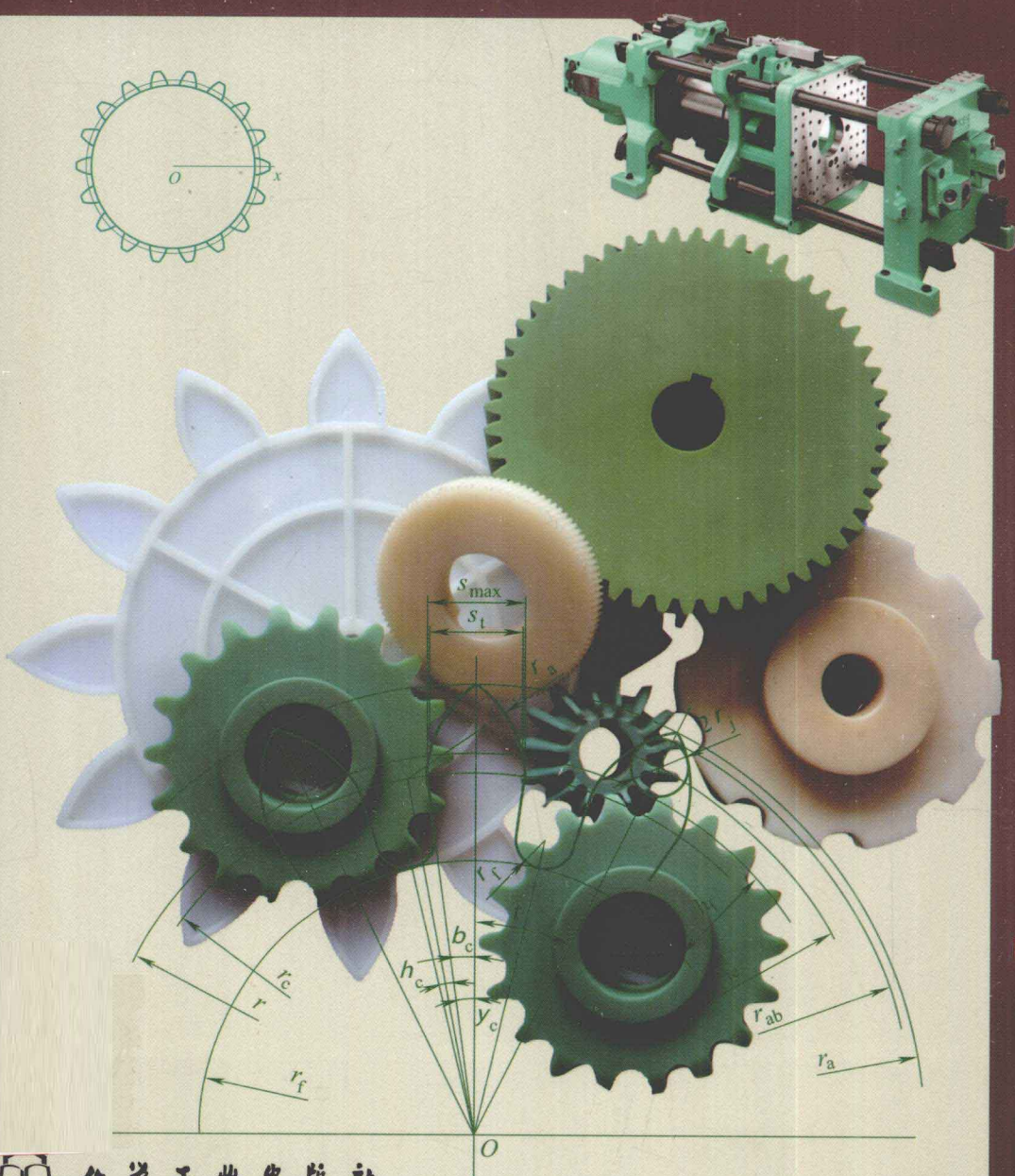


欧阳志喜 石照耀 编著

塑料齿轮 设计与制造

Design and Manufacturing
of Plastic Gears



化学工业出版社

欧阳志喜 石照耀 编著

塑料齿轮 设计与制造

Design and Manufacturing
of Plastic Gears



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是国内第一本全面、实用地介绍塑料齿轮设计与制造的技术图书，是作者 30 多年从事塑料齿轮开发与应用的经验总结，实用性、可操作性强。全书系统、全面地介绍了国内外塑料齿轮设计、制造与应用的技术成果，重点阐述了塑料齿轮及其轮系的设计计算方法、常用材料特性、注塑机、制造工艺及模具设计、检测以及典型塑料齿轮装置的应用等内容。

本书可供汽车、仪器仪表、家用电器、钟表、办公文仪以及国防军工等企业从事塑料齿轮和齿轮模具设计与制造的广大工程技术人员和技工使用，也可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

塑料齿轮设计与制造/欧阳志喜，石照耀编著. —北京：化学工业出版社，2011.9

ISBN 978-7-122-11952-0

I. 塑… II. ①欧…②石… III. ①塑料齿轮-设计
②塑料齿轮-制造 IV. TH132.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 147040 号

责任编辑：张兴辉
责任校对：洪雅姝

文字编辑：林 丹
装帧设计：王晓宇

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京云浩印刷有限责任公司

装 订：三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 23½ 字数 582 千字 2011 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

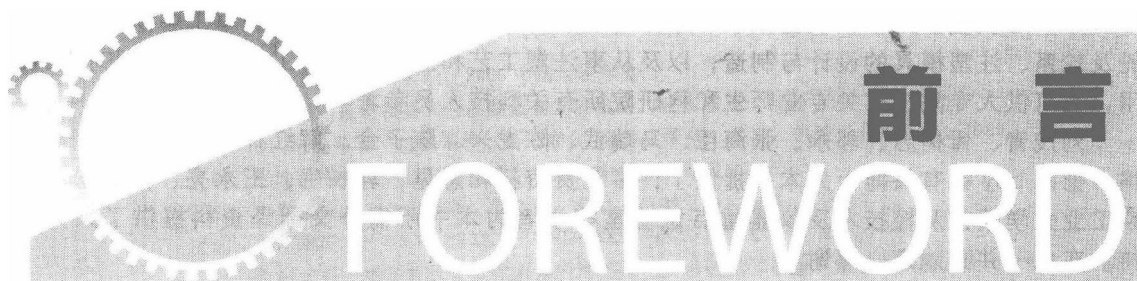
购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：78.00 元

