

# 直齿轮

## “渗碳—温挤” 成形技术

冯再新 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

**图书在版编目(CIP)数据**

直齿轮“渗碳—温挤”成形技术 / 冯再新著. —北京:  
国防工业出版社, 2008. 6

ISBN 978 - 7 - 118 - 05761 - 4

I. 直... II. 冯... III. ①齿轮—渗碳②齿轮—温挤  
IV. TG61 TG376

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 074592 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 100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850 × 1168 1/32 印张 5 1/4 字数 150 千字

2008 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 16.00 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

# 前 言

齿轮广泛用于各种机械设备和仪器仪表中,是机器的基础件,其质量、性能、寿命直接影响整机的技术、经济指标,对研究齿轮加工方法,提高产品性能,具有重要意义。

齿轮发展以硬齿面齿轮为主要趋势。实现齿轮硬齿面的工艺主要有渗碳、氮化、碳氮共渗、表面淬火(包括感应和火焰淬火)等热处理方法。渗碳淬火方法得到的齿轮与其他处理方法相比,具有更高的使用性能。目前,这种硬齿面齿轮采用低碳高合金钢锻件,切削加工后进行渗碳淬火的方式生产,存在齿面、齿顶及齿根的渗碳层浓度、梯度、厚度大致相同,不能满足齿面与齿根因工作特性不同对渗碳层厚度的不同要求;渗碳后金属晶粒粗大,表面出现网状渗碳体,降低齿面的性能;后续的热处理要兼顾轮齿心部和轮齿表面的性能要求导致后续的热处理工艺比较复杂等问题。

齿轮加工如采用坯料渗碳处理后,再进行温挤压成形,即“渗碳—温挤”方法可通过塑性变形使齿轮渗碳层碳化物细小、网状渗碳体得以消除,渗碳层组织得到改进,热处理工艺相应简化,同时渗碳层在塑性变形中有规律地成为齿型的外表层,达到理想渗碳层分布的目的。

目前关于这种新工艺过程分析及其解决方案没有系统论述,本书对直齿轮采用“渗碳—温挤”技术生产齿轮的相关方面进行系统介绍、论述,包括问题的提出、新技术碰到的渗碳层合理分布、渗碳材料的性能、所需要的直齿轮精密成形技术、渗碳

层合理分布控制及性能测试等方面内容。

撰写过程中得到中国机械工程学会塑性工程(锻压)学会理事长、北京航空航天大学周贤宾教授、中北大学张治民教授的审阅和修改;同时,得到所在中北大学材料科学与工程学院领导和同仁们的大力帮助和支持,在此一并表示感谢。

本书可供从事齿轮生产技术人员参考。

本书主要是对新技术进行探讨,限于自己学识、水平,书中会有不少疏误不当之处,希望读者提出宝贵意见。

冯再新  
2008 年 4 月

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....                      | 1  |
| 1.1 引言 .....                      | 1  |
| 1.2 齿轮制造技术国内外研究现状及发展趋势 .....      | 2  |
| 1.2.1 硬齿面齿轮是齿轮传动发展的主要趋势 .....     | 2  |
| 1.2.2 渗碳淬火处理是硬齿面齿轮加工的主要方法 .....   | 3  |
| 1.2.3 我国齿轮制造技术亟待改进 .....          | 4  |
| 1.3 齿轮温精密塑性成形技术是齿轮制造技术的发展方向 ..... | 5  |
| 1.3.1 齿轮精密塑性成形是齿轮制造工艺发展方向之一 ..... | 5  |
| 1.3.2 国内外齿轮精密塑性成形发展状况 .....       | 6  |
| 1.3.3 温挤压工艺是齿轮精密成形有前途的工艺方法 .....  | 9  |
| 1.4 “渗碳—温挤”技术是硬齿面齿轮制造的有效途径 .....  | 11 |
| 1.4.1 硬齿面齿轮生产方式及存在的问题 .....       | 11 |
| 1.4.2 提高硬齿面齿轮性能的技术途径 .....        | 12 |
| 1.5 齿轮“渗碳—温挤”成形的关键技术及其研究状况 .....  | 13 |
| 1.5.1 齿轮“渗碳—温挤”成形研究的现状 .....      | 13 |
| 1.5.2 直齿轮“渗碳—温挤”成形的关键技术 .....     | 14 |
| 1.5.3 齿轮“渗碳—温挤”关键技术的研究状况 .....    | 15 |

