



科学基金资助出版

# 多物理耦合场固液 两相磨粒流精密加工技术

李俊焯 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

# 多物理耦合场固液两相磨粒流 精密加工技术

李俊焯 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了多物理耦合场固液两相磨粒流精密加工技术的原理与方法,主要包括:磨粒流精密加工技术的相关理论,固液两相磨粒流加工过程中的力学特性、热学特性、流动特性和颗粒碰撞特性的研究,分子动力学方法、耗散粒子动力学方法、大涡模拟技术和离散元技术在固液两相磨粒流精密加工中的应用研究,固液两相磨粒流加工微小孔、特殊通道、异形曲面的试验研究与探索。在此基础上,揭示多物理耦合场固液两相磨粒流精密加工机制,并给出固液两相磨粒流精密加工的质量控制技术和可进一步深入研究的相关方向。

本书可供高等院校高年级本科生、研究生和科研单位的工程技术人员,以及航空航天、武器装备、医疗器械、精密机械、车辆工程、精细复杂模具等领域从事精密和超精密加工技术的相关研究人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

多物理耦合场固液两相磨粒流精密加工技术 / 李俊焯著. —北京: 科学出版社, 2018.8

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-056057-5

I. ①多… II. ①李… III. ①精密切削 IV. ①TG506

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 314802 号

责任编辑: 张 震 姜 红 / 责任校对: 王萌萌

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 无极书装

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

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 8 月 第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018 年 8 月 第一次印刷 印张: 25

字数: 504 000

定价: 188.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 付小兵 | 傅伯杰 | 郭坤宇 | 胡 滨 | 贾国柱 | 刘 伟 |
| 卢秉恒 | 毛大立 | 权良柱 | 任南琪 | 万国华 | 王光谦 |
| 吴硕贤 | 杨宝峰 | 印遇龙 | 喻树迅 | 张文栋 | 赵 路 |
| 赵晓哲 | 钟登华 | 周宪梁 |     |     |     |

## 《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

# 前 言

在军事、航空航天、精密机械、能源等领域很多关键零件都存在微小孔、特殊通道、自由曲面和异形曲面，如坦克及车辆发动机的重要部件喷油嘴和共轨管、航空航天用伺服阀阀芯喷嘴、航空发动机高速旋转的整体叶轮、步兵战车供油系统中的重要零件、卫星姿态控制系统中的特殊曲面、精细复杂模具和自由曲面等，而该类零件的光整加工都属于精密加工范畴。关键零件的表面质量往往可以决定整体使用性能，因此人们迫切需要提高零件的表面质量，以减少零件的磨损、提高其配合精度和疲劳强度以及耐腐蚀性等性能，从而推动光整加工技术的快速发展。而在精密与超精密加工领域，最为棘手的难题是对微小孔、特殊通道、自由曲面、异形曲面表面的精密光整加工。但目前的常规加工技术受加工形状和加工效益的限制，无法有效实现特殊通道、自由曲面和异形曲面表面的光整加工，特别对那些微小孔、异型深孔、自由曲面和复杂异形曲面的超精密加工更是束手无策，而微小孔、特殊通道、自由曲面和异形曲面零件在军工及民用领域应用广泛且用量巨大，其表面质量对整体性能影响巨大，因此迫切需要解决此类零件的光整加工问题并提高其表面质量。磨粒流精密加工技术就是在此背景下产生的，磨粒流精密加工技术对微小孔、特殊通道、自由曲面和异形曲面的超精密加工是行之有效的加工手段。

磨粒流加工技术已广泛应用于机械行业，例如，柴油机喷射系统（共轨管、喷油管）的精密加工；柴油机燃料喷油嘴和喷油器的环面、沉油槽孔的修理；铝制及钢制挤出模具复杂结构的抛光；高清洁度的阀体和医疗器械内表面和通道的抛光；热重铸层的去除；涡轮壳体及涡轮机内部零件、齿轮、制动器的精密光整加工；汽车、工程机械的零部件内部在车削、铣削、磨削、钻削过程中产生的毛刺的去除，零件内通道拐角、边角倒圆孔尺寸控制。经试验验证，磨粒流加工技术具有去毛刺、抛光、倒圆角和光整加工能力，并可有效提高特殊通道、自由曲面和异形曲面的表面质量，改善工件的表面形貌，可满足国家对高性能微小孔、特殊通道、自由曲面和异形曲面工件的大量需求。