版权所有 违者必究



塑料齿轮是近五十年来才发展起来的一种具有重量轻、惯性小、噪声低、自润滑好等特点的新型非金属齿轮。这种齿轮采用模塑成型工艺，生产效率高和制造成本低，已广泛应用于汽车电装、家用电器、办公文仪、食品和环卫、钟表和玩具等产业领域。近二十年来，随着高强度、高耐磨等高性能工程塑料研发和改性的成功，特别是在全球汽车工业飞速发展和军备剧烈竞赛等的驱动下，塑料齿轮的开发与应用已经取得了长足进步。现在塑料齿轮已经在汽车电装产品中成功取代了传统金属齿轮，近来又成功应用于小型航空器上控制表层稳定的动力螺旋器、军用领域中的陀螺仪表及操纵装置中。随着高性能新型热塑性材料不断涌现，有望在消声减振要求更高、机械加工难度更大的齿轮等领域中，获得越来越广泛的应用。总之，塑料齿轮在当代齿轮制造业中，已成为开发最快、应用最广、活力最强的产业之一。

塑料齿轮按材料分类，有热塑性齿轮和热固性齿轮两大类，本书仅讨论应用最广的热塑性齿轮。全书共分八章：第一、二章重点介绍了塑料齿轮及其轮系的设计特点与计算方法；第三章简要介绍了塑料齿轮常用材料物性、轮系材料选配及其齿轮失效特点；第四章简要介绍了塑料齿轮的注塑机与周边设备及其国外最新开发的各种微型注塑机；第五章详细讨论了齿轮注射模的设计与制造，重点介绍了多种齿轮型腔和齿轮电极参数设计步骤与方法及其特种加工工艺；第六章塑料齿轮的检测，介绍了国内外有关塑料齿轮检测的最新成果；第七章简要介绍了塑料齿轮轮系的测绘步骤与方法；第八章介绍已获得广泛应用的多种塑料齿轮装置实例。本书图文并茂，列举了大量的示例设计与计算，以便广大读者掌握、应用。在本书综述中，比较系统和全面的简要介绍了塑料齿轮开发应用概况，供非本专业领导和同仁浏览。此外，本书还附有三个有价值的附录，可供读者参考。

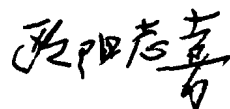
本书介绍了作者从事塑料齿轮开发与应用三十多年，主持或参与燃气表字轮式计数器与交换齿轮、洗衣机定时器和石英闹钟塑料机芯与传动轮系及精密塑料齿轮模具、汽车雨刮器及摇窗机和启动电机、少齿差行星减速器、汽车电动座椅驱动器及调角器和记忆器的开发设计与制造所取得的点滴经验和科技成果；同时也介绍了国内外有关塑料齿轮的先进经验、最新科技成果和发展动向。特别对《塑料齿轮齿形尺寸》美国国家标准（ANSI/AGMA 1006-A97 米制单位版）作了详细解读。本书第六章由北京工业大学教授石照耀博士编著，详细介绍了作者本人以及国内外在塑料齿轮检测方面的最新研究成果。

在长期的科技攻关的实践中，作者倍感我国塑料齿轮的设计制造水平与发达国家之间存在着较大的差距，深深认识到高精度、高强度等高性能塑料齿轮的研发基础还十分薄弱，目前仍基本上是由企业根据用户的要求自行攻关、开发和生产。这种体制上的缺陷，势必制约我国中高档塑料齿轮设计制造水平的提高，从而造成目前我国仍需从国外进口大量中高档塑料齿轮的被动局面。要突破这一困境，需要有齿轮产品设计、塑性材料研发、注塑模具设计制造、新型注塑设备与新的注塑工艺研究和齿轮检测与试验等多学科的专家团队进行联合攻关来解决。

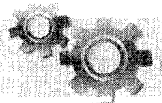
本书可供我国汽车、仪器仪表、家用电器、钟表、办公文仪以及国防军工中从事塑料齿轮及轮系、注塑模具的设计与制造，以及从事注塑工艺和齿轮检测的工程技术人员和技工使用，也可供大专院校有关专业师生和科研院所有关科技人员参考。

刘茂青、胥树志、郭永、张海臣、马瑞武、陈龙兴、陈子合、解红林等专家和德国阿博格、德国 boy 等有关博士为本书提供了许多宝贵资料和意见；郭长生、王永亮、仵文松和北京工业大学精密测控技术及仪器重点实验室等学者为本书所需外文翻译资料提供了大力支持。在此一并致以衷心感谢。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请批评指正。

A handwritten signature in black ink, reading '胥树志' (Xu Shuzhi) from right to left.

本书常用符号

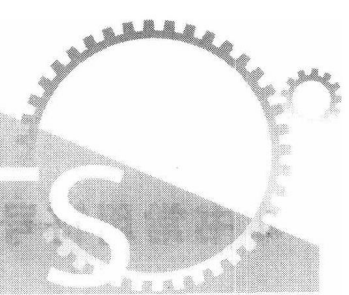


a, a' ——中心距, mm;
 b ——齿宽, mm;
 c ——顶隙, mm;
 c^* ——顶隙系数;
 d, r ——分度圆直径、半径, mm;
 d', r' ——节圆直径、半径, mm;
 d_a, r_a ——齿顶圆直径、半径, mm;
 d_b, r_b ——基圆直径、半径, mm;
 d_f, r_f ——齿根圆直径、半径, mm;
 e_t ——分度圆弧槽宽, mm;
 $\hat{e}_t$ ——分度圆弦槽宽, mm;
 h ——全齿高, mm;
 h' ——工作齿高, mm;
 h_a ——齿顶高, mm;
 h_a^* ——齿顶高系数;
 h_f ——齿根高, mm;
 h_{ao} ——刀具齿顶高, mm;
 h_{ao}^* ——刀具齿顶高系数;
 h_{fo} ——刀具齿根高, mm;
 i ——传动比;
 j ——侧隙, mm;
 j_n ——法向侧隙, mm;
 j_t ——圆周侧隙, mm;
 k ——跨越齿数, 跨越槽数 (用于内齿轮);
 m ——模数, mm;
 m_n ——法向模数, mm;
 m_t ——端面模数, mm;
 m_x ——轴向模数, mm;
 n ——转速, r/min;
 p ——齿距, 分度圆齿距, mm;
 p_b ——基圆齿距, mm;
 p_{bn} ——法向基圆齿距 (法向基节), mm;
 p_{bt} ——端面基圆齿距 (端面基节), mm;
 p_n ——法向齿距, mm;
 p_t ——端面齿距, mm;
 p_x ——轴向齿距, mm;
 p_z ——导程, mm;
 q ——蜗杆直径系数;
 s ——齿厚, 分度圆弧齿厚, mm;