|            |                               |           |
|------------|-------------------------------|-----------|
| 1.6        | 直齿轮“渗碳—温挤”成形技术意义              | 19        |
| 1.7        | 本书主要内容                        | 20        |
| <b>第二章</b> | <b>齿轮渗碳层深度分布模型建立</b>          | <b>22</b> |
| 2.1        | 引言                            | 22        |
| 2.2        | 齿轮失效概述                        | 23        |
| 2.2.1      | 齿轮失效类型                        | 23        |
| 2.2.2      | 齿轮失效主要形式                      | 28        |
| 2.3        | 硬齿面齿轮接触疲劳失效分析                 | 29        |
| 2.3.1      | 齿轮渗碳、渗碳层深度、有效硬化层深度<br>的概念     | 29        |
| 2.3.2      | 齿轮啮合时接触区域的应力分析                | 30        |
| 2.3.3      | 硬齿面齿轮接触疲劳失效的力学条件              | 32        |
| 2.4        | 硬化层深度的确定                      | 35        |
| 2.4.1      | 齿面接触疲劳强度决定的有效硬化层深度            | 37        |
| 2.4.2      | 齿根弯曲疲劳强度决定的有效硬化层深度            | 39        |
| 2.5        | 渗碳层分布模型                       | 41        |
| 2.6        | 小结                            | 44        |
| <b>第三章</b> | <b>渗碳 20CrMnTi 温变形规律及数学模型</b> | <b>45</b> |
| 3.1        | 引言                            | 45        |
| 3.2        | 实验方案                          | 45        |
| 3.3        | 实验及结果                         | 49        |
| 3.4        | 实验数据处理                        | 53        |
| 3.4.1      | 摩擦系数                          | 53        |
| 3.4.2      | 等效应力与等效应变                     | 55        |
| 3.5        | 渗碳 20CrMnTi 温变形力学特性           | 61        |
| 3.5.1      | 应变对流变应力的影响                    | 61        |
| 3.5.2      | 温度对流变应力的影响                    | 62        |
| 3.5.3      | 含碳量对流变应力的影响                   | 64        |

|            |                                     |           |
|------------|-------------------------------------|-----------|
| 3.5.4      | 应变速率对流变应力的影响 .....                  | 65        |
| 3.6        | 渗碳 20CrMnTi 温变形力学模型及流变方程 .....      | 65        |
| 3.6.1      | 渗碳 20CrMnTi 温变形力学模型 .....           | 65        |
| 3.6.2      | 渗碳 20CrMnTi 温变形流变方程 .....           | 67        |
| 3.7        | 小结 .....                            | 71        |
| <b>第四章</b> | <b>直齿轮精密成形技术 .....</b>              | <b>73</b> |
| 4.1        | 引言 .....                            | 73        |
| 4.2        | 直齿轮精密塑性成形技术分析 .....                 | 73        |
| 4.2.1      | 凹模浮动法 .....                         | 74        |
| 4.2.2      | 径向分流法 .....                         | 75        |
| 4.3        | 直齿圆柱齿轮切向分流成形技术 .....                | 77        |
| 4.3.1      | 直齿圆柱齿轮切向分流成形原理 .....                | 77        |
| 4.3.2      | 直齿圆柱齿轮切向分流成形技术特点 .....              | 79        |
| 4.3.3      | 直齿圆柱齿轮切向分流成形工艺参数 .....              | 80        |
| 4.4        | 齿轮成形精度控制研究 .....                    | 82        |
| 4.4.1      | 冷整形量确定的意义 .....                     | 82        |
| 4.4.2      | 冷整形量的计算 .....                       | 84        |
| 4.4.3      | 齿轮单侧冷整形量 .....                      | 86        |
| 4.4.4      | 齿轮精整坯件基本参数 .....                    | 87        |
| 4.4.5      | 实验验证 .....                          | 88        |
| 4.5        | 小结 .....                            | 90        |
| <b>第五章</b> | <b>齿轮渗碳层流动数值模拟 .....</b>            | <b>91</b> |
| 5.1        | 引言 .....                            | 91        |
| 5.2        | 直齿轮“渗碳—温挤”切向分流成形渗碳层流动<br>过程分析 ..... | 92        |
| 5.2.1      | 渗碳层流动过程分析 .....                     | 92        |
| 5.2.2      | 影响渗碳层流动的主要因素 .....                  | 93        |
| 5.3        | 数值模拟方案 .....                        | 94        |

