

博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

# 高性能镁合金 挤压剪切制备技术

胡红军 著



科学出版社

# 高性能镁合金挤压剪切制备技术

胡红军 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书主要针对传统的镁合金挤压棒材(型材)强韧性差的问题,提出了一种新型的镁合金挤压(extrusion)和剪切(shear)(简称ES)方法。本书共10章。总结了作者近几年在镁合金ES制备技术方面的研究工作,系统研究了基于热模拟仪的镁合金挤压剪切实验和数值模拟;镁合金ES实验和数值模拟研究及微观组织演化;ES变形对镁合金的力学性能、织构演变、摩擦磨损和腐蚀行为的影响。

本书可供高等学校和科研院所材料科学与工程专业及冶金专业等相关领域的研究工作者、工程技术人员、教师和研究生的教学及科研参考,也可供从事镁合金研究和生产的科技工作者阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

高性能镁合金挤压剪切制备技术/胡红军著. —北京:科学出版社, 2016.4  
(博士后文库)

ISBN 978-7-03-047624-1

I. ①高… II. ①胡… III. ①镁合金-挤压-生产工艺 IV. ①TG146.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第048742号

责任编辑:贾超/责任校对:杜子昂 彭珍珍

责任印制:徐晓晨/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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年4月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2016年4月第一次印刷 印张:22 3/4

字数:430 000

定价:118.00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：（按姓氏笔画排序）

万国华 毛大立 王光谦 卢秉恒 付小兵 印遇龙

任南琪 刘 伟 权良柱 吴硕贤 张文栋 杨宝峰

周宪梁 胡 滨 赵 路 赵晓哲 钟登华 郭坤宇

贾国柱 傅伯杰 喻树迅

## 《博士后文库》序言

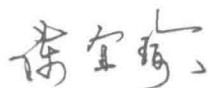
博士后制度已有一百多年的历史。世界上普遍认为，博士后研究经历不仅是博士们在取得博士学位后找到理想工作前的过渡阶段，而且也被看成是未来科学家职业生涯中必要的准备阶段。中国的博士后制度虽然起步晚，但已形成独具特色和相对独立、完善的人才培养和使用机制，成为造就高水平人才的重要途径，它已经并将继续为推进中国的科技教育事业和经济发展发挥越来越重要的作用。

中国博士后制度实施之初，国家就设立了博士后科学基金，专门资助博士后研究人员开展创新探索。与其他基金主要资助“项目”不同，博士后科学基金的资助目标是“人”，也就是通过评价博士后研究人员的创新能力给予基金资助。博士后科学基金针对博士后研究人员处于科研创新“黄金时期”的成长特点，通过竞争申请、独立使用基金，使博士后研究人员树立科研自信心，塑造独立科研人格。经过 30 年的发展，截至 2015 年底，博士后科学基金资助总额约 26.5 亿元人民币，资助博士后研究人员 5 万 3 千余人，约占博士后招收人数的 1/3。截至 2014 年底，在我国具有博士后经历的院士中，博士后科学基金资助获得者占 72.5%。博士后科学基金已成为激发博士后研究人员成才的一颗“金种子”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员取得了众多前沿的科研成果。将这些科研成果出版成书，既是对博士后研究人员创新能力的肯定，也可以激发在站博士后研究人员开展创新研究的热情，同时也可以使博士后科研成果在更广范围内传播，更好地为社会所利用，进一步提高博士后科学基金的资助效益。

中国博士后科学基金会从 2013 年起实施博士后优秀学术专著出版资助工作。经专家评审，评选出博士后优秀学术著作，中国博士后科学基金会资助出版费用。专著由科学出版社出版，统一命名为《博士后文库》。

资助出版工作是中国博士后科学基金会“十二五”期间进行基金资助改革的一项重要举措，虽然刚刚起步，但是我们对它寄予厚望。希望通过这项工作，使博士后研究人员的创新成果能够更好地服务于国家创新驱动发展战略，服务于创新型国家的建设，也希望更多的博士后研究人员借助这颗“金种子”迅速成长为国家需要的创新型、复合型、战略型人才。