$\bar{s}$ ——弦齿厚, 分度圆弦齿厚, mm;
 s_a ——齿顶厚, mm;
 s_n ——法向齿厚, mm;
 s_t ——端面齿厚, mm;
 s_o ——刀具齿厚, mm;
 T ——斜齿轮导程, mm;
 u ——齿数比, mm;
 x ——径向变位系数;
 x_z ——齿厚变位系数;
 y ——中心距变位系数;
 z ——齿数, 头数;
 z_u ——当量齿数;
 W ——公法线长度, mm;
 W_t ——斜齿轮端面公法线长度, mm;
 W_i ——内齿轮公法线长度, mm;
 α ——压力角, 齿形角, ($^\circ$);
 α' ——工作压力角, ($^\circ$);
 α_a ——齿顶压力角, ($^\circ$);
 α_n ——法向压力角, 齿形角, ($^\circ$);
 α_t ——端面压力角, 齿形角, ($^\circ$);
 α_y ——任意点 y 的压力角, ($^\circ$);
 α_o ——刀具齿形角, ($^\circ$);
 β ——螺旋角, 分度圆螺旋角, ($^\circ$);
 β' ——节圆螺旋角, ($^\circ$);
 β_b ——基圆螺旋角, ($^\circ$);
 γ ——导程角, ($^\circ$);
 γ_b ——基圆导程角, ($^\circ$);
 ε ——重合度, ($^\circ$);
 ε_a ——端面重合度, ($^\circ$);
 ε_β ——纵向重合度, ($^\circ$);
 ε_γ ——总重合度, ($^\circ$);
 θ_a ——齿顶角, ($^\circ$);
 θ_f ——齿根角, ($^\circ$);
 ρ_a ——齿顶圆倒圆半径, mm;
 ρ_f ——齿根圆倒圆半径, mm;
 τ ——齿角距, ($^\circ$);
 φ ——齿厚半角, ($^\circ$);
 φ_b ——基圆齿厚半角, ($^\circ$);
 δ ——收缩率, %。

目 录

CONTENTS



绪论	1
第一章 塑料齿轮设计	8
第一节 圆柱齿轮的齿形制及其形成	8
一、渐开线齿形制	8
二、计时仪器用圆弧齿形制	13
三、圆柱渐开线齿轮齿形的形成	16
四、计时仪器用圆弧齿轮齿形的形成	21
第二节 塑料齿轮轮齿设计	22
一、塑料齿轮轮齿的修正设计	22
二、采用定制基本齿条的优化设计	28
第三节 塑料齿轮结构设计	29
一、塑料齿轮结构设计要点	29
二、塑料蜗轮结构设计	33
三、带金属嵌件的斜齿轮结构设计	34
四、多功能组合齿轮结构设计	35
第四节 圆柱渐开线齿轮尺寸计算	37
一、圆柱渐开线齿轮尺寸的计算	37
二、齿轮齿厚的确定	42
三、齿轮齿顶的修缘计算	44
四、齿轮齿顶圆直径的调整示例计算	46
五、齿轮齿顶倒圆后的齿顶宽度计算	48
第五节 齿轮跨棒距 M 值、公法线长度 W 计算	49
一、齿轮 M 值的计算	50
二、圆柱蜗杆 M 值的计算	53
三、蜗轮 M 值的计算	54
四、齿轮公法线长度 W 的计算	59
第六节 塑料齿轮精度设计与标准	61
一、塑料齿轮的精度设计	61
二、日本塑料齿轮精度标准	67
第七节 塑料齿轮应力分析及强度计算	82
一、齿轮副在传动过程中轮齿的作用力	83
二、轮齿的弯曲应力以及强度计算	84

三、试验基础上的齿轮强度计算方法	87
第八节 圆柱渐开线齿轮齿形的绘制	87
一、概述	87
二、作图法绘制渐开线齿轮齿形	88
三、计算-作图法绘制渐开线齿轮齿形	92
四、实用型代圆弧拟合绘制渐开线齿形	95
五、齿根过渡圆弧的设计与计算	97
第二章 塑料齿轮传动轮系设计与计算	99
第一节 外啮合圆柱渐开线齿轮传动轮系设计与计算	99
一、设计步骤与要点	99
二、外啮合圆柱渐开线直齿轮传动轮系参数设计与计算	101
三、外啮合圆柱渐开线斜齿轮传动轮系参数设计与计算	106
第二节 内啮合圆柱渐开线齿轮传动轮系设计与计算	111
一、内啮合圆柱渐开线齿轮在传动中的干涉	111
二、内啮合圆柱渐开线直齿轮轮系参数设计与计算	114
三、内啮合圆柱渐开线斜齿轮传动轮系参数设计与计算	118
四、少齿差内啮合圆柱渐开线齿轮传动轮系参数设计与计算	121
第三节 圆柱蜗杆传动轮系设计与计算	128
一、渐开线圆柱蜗杆-斜齿轮传动轮系设计与计算	128
二、圆柱蜗杆-蜗轮传动轮系设计与计算	136
第三章 塑料齿轮材料	147
第一节 常用材料	147
一、聚甲醛 (POM)	147
二、尼龙 (PA66 与 PA46)	151
三、聚碳酸酯 (PC)	156
四、聚苯硫醚 (PPS)	159
五、聚醚醚酮 (PEEK 450G)	161
第二节 塑料齿轮材料的匹配及其改性	164
一、齿轮常用材料的匹配	164
二、蜗杆-蜗轮常用材料的匹配	165
三、齿轮材料改性研究	167
第三节 塑料齿轮的失效	173
一、塑料齿轮失效形式	173
二、塑料齿轮传动的磨损特点	174
三、工程塑料的黏弹性体滞后能耗	177
四、降低节点处断裂失效的优化设计要点	178
五、塑料齿轮寿命评估研究进展	179
六、蜗杆传动中的反常磨损现象	180