|            |                                   |            |
|------------|-----------------------------------|------------|
| 5.3.1      | 基本假设 .....                        | 94         |
| 5.3.2      | 模拟软件 .....                        | 94         |
| 5.3.3      | 模拟模型 .....                        | 96         |
| 5.4        | 预成形时渗碳层流动数值模拟 .....               | 97         |
| 5.4.1      | 模具参数 .....                        | 97         |
| 5.4.2      | 模拟结果 .....                        | 98         |
| 5.4.3      | 模拟结果分析 .....                      | 102        |
| 5.5        | 终成形凹模圆角半径及成形温度对渗碳层分布<br>的影响 ..... | 104        |
| 5.5.1      | 模具参数、成形温度 .....                   | 104        |
| 5.5.2      | 模拟结果 .....                        | 104        |
| 5.5.3      | 模拟结果分析 .....                      | 106        |
| 5.6        | 小结 .....                          | 107        |
| <b>第六章</b> | <b>直齿轮“渗碳—温挤”渗碳层流动模拟试验 .....</b>  | <b>109</b> |
| 6.1        | 引言 .....                          | 109        |
| 6.2        | 实验方案及实验条件 .....                   | 109        |
| 6.2.1      | 实验方案 .....                        | 109        |
| 6.2.2      | 实验条件 .....                        | 110        |
| 6.3        | 实验过程 .....                        | 113        |
| 6.3.1      | 挤压过程 .....                        | 113        |
| 6.3.2      | 试样制取 .....                        | 113        |
| 6.4        | 实验结果 .....                        | 117        |
| 6.5        | 实验结果分析 .....                      | 120        |
| 6.6        | 小结 .....                          | 121        |
| <b>第七章</b> | <b>直齿轮“渗碳—温挤”工艺实验及组织性能 .....</b>  | <b>123</b> |
| 7.1        | 引言 .....                          | 123        |
| 7.2        | 实验及实验结果 .....                     | 123        |
| 7.2.1      | 实验目的 .....                        | 123        |

|            |                       |     |
|------------|-----------------------|-----|
| 7.2.2      | 实验材料 .....            | 124 |
| 7.2.3      | 实验用设备及仪器 .....        | 124 |
| 7.2.4      | 实验过程及结果 .....         | 125 |
| 7.3        | 实验结果讨论 .....          | 138 |
| 7.3.1      | 渗碳层分布与工艺的关系 .....     | 138 |
| 7.3.2      | “渗碳—挤压”对晶粒大小的影响 ..... | 139 |
| 7.4        | 小结 .....              | 144 |
| 结语 .....   |                       | 145 |
| 1.         | 结论 .....              | 145 |
| 2.         | 展望 .....              | 147 |
| 参考文献 ..... |                       | 148 |

# 第一章 绪 论

## 1.1 引言

齿轮传动具有功率输出恒定、承载能力大、传动效率高、使用寿命长、可靠性高、结构紧凑等优点,广泛用于各种机械设备和仪器仪表中,是机械传动的基础零件,其质量、性能、寿命直接影响整机的技术、经济指标。而齿轮制造技术水平是获得优质齿轮的关键。因为齿轮形状复杂、技术问题多,制造难度大,齿轮加工水平在某一程度上反映了一个国家机械工业制造的水平。因此,齿轮加工的研究是各国加工制造业研究的一个热点。

齿轮产品种类较多,按大类来分,主要有圆柱齿轮、锥齿轮、蜗轮蜗杆齿轮与行星传动齿轮等四大类。其中,圆柱齿轮在机械设备中应用最为广泛,各种通用与专用的齿轮减速器以及机床、车辆、农机等大量采用,约占齿轮产品总量的90%左右。因此,齿轮制造技术的研究主要集中在圆柱齿轮的成形及其热处理方面。