中国博士后科学基金会理事长

## 前 言

镁合金具质轻、导热导电性好、阻尼减振、电磁屏蔽等优异性能，在交通、通信、电器和航空航天等领域有广阔的应用前景，被誉为 21 世纪资源与环境可持续发展的绿色材料，已成为世界各国普遍关注的焦点。发展高性能镁合金材料、提高镁合金的制备加工水平是实现我国从镁资源优势向经济优势转化的关键之举。

本书主要针对传统的镁合金挤压材的变形能力比较差和强韧性差，大变形技术（如 ECAP）又难以工业化推广，而且工艺复杂、成本高等常见问题，结合镁合金棒材（型材）的工业化制备和加工，提出了一种新型的镁合金复合挤压方法，就是将传统的挤压（extrusion）和大塑性变形方法等径角挤压（ECAE）相结合，也就是将压缩变径挤压（extrusion）和剪切（shear）（一次或者连续二次）结合起来（简称 ES），发展了一种低成本变形镁合金的挤压技术原型，对镁合金棒材进行晶粒细化及织构控制，找到一种提高镁合金塑性变形的途径，形成一些新型的镁合金复合成形理论。着重介绍了变形镁合金的塑性变形方法、镁合金挤压剪切新技术的提出及其基本原理、镁合金挤压与一次剪切的物理模拟实验和数值模型及微观组织观察、AZ31 和 AZ61 镁合金 ES 挤压实验和数值模型、组织结构演化及分析、连续二次剪切 ES 变形对镁合金的力学性能和耐磨性能及耐蚀性能的影响机制等内容。全书内容新颖、涉及面广，有些内容和技术研究属于前沿资料，是近年来笔者在镁合金领域研究成果的集成，笔者在撰写过程中力求做到深入浅出，通俗易懂。

感谢国家自然科学基金（51101176）、中国博士后科学基金（面上一等资助、特别资助）资助，重庆市前沿与基础研究项目（cstc2015jcyjBX0054 和 cstc2014jcyjA50004）、重庆市教委科研项目（KJ1500939）等科研项目的资助。

感谢涂铭旌院士、张丁非教授、欧忠文教授对本书撰写的指导，感谢多年来师弟师妹们（刘杰慧、张钧萍、耿青梅、沟引宁等）在研究过程中所提供的帮助。感谢硕士研究生翟志业、范俊枝、宿婷等对本书所涉及的实验研究的贡献。

