

论文题目：高硬齿面双圆弧齿轮滚刀的研究

专 业：机械设计及其理论

研 究 生：李志胜（签名） 李志胜

指 导 教 师：刘世军（签名） 刘世军

 张廷健（签名） 张廷健

摘 要

随着齿轮技术，特别是硬齿面齿轮技术的发展，双圆弧齿轮也必须向中硬齿面和硬齿面齿轮发展。齿面渗碳淬火工艺是提高齿面硬度、提高承载能力最有效的方法，是渐开线齿轮非常成熟的工艺，但因双圆弧齿轮廓形复杂，硬化后缺少成本较低的精加工手段，所以一直未采用这种工艺。刮削方法是克服上面难题的成本低、质量好、效率高的手段，适合我国国情。但是硬质合金刮削滚刀的研制难度大是推广刮齿工艺的瓶颈，是当前迫切需要解决的问题。很好地解决该问题将进一步提高双圆弧齿轮传动的承载能力和可靠性，扩大其在工业中的应用范围，对双圆弧齿轮传动技术的发展具有积极的意义。

本论文正是基于上述情况开展对硬质合金刮削滚刀的研究的。本论文的主要工作和创新点如下：

1) 根据空间双圆弧齿轮啮合原理，推出了法面双圆弧齿轮滚刀的前刀面方程、滚刀铲背曲面方程、铲磨砂轮轴向廓形方程。

2) 首次推出了双圆弧齿轮滚刀重磨后基本蜗杆轴向廓形方程，并分析了重磨后滚刀基本蜗杆轴向廓形的偏差。分析结果表明：用本文方法设计的直槽刮削滚刀在重磨角小于 6° 时都是精确的。

3) 利用功能强大的 Visual Basic 6.0 在 Solidworks2003 中开发了可以计算和绘制任意基本齿廓的双圆弧齿轮滚刀前刀面廓形和铲磨砂轮轴向廓形的软件。该软件界面直观，操作简单，利用该软件可以直接制作检测任意参数滚刀的前刀面廓形和砂轮轴向廓形的样板。

4) 根据双圆弧齿轮滚刀的铲背曲线方程和滚刀结构参数推导出了铲磨滚刀时发生干涉的铲磨砂轮最小外径 $D_{sg\min}$ 和齿顶铲削超量 Δ 的计算公式，并

根据算例分析了滚刀结构参数变化时对 $D_{g\min}$ 及齿顶后角的影响。

5) 设计并制造了硬质合金双圆弧齿轮刮削滚刀和铲磨砂轮。对 $m_n = 6mm$ 的刮削滚刀和淬火双圆弧齿轮进行了铲磨和刮削试验, 试验验证了理论分析的正确性。

关键词: 双圆弧齿轮 硬质合金 硬齿面 刮削滚刀 铲磨砂轮 轴向廓形
论文类型: 应用基础

本文研究得到了科学技术部科研院所技术开发研究专项资金项目“新型高参数双圆弧齿轮箱关键技术研究”(NCSTE-2002-JKZX-108)的资助。

Subject : Study on hob of High Case-hardened Double Circular-arc Gear

Specialty : Machinery Design and Theory

Name : Li Zhisheng(signature) Li Zhisheng

Directed By : Liu Shijun(signature) Liu Shijun

Zhang Tingjian(signature) Zhang Tingjian

ABSTRACT

According to the development of case-hardened gear technology, double circular-arc gear has to be the case-hardened gear. Carburizing and quenching is the most effective technique of improving the tooth flank rigidity and load capacity and is a very sophisticated technique that is suitable for involute gears. But double circular-arc gear does not adopt this technique all along because of its complicated tooth profile and without a finishing method of lower cost after it was carburized and quenched. Skiving is a way of low cost, good quality and high efficiency to overcome the above problem. It is difficult to popularize skiving technology due to the hard study on carbide skiving hob. Overcoming the difficulty well will enhance the load capacity and reliability of double circular-arc gear and enlarge its applying field and has active significance for the development of double circular-arc gear transmission.

Based on the cases above, the dissertation studies the carbide skiving hob. The main works and the creative ideas are summarized as follows:

1. According to the double circular-arc gear space mesh theory, the equation of rake face, the equation of relief flank of double circular-arc gear hob and the equation of the axial profile of the relief grinding wheel are deduced.
2. After the rake face is reground, the equation of the tooth profile of double circular-arc gear basic worm is deduced and the error of double circular-arc gear

basic worm is computed. The result indicates that when the regrinding angle is smaller than 6 degree the straight flute skiving hob which is designed with the method in the dissertation is qualified.

3. Based on the powerful Visual Basic 6.0 and Solidworks2003, a software which can draw rake face tooth profile of double circular-arc gear hob of any basic rack and the axial profile of the relief grinding wheel is developed. The interface of the software is intuitional and operation is simple. With the software, a template that can detect the rake face tooth profile of double circular-arc gear hob and the axial-section profile of the relief grinding wheel can be made.

4. According to the relief curve and structure parameter of double circular-arc hob, when interference happens the smallest grinding wheel diameter— $D_{sg\ min}$ is deduced. The effect of hob structure parameter on $D_{sg\ min}$ is analyzed.

5. The carbide skiving hob and relief grinding wheel were designed and produced. The experiment of carburized and quenched double circular-arc gear of $m_n = 6mm$ was done and the correctness of theoretic analysis was proved.

Key Words: Double Circular-arc Gear Carbide Case-hardened Skiving
Hob Relief Grinding Wheel Axial Profile

Dissertation Type: Application Fundamentals

This dissertation is supported by the Special Plan of Scientific Academe of the Ministry of Science and Technology of China “Study on the Key Technology of the New Style High Parameter Double-circular-arc Gear Box”(The item number is NCSTE-2002-JKZX-108).

符 号 清 单

m_n	滚刀法向模数	e_a	凸齿齿廓圆心移距量
β	滚刀分度圆上的螺旋角	e_f	凹齿齿廓圆心移距量
λ	滚刀分度圆上的升角	l_a	凸齿齿廓圆心偏移量
d	滚刀分度圆直径	l_f	凹齿齿廓圆心偏移量
d_a	滚刀外径	δ_1	凸齿工艺角
A	滚刀轴与砂轮轴距离	δ_2	凹齿工艺角
p	滚刀螺旋参数	h_k	接触到节线距离
γ	滚刀分度圆前角	s_{ak}	凸齿接触点齿厚
ε	滚刀重磨角	w_{fk}	凹齿接触点齿槽宽
K	滚刀铲背量	s_{fk}	凹齿接触点齿厚
Z_k	滚刀容屑槽数	r_{gf}	齿根圆弧半径
α_0	基本齿廓压力角	r_j	连接圆弧半径
h	基本齿廓全齿高	h_{ja}	凸齿连接点高
h_a	基本齿廓齿顶高	h_{jf}	凹齿连接点
h_f	基本齿廓齿根高		
j	基本齿廓侧隙		
ρ_a	凸齿齿廓圆弧半径		
ρ_f	凹齿齿廓圆弧半径		