本书作者长期从事精密与超精密加工、微摩擦磨损和多相流技术的研究，自2008年开始对多物理耦合场固液两相磨粒流精密加工技术开展研究，利用分子动力学方法、耗散粒子动力学方法、有限元技术及离散元技术等对多物理耦合场固液两相磨粒流精密加工过程中的力学特性、热学特性、流动特性和颗粒碰撞特性

进行了研究,提出了固液两相磨粒流加工相关零部件的核心工艺及其质量控制技术,揭示了固液两相磨粒流精密加工机制,并成功研制了磨粒流精密加工机床,部分研究成果已得到实际应用。近年来,作者所在课题组在磨粒流精密加工技术领域已发表论文 80 余篇,获外观专利授权 14 项,获软件著作权授权两项,获得省部级科技进步二等奖和自然科学学术成果奖二等奖各两项。

本书主要由李俊焯副教授撰写、张心明研究员统稿,主要参撰人员有王淑坤教授和李学光副教授。全书共 10 章,内容多来自作者及其研究生的研究成果,在写作过程中得到了研究生尹延路、胡敬磊、董坤、周立宾、王兴华、乔泽民、王震、孙风雨、吴绍菊、郭豪的热情支持,在此表示感谢。同时,要特别感谢多年来一直给予作者大力支持与培养的杨建东导师、杨兆军导师和刘薇娜导师,感谢他们多年来的宽容、理解和关爱。

由于作者水平有限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

李俊焯

2017 年 12 月于长春

# 目 录

《博士后文库》序言

前言

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                  | 1  |
| 1.1 多物理耦合场磨粒流精密加工技术的研究价值  | 1  |
| 1.2 磨粒流精密加工技术与装备国内外发展现状分析 | 3  |
| 1.2.1 磨粒流精密加工技术国外发展现状     | 3  |
| 1.2.2 磨粒流精密加工技术国内发展现状     | 6  |
| 1.2.3 磨粒流精密加工装备国外发展现状     | 8  |
| 1.2.4 磨粒流精密加工装备国内发展现状     | 10 |
| 参考文献                      | 12 |
| 第 2 章 多物理耦合场磨粒流精密加工技术理论分析 | 16 |
| 2.1 磨粒流的加工特性分析            | 16 |
| 2.2 描述流体运动的两种方法           | 17 |
| 2.2.1 Lagrange 方法         | 17 |
| 2.2.2 Euler 方法            | 17 |
| 2.3 流体力学基本方程              | 18 |
| 2.3.1 物理量守恒微分方程           | 18 |
| 2.3.2 流体运动控制方程组           | 19 |
| 2.4 磨粒流加工动力学理论分析          | 23 |
| 2.5 磨粒流加工力学分析             | 25 |
| 2.6 磨粒流的切削磨损机理分析          | 29 |
| 2.7 固液两相磨粒流热力学理论模型        | 30 |
| 2.8 连续相运动控制方程             | 31 |
| 2.8.1 N-S 方程及其无量纲化        | 31 |
| 2.8.2 不可压缩的 N-S 方程        | 33 |
| 2.9 固液两相磨粒流主要参数           | 34 |
| 2.9.1 两相浓度                | 34 |
| 2.9.2 两相流体的黏度             | 34 |
| 2.9.3 两相流体的比热和导热系数        | 35 |