由于镁合金制备成形加工技术发展迅速，涉及的内容与应用新颖、宽广，加上笔者学术、技术水平有限，疏漏之处恳请相关领域专家及读者批评指正，笔者将不胜感激。

胡红军

2015年8月于重庆



# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                    | 1  |
| 参考文献                        | 6  |
| 第 2 章 镁合金挤压剪切技术的提出          | 9  |
| 2.1 镁合金大塑性变形方法的国内外研究现状      | 9  |
| 2.2 镁合金挤压-剪切变形方法的提出         | 14 |
| 2.3 ES 工艺基本原理和理论模型          | 18 |
| 2.3.1 ES 变形金属的受力状态分析        | 18 |
| 2.3.2 ES 工艺挤压力模型            | 20 |
| 2.3.3 ES 工艺应变率及 $Z$ 参数模型    | 25 |
| 2.3.4 ES 工艺坯料温升模型           | 28 |
| 2.3.5 ES 工艺滑移场模型及应力状态       | 30 |
| 2.3.6 ES 工艺晶粒的转动和纯剪切变形模型    | 31 |
| 2.3.7 AZ31 材料模型             | 36 |
| 2.4 本章小结                    | 38 |
| 参考文献                        | 38 |
| 第 3 章 基于热模拟仪的镁合金挤压剪切实验和数值模拟 | 43 |
| 3.1 引言                      | 43 |
| 3.2 基于热模拟设备的挤压剪切实验          | 43 |
| 3.2.1 实验方案及装置               | 43 |
| 3.2.2 实验方法及材料               | 46 |
| 3.2.3 ES 挤压变形行为数值模型研究方法     | 47 |
| 3.3 ES 工艺物理和数值模拟结果与分析       | 49 |
| 3.3.1 ES 变形过程挤压力变化分析        | 49 |
| 3.3.2 ES 热模拟应力-应变曲线         | 52 |
| 3.3.3 微观组织和数值模拟分析           | 54 |
| 3.3.4 变形温度对双级动态再结晶的影响       | 67 |
| 3.3.5 挤压速率对双级动态再结晶的影响       | 71 |
| 3.4 ES 变形中物理场演变分析及变形的均匀性    | 74 |
| 3.5 基于热模拟的 ES 挤压双级动态再结晶机制   | 77 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 3.6 本章小结                            | 78         |
| 参考文献                                | 79         |
| <b>第4章 AZ31 镁合金的挤压剪切工艺实验及数值模拟研究</b> | <b>82</b>  |
| 4.1 引言                              | 82         |
| 4.2 连续二次剪切 ES 挤压过程分析                | 82         |
| 4.3 二次剪切的 ES 组合凹模的设计与制造及挤压工艺        | 83         |
| 4.4 ES 挤压过程的有限元分析                   | 86         |
| 4.4.1 ES 挤压有限元模型                    | 87         |
| 4.4.2 ES 锥模挤压过程流动网格变化               | 88         |
| 4.4.3 ES 平模挤压过程金属流动与分区              | 89         |
| 4.4.4 ES 挤压过程的均匀性研究                 | 90         |
| 4.5 AZ31 镁合金 ES 挤压中试生产与工艺分析         | 92         |
| 4.5.1 模具设计与制造                       | 92         |
| 4.5.2 ES 挤压和普通挤压的比较                 | 95         |
| 4.6 ES 挤压极限图的建立                     | 100        |
| 4.7 AZ31 镁合金挤压剪切过程有限元模拟预测           | 106        |
| 4.7.1 挤压力演化                         | 106        |
| 4.7.2 等效应变演变                        | 111        |
| 4.7.3 挤压速度场                         | 114        |
| 4.7.4 挤压过程温度场的变化                    | 117        |
| 4.8 本章小结                            | 120        |
| 参考文献                                | 122        |
| <b>第5章 AZ31 镁合金挤压剪切过程中微观组织演化</b>    | <b>124</b> |
| 5.1 引言                              | 124        |
| 5.2 实验材料及方法                         | 124        |
| 5.3 ES 挤压过程微观组织演化与计算机模拟分析           | 125        |
| 5.3.1 动态再结晶理论计算                     | 125        |
| 5.3.2 挤压比为 32.1 的 ES 变形微观组织         | 129        |
| 5.3.3 挤压比为 18 的 ES 变形微观组织           | 141        |
| 5.4 ES 挤压中试生产的微观组织演化与分析             | 146        |
| 5.4.1 ES 挤压过程动态再结晶的理论分析             | 146        |
| 5.4.2 挤压温度 370℃ 对普通挤压和 ES 挤压微观组织的影响 | 149        |
| 5.4.3 挤压温度 400℃ 对普通挤压和 ES 挤压微观组织的影响 | 155        |
| 5.4.4 挤压温度 420℃ 对普通挤压和 ES 挤压微观组织的影响 | 158        |
| 5.5 ES 变形过程中动态再结晶机制                 | 163        |