插图清单

图 2-1	双圆弧齿轮基本齿廓	10
图 2-2	滚刀前刀面示意图	12
图 2-3	径向铲磨时滚刀与铲磨砂轮相对位置关系图	13
图 2-4	滚刀重磨示意图	21
图 2-5	G_1 点与 G_{1b} 点的相对位置示意图	23
图 2-6	截形偏差	23
图 2-7	直槽零前角滚刀偏差	24
图 2-8	直槽负前角滚刀偏差	24
图 2-9	头数不同直槽负前角滚刀偏差	25
图 2-10	分度圆半径不同的滚刀轴向截形偏差	25
图 3-1	双圆弧齿轮基本齿廓	27
图 3-2	计算滚刀轴向廓形主窗体	30
图 3-3	读入数据后窗体	31
图 3-4	不同前角的双圆弧齿轮滚刀的前刀面廓形	33
图 3-5	滚刀三维造型图	33
图 3-6	计算砂轮轴向廓形主窗体	35
图 3-7	砂轮轴向廓形	35
图 3-8	滚刀齿顶前角不同时的砂轮轴向廓形	36
图 3-9	砂轮三维造型	36
图 4-1	铲磨干涉校验解析法的计算原理示意图	39
图 4-2	I 型齿背图	40
图 4-3	基本参数改变后 $D_{sg\min}$ 的变化情况	46
图 4-4	基本参数改变后 α_b 的变化情况	47
图 5-1	刀体端剖面牙型	51
图 5-2	刮前滚刀法向齿形	55
图 5-3	负前角滚刀切削齿轮	55
图 5-4	焊接结构	56
图 5-5	粘结结构	56
图 5-6	焊接刀片形状	57

表格清单

表 3-1	GB12759-1991 双圆弧圆柱齿轮基本齿廓参数	28
表 4-1	m=8 的双圆弧齿轮滚刀结构参数及铲背量	45
表 4-2	m=10 的双圆弧齿轮滚刀结构参数及铲背量	45
表 4-3	m=8 的被铲磨双圆弧齿轮滚刀校验计算结果	45
表 4-4	m=10 的被铲磨双圆弧齿轮滚刀校验计算结果	45
表 5-1	硬质合金滚刀主要结构参数	52
表 5-2	刮削试验件的参数	59
表 5-3	m=6 硬质合金双圆弧齿轮刮削滚刀制造精度	59

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得郑州机械研究所或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：李志胜

签字日期：2005年7月26日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解郑州机械研究所有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权郑州机械研究所可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

学位论文作者签名：李志胜

导师签名：张世华

签字日期：2005年7月26日

签字日期：2005年7月26日

第一章 绪论

1.1 圆弧齿轮简介

1.1.1 圆弧齿轮发展由来及简史

齿轮传动是现代机械传动中应用最广泛的一种传动形式。经过二百多年的实践，渐开线齿轮由于中心距的可分性及制造、测量、安装方便等许多优点，获得了广泛的应用和发展。直到如今，它仍是最主要的齿轮传动方式。但渐开线齿轮传动也存在着下述缺点：

(1) 渐开线齿轮两轮齿在节点处啮合时，两齿面之间的相对运动是纯滚动。但啮合点离节点越远，则两啮合面之间的滑动速度也越大。这种滑动对于齿面的磨损、发热、传动平稳性和效率以及使用寿命都很不利。因此，渐开线齿轮滑动系数的大小要力求降低。

(2) 渐开线外啮合齿轮传动就是凸齿对凸齿的传动。从接触强度来看，由于当量曲率半径较小，接触应力较大，承载能力受到限制。

随着生产和科学技术的发展，对高速、重载、大功率的齿轮传动装置，提出了更高的要求。圆弧齿轮就是适应生产和技术发展的需要而产生的。圆弧齿轮是点啮合制齿轮传动，它将渐开线齿轮轮齿的凸面与凸面相接触，改变成凸面与凹面相啮合，增大了当量曲率半径，提高了接触强度。

早在1907年英国人就提出了圆弧齿形的设想。1922年出现了凹凸齿啮合的VBB齿轮，但由于弯曲强度较弱易于折断而未得到应用。1926年美国格利森(Gleason)公司的瑞典人威尔德哈泊(E·Wildhaber)提出的法面为圆弧齿廓的斜齿轮，并获得专利，但也未得到应用。1956年前苏联人诺维柯夫(М·Л·Новиков)提出了端面为圆弧齿廓的圆弧齿轮并对该齿轮作了系统的理论分析和强度计算，为便于制造，建议采用法面为圆弧齿廓。其齿形特点是凸齿齿廓的圆心位于齿条形刀具的节线上，啮合时位于节点上。凹齿齿廓的半径稍大于凸齿齿廓半径一个 $\Delta\rho$ 值。这种齿制在前苏联的工业上得到广泛应用，并制订了相应的标准，如ГОСТ 15032—76双圆弧齿形标准。我国现在制订的单双圆弧齿轮齿形标准都属于这种齿制。可以说威尔德哈泊和诺维柯夫两人提出的齿形基本是一致的。为此，1960年在德国埃森(Essen)召开的国际齿轮会议上把点啮合的圆弧齿轮命名为Wildhaber—Novikov齿轮，

简称 W—N 齿轮。除前苏联外，东欧各国、日本、印度、埃及、英国等都在研究圆弧齿轮，其中日本已制定出齿形和减速器系列标准，并有专业生产厂家。时至今日，圆弧齿轮的发展，从齿形构思到广泛应用，整整跨越了一个世纪，但真正的发展应用还是五十年代末到现在。