第四章 塑料齿轮制造工艺及其注塑设备	183
第一节 塑料齿轮制造工艺	183
一、塑料齿轮的滚齿加工	183
二、齿轮注射成型工艺的主要特征	184
三、注射成型齿轮的常见缺陷及其对策	187
四、塑料制品的后处理	190
第二节 注塑机及其周边设备	191
一、立式注塑机	191
二、卧式注塑机	193
三、全电动注塑机	193
四、精密塑料齿轮对注塑机的要求	194
五、小型注塑机的优势	194
六、周边设备配置	195
第三节 精密塑料齿轮注射成型工艺	197
一、微型塑料齿轮注塑机及其备置	197
二、二次压缩成型工艺	203
三、国内微型塑料齿轮生产概况	206
第五章 塑料齿轮注射模的设计与制造	207
第一节 齿轮注射模的设计	207
一、齿轮注射模的设计步骤及其分类	207
二、齿轮型腔结构设计	209
三、浇口系统设计	214
四、排气系统设置	220
五、冷却水（油）道系统的设置	222
六、精定位结构设计	225
第二节 塑料齿轮型腔的参数计算	226
一、齿轮型腔齿形角的早期修正计算公式	226
二、各向同性向心收缩的齿轮型腔参数计算方法的讨论	227
三、以浇口为中心收缩规律的机理分析与试验验证	231
四、齿轮型腔参数及尺寸的实用计算方法	233
五、塑料齿轮型腔参数尺寸的计算	235
第三节 齿轮型腔材料选用	243
一、齿轮型腔用材料的性能要求	243
二、齿轮型腔材料的选用	243
第四节 齿轮型腔制造特种工艺	246
一、齿轮型腔电火花成型加工工艺	246
二、齿轮型腔电火花线切割加工工艺	252
三、齿轮型腔电铸成型工艺	256
四、齿轮型腔冷挤压成型工艺	257
五、挤压珩磨工艺	258
第五节 圆柱塑料齿轮及蜗杆注射模的典型结构与工作步骤	260

一、双联直齿轮注射模	260
二、斜齿轮注射模	261
三、蜗杆注射模	263
四、四滑块式蜗杆注射模	264
五、双联直/斜齿轮注射模	267
六、内直齿轮注射模	269

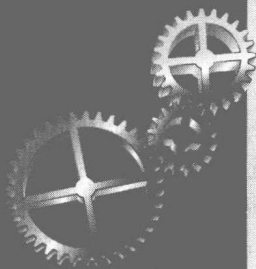
第六章 塑料齿轮的测量 271

第一节 齿轮误差、测量与仪器	271
一、分析式齿轮测量仪器	272
二、综合式齿轮测量仪器	273
第二节 塑料齿轮的单项误差测量	275
一、测量方法与仪器	275
二、测量示例	276
三、误差曲线分析	276
第三节 塑料齿轮的综合误差测量	280
一、单面啮合测量	281
二、双面啮合测量	282
三、测量元件	283
四、单啮测量与双啮测量比较	286
第四节 塑料齿轮的尺寸与缺陷检测	288
一、齿轮侧隙测量	288
二、光学投影测量	290
三、光学影像测量	291
第五节 塑料齿轮测量新技术——工业 CT 测量	294
一、CT 测量原理及构成	294
二、小模数齿轮的 CT 测量	295

第七章 塑料齿轮传动轮系测绘 299

第一节 概述	299
一、塑料齿轮传动轮系设计的主要特点	299
二、两类齿轮测绘主要目的与难点	300
第二节 直齿圆柱渐开线齿轮轮系测绘	301
一、确定齿数与判断齿形角等的属性	301
二、测量齿顶圆直径 d_a 和齿根圆直径 d_f	301
三、测量齿轮箱中心距 a'	303
四、齿轮齿形角 α 、模数 m (或径节 DP) 的确定	303
第三节 斜齿圆柱渐开线齿轮传动轮系测绘	307
一、斜齿轮法向齿形角 α_n 的确定与法向模数 m_n 的测定	307
二、特小模数斜齿轮分度圆螺旋角 β 与法向模数 m_n 的测定	309
三、根据中心距 a' 确定斜齿轮分度圆螺旋角 β	311
第四节 蜗杆-蜗轮传动轮系测绘	311

一、钢质蜗杆-塑料斜齿轮传动轮系的测绘	311
二、钢质蜗杆-塑料蜗轮传动轮系的测绘	314
第五节 计时仪器用齿轮传动轮系的测绘	316
第八章 塑料齿轮装置	325
第一节 煤气表字轮式计数器与交换齿轮	325
一、燃气表字轮式计数器	325
二、塑料交换齿轮	326
第二节 石英闹钟塑料机芯与传动轮系	327
一、石英闹钟塑料机芯	327
二、“扫描机芯”传动轮系	327
第三节 汽车雨刮电机、摇窗电机及调角器	328
一、汽车雨刮电机	328
二、汽车摇窗机	329
三、轿车电动座椅调角器	329
第四节 塑料齿轮行星减速器及少齿差计时器	330
一、塑料齿轮行星减速器	330
二、少齿差行星减速器	332
第五节 汽车电动座椅驱动器及记忆器	333
一、座椅水平驱动器 (HDM)	333
二、座椅垂直驱动器 (VDM)	334
三、小型座椅调角器	335
四、座椅腰托驱动器	335
五、座椅位置记忆器	335
附录一 不采用基本齿条生成渐开线圆柱齿轮齿形的新途径	337
附录二 塑料齿轮的强度设计与计算	343
附录三 塑料齿轮寿命的估算	351
参考文献	365



绪论

近三十年来,在全球汽车工业发展和军备竞赛等产业的驱动下,伴随着更为坚固耐用的高强度、高耐磨、耐高温等高性能工程塑料聚合物和复合物的开发;新型注塑设备性能的提升,注塑工艺过程参数的更为先进的智能化控制;现代制模业技术的快速发展,使人们能够制造出模数更大、尺寸更精密、传递载荷更高的塑料齿轮。这类用来传递中、小载荷的塑料齿轮首先在汽车电装产业和家用电器业中得到广泛成功的应用。近年来,塑料齿轮又已开始替代金属齿轮应用于小型航空器控制表层稳定的动力螺旋器、导弹等武器装备中的陀螺仪表以及谐波减速器等操纵装置。总之,在小模数($m \leq 2\text{mm}$)齿轮领域中,“以塑代钢”已成为世界性的潮流。在当代齿轮制造业中,塑料齿轮已成为开发应用最快、最具活力与发展潜质的齿轮产业之一。

在我国,塑料齿轮业起步于20世纪70年代初^[1]。塑料齿轮的开发应用大致经历了以下三个阶段:水、电、气三表计数器和各种机械传动式玩具中的传动齿轮;洗衣机定时器、石英闹钟和全塑手表机芯及各种家用电器和办公文仪设备中的传动齿轮;汽车雨刮、摇窗和启动电机、电动座椅中各种电机驱动器中的斜齿轮、蜗轮和蜗杆等。这类配置有腰托与腿托等按摩功能的电动座椅,正在朝航空客机座椅等方向扩展。本文拟称传递载荷轻微的齿轮为运动传递型(简称运动型)塑料齿轮,传递中、小载荷的汽车雨刮、摇窗、启动、座椅电机等,以及各种减速器用传动齿轮为动力传递型(简称动力型)塑料齿轮。