|                                              |            |
|----------------------------------------------|------------|
| 5.6 ES 挤压对 AZ31 第二相演化的影响 .....               | 167        |
| 5.7 本章小结 .....                               | 170        |
| 参考文献 .....                                   | 171        |
| <b>第 6 章 ES 变形对 AZ31 镁合金的力学性能的影响 .....</b>   | <b>174</b> |
| 6.1 引言 .....                                 | 174        |
| 6.2 室温显微硬度测试 .....                           | 174        |
| 6.2.1 显微硬度测试方法及设备 .....                      | 174        |
| 6.2.2 ES 挤压棒的室温硬度测试结果与分析 .....               | 174        |
| 6.3 压缩性能分析 .....                             | 179        |
| 6.4 拉伸性能分析 .....                             | 180        |
| 6.5 拉压不对称性 .....                             | 181        |
| 6.6 本章小结 .....                               | 182        |
| 参考文献 .....                                   | 182        |
| <b>第 7 章 AZ31 镁合金挤压剪切过程织构演变研究 .....</b>      | <b>184</b> |
| 7.1 ES 变形过程晶粒取向研究 .....                      | 184        |
| 7.2 X 射线衍射实验结果分析 .....                       | 186        |
| 7.3 ES 挤压背散射电子衍射织构演变 .....                   | 188        |
| 7.4 本章小结 .....                               | 197        |
| 参考文献 .....                                   | 198        |
| <b>第 8 章 挤压剪切对 AZ61 镁合金的微观组织和性能的影响 .....</b> | <b>202</b> |
| 8.1 实验方案与方法 .....                            | 202        |
| 8.2 AZ61 镁合金 ES 过程物理场模拟 .....                | 204        |
| 8.3 微观组织观察 .....                             | 209        |
| 8.4 挤压-剪切与普通挤压对 AZ61 镁合金塑性变形的影响 .....        | 211        |
| 8.5 挤压温度对镁合金挤压剪切的影响 .....                    | 214        |
| 8.6 模具转角对镁合金挤压剪切过程物理场的影响 .....               | 216        |
| 8.7 AZ61 镁合金挤压剪切过程微观组织和力学性能 .....            | 222        |
| 8.7.1 微观组织形貌 .....                           | 222        |
| 8.7.2 硬度测试 .....                             | 224        |
| 8.8 本章小结 .....                               | 226        |
| 参考文献 .....                                   | 226        |
| <b>第 9 章 挤压剪切变形镁合金的摩擦磨损行为及机理研究 .....</b>     | <b>230</b> |
| 9.1 镁合金摩擦磨损研究现状 .....                        | 232        |
| 9.1.1 摩擦与磨损 .....                            | 232        |
| 9.1.2 镁合金摩擦磨损研究现状 .....                      | 233        |