1.1.2 圆弧齿轮传动的特点

针对渐开线齿轮传动，圆弧齿轮传动具有以下特点：

- (1) 圆弧齿轮传动有很大的当量曲率半径，因此有很高的接触强度；
- (2) 非硬齿面的双圆弧齿轮，无论是按弯曲强度或按表面接触强度所计算的承载能力，都高于相同材质、相同工艺和相同参数的渐开线齿轮；
- (3) 圆弧齿轮在理论上处于点接触状态，满载工作前应进行跑合；
- (4) 啮合过程中，两啮合齿面沿齿线方向相互滚动，接触点沿齿面间的迁移速度很大，有利于在齿面间建立油膜，因此摩擦损耗小，效率高。
- (5) 圆弧齿轮齿面间各点的相对滑动速度相同，齿面磨损小且均匀，具有良好的跑合性。正常磨损后，齿面的粗糙度会降低，对传动质量有所改善；
- (6) 在圆弧齿轮传动中，中心距及切齿深度偏差引起齿高方向轮齿接触位置变化，对承载能力影响较大，因此要严格控制中心距及切齿深度的公差要求。
- (7) 齿向偏差或轴向齿距偏差，对于渐开线齿轮来说，主要影响接触精度。但对于圆弧齿轮，其作用犹如渐开线齿轮的基节偏差，会导致啮入和啮出冲击。齿面波度、走刀刀痕波纹和表面粗糙度也是影响传动工作平稳性的重要因素，它们是引起噪声中的高频成分的主要来源。
- (8) 圆弧齿轮传动中，啮合点沿轴向移动，初始接触点在齿端，齿端是薄弱环节。齿端修形有利于防止齿端崩角，减小啮入冲击，降低振动和噪声，提高传动平稳性；
- (9) 圆弧齿轮制造工艺也在不断完善，相继开发了中硬齿面精滚齿、齿面离子氮化和珩齿精整工艺。渗碳淬火硬齿面双圆弧齿轮制造技术在工程中的应用越来越广泛，齿部最终加工工序是刮齿，加工效率高，成本低，应用范围广。

1.2 圆弧齿轮在我国的发展和现状

我国从 1958 年开始研究和应用圆弧齿轮。1959 年 11 月和 1962 年 12 月分别在洛阳和上海,由原一机部主持召开了两次全国圆弧齿轮技术会议,组织研究和推广应用圆弧齿轮传动。1967 年由机械科学研究院负责组织国内工厂、高等院校先后制定出 JB929-67(圆弧齿轮滚刀法面齿形)标准和 D14120 圆弧圆柱齿轮减速器系列,以及高速圆弧齿轮增速器系列(草案)。时隔不到十年,由郑州机械研究所负责于 1975 年制定了 JB1585-75 和 JB1586-75 圆弧齿轮减速器标准,使我国圆弧齿轮走上了标准化系列化生产的轨道。

在 70 年代以前,我国主要研究应用单圆弧齿轮。但是单圆弧齿轮有两个缺陷:一是齿形限制,齿根弯曲强度略显不足;二是加工一对相啮合的齿轮需要两把滚刀。为了进一步提高圆弧齿轮的弯曲强度,从 1967 年我国开始研究双圆弧齿轮。由于双圆弧齿轮是由两段工作圆弧组成,节圆以上为凸弧,节圆以内为凹弧,成倍地增加了瞬时啮合点数,降低了啮合点上的载荷,再由于齿根厚度的增加,大大提高了轮齿的弯曲强度。与同材料、同工艺和同参数的单圆弧齿轮相比,双圆弧齿轮的承载能力提高将近 40%,是一种很有发展前途的传动形式。从 80 年代后,我国就开始重点发展双圆弧齿轮。

到目前为止,圆弧齿轮在我国的研究和应用主要取得以下几方面成绩:

1. 在基础理论和设计计算方面

先后进行了圆弧齿轮(法面圆弧)点啮合理论、承载能力计算方法、轮齿受载变形及修形计算、弹流润滑分析、珩齿工艺机理、滚刀齿形设计与计算、精度检测与测量尺寸计算、计算机辅助设计与工艺等项研究。

2. 在圆弧齿轮的标准方面

在大量的试验和工业应用的基础上,制定了一整套圆弧齿轮的国家标准,它们是:

GB1840—1989 圆弧圆柱齿轮模数、GB12759—1991 双圆弧圆柱齿轮基本齿廓、GB/T13799—1992 双圆弧圆柱齿轮承载能力计算方法、GB/T14348.1—1993 双圆弧齿轮滚刀型式和尺寸、GB/T14348.2—1993 双圆弧齿轮滚刀技术条件、GB/T15752—1995 双圆弧圆柱齿轮基本术语、GB/T15753—1995 圆弧圆柱齿轮精度。

3. 在加工工艺方面

1) 热加工工艺

主要是材料的调质工艺。80年代前以软齿面为主，齿面硬度不大于300HBS。80年代后开始发展中硬齿面调质工艺，齿面硬度达350HBS，并且逐渐替代了软齿面调质工艺。

齿面离子渗氮工艺，其特点是渗后轮齿变形小。离子渗氮分浅层（0.5mm左右）渗氮和深层（大于0.7mm）渗氮两种，多用于高速重载齿轮传动（为避免“薄壳效应”，渗氮齿轮的基体调质硬度要求大于300HBS）。齿面碳氮共渗工艺，最好是离子碳氮共渗，其特点是变形小，可有效地提高齿面硬度、提高承载能力。

齿面渗碳淬火工艺是提高齿面硬度、提高承载能力最有效的方法，是渐开线齿轮非常成熟的工艺，但因双圆弧齿轮廓形复杂，硬化后缺少成本较低的精加工手段，所以一直未采用这种工艺。后来由郑州机械研究所负责，与中信重机公司、太原理工大学合作共同完成的机械工业技术发展基金项目《渗碳硬化双圆弧齿轮超硬加工技术研究》，经过三年多的努力工作，解决了该课题进行过程中的关键技术，研究出了硬齿面双圆弧齿轮刮削加工的成套制造技术。

2) 冷加工工艺

主要指制齿工艺和齿面精整工艺。

最常用的制齿工艺是滚齿。而常用的齿端修形方法，无论是径向进刀法、切向窜刀法和变挂轮法，也都是用滚齿法修形。

齿面精整加工工艺，主要指蜗杆状软砂轮珩齿工艺。这一工艺的特点主要是降低齿面的粗糙度，可达 $R_a = 0.32\mu\text{m}$ ，对齿向精度有所改善，可提高一级左右，主要用于高速齿轮传动，是一项成熟工艺。为了改善齿面接触状况，可采用粥状金刚砂研磨膏进行研齿（磨齿），效果很好。

4. 在滚切刀具方面

目前用得最多的是高速钢滚刀。为了滚切中硬齿面齿轮发展了钴高速钢滚刀，有M35和M42两种牌号。这是美国钢铁学会的牌号。其对应关系为：高速钢W18Cr4V（美国牌号T1），钴高速钢W6Mo5Cr4V2Co5（美国牌号M35），W2Mo9Cr4V1Co8（美国牌号M42），M42为高碳钴高速钢。M35与M42滚刀的价格与高速钢滚刀比是成倍的关系，但性能好。

滚切中硬齿面齿轮，最经济的办法是采用TiN涂层刀具，即在高速钢滚刀刀刃表面用PVD（物理气相沉积）法涂上一层TiN涂层，可提高刃面硬度

到 HV2000 以上（相当于 80~85HRC），大大提高了滚刀的切削性能。涂层刀具的使用寿命比原刀具一般可提高两倍左右。

镶片式和焊接式双圆弧齿轮硬质合金刮削滚刀的研制成功，标志着应用渗碳淬火硬齿面双圆弧齿轮时代的开始，在圆弧齿轮发展史上具有重要的意义。

5. 圆弧齿轮在我国的应用

圆弧齿轮在我国是边研究边工业产业化应用，即使在没有统一标准的情况下，应用也十分广泛。主要应用在冶金轧钢、矿山运输、建材水泥、交通运输、轻工榨糖、发电设备、采油炼油、化工化纤等行业。在低速传动中，应用的最大模数是 30mm 的双圆弧齿轮，功率达到 9000kW；在高速传动中，最高线速度达 120m/s，功率为 3000kW，其性能与磨齿的渐开线齿轮相当。