|            |                              |           |
|------------|------------------------------|-----------|
| 2.10       | 磨粒的运动条件分析                    | 36        |
| 2.11       | 湍流数值计算方法                     | 37        |
| 2.11.1     | 直接数值模拟法                      | 37        |
| 2.11.2     | 雷诺平均方程法                      | 38        |
| 2.11.3     | 大涡数值模拟法                      | 39        |
|            | 参考文献                         | 41        |
| <b>第3章</b> | <b>基于耗散粒子动力学的磨粒加工技术研究</b>    | <b>43</b> |
| 3.1        | 耗散粒子动力学模拟技术研究现状              | 43        |
| 3.1.1      | 耗散粒子动力学模拟技术国外研究现状            | 43        |
| 3.1.2      | 耗散粒子动力学模拟技术国内研究现状            | 45        |
| 3.2        | 耗散粒子动力学方法体系                  | 46        |
| 3.2.1      | 耗散粒子动力学理论模型                  | 46        |
| 3.2.2      | 耗散粒子动力学数值积分方法                | 48        |
| 3.3        | 磨粒流颗粒晶胞数值模拟分析                | 48        |
| 3.4        | 碳化硅颗粒性能数值模拟分析                | 50        |
|            | 参考文献                         | 52        |
| <b>第4章</b> | <b>基于分子动力学的磨粒微切削力学关键技术研究</b> | <b>54</b> |
| 4.1        | 分子动力学模拟国内外研究现状               | 54        |
| 4.1.1      | 分子动力学模拟国外研究现状                | 54        |
| 4.1.2      | 分子动力学模拟国内研究现状                | 55        |
| 4.2        | 分子动力学模拟方法概述                  | 56        |
| 4.2.1      | 基于牛顿运动方程的数值求解算法              | 57        |
| 4.2.2      | 分子动力学模拟中的边界条件                | 58        |
| 4.2.3      | 模拟体系的势能函数                    | 59        |
| 4.2.4      | 平衡系统的分子动力学模拟系综               | 61        |
| 4.2.5      | 平衡系综的控制方法                    | 62        |
| 4.2.6      | 系统弛豫                         | 64        |
| 4.2.7      | 晶体缺陷分析方法                     | 65        |
| 4.3        | 分子动力学模拟运动方程求解                | 67        |
| 4.4        | 颗粒微切削分子动力学模型的建立              | 68        |
| 4.5        | 颗粒微切削分子动力学数值分析               | 70        |
| 4.5.1      | 颗粒正交切削与斜切削对磨粒切削影响分析          | 70        |
| 4.5.2      | 颗粒正交切削分子动力学数值分析              | 72        |
| 4.5.3      | 颗粒速度对磨粒切削的影响                 | 74        |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 4.5.4 | 系综温度对颗粒切削的影响             | 77  |
| 4.5.5 | 磨粒形状对切削过程的影响             | 81  |
| 4.6   | 颗粒微切削规律探究与模型验证           | 83  |
| 4.6.1 | 磨粒切削单晶铝和单晶镍的分子动力学分析      | 83  |
| 4.6.2 | 磨粒速度对工件切削的影响             | 84  |
| 4.6.3 | 系综温度对磨粒切削的影响             | 87  |
| 4.6.4 | 模型的验证                    | 91  |
|       | 参考文献                     | 92  |
| 第 5 章 | 基于分子动力学的固液两相磨粒流加工机理研究    | 94  |
| 5.1   | 固液两相磨粒流加工机理的分子动力学模型构建与分析 | 94  |
| 5.1.1 | 泰森多边形方法                  | 94  |
| 5.1.2 | 磨粒流加工分子动力学模拟的仿真流程        | 98  |
| 5.1.3 | 多颗粒微切削单晶材料的分子动力学模型构建     | 98  |
| 5.1.4 | 多晶材料磨粒流加工分子动力学模型构建       | 100 |
| 5.1.5 | 基于分子动力学的磨粒流加工模拟方案        | 103 |
| 5.2   | 磨粒微切削单晶材料的分子动力学数值分析      | 104 |
| 5.2.1 | 磨粒对粗糙单晶铜表面抛光过程数值分析       | 105 |
| 5.2.2 | 单晶铁和单晶铝的表面抛光过程数值分析       | 128 |
| 5.3   | 磨粒流加工不同工件材料仿真模型构建        | 135 |
| 5.3.1 | 多晶铜工件材料磨粒流加工切削机理         | 136 |
| 5.3.2 | 多晶铁工件材料磨粒流加工切削机理         | 142 |
| 5.3.3 | 多晶铝工件材料磨粒流加工切削机理         | 146 |
| 5.3.4 | 磨粒种类对磨粒流加工不同工件材料效果的影响    | 148 |
| 5.3.5 | 切削深度对磨粒流加工不同工件切削效果的影响    | 150 |
|       | 参考文献                     | 151 |
| 第 6 章 | 多物理耦合场磨粒流加工的热力学作用规律分析    | 153 |
| 6.1   | 物理模型建立及网格划分              | 153 |
| 6.1.1 | 物理模型建立                   | 153 |
| 6.1.2 | 模型网格的划分                  | 154 |
| 6.2   | 多物理耦合场固液两相磨粒流加工数值分析      | 155 |
| 6.2.1 | 喷油嘴通道磨粒流加工数值分析           | 155 |
| 6.2.2 | 共轨管通道磨粒流加工数值分析           | 164 |
| 6.2.3 | 三通管通道磨粒流加工数值分析           | 176 |
| 6.2.4 | U 型管通道磨粒流加工数值分析          | 185 |