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| 9.2 实验材料与实验方法 .....                       | 237        |
| 9.2.1 实验材料 .....                          | 237        |
| 9.2.2 实验设备 .....                          | 237        |
| 9.2.3 实验方法 .....                          | 238        |
| 9.2.4 往复干滑动摩擦过程有限元模拟 .....                | 241        |
| 9.3 挤压-剪切 AZ31 和 AZ61 镁合金的微观组织及性能 .....   | 243        |
| 9.3.1 正挤压和 ES 挤压变形后微观组织 .....             | 243        |
| 9.3.2 不同 ES 变形温度下镁合金的微观组织 .....           | 244        |
| 9.3.3 不同 ES 挤压变形条件下 AZ61 镁合金的显微组织 .....   | 246        |
| 9.3.4 不同条件下 AZ31 和 AZ61 变形镁合金的显微硬度 .....  | 249        |
| 9.4 挤压-剪切镁合金的摩擦磨损行为及微观机制研究 .....          | 251        |
| 9.4.1 正挤压和 ES 挤压对 AZ31 镁合金摩擦磨损行为的影响 ..... | 251        |
| 9.4.2 不同挤压温度下 ES 变形制备镁合金的摩擦磨损行为 .....     | 260        |
| 9.4.3 不同模具转角下 ES 变形镁合金的摩擦磨损性能 .....       | 266        |
| 9.4.4 铸态和均匀化坯料经 ES 变形后摩擦磨损行为 .....        | 273        |
| 9.5 基于有限元数值模拟的变形镁合金磨损机制研究 .....           | 279        |
| 9.5.1 ES 挤压和正挤压镁合金的模拟结果与分析 .....          | 279        |
| 9.5.2 相同压力, 不同摩擦频率下往复摩擦过程数值模拟 .....       | 281        |
| 9.5.3 相同摩擦频率, 不同载荷下往复摩擦过程数值模拟 .....       | 282        |
| 9.6 本章小结 .....                            | 284        |
| 参考文献 .....                                | 284        |
| <b>第 10 章 挤压剪切镁合金的腐蚀行为及机理研究 .....</b>     | <b>288</b> |
| 10.1 镁及镁合金的腐蚀与防护技术 .....                  | 289        |
| 10.1.1 镁合金的腐蚀类型 .....                     | 289        |
| 10.1.2 提高镁合金耐蚀性的途径 .....                  | 289        |
| 10.1.3 镁合金的表面处理技术 .....                   | 290        |
| 10.1.4 镁合金在 NaCl 溶液中的腐蚀行为研究 .....         | 292        |
| 10.2 挤压剪切变形和普通挤压对 AZ61 镁合金的耐蚀性能研究 .....   | 292        |
| 10.2.1 实验材料及设备 .....                      | 292        |
| 10.2.2 性能表征方法 .....                       | 293        |
| 10.2.3 结果与讨论 .....                        | 295        |
| 10.3 均匀化处理对挤压剪切 AZ61 镁合金腐蚀性能的影响 .....     | 311        |
| 10.3.1 浸蚀时间对两种镁合金腐蚀行为的影响 .....            | 311        |
| 10.3.2 浸蚀时间对两种镁合金腐蚀速率的影响 .....            | 311        |
| 10.3.3 浸蚀时间对两种镁合金腐蚀形貌的影响 .....            | 313        |

---

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 10.3.4 浸蚀时间对两种镁合金腐蚀产物成分的影响 .....         | 318 |
| 10.3.5 浸蚀不同时间两种镁合金的电化学阻抗谱分析 .....        | 320 |
| 10.3.6 $\text{Cl}^-$ 浓度对两种镁合金腐蚀的影响 ..... | 322 |
| 10.3.7 不同 pH 对两种镁合金耐蚀性能的影响 .....         | 326 |
| 10.4 坯料预热温度对 AZ61 镁合金腐蚀性能的影响 .....       | 331 |
| 10.4.1 腐蚀形貌及产物分析 .....                   | 331 |
| 10.4.2 极化曲线 .....                        | 336 |
| 10.4.3 浸泡过程中腐蚀速率变化 .....                 | 337 |
| 10.4.4 交流阻抗 .....                        | 338 |
| 10.5 ES 模具转角对制备的 AZ61 镁合金耐腐蚀性能的影响 .....  | 340 |
| 10.5.1 腐蚀形貌及产物分析 .....                   | 340 |
| 10.5.2 极化曲线 .....                        | 343 |
| 10.6 本章小结 .....                          | 345 |
| 参考文献 .....                               | 346 |
| 编后记 .....                                | 349 |

# 第1章 绪 论

镁合金具有比刚度高、导热性好、比强度大、导电性好、抗动态冲击载荷能力较强、资源丰富、密度小等诸多优点，是目前工程应用中最轻的金属结构材料，当前被誉为“绿色的工程材料”、“用之不竭的轻质材料”、“21 世纪绿色工程金属”，目前镁合金产品主要是压铸件，而不是塑性变形件<sup>[1-3]</sup>。

在当前节能环保的发展要求下，资源丰富、能耗低且可回收再利用的金属结构材料更具发展潜能。镁主要以化合物的形式存在于诸如菱镁矿、白云石、光卤石等矿物以及海水中，在地壳中的储量非常丰富，占地壳矿藏的 2.4%；同时，镁及镁合金在金属材料中密度很小（大约为钢的 1/4，铝的 2/3），且铸造性很好，阻尼减震和电磁屏蔽性好；此外，镁的熔化潜热较低，镁合金也易于回收，这在能源和环保问题突出的今天无疑又是一大优势。镁合金的铸造性能较好，但铸件易产生严重的显微缩孔、缩松、氧化、夹杂等组织缺陷<sup>[4-6]</sup>。