近年来,随着汽车工业的发展,特别是轿车生产对变速器齿轮的精度及力学性能的要求愈来愈高,齿轮正朝着高精度、低噪声、高承载、高速度、轻量化及长寿命的方向发展。其中,采用硬齿面齿轮是提高齿轮强度及承载能力的有效途径。

目前,硬齿面圆柱齿轮普遍采用“机械加工—渗碳—热处理—精加工”的传统工艺,材料利用率不高,生产效率低,产品成本高,尤其是金属流线被切断,而且成形后渗碳处理使渗碳层晶粒粗大,渗碳层厚度分布不合理,造成齿轮强度与疲劳寿命的降低。这种不利局面使得工程技术人员寻求新的制造工艺。齿轮“渗

碳—温挤”技术是近年来最具代表性的一种齿轮加工新方法,将坯料先做渗碳处理,再温精密塑性成形为齿轮,属于少无切削塑性加工方法,具有材料利用率高、生产率高的优点。

齿轮“渗碳—温挤”后齿型精度即能达到设计要求,不需再切削加工,金属流线得以连续分布,而且通过塑性变形,齿面渗碳层组织得到改善,渗碳层厚度重新分布,性能得以提高。齿轮采用“渗碳—温挤”技术符合时代发展的要求,是齿轮制造技术发展的一个方向。

硬齿面圆柱齿轮采用“渗碳—温挤”技术,为提高齿轮的制造水平、改善齿轮质量提供了一种全新的生产方式,同时为其他类似传动件如花键轴、链轮等零件的生产提供了新的思路。

## 1.2 齿轮制造技术国内外研究现状及发展趋势

### 1.2.1 硬齿面齿轮是齿轮传动发展的主要趋势

随着市场对产品质量、成本、环境等方面要求的提高,齿轮向着优质、高效、轻量化的方向发展。自20世纪80年代开始,世界工业发达国家先后投入数以亿计的资金,发展高性能的齿轮<sup>[1~3]</sup>。理论和实践都已证明,与软齿面、中硬齿面齿轮相比,硬齿面齿轮的承载能力成倍地增加,表面硬化齿轮比调质齿轮抗点蚀能力提高2.5倍,抗弯曲能力提高1.5倍,抗胶合能力提高1.6倍,抗磨损能力在齿轮切线速度0.3m/s时提高2.3倍<sup>[4]</sup>,在防止齿轮过早损伤的各种措施中,齿面硬度的重要性越来越大。而且硬齿面齿轮传动装置的箱体(机体)尺寸大大减小,噪声大幅度降低。例如日本,从20世纪60年代末期到70年代末期,齿轮装置的噪声就已由80dB降至60dB,现在的指标已经远远低于这个数值,而齿轮寿命由9000h增长到30000余小时<sup>[5]</sup>。

鉴于硬齿面齿轮的优异性能,在世界发达国家硬齿面齿轮减速器已成为主导产品,而软齿面减速器则逐渐被淘汰。如美国,其

汽车、拖拉机等所用齿轮几乎全部采用硬齿面齿轮,航空设备更是全部采用硬齿面齿轮;国内引进或购买的国外厂家的产品(如 DEMAG、FLENDER、SEW 等公司的产品),也已过渡到全部采用硬齿面齿轮,如上海宝钢公司 20 世纪 80 年代引进的现代化高效大型成套冶金设备中的约 2 万台齿轮装置,其中硬齿面齿轮装置占 80% 以上,而在 90 年代末期,引进的机组齿轮装置几乎 100% 为硬齿面齿轮装置<sup>[6]</sup>。

我国对硬齿面技术的发展也非常重视。自 20 世纪 60 年代以来,我国就开始引进和推广硬齿面齿轮制造工艺。“六五”期间,更迈开了重要的一步,在设计、计算、材料热处理及其配磨方面做了很多工作。到 90 年代末期,我国工业齿轮基本完成了从软齿面(300HB)到中硬齿面(350HB)及硬齿面(45HRC ~ 62HRC)的过渡,在《齿轮行业“十五”发展规划》中指出:“工业变速箱……国内将继续淘汰软齿面,向硬齿面 50HRC ~ 60HRC,高精度、高可靠性、软启动、运行监控、运行状态记录、低噪声,变速箱的功率与体积、重量比高的方向发展。”<sup>[7]</sup>。因此,高精度硬齿面齿轮在我国也得到广泛地应用<sup>[8~10]</sup>。