|            |                               |            |
|------------|-------------------------------|------------|
| 6.3        | 磨粒流加工热力学作用规律探讨                | 193        |
| 6.4        | 磨粒流加工的在线温度修正补偿技术              | 195        |
|            | 参考文献                          | 197        |
| <b>第7章</b> | <b>基于大涡模拟的磨粒流加工弯管表面创成机理研究</b> | <b>198</b> |
| 7.1        | 大涡模拟国内外研究现状                   | 198        |
| 7.1.1      | 大涡模拟国外研究现状                    | 198        |
| 7.1.2      | 大涡模拟国内研究现状                    | 199        |
| 7.2        | 磨粒流加工弯管表面创成机理研究               | 199        |
| 7.2.1      | CFD 数值计算概述                    | 200        |
| 7.2.2      | 模型构建及参数设定                     | 201        |
| 7.2.3      | 弯管内磨粒流流动机理分析                  | 204        |
| 7.2.4      | 磨粒流加工弯管内表面创成机理                | 208        |
| 7.2.5      | 磨粒流加工下弯管的受力变形分析               | 210        |
| 7.3        | 磨粒流加工弯管影响因素分析                 | 212        |
| 7.3.1      | 研抛参数对磨粒流加工效果的影响分析             | 212        |
| 7.3.2      | 管件特性对磨粒流加工效果的影响分析             | 216        |
|            | 参考文献                          | 223        |
| <b>第8章</b> | <b>多物理耦合场离散相颗粒碰撞及运动规律分析</b>   | <b>225</b> |
| 8.1        | 离散相模型的国内外研究现状                 | 225        |
| 8.1.1      | 离散相模型的国外研究现状                  | 225        |
| 8.1.2      | 离散相模型的国内研究现状                  | 226        |
| 8.2        | 离散相颗粒运动控制方程与颗粒微磨削去除机理         | 227        |
| 8.2.1      | 单颗粒的动力学模型                     | 227        |
| 8.2.2      | 颗粒轨迹模型                        | 229        |
| 8.2.3      | 颗粒运动方程                        | 232        |
| 8.2.4      | 离散项的控制方程                      | 234        |
| 8.2.5      | 磨粒流加工中颗粒微磨削去除机理               | 236        |
| 8.3        | 离散相颗粒运动数学模型                   | 239        |
| 8.4        | 颗粒与工件的磨削数值分析                  | 240        |
| 8.4.1      | 磨粒流加工喷油嘴颗粒磨削数值分析              | 240        |
| 8.4.2      | 磨粒流加工阀芯喷嘴颗粒磨削数值分析             | 243        |
|            | 参考文献                          | 249        |
| <b>第9章</b> | <b>磨粒流加工异形曲面流场数值分析</b>        | <b>252</b> |
| 9.1        | 异形曲面加工技术国内外研究现状               | 252        |