镁合金作为密度最低的金属结构材料，在以汽车为主的交通工具中的应用具有重要的发展前景。一方面，我国汽车数量的快速增长加剧了我国石油资源的短缺，另一方面，在大气污染中汽车尾气占 30%~60%，已成为全球的重要污染源。因此，以降低油耗和尾气排放为目标的汽车减重已成为我国节能环保的重要任务。已有试验表明：汽车质量每下降 10%，油耗可降低 6%~8%，燃油效率可提高 5.5%。但目前镁合金在汽车、摩托车及轨道交通等中的应用还主要在非承力的壳（箱）体件上，而一些新研发的合金由于加入了较贵的合金元素以及加工成本高等问题还无法满足交通工业上的规模化应用，所以，研究低成本、高性能镁合金材料及产品，促进镁合金在交通工具中的应用，对于降低石油（能源）消耗和尾气排放都具有十分重要的意义。镁合金材料在军事装备中的应用优势未得到充分发挥，所以新型高性能镁合金材料在国防军工领域具有十分广阔的应用前景<sup>[7-10]</sup>。

镁合金材料除了拥有良好的质感和较高的强度外，还具有质轻、减振和电磁屏蔽等优异性能，目前已成为高端 3C 电子产品（计算机、通信、消费电子产品）的首选结构材料，可显著提升 3C 产品的生产技术和使用水平，并降低电磁污染对健康的危害<sup>[11-14]</sup>。

由于镁是密排六方（hexagonal）晶体结构， $c/a$  轴比为 1.623，常温下能够开动的滑移系少，因而延展性低、塑性差、成形困难、成材率低，制约了高性能变

形镁合金产业的发展<sup>[15-16]</sup>。因此有必要对高性能镁合金材料制备及成形的这一科学技术问题进行深入研究,探索提高镁合金室温强韧性和成形性能的新途径和新技术,为推动高性能镁合金产业的快速发展提供技术支撑,满足国民经济和国防军工发展的需求。为此,必须深入系统地开展具有高使役性能和高加工性能的镁合金新材料的研究开发,大力发展低成本的镁合金凝固成形和塑性加工新技术,进一步降低镁合金特别是变形镁合金的生产成本,完善腐蚀与表面防护等相关技术,才能从根本上突破降低镁合金生产和应用成本的瓶颈,推动镁合金产品的大规模生产与应用,实现从镁资源优势向经济优势的转变<sup>[17-22]</sup>。

综上所述,我国汽车工业和相关工业的飞速发展,对高性能镁合金材料提出了重大的需求,因此,要探索提高镁合金强韧性、塑性成形性能和耐磨耐腐蚀性能的新途径,为推动镁合金产业的快速发展提供技术支撑,以满足国民经济和国防军工发展的需求。当前制约镁合金产业发展及阻碍镁合金广泛应用的主要技术问题有以下几方面<sup>[23-26]</sup>。

### (1) 镁合金热物性特点,制约了高性能铸造镁合金的发展

镁合金固-液相变体积变化大、热强度低、凝固潜热和热容量小,导致镁合金液态充型能力弱、凝固缩孔疏松和热裂倾向大,且得到的铸造镁合金强度通常小于 250MPa,延伸率低于 2%。深入研究镁合金的凝固特性和液态成形性能,发展新型液态成形技术,是进一步拓展铸造镁合金应用领域的关键。

### (2) 镁合金室温塑性差,变形加工困难

由于镁合金具有六方晶体结构的特点,其在室温变形条件下独立的滑移系少,导致室温塑性低,变形加工困难。因此,需要系统认识热-力耦合条件下镁合金塑性变形机制及微观组织演变规律,建立组织结构及织构的形成和演变的物理与数学模型,通过工艺优化实现对镁合金组织结构的控制,为提高镁合金塑性加工能力开发新的工艺技术提供技术支撑。