综上所述，从基础理论到实际应用，圆弧齿轮在我国已发展成为一种独立完整的齿轮传动体系。

1.3 硬齿面双圆弧齿轮滚刀的研究现状

由于本论文研究的对象为高硬齿面双圆弧齿轮滚刀，所以下面重点介绍一下有关硬齿面双圆弧齿轮加工和滚刀的研究现状。

由于双圆弧齿轮和相同材质、相同工艺和相同参数的渐开线齿轮相比有许多优势，所以从 70 年代中后期起，国内许多单位和学者对双圆弧齿轮作了大量的研究工作，得出了很多具有实用价值的结果。其中对中硬齿面双圆弧齿轮研究工作的主要内容如下：

1. 滚刀齿形精确计算

沈阳大学的吴洁等^[14]通过对圆弧齿轮达不到理想跑合状态的分析，发现了圆弧齿轮的制造齿形误差是影响其跑合性能的因素之一，要消除此误差在设计圆弧齿轮滚刀时必须运用空间啮合原理，从建立基本齿条与滚刀基本蜗杆的啮合入手，通过解析计算求出滚刀基本蜗杆齿面方程。用此滚刀加工圆弧齿轮，可消除制造齿形误差，提高齿轮的跑合性能，为工程实际提供理论依据。

重庆大学的陈远志等^[15]以部标 JB2940-81 所规定的基准齿形为双圆弧齿轮的法面齿形，根据啮合原理，推导出双圆弧齿轮滚刀的齿面方程式，在此基础上利用 C 语言编程对双圆弧齿轮滚刀的齿形进行精确计算。

太原理工大学的段德荣^[16]通过对磨前双圆弧齿轮基本齿廓的讨论，根据包

络原理提出磨前双圆弧齿轮滚刀前刀面齿形的计算方法，并给出实例进行验证。

2. 硬齿面双圆弧齿轮加工技术

在 80 年代中期，郑州机械研究所研究出一套中硬齿面精滚齿、齿面离子氮化和齿面珩齿精整加工技术，使高速双圆弧齿轮的承载能力和传动品质达到同级渗碳淬火磨齿渐开线齿轮的水平。

郑州机械研究所、太原理工大学和中信重型机械公司根据机械工业技术发展基金委员会于 1996 年设立的《渗碳硬化双圆弧齿轮超硬加工技术研究》一项基金课题，对渗碳淬火硬齿面双圆弧齿轮成套制造技术进行研究。经过三年多的努力工作，解决了该课题进行过程中的关键技术，研究出了硬齿面双圆弧齿轮刮削加工的成套制造技术。这项研究的成功进一步提高双圆弧齿轮传动的承载能力和可靠性，扩大其在工业中的应用范围，对双圆弧齿轮传动技术的发展具有积极的意义。

郑州机械研究所的陶冶，崔为民，陈渊，周明英等^[17]使用硬质合金刮削滚刀，应用正交试验法，对渗碳淬火双圆弧齿轮（齿面硬度 58HRC-62HRC）进行了刮削加工工艺试验研究。推荐了适用的刮削工艺规范。采用此规范加工的齿轮在工业现场应用良好。

郑州机械研究所的崔为民，姚兰等^[18]阐述了滚切中硬齿面高速双圆弧齿轮时进行精度控制应注意的几个环节，并简述了实际加工中的经验。

太原理工大学的秦旭平^[19]介绍了渗碳硬齿面双圆弧齿轮超硬加工技术。应用这项技术加工的硬齿面双圆弧齿轮，其承载能力与相同规格的硬齿面渐开线齿轮相当。

太原理工大学的秦旭平等^[20]对刮削加工的硬齿面双圆弧齿轮和磨削加工的硬齿面渐开线齿轮（两齿轮的材质和基本参数都相同）承载能力对比试验进行了全面叙述，并对试验结果进行了分析。试验表明，刮削硬齿面双圆弧齿轮在承载能力、传动平稳性和动态特性等方面能够满足对硬齿面齿轮传动的设计要求。经过跑合和一段时间的承载磨合运行，齿面接触会越来越好，其传动性能优于渐开线齿轮传动。

祁肃郎^[21]通过多年实践，对圆弧齿轮滚切加工过程进行了较深的探讨，提出了他的见解，并指出了实际与理论相矛盾的症结所在。

3. 滚刀精密铲磨方法

由于阿氏滚刀与双圆弧齿轮滚刀只是刀齿形状不同,而铲磨原理相同,研究阿氏齿轮滚刀铲磨方法的文献同样适用于研究圆弧齿轮滚刀的铲磨,所以有必要把国内一些关于阿氏齿轮滚刀铲磨方法的研究成果介绍一下。

大连理工大学的孙玉文,王晓明等^[22]应用齿轮滚刀的偏置构形原理,提出了齿轮滚刀齿侧面精密铲磨的一种新方法,并用算例验证了模型的可靠性,为制造高精度滚刀提供了可靠的理论依据。

东北大学杜立群等^[23]推导了渐开线蜗轮滚刀径向铲磨的齿侧面方程,提出了直线修正逼近砂轮廓形的数值计算方法,建立了砂轮廓形方程式。应用该方法计算了铲磨渐开线蜗轮滚刀在其各截面上的齿形误差。

西安交通大学的聂钢等^[24-26]提出了一种以解析方式确定铲齿成形刀具齿顶铲磨长度的新方法,可以明显提高刀具设计的精度、效率和经济性,有助于优化刀具设计和制造过程。此外,根据两种不同的齿背提出了齿顶铲磨长度的控制方法,即 I 型齿背可以通过改变齿顶铲削超量而任意变化,II 型齿背则只能通过修改铲齿凸轮廓形而变化。

4. 滚刀铲磨砂轮廓形计算方法

太原理工大学的韩振南等^[27]论述了硬齿面双圆弧齿轮滚刀的结构特点,从双圆弧齿轮滚刀的基本蜗杆齿面方程出发,利用啮合原理推导出具有直槽负前角的滚刀的前刀面齿形计算公式和铲背曲面方程;再利用铲背曲面和铲磨运动的关系求出铲磨滚刀的砂轮轴向截形,并给出了负前角双圆弧滚刀铲磨砂轮截面的具体算例。