早在20世纪60年代末,我国华北某军工企业就在极其简陋的条件下试制出了小模数塑料齿轮。他们采用FX-501玻璃钢制作模具齿轮型腔,其制作过程是先将FX-501加热到110℃左右,压入已经预热到80℃的基准齿轮和模框之间,制成简易注射模的齿轮型腔。这种玻璃钢为热固性塑料,成型后即可耐800℃以上高温,这种简易齿轮型腔只能一次性使用,可注塑PC、ABS或PA等塑料齿轮达500~600件。

1976年,浙江奉化“以塑代铜”开发成功了水表计数用塑料齿轮,后发展成颇具规模的仪表塑料齿轮厂。该厂在1994年塑料齿轮产量已达1.5亿件,但所使用的设备仍极其简陋,大多为小型柱塞式立式注塑机。近年来换代为国产全液压卧式注塑机和自制模具,自主成功开发和生产了模数 $m=0.05\text{mm}$ 的手表用微型塑料齿轮。20世纪80年代,海外定时器、石英钟等产业大举向沿海迁移,国内的石英钟、定时器生产厂家也大量涌现。在奉化从事塑料齿轮生产的作坊式小厂,有如雨后春笋多达上千家,使奉化成为全国闻名的“塑料齿轮之乡”。但随着全塑手表、多功能手机的问世,使石英闹钟市场出现了下滑和萎缩,经过多年的优胜劣汰,真正有生产规模有实力的厂家也所剩无几。这些厂家主要分布在浙、粤、闽等沿海地区,并多为港、台资或合资企业。这些企业既生产全塑手表又生产石英闹钟,所需的塑料齿轮多为企业内部封闭式自给生产。

随着国内外汽车产业迅猛发展,汽车各种电装产品所需的塑料齿轮得到了飞跃发展。其中“以塑代钢”最具成功的典型案例,就是采用钢蜗杆与塑料斜齿轮传动的减速驱动器,已广泛应用于汽车雨刮、摇窗和电动座椅驱动电机中,使啮合噪声和制造成本大为降低。另一个典型案例,是20世纪90年代,在汽车新型启动电机分流式行星传动机构中,采用塑料内



齿轮替代金属内齿轮获得成功。这种行星减速传动启动电机具有体积小、质量轻、效率高、工作平稳、噪声低和使用寿命长等优点。近几年来,国内外又启动了采用高性能聚醚醚酮(PEEK 450G)模塑蜗杆替代冷轧成型或旋铣切削加工的钢蜗杆的研发,已成功应用在汽车电动座椅等电机驱动器上,进一步降低了这类驱动器的传动噪声和制造成本。

早期运动型塑料齿轮直径一般多小于 25mm,传输能力小于 180W;现在可以生产出许多不同结构的塑料齿轮,直径为 100~150mm,传输能力可达 735W 以上。目前,塑料齿轮正朝着尺寸更大、形状和结构更复杂、机械强度更高和传输载荷更大的方向发展。预测不久就可开发出直径达 450mm,传输能力可提高 7350W 以上的塑料齿轮。要实现以上目标,有两大课题要突破:一是新型高性能材料的研发;二是材料的进一步改性研究。自身不具有润滑性的塑料可通过添加填料来提高润滑性,同时还可以大大提高材料的物理力学性能。可以展望,随着高性能的新型塑料的涌现,材料改性的研发不断进展,来自塑料齿轮对金属齿轮的挑战将会更加强劲!

尽管我国塑料齿轮起步并不算晚,但国内塑料齿轮的状况仍令人甚忧。目前的供需状况是中低档齿轮国内完全可以自足自给,但附加值高的高档齿轮的生产厂家很少;国内一些需要塑料齿轮的外资企业对国产齿轮质量保证体系缺少信任,仍多从国外进口高档齿轮。国内少数高档塑料齿轮生产厂家,也多为外资企业,分布在东南沿海各省,所生产的齿轮多销往海外。目前国内塑料齿轮行业最突出的问题是注塑与模具业者不熟习齿轮,而齿轮业者又不了解注塑与模具,相互之间缺乏有效的沟通,专业背景知识的鸿沟桎梏了塑料齿轮的高速发展。国内大多数塑料齿轮生产厂由于严重缺乏懂齿轮的中高档技术人才,缺少中高档模具制造和注塑设备,致使这些生产企业长期处于只能生产中低档齿轮的来料加工的困境^[2]。

塑料齿轮和金属齿轮所采用的材料不同,有关塑料齿轮的特性、设计方法、材料选用、加工工艺与设备以及检测方法均与金属齿轮有着很大的差异,现对这些差异简要介绍如下。

(1) 塑料齿轮的特性

① 与金属齿轮比较,金属齿轮的机械强度高、刚性好、温度和湿度变化对尺寸稳定性的影响小。而塑料齿轮则有较大的热膨胀系数,没有经填充增强的工程塑料,如尼龙 PA66 的热膨胀系数是钢的 7 倍,聚甲醛其达 9 倍以上^[3]。因此,一对齿轮要在高温下工作,设计人员必须对这种热膨胀予以充分考虑,否则会由于侧隙、顶隙过小而造成轮齿发生“胶合”现象;在低温下工作又会出现轮系重合度过小等问题。

② 与金属齿轮比较,塑料齿轮最大的弱点是弹性模量较小,其轮齿的弯曲强度和尺寸精度较低。目前,齿轮常用热塑性材料的种类较多,由于缺乏有关这类齿轮强度、磨损磨耗和使用寿命等可信的计算方法和可靠的物性数据而受到制约。因此,在动力传动塑料齿轮设计中,往往会出现对所提出的“以塑代钢”方案备受质疑。对于汽车动力传动用塑料齿轮,通常会要求按产品设计特性规范,对原型样机特性和寿命进行形式试验来验证其设计和材料选择可行性。

③ 与金属齿轮相比,塑料可以进行着色处理,使模塑齿轮具有各种各样鲜艳美丽的色彩。在电动玩具、石英钟表等产品中采用这类五颜六色齿轮,既显得美观大方、又方便于生产中装配操作。