### (3) 缺乏有效的强化途径,限制了镁合金强度的大幅度提高

目前,镁合金还缺乏有效的强化途径,导致镁合金强度偏低,高温性能差,限制了镁合金在汽车、飞机等中关键结构部件和耐热零部件方面的应用。目前,应用于汽车的镁合金只限于变速箱、方向盘等非结构件。因此,提高镁合金的室温和高温强度需要从本质上认识镁合金的强化机理,认识溶质原子在镁合金中的扩散与偏聚行为和高温固溶强化规律,揭示析出第二相的晶体结构、析出行为、热-机械稳定性及其对镁合金本构关系和蠕变行为的影响规律;通过多元合金化、晶界和析出第二相的设计与控制等多种手段,探寻提高镁合金常温和高温强韧性的途径,为提高镁合金常温和高温性能提供理论指导。

镁合金不像铝合金那样主要以挤压材和板材的形式获得应用。晶粒细化及织构控制是改善、提高镁合金材料性能的有效途径之一。通过细化晶粒可以提高材

料的强度,还可以改善其塑性和韧性。晶粒细化对镁合金室温塑性的提高主要表现在:①使位错滑移路程缩短、变形分散均匀;②使晶粒转动和晶界移动变得更容易,晶粒转动对滑移变形的影响实质就是连续地产生硬化和软化,使晶粒变形得到协调均匀;③可以激活镁合金中棱柱面和锥面等潜在非基面滑移系<sup>[27]</sup>。镁合金材料在获得超细晶结构后,其力学和物理性能得到显著提高,超细晶镁合金材料具有一些特殊的性能。采用传统的锻造、挤压、轧制等塑性成形工艺以及随后的退火处理工艺后,晶粒尺寸可达  $10\mu\text{m}$  并可能形成变形组织(或再结晶组织),难以满足对高性能材料的要求。常用的铝合金、铁合金的加工产品都可通过固溶、时效等热处理手段来改善强度和塑性,AZ31 镁合金中加入的合金元素量很少,而且在常温下基本都是以固溶形式存在,形成的  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  第二相的量很少,不能进行热处理强化,因此对于 AZ31 镁合金,要获得理想的组织性能只能通过塑性变形来得到<sup>[26]</sup>。晶粒细化对镁合金屈服强度与塑性改善具有巨大作用与潜力,如 Hall-Petch 公式<sup>[28-32]</sup>:

$$\sigma = \sigma_0 + K_y d^{-\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

材料的晶粒尺寸对韧性(或脆性)转变温度影响的关系见式(1.2),细晶粒材料脆性转变温度低,这对于镁合金意义很大,如晶粒尺寸为  $60\mu\text{m}$  的纯镁的脆性转变温度(ductile-brittle transition, DBT)为  $250^\circ\text{C}$ ,而  $2\mu\text{m}$  脆性转变温度为室温,超细镁成形性能可以大幅度提高,在室温下可以塑性成形加工,而不会出现开裂<sup>[33, 34]</sup>。

$$T_{sv} = a + a' \Delta\sigma_x - bd^{-\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

式中,  $T_{sv}$  为材料韧性/脆性转变温度;  $\Delta\sigma_x$  为由于析出硬化相使内摩擦应力升高的部分;  $a$ 、 $a'$ 、 $b$  为常量;  $d$  为平均晶粒直径。

另外一种是通过镁合金塑性变形来细化晶粒<sup>[33]</sup>,塑性变形中通过温度、应变、应变率等工艺参数的配合,利用动态或静态再结晶来控制晶粒尺寸。研究表明大塑性变形可以成功制备超细金属材料,Mabuchi、Kubota 等认为镁合金的晶粒度随 Zener-Hollomon 参数的增大而减小<sup>[13]</sup>,见式(1.3):