中南大学刘鹤然^[28]提出了用普通圆柱砂轮磨削轴截面为曲线的金刚砂轮的加工原理和计算方法。

甘肃工业大学的姚运萍,陈惠贤^[29-30]论述了用计算机辅助设计的方法计算铲磨砂轮截形,用数控砂轮修形系统修整砂轮形状,这种方法满足了加工高精度铲齿成形铣刀的需要。

孙玉文,刘键^[31]在建立通用数学模型的基础上,以刀具齿形重磨精度为砂轮修形评价指标,对采用椭圆修形砂轮铲磨阿氏滚刀齿侧面的过程进行了成功的数值模拟,获得了具有工程应用价值的数值计算结果,并讨论了不同的砂轮修形误差曲线对滚刀重磨精度的影响。

5. 双圆弧硬质合金刮刀制造

中信重机公司的张邦栋等^[33]对硬齿面双圆弧齿轮刮前滚刀和硬质合金刮前滚刀的制造试验进行了较详细的研究,为我国制造渗碳淬火双圆弧齿轮作了有益的探索。还有中信重机公司的申明付等^[34]结合生产实践,介绍了硬质合金滚刀的设计与制造工艺,提出了滚刀各参数的选取原则。

1.4 论文研究背景及意义

由于双圆弧齿轮制造成本相对较低、承载能力高,使用寿命较长等优点,使得它在我国工业中的应用越来越广泛。随着现代工业的发展,对齿轮传动机构的要求是高速重载或低速重载、高寿命,小体积。提高齿面硬度是实现上述目标的有效途径。但是,渗碳淬火硬齿面双圆弧齿轮缺少成本较低的精加工手段。刮削方法是克服上面难题的有效方法之一,但是硬质合金刮削滚刀的研制难度大是推广刮齿工艺的瓶颈,是当前迫切需要解决的问题。到目前为止,国内对软齿面和中硬齿面双圆弧齿轮的研究和应用较多,而对高硬齿面渗碳双圆弧齿轮的研究和应用还是较少的,对渗碳淬火双圆弧齿轮刮削滚刀的研究也不多。国内对铲磨砂轮廓形的研究成果有不少^[22-32],但大多数都是对不很复杂的铣刀的铲磨砂轮或渐开线齿轮滚刀的铲磨砂轮的研究,对双圆弧滚刀的铲磨砂轮的研究甚少。

中硬齿面双圆弧齿轮滚刀采用零前角,刀具标准 GB/T14348.1-93 已经给出了滚刀轴向廓形精确坐标。铲磨砂轮采用这个标准中的滚刀轴向齿廓坐标所铲出的滚刀前刀面的齿廓误差已经能保证滚刀精度。对于高硬齿面双圆弧齿轮刮削滚刀而言,采用负前角后,在铲磨过程中不能采用投影仪检查滚刀前刀面齿廓。虽然可以计算出负前角滚刀的前刀面齿廓的坐标,但是砂轮轴向廓形采用这样的坐标能否保证铲磨出的滚刀前刀面的齿廓精度目前还是未知情况。用啮合原理推出的砂轮轴向廓形可以从理论上保证刮削滚刀前刀面齿廓的正确性,进而保证滚刀前刀面的精度。所以有必要从理论上对负前角双圆弧齿轮滚刀的铲磨砂轮轴向廓形进行深入研究,从而为负前角双圆弧齿轮滚刀铲磨砂轮的制造提供理论指导。

根据空间双圆弧齿轮啮合原理、双圆弧齿轮滚刀基本蜗杆齿面方程和铲磨时滚刀与铲磨砂轮的相对运动关系来求铲磨砂轮的轴向廓形,使重磨后的滚刀

5. 双圆弧硬质合金刮刀制造

中信重机公司的张邦栋等^[33]对硬齿面双圆弧齿轮刮前滚刀和硬质合金刮削滚刀的制造试验进行了较详细的研究,为我国制造渗碳淬火双圆弧齿轮作了有益的探索。还有中信重机公司的申明付等^[34]结合生产实践,介绍了硬质合金滚刀的设计与制造工艺,提出了滚刀各参数的选取原则。

1.4 论文研究背景及意义

由于双圆弧齿轮制造成本相对较低、承载能力高,使用寿命较长等优点,使得它在我国工业中的应用越来越广泛。随着现代工业的发展,对齿轮传动机构的要求是高速重载或低速重载、高寿命,小体积。提高齿面硬度是实现上述目标的有效途径。但是,渗碳淬火硬齿面双圆弧齿轮缺少成本较低的精加工手段。刮削方法是克服上面难题的有效方法之一,但是硬质合金刮削滚刀的研制难度大是推广刮齿工艺的瓶颈,是当前迫切需要解决的问题。到目前为止,国内对软齿面和中硬齿面双圆弧齿轮的研究和应用较多,而对高硬齿面渗碳双圆弧齿轮的研究和应用还是较少的,对渗碳淬火双圆弧齿轮刮削滚刀的研究也不多。国内对铲磨砂轮廓形的研究成果有不少^[22],但大多数都是对不很复杂的铣刀的铲磨砂轮或渐开线齿轮滚刀的铲磨砂轮的研究,对双圆弧滚刀的铲磨砂轮的研究甚少。

中硬齿面双圆弧齿轮滚刀采用零前角,刀具标准 GB/T14348.1-93 已经给出了滚刀轴向廓形精确坐标。铲磨砂轮采用这个标准中的滚刀轴向齿廓坐标所铲出的滚刀前刀面的齿廓误差已经能保证滚刀精度。对于高硬齿面双圆弧齿轮刮削滚刀而言,采用负前角后,在铲磨过程中不能采用投影仪检查滚刀前刀面齿廓。虽然可以计算出负前角滚刀的前刀面齿廓的坐标,但是砂轮轴向廓形采用这样的坐标能否保证铲磨出的滚刀前刀面的齿廓精度目前还是未知情况。用啮合原理推出的砂轮轴向廓形可以从理论上保证刮削滚刀前刀面齿廓的正确性,进而保证滚刀前刀面的精度。所以有必要从理论上对负前角双圆弧齿轮滚刀的铲磨砂轮轴向廓形进行深入研究,从而为负前角双圆弧齿轮滚刀铲磨砂轮的制造提供理论指导。

根据空间双圆弧齿轮啮合原理、双圆弧齿轮滚刀基本蜗杆齿面方程和铲磨时滚刀与铲磨砂轮的相对运动关系来求铲磨砂轮的轴向廓形,使重磨后的滚刀时滚刀与铲磨砂轮的相对运动关系来求铲磨砂轮的轴向廓形,使重磨后的滚刀

基本蜗杆轴向截形的误差在双圆弧齿滚刀公差范围内;根据生产实际设计刮刀参数,刮齿工艺,制造刮刀,进行刮齿试验,寻求降低高硬齿面双圆弧齿轮加工成本的有效方法,从而提高双圆弧齿轮产品在市场的占有率。