④ 采用塑料齿轮替代金属齿轮,同时也是一种满足低噪声运行要求的重要途径。这就要求有新的齿形设计方案和润滑性与柔韧性兼优的材料出现。塑料齿轮自身就具有一定的自润性能,如果采用添加有 PTFE、硅油等的复合材料,齿轮即可在没有润滑条件下长期工作。这类自润性塑料齿轮更是打印机、传真机和数码相机、食品加工机械等传动轮系的最佳选择。因为这些齿轮无需添加润滑油脂,不会对工作环境、食品加工和使用者造成污染。

(2) 塑料齿轮的设计 塑料齿轮的强大优势之一,就在于它的制造工艺:许多被原金属

齿轮设计师所不看好和难以采纳的某些传统结构和齿轮几何形状，均可轻而易举地通过模塑齿轮来突破，大大扩展了齿轮轮系设计的自由度。其主要原因在于采用塑料齿轮可以有效的减小传动装置的体积、重量，缩短生产工艺流程和降低制造成本，还可达到啮合传动减震降噪等目的。以下举例说明。

图 0-1 (a) 所示为结构紧凑的分流式行星传动轮系中的内齿轮，由于金属内齿轮等关键件的加工难度大、制造流程长和生产成本高，很少为设计师们所看好。而采用塑料内齿轮却大大促进这类小型化、轻量化的行星齿轮装置在家用电器和汽车启动电机中获得广泛应用。在这类新型大传动比行星减速传动装置中，由于采用 PA66 等塑料内齿轮，大大降低了电机驱动的啮合噪声和生产成本。

图 0-1 (b) 所示为计时仪表传动轮系中的齿轴组件，这类形状复杂金属齿轮零组件是采用铆合工艺将细长金属轴杆和轮片组装在一起，不但加工工序长、成本高，还很难保证组件的精度要求。而在石英闹钟和全塑手表中类似的这类齿轴组件，只需一付注射模和一道注塑工序即可完成，大大降低了生产成本，保证了产品质量。正是这类塑料齿轮的应用，使得石英闹钟和全塑手表的价格特别低廉。

图 0-1 (c) 所示为蜗杆-斜齿轮组件，与斜齿轮相连的蜗杆螺纹牙形很难通过切削加工完成，而采用模塑成型工艺却显得十分简单方便。这类塑料组件已在汽车电动座椅位置记忆器中获得成功采用。

图 0-1 (d) 是一种带凸轮、字轮、棘轮和两齿轮组合的计数器组件，很难采用金属零件组合而成，但最适合采用模塑工艺成型加工。

图 0-1 (e) 是一种薄壳型的异形齿轮组件，应用于仪器仪表的运动传输机构中，有着良好的消震减噪作用。这类异形齿轮很难采用机械加工成形，但适合采用模塑工艺成型加工。

图 0-1 (f) 所示为塑料双联齿轮组件，小齿轮为直齿轮（或小斜齿轮），大齿轮为斜齿轮。在 Valeo 雨刮器和座椅调角器的传动轮系中，这类双联塑料齿轮中的大、小齿轮均为斜齿轮；对双联齿轮的轮齿还有严格的选向方位要求，否则将造成装配上的困难。以上这些要求，采用模塑成型的塑料齿轮都是不难办到的。

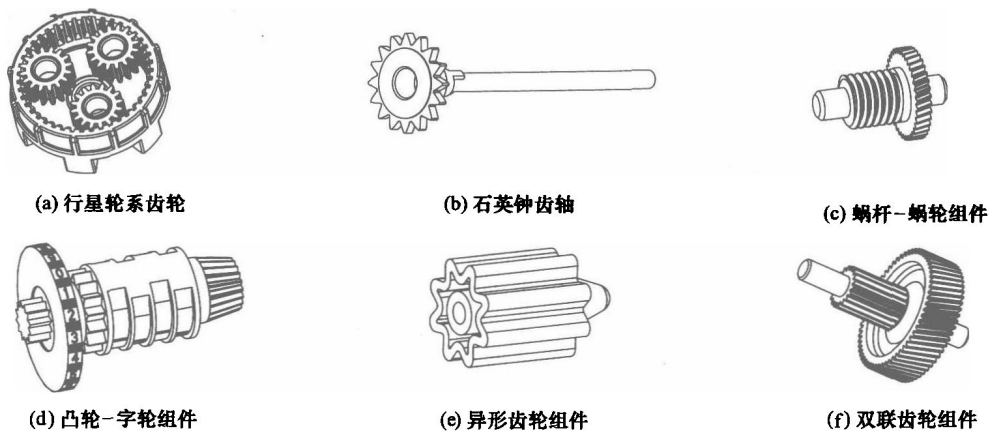


图 0-1 几种结构复杂的塑料齿轮组件

塑料齿轮通常都采用渐开线齿形制，因为这种渐开线齿轮能容纳齿轮传动装置所固有的中心距误差。而采用非渐开线齿形制，由于其中中心距误差对啮合质量的敏感性大，因此不太适应于塑料齿轮轮系。但也有例外，如全塑手表和高档石英闹钟机芯，主要从能耗和传动比上考虑，在走时传动轮系中仍采用传统的圆弧齿形制（俗称摆线或钟表齿形）。这种圆弧齿形对机芯上、中、下夹板轮系中心距的精度要求较高，由于采用收缩率小和尺寸稳定性较好

的 ABS 塑料,能基本满足这类齿形制轮系的传动要求。电动牙刷和化装用描笔中的齿轴-平面齿轮交错轴传动轮系则是另一个例外,其中平面齿轮是一种与渐开线圆柱齿轮相共轭而生成的非渐开线齿廓的特殊齿面。

《塑料齿轮齿形尺寸》美国国家标准 (ANSI/AGMA 1006—A97 米制单位版),为塑料渐开线齿轮设计推出的一种新版本的基本齿条 AGMA PT。此基本齿条的最大特点是齿根采用全圆弧,可以在塑料齿轮轮系设计的许多应用场合中优先选用。该标准阐明了采用基本齿条展成渐开线齿廓的一般概念,包括任何以齿轮齿厚和少量几个数据,推算出圆柱直齿和斜齿齿轮尺寸的说明,并附有公式和示范计算。所有公式和计算均采用 ISO 标准所规定的符号和公制单位。还编写有多份附录,详细介绍了所推荐的几种试验性基本齿条参数。