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1.3)$$

式中,  $\dot{\varepsilon}$  为挤压速率;  $Q$  为镁的晶格扩散激活能 ( $135\text{kJ/mol}$ );  $R$  为摩尔气体常量;  $T$  为挤压温度。式(1.3)对镁合金的晶粒细化起到了指导作用,理论上可采用如下方法:①增大应变率或应力;②降低变形温度(在动态再结晶温度以上)。Hiroyuki 等<sup>[14]</sup>还推出了晶粒尺寸公式:

$$\left(\frac{d}{d_0}\right)^n = 10^{-3} \times Z^{\frac{1}{3}} \quad (1.4)$$



相对于具有面心立方结构的铝合金而言,密排六方结构的镁合金的塑性较差。具有面心立方结构的铝或铝合金有 12 个几何滑移系和 5 个独立滑移系,在塑性变形时,它们可协调变形而使塑性变形容易;而镁及其合金有 5 个滑移系,常温变形时滑移系不易开动而使其塑性变形性能差<sup>[8]</sup>。通常塑性变形发生在原子排列最密的面和原子排列最密的方向。镁合金在 200℃ 以下发生塑性变形时,塑性变形主要为 $\{0001\} \langle 11\bar{1}2 \rangle$  基面滑移和 $\{10\bar{1}2\} \langle 10\bar{1}1 \rangle$  锥面孪生。温度高于 200℃ 时, $\{10\bar{1}1\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$  滑移系开动。高温时由于 $\{10\bar{1}1\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$  滑移系参与变形,镁合金的塑性增加<sup>[10]</sup>。由于镁合金晶体轴比  $c/a$  值变化引起原子密排变化,在镁中加入 Li 等元素可降低轴比,从而激活了 $\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$  棱柱滑移系而提高镁合金的低温塑性。因而提高变形温度和加入适当的合金元素均可提高镁合金的塑性<sup>[34]</sup>。

细晶强化可同时提高镁合金的强度和塑性,因此它是改善镁合金综合力学性能的最佳方式<sup>[13]</sup>。细化晶粒有利于抑制裂纹的萌生以及释放应力集中,当晶粒细化到一定程度后,在室温拉伸时镁合金表现出超塑性<sup>[14]</sup>。细晶强化是改善镁合金力学性能的最佳途径<sup>[35]</sup>。

常规镁材制备工艺(正挤压、轧制)形成的强烈的基面织构严重制约了镁材综合性能的提高,因此开发镁材成形制备新技术,是促进变形镁合金持续发展的重要举措,因为 AZ31 镁合金既不可能靠热处理强化亦不能靠应变强化(AZ31 镁合金中加入的合金元素量小,在常温下基本都是以固溶形式存在,形成  $Mg_{17}Al_{12}$  第二相的量又非常少,因此该合金不能进行热处理强化),所以细晶强化是提高 AZ31 镁合金强度的唯一有效方法<sup>[36-40]</sup>。

20 世纪 90 年代以来,伴随着对高性能镁合金需求量的增长,各种新型镁合金加工方法引起国内外材料界的高度重视,变形镁合金应用的推广需要发展新的镁合金加工技术和方法,研究各种温度及复杂应力-应变条件下的微观组织结构演变规律对于新的加工技术和方法的开发具有重要的技术指导意义<sup>[41-45]</sup>。由此可见,目前应用挤压技术大规模制备变形镁合金急需解决如下问题。

#### (1) 成形方法问题

镁合金变形能力比较差,需要提出有效的镁合金塑性变形的新技术。常规棒材(型材)制备工艺(挤压、轧制)会形成强烈的基面织构,严重制约了镁合金棒材力学性能的提高。

#### (2) 塑性变形理论问题

针对镁合金材料存在强韧性差等基本科学问题,可以通过对镁合金塑性成形基础理论的研究,发展变形镁合金加工制备的基本理论,研究镁合金塑性变形机制和组织及性能,形成新型的塑性成形加工技术的基础理论体系,指导变形镁合金的工业生产,并提高镁合金的产品质量。