可见,采用硬齿面齿轮是提高齿轮强度及承载能力的最有效途径,是齿轮传动发展的主要趋势<sup>[11]</sup>。

### 1.2.2 渗碳淬火处理是硬齿面齿轮加工的主要方法

齿轮传动采用硬齿面齿轮,虽然材料费用和制造成本都较高,但究其综合经济效益而言却比中、软硬齿面齿轮相对要好。实现齿轮硬齿面的工艺主要有渗碳、氮化、碳氮共渗、表面淬火(包括感应和火焰淬火)等热处理方法<sup>[12]</sup>。表 1.1 集中列出齿轮不同处理方法的特性对比,其中通过渗氮处理可以获得较高的胶合承载能力和抗点蚀能力,但是该方法对材料质量、加工和热处理方面的要求较高,此外,渗氮硬化层浅、心部硬度低,抗冲击和边缘受载时抗过载能力较差;感应淬火和火焰淬火方法要求有仔细的预热处理和严格的材料选择;而渗碳淬火方法虽然在技术比较复杂,但在

传递相同功率(扭矩)的情况下,这类齿轮组成的减速器体积最小、重量最轻(相同承载能力),整机价格最低。由此看出渗碳淬火方法得到的齿轮与其他处理方法相比,具有更高的使用性能。因此,目前,制造硬齿面齿轮方法主要是齿轮毛坯采用低碳高合金钢锻件,经切削加工后进行渗碳淬火,齿面硬度达 56HRC 以上,磨齿后精度达 ISO 标准 6 级以上。

从现在来看,今后相当长的时间内,渗碳淬火仍将是硬齿面齿轮加工的主要工艺方法<sup>[13]</sup>。

表 1.1 各种处理后齿轮特性对比

| 工艺方法 | 使用性    |        |     |      | 工艺性  |    |
|------|--------|--------|-----|------|------|----|
|      | 表面疲劳强度 | 弯曲疲劳强度 | 耐磨性 | 耐胶合性 | 不变形性 | 层深 |
| 渗碳   | 优      | 优      | 优   | 良    | 可    | 良  |
| 渗氮   | 良      | 良      | 优   | 优    | 优    | 可  |
| 表面淬火 | 良      | 良      | 可   | 可    | 良    | 优  |
| 整体处理 | 差      | 可      | 差   | 差    |      |    |

### 1.2.3 我国齿轮制造技术亟待改进

我国齿轮制造业从 20 世纪 50 年代开始经历了从无到有,到门类齐全、规模宏大的发展历程。目前,拥有成批生产齿轮产品能力的机械工厂约 1000 余家,从业人员约 30 万<sup>[7]</sup>,企业的规模和从业人员均位居世界前列,但是每年还需进口价值约 2 亿多美元的高质量 and 特殊性能的各种齿轮减速器,与此同时国内齿轮制造业的生产能力尚有 30% 的处于闲置状态<sup>[14]</sup>。在效益方面,国内齿轮总成产品年产值约 250 亿元,从业者人均年销售额不到 8000 美元,而国外齿轮制造公司人均年销售额达 13 万~20 万美元,相差 16 倍~25 倍。可见,整个行业存在低水平重复建设的问题,缺少制造高性能、高精度的齿轮装备,制造技术整体水平低,工艺落后。可以说,我国齿轮行业处于制造企业最多、行业规模最大、进口设

备最多,而全行业生产效率、人均产值、制造工艺水平、产品质量却很低的现状<sup>[14,15]</sup>。

预计 21 世纪,我国轿车制造业将在 20 年左右的时间里达到年产 1200 万~1500 万辆,产量上将要位居世界首位,其他与齿轮制造业有关的几十项主机行业均会有较快的发展<sup>[16]</sup>。而齿轮行业目前状况远远不能适应我国汽车等产业快速发展的需要。这种庞大但总体技术还比较落后、效益不高的齿轮制造业,将成为制约我国机械行业发展的瓶颈。因此提高齿轮制造技术水平已刻不容缓<sup>[17]</sup>。