在现代模具制造业中,模塑直齿轮型腔可采用 EDM 电火花线切割成型工艺加工,其原理是采用一根通电的金属丝,按事先编制的程序进行切割成型。这种电火花线切割成型方法,除了要求详尽了解齿轮渐开线齿廓与齿根的准确形状外,再没有其他要求。由这种线切割还催生出采用基本齿条按范成原理来确定轮齿的几何尺寸和齿根形状,而是通过与一母齿轮的无侧隙范成啮合来生成配对齿轮的共轭齿廓,并确定其齿轮的几何尺寸。因此,这种现代制模工艺也进一步更新了传动齿轮轮系的设计理念。设计者可以不再受基本齿条概念的约束,通过 CAD 二次开发软件对齿轮轮系进行优化设计与校核。这也正是美国 ANSI/AGMA 1006—A97 标准附录 F,所提出的一种不采用传统的基本齿条和模数等参数,来确定齿轮齿廓及其几何参数新方法的实践依据。

(3) 塑料齿轮用材料 塑料齿轮按材料分类,可分为热固性和热塑性两大类。热固性塑料主要用于模数大、强度要求高和精度低的动力传动用齿轮;热塑性塑料则广泛应用于功率较小的传动齿轮。目前,热塑性塑料齿轮模数较小 ($m \leq 2\text{mm}$)。本书将重点讨论热塑性塑料齿轮的设计与应用。

聚甲醛 (POM) 作为一种最常用、最重要的塑料齿轮材料,已有 40 余年的历史。由于聚甲醛吸湿性特小,可保证齿轮长时间的尺寸稳定性和在较宽广温度范围内的抗疲劳、耐腐蚀等的优良特性和一定的自润滑性能,一直成为塑料齿轮的首选工程塑料。

尼龙 (PA6、PA66 等) 具有良好的坚韧性、耐磨损磨耗等优点,是另一种最常用的齿轮材料。但尼龙具有较强的吸湿性,会引起了塑件性能和尺寸发生变化。因此,尼龙不适宜精密传动齿轮。

聚对苯二酐对苯二胺 (PPA) 具有高热变形稳定性,可以在高的宽广温度范围内和高湿度环境中保持其优越的机械强度、硬度、耐疲劳性及抗蠕变性能。可以在某些 PA6、PA66 齿轮所无法承受的高温、高湿条件下,仍拥有正常工作的能力。

聚对苯二甲酸丁二酯 (PBT) 可模塑出表面非常光滑的齿轮,未经填充改性塑件的最高工作温度可达 150°C ,玻璃纤维增强后的产品工作温度可达 170°C 。它的传动性能良好,也被经常应用于齿轮结构件中。

聚碳酸酯 (PC) 具有优良的抗冲击和耐候性、硬度高、收缩率小和尺寸稳定等优点。但聚碳酸酯的自润滑性能、耐化学性能 (可溶解于丙酮等溶剂中) 和耐疲劳性能较差。这种材料无色透明,易于着色,塑件美观,在精密仪器仪表齿轮传动中,仍多有应用。

液晶聚合物 (LCP) 早已成功应用于注塑模数特小的精密塑料齿轮。这种齿轮具有尺寸稳定性好、高抗化学性能和低成型收缩等特点。该材料已成功用来模塑微型手表塑料齿轮。

丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS) 和低塑性弹性体 (LDPE) 材料通常不能满足塑料齿轮的润滑性能、耐疲劳性能、耐热与抗蠕变、抗化学腐蚀等性能要求,但 ABS 也常用于各种低档玩具等传动机构中。

热塑性弹性体模塑齿轮柔韧性更好,能够很好地吸收传动所产生的冲击负荷,使齿轮噪

声降低、运行平稳。常用共聚酯类的热塑性弹性体模塑低动力高速传动齿轮,这种齿轮在运行时即使出现一些轮齿变形,同时也能够降低运行噪声。

聚苯硫醚(PPS)具有高硬度、尺寸稳定性、耐疲劳和耐化学性能,其工作温度可高达 200°C 。聚苯硫醚齿轮的应用正扩展到汽车及其工作条件要求十分苛刻的齿轮传动领域中。

聚醚醚酮(PEEK 450G)已成功应用于负载较大的动力传动用齿轮中。这种材料具有耐高温、高的综合力学性能、低啮合噪声、耐磨损和耐化学腐蚀等特性,是当前一种顶级的高性能热塑性材料。但由于材料的产能有限,材料价格昂贵等因素,限制了广泛使用。

在汽车工业用齿轮的驱动下,随着对齿轮所传输载荷的增大,降低传动噪声等要求,对材料的选用尤为重要。当对啮合噪声的要求比传递载荷更重要时,多选用未填充材料。反之,应首选增强改性材料。

(4) 注塑工艺与设备 20世纪80年代以前,国内的注塑机十分简陋,多为原上海文教15T、30T柱塞式液压立式注塑机。这类注塑机,多采用一模一腔模具注射齿轮,齿轮尺寸的一致较好。有时也采用一模二腔模具,但很少采用一模四腔模具注射齿轮。到20世纪90年代,以震德、东华、柳塑和德马格-海天等合资企业生产的电脑控制的液压注塑机系列占领了国内注塑机的主要市场。近十年来,几乎所有国外知名品牌的注塑机生产厂家,都已登陆中国市场。这种采用全液压注塑机模塑齿轮,多为一模四腔、八腔或十二腔。有资料介绍,某种德国齿轮注射模多达一模32腔。模具型腔越多生产效率越高,但模塑齿轮的尺寸一致性越差,在生产中模具的故障率较高,对精密齿轮的注塑不适合。

一些发达国家从20世纪80~90年代开始致力于精密注塑工艺与设备的研发,一种桌面台式全自动微型注塑机注塑量可小到 $0.001\sim 0.1\text{g}$,一台电脑可以同时控制十几台机床。这种注塑机采用一模一腔模具,特别适应于精度要求高的微型齿轮和塑件的注塑。采用多台微型塑机生产的塑料齿轮可以避免发生混批,即使个别机台的产品出了质量问题,也不会将不良品混入其他机台生产的合格品内。西班牙Cosmold、英国Butler Designs和日本Sumitomo都先后开发出这类微型塑机。瑞士Intron Engineering开发的微型塑机,由于注射模采用热流道或热嘴(没有主流道、分流道和浇口),因而可实现将熔料直接注入模腔。这一点对于特别细小的微型手表齿轮和塑件非常重要,因为主、分流道和浇口的总重量往往要比产品自身重量大许多倍。这种塑机的注射方式也与众不同,先通过塑化螺杆将熔料推过柱塞送入注射室,室中设有止回阀可阻止熔料回流至螺杆。接着由柱塞将熔料注入模腔。这种配置能更好地控制注射过程,对保证塑件质量十分有利。