1.5 论文的主要研究工作

采取理论与实践结合的原则,先计算出滚刀前刀面齿形、根据铲磨时滚刀与砂轮的相对运动关系求出铲磨砂轮轴向廓形和滚刀铲背曲面方程,并根据不同重磨量计算滚刀重磨后的精度,然后做铲磨试验,检测滚刀齿形是否合格,最后做刮削试验并对齿轮进行检测。论文的主要研究工作如下:

1) 以 GB/T12759—1991 双圆弧圆柱齿轮基本齿廓为基础,根据空间双圆弧齿轮啮合原理求出任意前角的双圆弧齿轮刮刀的前刀面齿形。用二维绘图软件(如 AutoCAD)绘出该图形,并进行相关分析;设计刮刀参数,用三维绘图软件(如 SolidWorks)建立刮刀实体模型,为后续处理做好准备。

2) 根据圆弧齿轮刮刀设计的两个基本要求,利用滚刀前刀面刀刃方程和铲磨运动的关系求出铲磨砂轮轴向截形,编程绘出砂轮轴向廓形图并输出砂轮轴向廓形上点的坐标值,然后做出砂轮的三维造型。

3) 计算滚刀铲背曲面方程并根据不同重磨量求解滚刀基本蜗杆轴向截形偏差;分析滚刀各参数对滚刀基本蜗杆轴向截形偏差的影响。

4) 计算双圆弧齿轮滚刀铲磨时的干涉条件,分析滚刀各参数对发生铲磨干涉时的砂轮最小半径和滚刀齿顶后角的影响情况;之后根据干涉条件确定滚刀参数的选择原则。

5) 根据试验要求和试验条件设计制造双圆弧齿轮滚刀。考虑滚刀使用场合、使用寿命和现有生产条件,根据生产实际中的径向铲磨方法制定滚刀铲磨工艺,使滚刀铲磨高效准确,滚刀经济耐用。

6) 在完成前面几项工作的基础上,制定试验方案,进行高硬齿面双圆弧齿轮刮刀刮削齿轮的试验。对试验结果进行分析,检验所加工的齿轮是否合格。

第二章：铲磨砂轮廓形及滚刀的铲背曲面方程的计算

加工高硬齿面双圆弧齿轮一般选用焊接硬质合金滚刀或镶片硬质合金滚刀。硬质合金双圆弧齿轮滚刀的铲磨加工是滚刀制造中技术难度最大，最重要的工序，而且铲磨砂轮的廓形决定着滚刀前刀面刀刃曲面的形状，是影响滚刀制造精度和切削性能的决定因素。本章从双圆弧齿轮通用齿面方程出发^[1]，依据滚刀侧铲面上一条给定曲线（滚刀切削刃）和铲磨运动，先确定出滚刀侧铲面在给定曲线上的法向量，再根据啮合原理^[2]计算出铲磨砂轮的轴向廓形，最后根据滚刀的重磨量求出重磨后滚刀基本蜗杆轴向廓形的偏差。

2.1 铲磨砂轮廓形的计算

2.1.1 直槽滚刀前刀面刀刃方程

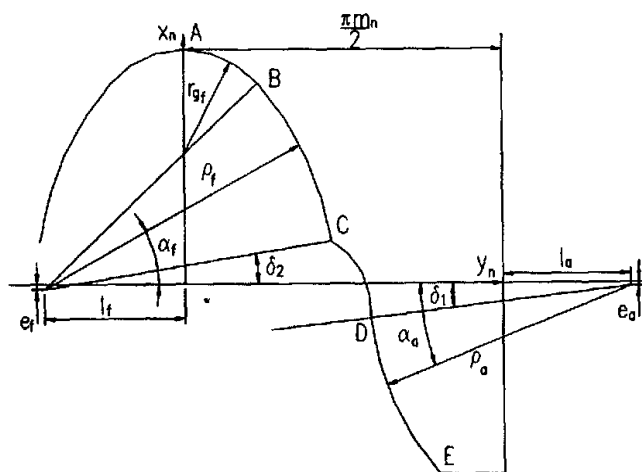


图 2-1 双圆弧齿轮基本齿廓

1. 双圆弧齿轮滚刀基本蜗杆的通用齿面方程

文献[1]中根据法面双圆弧齿轮基本齿廓（图 2-1）的方程推导出法面双圆弧齿轮右旋滚刀基本蜗杆齿面各段的通用方程为：

$$\begin{cases} x = X, \cos \varphi \pm Y, \sin \varphi \\ y = X, \sin \varphi \mp Y, \cos \varphi \\ z = p\varphi \pm Z, \end{cases} \quad (2-1)$$

方程中 α 和 φ 为自变量。其中：

第二章：铲磨砂轮廓形及滚刀的铲背曲面方程的计算

加工高硬齿面双圆弧齿轮一般选用焊接硬质合金滚刀或镶片硬质合金滚刀。硬质合金双圆弧齿轮滚刀的铲磨加工是滚刀制造中技术难度最大，最重要的工序，而且铲磨砂轮的廓形决定着滚刀前刀面刀刃曲面的形状，是影响滚刀制造精度和切削性能的决定因素。本章从双圆弧齿轮通用齿面方程出发^[1]，依据滚刀侧铲面上一条给定曲线（滚刀切削刃）和铲磨运动，先确定出滚刀侧铲面在给定曲线上的法矢量，再根据啮合原理^[2]计算出铲磨砂轮的轴向廓形，最后根据滚刀的重磨量求出重磨后滚刀基本蜗杆轴向廓形的偏差。

2.1 铲磨砂轮廓形的计算

2.1.1 直槽滚刀前刀面刀刃方程

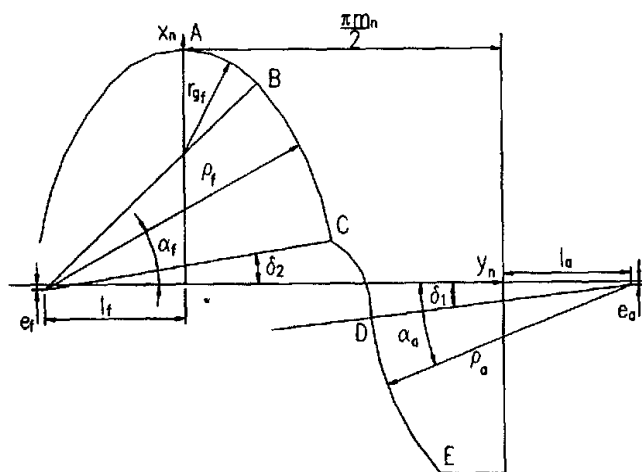


图 2-1 双圆弧齿轮基本齿廓

1. 双圆弧齿轮滚刀基本蜗杆的通用齿面方程

文献[1]中根据法面双圆弧齿轮基本齿廓（图 2-1）的方程推导出法面双圆弧齿轮右旋滚刀基本蜗杆齿面各段的通用方程为：

$$\begin{cases} x = X_i \cos \varphi \pm Y_i \sin \varphi \\ y = X_i \sin \varphi \mp Y_i \cos \varphi \\ z = p\varphi \pm Z_i \end{cases} \quad (2-1)$$