## 1.3 齿轮温精密塑性成形技术是齿轮制造技术的发展方向

### 1.3.1 齿轮精密塑性成形是齿轮制造工艺发展方向之一

随着时代的进步,各种高新技术不断发展和应用,传统的塑性加工技术也得以不断发展和提高。精密塑性成形技术作为一种先进的制造技术,以生产尽量接近零件最终形状的产品(Near-Net-Shape),甚至完全提供成品零件(Net-Shape)为目标,在工业发达国家得以迅速发展并发挥重要作用,已成为提高产品竞争力的重要途径<sup>[18,19]</sup>。

我国齿轮制造技术水平的提高,可从两方面入手,一是对现有的工艺技术及其设备进行改进,利用现有技术设备条件进行工艺技术改造,提高原来的技术水平;二是大力研究开发齿轮制造的新工艺技术,将国内齿轮制造引向新的发展之路。近年来,齿轮精密塑性成形技术成为齿轮制造技术研究的主要方向之一,越来越多的制造厂家和用户开始重视用精密塑性成形方法制造齿轮,并进行大量的研究<sup>[20~29]</sup>。

齿轮精密塑性成形技术,是指坯料通过模具在压力作用下产生塑性变形得到齿面不需切削加工即可使用的齿轮加工工艺。这

种工艺从根本上改变了塑性成形仅提供齿轮毛坯的观念。与传统的模锻制坯、切削加工齿轮的工艺比较,齿轮精密塑性成形技术具有显著的技术优势。

(1) 节约原材料:齿轮采用传统的切削工艺加工,材料利用率仅为 30% 左右;若采用精密塑性成形加工,材料利用率可达 80% 以上。

(2) 生产率提高:齿轮采用精密塑性成形技术,直接成形齿型,省去加工齿型时大量的机加工工时,生产率较传统的切削加工提高十倍或几十倍以上。

(3) 齿轮性能提高、寿命延长:塑性成形齿轮可以使齿轮内部组织改善、齿形轮廓保持了连续分布的流线,大大提高了齿轮疲劳强度和使用寿命。

(4) 能源消耗降低、设备投资减少:传统的齿轮切削工艺,从下料、锻造毛坯、粗车、钻孔、加工齿形(插、铣、刨、滚、剃、珩齿等)大多需要十几道工序,而精密塑性成形齿轮只需要四道工序左右,可以减少设备投资和能源的消耗。

显然,齿轮精密塑性成形的技术优势,将大大降低齿轮的制造成本,增强市场的竞争力,尤其在用于汽车工业的大规模生产,具有更大的效益和潜力<sup>[30~32]</sup>。这种新技术的运用将提高我国齿轮的制造技术的整体水平,与可持续发展的“能源和原材料”战略相一致。因此,齿轮精密塑性成形技术成为齿轮制造新技术发展的主要趋势<sup>[33~35]</sup>。

### 1.3.2 国内外齿轮精密塑性成形发展状况

齿轮精密成形技术源于 20 世纪 50 年代的联邦德国,当时由于缺乏足够的齿轮加工机床,德国人开始在摩擦压力机上用闭式热模锻的方法制造直齿圆锥齿轮。此后,苏联、美国、捷克、日本等国家出现了许多用于直齿圆锥齿轮生产的精锻方法,如热模锻法、轴向挤出法、径向锻造法、冷打法、摆碾法、粉末冶金法等。其中后四种方法均需要专门的设备,投资大,见效慢,导致应用少,发展

慢;前两种方法由于对设备没有特殊的要求,普通的压力设备即可,且可借鉴原有锻造工艺,具有投资少见效快的特点,因此,得以较为广泛的应用,其产品的主要对象是卡车、拖拉机、农用机械等精度要求不高的伞齿轮,如民主德国、捷克、匈牙利、苏联等相继在摩擦压力机和热模锻压机上用半精锻方法生产具有粗切齿效果的伞齿轮;英国 Birfield Group,美国 Eaton Yale & Towne Inc. 以及日本三菱金属和日锻阀门公司先后解决了生产伞齿轮并使之达到切削齿轮精度的技术问题,取得显著的经济效益<sup>[24,36,37]</sup>。