随着微、纳米科学技术的进步,高科技产品不断向微型化方向发展;特征尺寸为微米级的微机电系统技术(MBMS)受到了高科技产业的高度重视,从而促进了始于20世纪80年代的微型注塑成型技术的快速发展,开创了精密微细结构零件低成本、大批量生产的新途径,成为当今世界先进制造技术的研究热点之一。《日刊工业新闻》在几年前报道:日本已研制出直径小于 0.15mm 、模数为 0.02mm 的世界上最小的钟表齿轮。齿轮材料为直径 $\phi 80\sim 100\text{nm}$ 的碳纤维(VGCF)与树脂(PA12)混合而成的复合材料。与现有齿轮材料相比,耐磨性能提高10倍,滑动性提高5倍;防带电和热传导性能也良好。

1983,年日本日精研制出世界上首台全电动注塑机。在一段时期内,由于价格和技术等因素,限制了全电动注塑机的应用推广。近年来,随着伺服电机技术的日趋成熟和价格下降,以及环保和节能的需求,为全电动式注塑机的应用与发展注入了新的活力。与传统液压注塑机相比,全电动注塑机在动力驱动系统上摒弃了液压油泵马达产生的液压驱动系统,而是采用伺服电机驱动。传动机构采用滚珠丝杆和同步皮带(或不采用皮带),大幅度提高了注塑机动力系统的控制精度,解决了液压油对环境产生的污染问题,驱动机构所产生的噪声也随之下降。当前,日本住友、制钢所、法拉克、东芝等都已将全电动注塑机推向市场。



全电动注塑机具有节能、环保、低噪声、计量准确等优点，但价格较高，使用寿命也不及液压注塑机。在需要极长时间闭模和极高锁模压力的加工领域，仍需采用液压注塑机；这是当前液压注塑机或者全蓄压力注塑机仍保有的基本优势。在国内，一些单位也已先后开发和批量生产国产全电动注塑机。

众所周知，塑料齿轮的精密不高，其主要原因是齿轮注塑成型收缩所致。近几年国内外出现了一种注塑机二次压缩成型新工艺，即当一次注塑成型至注射、保压结束后，在冷却开始的同时，再通过顶出机构开始向前移动，推动动模芯到所设定的位置后保持一定时间，实现产品的再次压缩。实施二次压缩成型的塑料齿轮，其齿轮的径向综合误差精度可达 JG-MA 0 级。

精密塑料齿轮的注塑工艺，要求注射机必须配备有模温机。对含水量要求严的塑料，还需配备有除湿烘干机等多种周边设备。

(5) 齿轮注塑模具 塑料齿轮注射模最核心零组件是齿轮型腔，型腔结构取决于齿廓的成型加工工艺。齿轮型腔（或型芯）的成型加工装备和工艺，已经成为一个国家现代模具制造业（简称现代模业）水平的主要标志。齿轮型腔齿廓，可以采用电火花成型机加工。如果采用线切割加工，其齿轮型腔的结构比较复杂。为了简化型腔结构和提高型腔精度，最好采用高精度 EDM 成型机加工。对于 $m \leq 0.15\text{mm}$ 的齿轮型腔，仍采用 EDM 成型加工就显得比较困难，因为电极齿轮的滚切加工需要有专用滚刀，电极的装卡以及相对型腔的位置度也较难保证。特别是全塑手表中的某些齿轮模数特小（ $m \leq 0.05\text{mm}$ ），模具型腔需要采用线径 $\phi \leq 0.03\text{mm}$ 的慢走丝机进行切割加工。至于石英闹钟机芯 $m \geq 0.15\text{mm}$ 的塑料齿轮，可采用精密 EDM 成型机加工型腔。塑料斜齿轮型腔应采用 EDM 成型工艺加工，只有当与蜗杆啮合的斜齿轮螺旋角 $\beta \leq 6^\circ$ 时，型腔齿廓才可以采用具备锥度切割功能的线切割加工。

塑料蜗杆型腔是一种加工难度更大的型腔。国内外，仍有不少企业采用电镍铸工艺制造蜗杆型腔，这种工艺的制造成本较低，但电镍铸周期较长。蜗杆型腔最宜采用带 Z 轴数控的精密 EDM 成型机加工。由于采用整体型腔注塑蜗杆的脱模时间较长，因此，出现了将蜗杆型腔设计制造成双滑块或四滑块结构。这种蜗杆注射模型腔的组合精度要求高，但注塑周期缩短，可应用于精度要求不太高的蜗杆模塑成型。

型腔齿形参数设计是塑料齿轮和塑料蜗杆注射模设计制造中的关键环节，特别是采用 EDM 成型加工所采用的电极齿轮或蜗杆齿形参数设计是一项细致的工作。由于各种塑料特性在塑胶流动方向与垂直方向上的收缩率是不相同的，其收缩率的大小还与产品的几何形状和结构有关。总之，齿轮型腔收缩率选取是一项相当困难的工作，至今仍未找到一种可靠、统一的计算模式，唯一可以参考的仍是类似零件的经验积累。此外，电极齿形参数设计，还要考虑粗、中、精加工放电间隙，以及各段摇动量大小的分配和尽可能缩短电极进入、退出时间等因素。任何一种精密齿轮和蜗杆型腔的设计制造很难做到一次成功，往往需要两次以上的型腔和电极齿形参数的修正，通过工艺试验验证后方可确定。如果精密 EDM 成型机具备三向摇动功能，采用电极三向摇动加工的蜗杆型腔的螺纹牙面将获得更佳的质量。

(6) 齿轮检测及产品形式试验 与金属齿轮比较，模塑齿轮有两大特点：一是齿轮模数较小，二是齿轮的精度不高，多为 GB 10227—1988.9~11 级精度齿轮。即使是精密塑料齿轮也仅为 8 级左右，这是注塑工艺和材料特性所决定的。但是塑料齿轮自身的弹性模量较小，又有一定的可塑性；因此，其齿轮齿形、齿向误差对轮系的啮合噪声的敏感性要比金属齿轮低。正是这一特性，使得对动力型塑料齿轮的精度等级的选定可比钢制齿轮降低 1~2 级，仍可获得同等的啮合传动品质与噪声效果。

塑料齿轮在检测方法和手段上与金属齿轮并没有多大区别，对于 $m \geq 0.5\text{mm}$ 的塑料齿轮，如果在齿轮检测仪上安装方便，可进行直接测量。检测仪器会将测量所获得的信息经过