方程中 α 和 φ 为自变量。其中：

$$\begin{cases} X_i = \rho \sin \alpha + e + r \\ Y_i = (\rho \cos \alpha + e \cot \alpha) \cos \beta \\ Z_i = \rho \cos \alpha \sin \beta - e \cot \alpha \cos \beta \cot \beta - N / \sin \beta \end{cases} \quad (2-2)$$

如图 2-1, 式 (2-2) 中的 ρ 、 α 、 e 、 N 均为双圆弧齿轮滚刀基本齿廓的参数。

对式 (2-1) 做如下规定: 双重正负号者, 上面的对应左侧齿面, 下面的对应右侧齿面。所谓左右侧是以齿面齿形 (凸齿取齿做齿形, 凹齿取槽做齿形) 对称轴线为准, 顺着坐标轴 z_n 方向 (图 2-1 中, z_n 指向纸内) 判断。在图 1 中, AB 段、BC 段和 CD 段是右侧, DE 段是左侧。

式 (2-1) 和式 (2-2) 中各参数的规定如下:

α ——基本齿条第 i 段圆弧上的点的径向线与节线的夹角, α 对凸齿取正值, 凹齿取负值;

ρ ——基本齿条第 i 段圆弧半径;

e ——基本齿条第 i 段圆弧中心相对坐标 y_n 的移距量, e 的正负规定为: 齿廓圆弧中心位于基本齿条节线之上为正, 齿廓圆弧中心位于基本齿条节线之下为负;

l ——齿廓圆弧圆心相对齿形对称轴线的偏移量, 它的正负规定为: 齿廓圆弧与圆心位于齿形对称轴线的异侧取正值, 同侧取负值; 如图 2-1, BC 段和 DE 段的 l 为正值, CD 段的 l 为负值;

N ——基本齿条第 i 段圆弧中心相对坐标 x_n 的偏移量, 对这里所选的坐标系, 凸齿 $N=l$, 凹齿 $N = \pi m_n / 2 + l$;

φ ——与双圆弧齿轮滚刀固连的坐标系对与基本齿条固连的坐标系的相对运动参数;

r ——圆弧齿轮滚刀的分度圆半径;

β ——滚刀分度圆上的螺旋角;

p ——螺旋参数, $p = r \cot \beta$ 。

2. 直槽负前角的双圆弧齿轮滚刀的前刀面齿形

高硬齿面双圆弧齿轮滚刀在切削硬齿面齿轮时, 单位长度切削刃上的载荷很大, 为防止崩刃采用负前角。

建立如图 2-2 所示坐标系。其中 $O_1x_1y_1z_1$ 与滚刀固连， O_2 位于前刀面与齿顶圆的交点处。 r 为滚刀节圆半径， r_a 为滚刀齿顶圆半径， γ 为滚刀分度圆上的前角， $\sin \gamma = c/r$ 。取右旋滚刀基本蜗杆齿面的右侧方程：

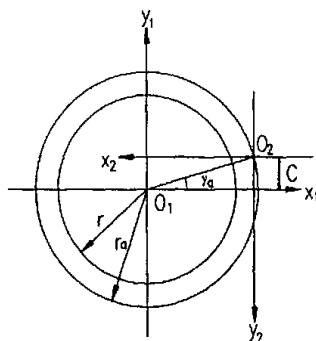


图 2-2 滚刀前刀面示意图

$$\begin{cases} x_1 = X_t \cos \varphi - Y_t \sin \varphi \\ y_1 = X_t \sin \varphi + Y_t \cos \varphi \\ z_1 = p\varphi - Z_t \end{cases} \quad (2-3)$$

以直槽滚刀为例，为取得负前角， c 取正值，按 $y_1 = c$ 解得：

$\varphi_0 = \arcsin \frac{c}{\sqrt{X_t^2 + Y_t^2}} - \arctan \frac{Y_t}{X_t}$ ，所以在 $O_1x_1y_1z_1$ 内前刀面刃方程为：

$$\bar{r}_1 = \begin{cases} x_1 = X_t \cos \varphi_0 - Y_t \sin \varphi_0 \\ y_1 = c \\ z_1 = p\varphi_0 - Z_t \end{cases} \quad (2-4)$$

式中 α 为自变量， X_t ， Y_t ， Z_t ， φ_0 均为 α 的函数。

设式 (2-4) 表示的曲线上任意一点的切线矢量为 $\bar{\tau}_1$ ，则 $\bar{\tau}_1$ 可由该式对自变量 α 求导得到，具体如下：

$$\begin{cases} X_t' = \rho \cos \alpha \\ Y_t' = -(\rho \sin \alpha + \frac{e}{\sin^2 \alpha}) \cos \beta \\ Z_t' = -\rho \sin \alpha \sin \beta + \frac{\cos \beta \cot \beta}{\sin^2 \alpha} e \\ \varphi_0' = d(\arcsin \frac{c}{\sqrt{X_t^2 + Y_t^2}} - \arctan \frac{Y_t}{X_t}) / d\alpha = \frac{a_2}{a_3} + a_4 \end{cases} \quad (2-5)$$

其中， $a_2 = -c(X_t X_t' + Y_t Y_t')$ ， $a_3 = \sqrt{X_t^2 + Y_t^2} - c^2(X_t^2 + Y_t^2)$ ， $a_4 = -\frac{X_t Y_t' - Y_t X_t'}{X_t^2 + Y_t^2}$

所以：

$$\bar{r}'_1 = \begin{cases} x'_1 = X'_i \cos \varphi_0 - Y'_i \sin \varphi_0 - (X_i \sin \varphi_0 + Y_i \cos \varphi_0) \varphi'_0 \\ y'_1 = 0 \\ z'_1 = p \varphi'_0 - Z'_i \end{cases} \quad (2-6)$$

实际齿形是在 $O_2x_2y_2z_2$ 中以齿顶 O_2 为准计算的, 因此, 需要将 (2-4) 式变换到 $O_2x_2y_2z_2$ 中。图 2-2 中, γ_a 为齿顶切削前角, $\sin \gamma_a = c/r_a$ 。为取得负前角, c 取负值, γ_a 也为负值。考虑到 γ_a 的符号, 两个坐标之间的变换关系为:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = r_a \cos \gamma_a \\ y_1 + y_2 = c \\ z_1 = z_2 + p \gamma_a \end{cases}, \text{ 因此滚刀前刀面刀刃在 } O_2x_2y_2z_2 \text{ 中的方程为:}$$

$$\begin{cases} x_2 = r_a \cos \gamma_a - (X_i \cos \varphi_0 - Y_i \sin \varphi_0) \\ z_2 = p(\varphi_0 - \gamma_a) - Z_i \end{cases} \quad (2-7)$$