精密成形用于齿轮生产的初期,由于采用热成形所需的压力较小,金属容易流动,齿型成形容易,热成形法成为齿轮精密形成的主要特点,但由于加热温度高,受热缩影响大,成形精度低,生产率不高。随着汽车工业的迅速发展,对齿轮需求量迅速增大,质量要求越来越高,热成形的局限性日益显现。冷精密成形由于具有生产效率高、表面质量好、性能优异等特点,到 20 世纪 80 年代,得到各个汽车发达国家的重视,采用冷精锻工艺成形小模数齿轮的技术日趋成熟。在日本,利用径向挤压机理而发展的闭塞锻造技术及相应的设备得到迅速发展及广泛应用,成功地用于差速器伞齿轮、等速万向节星形套等高精度复杂齿形零部件的生产。

齿轮精密塑性成形技术用于圆柱齿轮加工,由于金属材料的塑性流动方向与其受力方向垂直,所以其齿形比锥齿轮更难形成。20 世纪 60 年代日本和美国尝试在高速锤上成形直齿圆柱齿轮,并对模具设计、加工模具的电极修正、坯料形状和成形力能参数等进行了系统研究,利用高速度效应,使热挤直齿圆柱齿轮成为可能,但是由于齿轮锻件有横向飞边,特别是锻件精度低、模具寿命低,该项技术没有得到推广应用。

由于齿轮采用精密塑性成形技术生产具有的诸多优点,且已成功用于伞齿轮的生产,并带来显著的经济效益,因此近年来国内外从事塑性成形的学者、技术人员致力于直齿圆柱齿轮精密成形技术的探索。在研究过程中具有重要影响的,如 20 世纪 80 年代

中期日本名古屋大学的近藤一义先生,他首次提出利用分流原理,在齿轮非重要部位设置溢流口,以保证体积模锻过程中,在充填主要轮廓的同时始终有材料分流,避免闭式模锻终了时,由于自由表面锐减而造成工作载荷的陡增,甚至趋于理论上无穷大的弊端,从而使在相对较低的成形力下,冷精锻直齿圆柱齿轮成为可能<sup>[38~43]</sup>。在1987年,又提出将常规闭式模锻与溢流轴(RA法)或溢流孔(RH法)法技术相结合,以工业纯铝为试验材料,对于棒料与环状坯料进行模数为1.0及2.25、齿数为22标准直齿圆柱齿轮精锻试验研究。1988年,英国学者C. Tuncer和T. A. Dean利用精锻空心件的凹模浮动原理<sup>[44,45]</sup>,把厚壁管截成的环形坯管,锻成带有中心孔的直齿圆柱齿轮,齿面上留有0.6mm的切削加工余量,该方法适用于生产具有大中心孔的圆柱齿轮,但齿面仍需切削加工。

再如,德国汉诺威大学的E. Doege和B. A. Behrens<sup>[21]</sup>、伊朗Tarbiat Modarres大学的M. H. Sadeghi<sup>[46]</sup>与英国伯明翰大学<sup>[37]</sup>的T. A. Dean用凹模浮动模具对直齿轮和斜齿轮作了系统的研究,包括模具结构形式的选择,齿轮尺寸精度的影响因素,齿轮塑性成形力的预测及其与摩擦系数、齿轮模数、宽度之间的关系,脱模力与摩擦系数、成形力、成形温度、压力角、齿数之间的关系等。英国曼彻斯特大学科学技术学院的N. R. Chitkara和M. A. Bhutta及韩国釜山国立大学的J. C. Choi和Y. Choi等人分别对直齿圆柱齿轮的塑性成形作了数值模拟研究,用能量法和上限法作了理论分析,并用凹模浮动原理模具对此作了实验验证<sup>[22,47]</sup>;1986年英国Birmingham大学的N. A. Abdul等用上限法进行了直齿圆柱齿轮精锻的分析计算,论述了齿根圆直径、齿数以及工件与型腔之间的摩擦对金属流动和锻造成形力的影响<sup>[48]</sup>;1996年J. C. Choj等用上限法对实心圆柱坯料精锻直齿圆柱齿轮进行了较为精确的分析<sup>[49]</sup>;N. R. Chitkara等用上限元法分析了锻锻直齿圆柱齿轮的变形规律,在此基础上用计算机模拟了增量锻造直齿圆柱齿轮时的变形力和应力应变规律<sup>[19]</sup>。