|   |            |
|---|------------|
| 9.1.1 异形曲面加工技术国外研究现状 .....              | 252        |
| 9.1.2 异形曲面加工技术国内研究现状 .....              | 253        |
| 9.2 磨粒流加工叶轮流场数值分析 .....                 | 255        |
| 9.2.1 异形曲面三维模型建立与网格划分 .....             | 255        |
| 9.2.2 异形曲面模型选择 .....                    | 256        |
| 9.2.3 异形曲面材料设置 .....                    | 256        |
| 9.2.4 计算模型边界条件的设置 .....                 | 256        |
| 9.2.5 叶轮仿真结果分析 .....                    | 257        |
| 9.3 磨粒流加工螺旋齿轮流场数值分析 .....               | 262        |
| 9.3.1 螺旋齿轮三维模型建立与网格划分 .....             | 262        |
| 9.3.2 螺旋齿轮磨粒流加工数值分析 .....               | 262        |
| 9.4 磨粒流加工多边形螺旋曲面膛线管数值分析 .....           | 268        |
| 9.4.1 膛线管三维模型建立与网格划分 .....              | 268        |
| 9.4.2 多边形螺旋曲面膛线管数值分析 .....              | 268        |
| 9.5 膛线管优化研抛加工数值分析 .....                 | 275        |
| 9.5.1 加入仿形模芯后三维模型的建立与网格划分 .....         | 276        |
| 9.5.2 加入仿形模芯约束后流场磨粒流加工数值分析 .....        | 276        |
| 参考文献 .....                              | 279        |
| <b>第 10 章 多物理耦合场固液两相磨粒流加工试验研究 .....</b> | <b>281</b> |
| 10.1 变口径管的磨粒流加工试验 .....                 | 281        |
| 10.1.1 喷油嘴磨粒流加工单因素试验研究 .....            | 281        |
| 10.1.2 喷油嘴磨粒流加工全因子试验研究 .....            | 294        |
| 10.1.3 喷油嘴磨粒流加工均匀试验设计研究 .....           | 311        |
| 10.1.4 伺服阀阀芯喷嘴的磨粒流加工试验研究 .....          | 328        |
| 10.1.5 变口径管磨粒流加工试验小结 .....              | 338        |
| 10.2 非直线管的磨粒流加工试验研究 .....               | 339        |
| 10.2.1 共轨管的磨粒流加工试验研究 .....              | 340        |
| 10.2.2 三通管的磨粒流加工试验研究 .....              | 351        |
| 10.2.3 非直线管磨粒流加工试验小结 .....              | 361        |
| 10.3 弯管磨粒流加工试验研究 .....                  | 361        |
| 10.3.1 磨粒流试验材料的选用 .....                 | 361        |
| 10.3.2 磨粒流试验结果分析 .....                  | 362        |
| 10.3.3 弯管磨粒流加工试验小结 .....                | 370        |
| 10.4 异形曲面——多边形螺旋曲面磨粒流加工试验研究 .....       | 370        |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 10.4.1 磨粒流加工材料准备.....     | 370 |
| 10.4.2 磨粒流加工试验选用的方案.....  | 371 |
| 10.4.3 磨粒流加工试验结果分析.....   | 371 |
| 10.5 固液两相磨粒流加工质量控制策略..... | 378 |
| 参考文献.....                 | 380 |
| 编后记.....                  | 383 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 多物理耦合场磨粒流精密加工技术的研究价值

磨粒流光整加工技术涉及机械、材料、工程热物理、化学等学科，其实质是固液两相流体对零件表面的碰撞摩擦作用，其光整加工过程属于内流湍流作用范畴。磨粒流加工以其特有的精确性、稳定性和灵活性，不受零件形状限制，可以通达零件复杂而难以进入的部位，研抛表面均匀、批量零件的加工效果重复一致，同时避免繁杂的手工劳动，大大降低劳动强度，使零件性能得到改善，寿命延长。磨粒流抛光可实现喷嘴的超精密光整加工，涉及磨粒流流体材料的选用与特性分析，而流体材料会在磨粒流抛光过程中产生非常复杂的研磨行为，流体材料特性、颗粒的碰撞摩擦特性、颗粒表面特性及其抛光行为都具有重要的科学研究价值。

