| 4. 5. 1          | Process .....                                                                                 | 286        |
| 4. 5. 2          | Main affecting factors .....                                                                  | 287        |
| 4. 5. 3          | Finishing effects .....                                                                       | 290        |
|                  | References .....                                                                              | 293        |
| <b>Chapter 5</b> | <b>Two-phase swirling flow hole surface finishing technology .....</b>                        | <b>296</b> |
| 5. 1             | Introduction .....                                                                            | 296        |
| 5. 1. 1          | Presentation of two-phase swirling flow finishing<br>method .....                             | 296        |
| 5. 1. 2          | Characteristics of two-phase swirling flow hole surface<br>finishing .....                    | 297        |
| 5. 2             | Swirling flow theory and numerical simulation .....                                           | 297        |
| 5. 2. 1          | Single-phase swirling flow .....                                                              | 297        |
| 5. 2. 2          | Two-phase swirling flow .....                                                                 | 311        |
| 5. 2. 3          | Numerical simulation on different parameters of gas-particle<br>two-phase swirling flow ..... | 321        |
| 5. 3             | Gas-particle two-phase swirling flow finishing mechanism .....                                | 325        |
| 5. 3. 1          | Formation of flow field .....                                                                 | 326        |
| 5. 3. 2          | Force analysis .....                                                                          | 328        |
| 5. 3. 3          | Microscopic motion feature .....                                                              | 332        |
| 5. 3. 4          | Finishing mechanism .....                                                                     | 333        |
| 5. 4             | Gas-particle two-phase swirling flow finishing device .....                                   | 335        |
| 5. 4. 1          | Overall design .....                                                                          | 335        |
| 5. 4. 2          | Swirling flow formation parts .....                                                           | 336        |