磨粒流精密加工技术可实现微小孔、特殊通道、自由曲面和异形曲面的超精密光整加工，磨粒流精密加工技术是通过一种载有磨粒的黏弹体软性磨料介质，在压力作用下往复流经零件被加工面来实现光整加工的。利用磨粒流中的磨粒充作无数的切削刀具，以其坚硬锋利的棱角对工件表面进行反复切削，从而达到一定的加工目的。磨粒流所流经的任何部位都将被光整，对于那些一般工具难以接触的特殊通道，磨粒流精密加工技术的优越性尤为突出。当磨粒均匀而渐进地对零件表面或边角进行工作时，产生去毛刺、抛光、倒角等作用，其加工工作原理如图 1.1 所示。开始研抛时，磨料填充在上磨料缸，在外力作用下，上磨料缸活塞挤压磨料经工件与夹具的通道，到达下磨料缸，工件中的通道表面就是要加工的表面，当上磨料缸到达底部后，下磨料缸开始向上挤压磨料经工件加工表面回到上磨料缸，完成一个加工循环，通常加工需要经过几个循环完成。

磨粒流精密加工技术实质是在多物理耦合场磨粒与壁面的相互碰撞作用，从而达到一定的加工效果。从宏观角度讲，磨粒流精密加工技术可认为是一种精密抛光技术；从微观角度讲，磨粒流精密加工技术可认为是一种精密微切削技术。在磨粒流精密加工过程中，可以把磨粒看作随机点热源，磨粒与零件表面相互作用产生热，热在零件表面和流体材料中传递，弄清两相流力学、生热和传热及流动规律，研制性能较好、性价比合适的磨粒流流体材料，解决其应

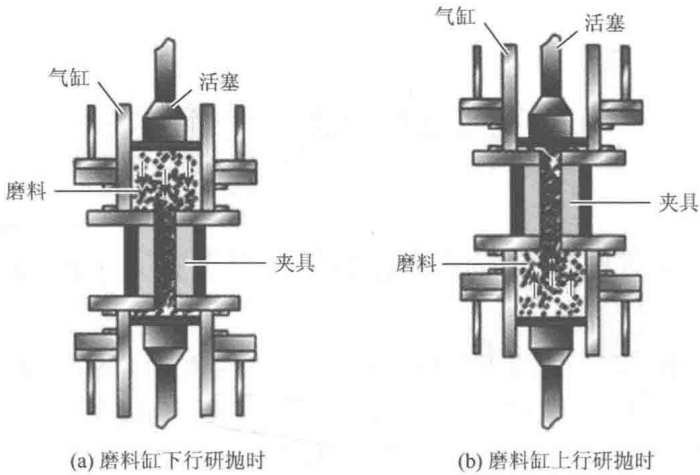


图 1.1 磨粒流加工原理图

用中的若干机理问题，具有很高的学术价值和应用价值。磨粒流光整加工效果是多种因素随机作用的结果，如不同微观、介观的磨粒与零件表面的相互作用，在不同挤压压力与加工时间条件下磨粒与壁面（零件表面）的相互作用，不同黏度的流体材料对磨粒的包覆程度等。精密与超精密加工技术在制造业和国防工业中蕴藏着巨大的应用价值，磨粒流精密加工技术由于其独特的加工机理成为众多超精加工技术的核心支撑技术，揭示固液两相磨粒流在加工应用中的力学与热学关键技术并应用于实际生产将对超精密加工领域具有重要的理论意义与实用价值。

磨粒流精密加工技术现已在研抛各种微小内孔、气缸头、伺服阀阀芯喷嘴、共轨管、磨具、涡轮壳体和叶片中得到了广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。叶轮、气缸盖经磨粒流加工前后的效果对比图如图 1.2 所示。与传统的手工抛光、机械抛光相比较，磨粒流加工最突出的优点是：可不受零件形状尺寸的影响，进入微小孔、夹缝、不规则孔等手工难以触碰的部位对其进行表面抛光、去毛刺等处理，且经其抛光处理后的表面质量具有一致性<sup>[3,4]</sup>。应用传统的抛光技术在抛光如汽车进气管等形状稍微复杂的工件内表面时，往往需要先将其切割开，抛光完成后再对其进行焊接，工艺烦琐。而磨粒流加工技术可直接对其进行内表面的抛光，具有高效性和灵活性的优点。

综上所述，开展多物理耦合场固液两相磨粒流精密加工技术研究可满足国家对高质量表面的大量需求，通过发现热流固耦合场固液两相流体力学、流动、生热传热过程中的新现象及其物理本质和固液两相磨粒流加工机理，为磨粒流微切削超精密加工理论的发展奠定基础，适时启动多物理耦合场固液两相磨粒流超精密加工机理的研究是必要而且迫切的，产业、产品及市场对该项目的技术有着巨大的需求。

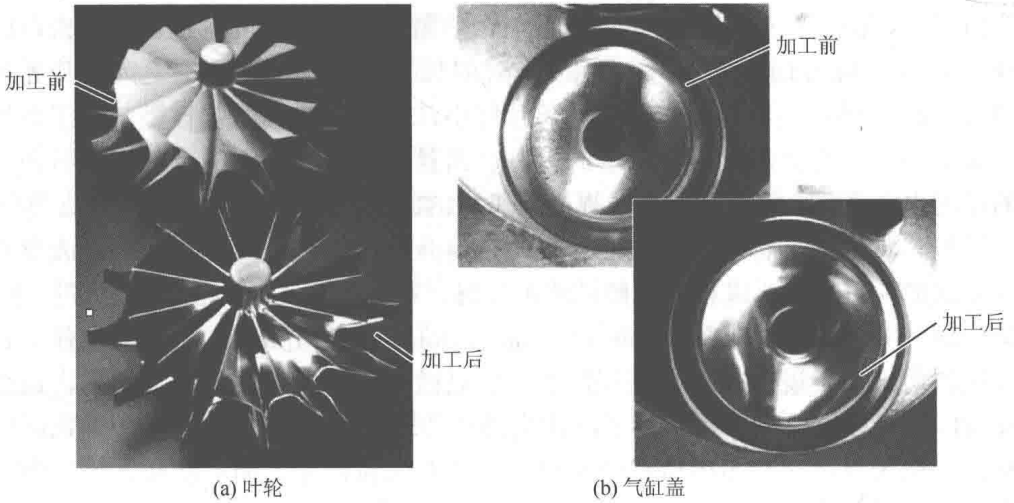


图 1.2 磨粒流加工前后对比图

## 1.2 磨粒流精密加工技术与装备国内外发展现状分析

### 1.2.1 磨粒流精密加工技术国外发展现状

在磨粒流精密加工技术研究中，国外发展较快，已有多位学者提出磨粒流精密加工技术的研究报告。Jain 等对材料去除率和表面粗糙度进行了试验性研究，优化了加工参数，利用有限元模拟磨料载体和加工介质黏滞性的变化对工件去除量与表面粗糙度的影响，得出磨粒流加工时材料的主要磨耗方式为磨粒刮除作用，从而达到精加工的目的；开发随机模拟模型研究材料表面活动磨粒密度与工件表面关系，讨论了加工过程中的热传递，预测部分热量进入工件和研磨介质中<sup>[3,4]</sup>。Gorana 等讨论了磨粒流加工过程中挤压压力、磨粒粒度、磨料浓度对材料去除率、切削力与运动磨粒密度的影响，建立了单个磨粒作用力理论模型，研究了磨粒流加工过程中的轴向力、径向力和磨粒密度，分析了加工过程中的研磨及耕犁作用<sup>[5,6]</sup>。Ali-Tavoli 等<sup>[7]</sup>运用神经网络数据组处理方法和遗传算法来分析磨粒流加工过程中循环次数和磨料浓度对材料去除率和表面光洁度的影响，并根据帕累托定律实现了加工过程中材料去除率和表面光洁度两个冲突目标的双重优化。Sankar 等探讨了磨粒流旋转加工对工件材料表面形貌的影响，分析了理论和试验螺旋路径长度条件下的工件旋转速度和磨粒在抛光区域有效距离的关系，给出了工件旋转速度与表面粗糙度变化率（磨粒流加工后的表面粗糙度与原始表面粗糙度的比值）和材料去除量之间的关系，对流变参数进行了评估，发现研磨介质的黏弹性是随剪切稀释属性变化的<sup>[8,9]</sup>。Tzeng 等<sup>[10]</sup>利用自配的磨料去加工微通道表面经电火花加工后形成的重铸层，并着重



分析了磨料中颗粒尺寸和介质黏度对表面质量的影响。Tzeng 等在试验中发现磨粒尺寸为  $150\mu\text{m}$  时要比尺寸为  $50\mu\text{m}$  时的加工效果好很多,这是因为尺寸为  $150\mu\text{m}$  时,磨粒处于自由态,如果尺寸过小,结合力就会非常轻微,加工效果也极其微弱,这会限制表面质量的提高,而且随着加工时间的延长,磨料介质的黏度也会降低,此时可以通过提高挤压力的方式来提高加工效率。Walia 等<sup>[11]</sup>在采用正常方式进行磨粒流加工的同时,为介质添加一个旋转运动,形成离心式辅助磨粒流加工;进行混合磨粒流加工时,在不改变其他加工参数的前提下,只改变旋转速度,分别在  $0\text{r/min}$ 、 $18\text{r/min}$ 、 $36\text{r/min}$ 、 $54\text{r/min}$ 、 $72\text{r/min}$  条件下进行试验,结果发现,转速越高工件表面的显微硬度和压缩残余应力越高,这是旋转时磨粒在离心力作用下剧烈冲击腐蚀工件表面的结果。Mali 等<sup>[12]</sup>以铝制圆柱筒为试验样件,利用田口试验法设计理论对磨粒尺寸、循环次数、挤压力、磨料浓度百分比、介质黏度等级等试验参数进行试验优化设计,根据测量的粗糙度值和方差建立  $Ra$ 、 $Rt$ 、 $\Delta Ra$ 、 $\Delta Rt$  数学模型来探讨各项参数对工件表面质量的影响。Furumoto 等<sup>[13]</sup>对注塑模具内表面进行自由磨粒光整加工,表面粗糙度在加工初始阶段提高明显,高速自由流动的磨粒导致磨粒动能增加,从而增加磨粒与内表面碰撞的机会并提高表面质量。Gov 等<sup>[14]</sup>探讨了不同硬度的工具钢经电火花加工后再利用磨粒流进行精整加工,经几次循环研磨加工,所有工件的表面质量都有所提高并且硬质材料表面的改善程度要好于软质材料。Wan 等<sup>[15]</sup>研究了双向耦合磨粒流加工的数值模拟和模型的创建,利用非牛顿模型捕捉研磨介质的流动行为,利用壁面模型定义剪切速率,计算壁面与流体的相对运动,建立了描述壁面粗糙度的演化模型并进行了管类零件的试验。Pusavec 等<sup>[16]</sup>提出在磨粒流加工中增加一可移动芯轴的方法来提高抛光效率并可清洁零件表面,通过对注塑齿轮模具的磨粒流加工,齿轮的性能、能源利用率都有明显提高。Venkatesh 等对材料为 EN8 的锥齿轮进行了超声波辅助磨粒流精整加工,提出了一种适用于超声波辅助磨粒流加工锥齿轮的数值模拟方法,对加工过程中的速度、压力、温度值进行了计算并进行了试验验证<sup>[17,18]</sup>。Venkatesh 等<sup>[19]</sup>对超声波振动辅助磨粒流加工过程中研磨介质的行为进行了数值模拟,分析了工作流体中速度、温度分布及工作表面的壁面剪切力随压力的变化情况。通过数值模拟发现,研磨颗粒是以某一角度撞击壁面进行研磨加工。研究发现,作用力振幅的改变对壁面剪切力有重要影响,温度升高时不影响介质的稳定性。通过计算比较磨料对加工工件的壁面剪切力的作用效果,得出与传统的磨粒流加工相比,超声波辅助磨粒流加工通过产生垂直压力与速度的合力能够在很大程度上提高磨粒流的加工效果。Sushil 等<sup>[20]</sup>对碳化硅铝复合材料进行磨粒流加工试验研究,观察加工参数对材料去除率的影响、表面粗糙度及表面形貌的变化,通过最终试验分析得出挤压力是影响粗糙度的最主要因素。Singh 等<sup>[21]</sup>对磨粒流加工中的