2.1.2 砂轮廓形计算

2.1.2.1 采用的坐标变换

建立如图 2-3 所示开始铲磨后任一时刻的坐标系, 其中 $S-Oxyz$ 为空间固定的坐标系, $S_1-O_1x_1y_1z_1$ 与滚刀固连, $S_2-O_2x_2y_2z_2$ 与砂轮固连, θ 为滚刀与砂轮的相对运动参数。铲磨刚开始时, 两转轴之间的距离为 A 。图中 λ 为砂轮的安装角, 一般取滚刀分度圆上的螺旋升角。设滚刀铲背量为 K , 滚刀转过单位转角时, 铲磨砂轮沿滚刀径向移动的距离为 $k_p = K \frac{z_k}{2\pi}$ 。下

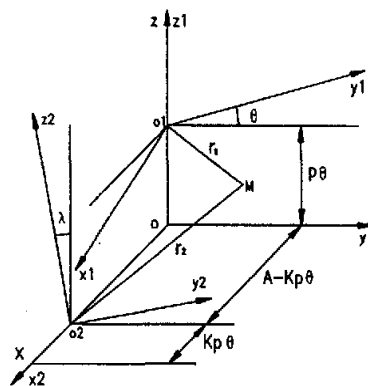


图 2-3 径向铲磨时滚刀与铲磨砂轮相对位置关系图

面分析各坐标系之间的关系。

从 S_1 到 S 的坐标变换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = M_{01} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}, M_{01} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & p\theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

从 S 到 S_2 的坐标变换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = M_{20} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, M_{20} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & k_p \theta - A \\ 0 & \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ 0 & -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

从 S_1 到 S_2 的坐标变换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = M_{21} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$$

$$M_{21} = M_{20} \cdot M_{01} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & k_p \theta - A \\ \sin \theta \cos \lambda & \cos \theta \cos \lambda & \sin \lambda & p \theta \sin \lambda \\ -\sin \lambda \sin \theta & -\sin \lambda \cos \theta & \cos \lambda & p \theta \cos \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

2.1.2.2 接触点 M 处的相对速度

在径向铲磨双圆弧齿轮滚刀的过程中, 成形运动由三种运动组成: 滚刀的转动, 设角速度为 $d\theta/dt = \omega_1 = 1$; 滚刀沿自身轴线 Z_1 的移动, 速度为 $v_0^{(1)} = p\omega_1 = p$; 砂轮沿 x 轴逆向移动, 速度为 $v_0^{(2)} = k_p \omega_1 = k_p$ 。因为砂轮的自转与成形运动无关, 所以设砂轮的自转角速度为零。

设坐标系 $Oxyz$ 的 x 、 y 、 z 方向的单位矢量分别为 \bar{i} 、 \bar{j} 、 \bar{k} , 坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 的三个方向的单位矢量分别为 \bar{i}_1 、 \bar{j}_1 、 \bar{k}_1 , 坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 的三个方向的单位矢量分别为 \bar{i}_2 、 \bar{j}_2 、 \bar{k}_2 。下面求在坐标系 S 中的任一接触点 M 处的相对速度 $\bar{v}^{(12)}$ 。

在坐标系 S 中, 由齿轮啮合原理和图 2-3 知:

$$\bar{v}^{(12)} = \bar{\omega}_1 \times \bar{r}_1 + \bar{v}_0^{(1)} - \bar{\omega}_2 \times \bar{r}_2 - \bar{v}_0^{(2)} \quad (2-11)$$

式中, $\bar{\omega}_1 = \bar{k}$, $\bar{\omega}_2 = 0$, $\bar{v}_0^{(1)} = p\bar{k}$, $\bar{v}_0^{(2)} = -k_p\bar{i}$, \bar{r}_1 为将 S_1 中的 \bar{r}_1 变换到 S 中得到:

$$\bar{r}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{cases} (x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta) \bar{i} \\ (x_1 \sin \theta + y_1 \cos \theta) \bar{j} \\ z_1 \bar{k} \end{cases} \quad (2-12)$$

而: $\bar{\omega}_1 \times \bar{r}_1 = (-x_1 \sin \theta - y_1 \cos \theta) \bar{i} + (x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta) \bar{j}$, 所以:

$$\bar{v}^{(12)} = (k_p - x_1 \sin \theta - y_1 \cos \theta) \bar{i} + (x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta) \bar{j} + p \bar{k} \quad (2-13)$$

2.1.2.3 砂轮包络面在滚刀切削刃上的法矢量 \bar{n}_1

因为滚刀侧铲面是铲磨过程砂轮曲面的包络面,而滚刀切削刃是包络面上的曲线,所以可先求出坐标系 S 中砂轮包络面在滚刀切削刃上的法矢量 \bar{n}_1 。

根据啮合原理,滚刀切削刃上一点成为砂轮与侧铲面的一个接触点时,必有啮合基本方程 $\bar{n}_1 \cdot \bar{v}^{(12)} = 0$ 成立, $\bar{v}^{(12)}$ 由式 (2-13) 表示。

因为切削刃在包络面上,所以它的切矢 $\bar{\tau}_1$ 必定与 \bar{n}_1 垂直,即有下式成立:

$\bar{\tau}_1 \cdot \bar{n}_1 = 0$, 其中 $\bar{\tau}_1$ 由式 (2-6) $\bar{\tau}_1 = \bar{r}'_1 = x'_1 \bar{i}_1 + z'_1 \bar{k}_1$ 变换到 S 中得到:

$$\bar{\tau}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_1 \cos \theta \bar{i} \\ x'_1 \sin \theta \bar{j} \\ z'_1 \bar{k} \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

一般来说, $\bar{v}^{(12)}$ 与 $\bar{\tau}_1$ 是不平行的。所以 \bar{n}_1 可用 $\bar{v}^{(12)}$ 和 $\bar{\tau}_1$ 表示如下:

$$\bar{n}_1 = \bar{v}^{(12)} \times \bar{\tau}_1 = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ kp - x_1 \sin \theta - y_1 \cos \theta & x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta & p \\ x'_1 \cos \theta & x'_1 \sin \theta & z'_1 \end{vmatrix} = D\bar{i} + E\bar{j} + F\bar{k} \quad (2-15)$$

其中: $D = (x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta)z'_1 - px'_1 \sin \theta$

$$E = px'_1 \cos \theta - (kp - x_1 \sin \theta - y_1 \cos \theta)z'_1$$

$$F = x'_1 (kp \sin \theta - x_1)$$

2.1.2.4 铲磨砂轮理论廓形计算

将式 (2-4) 表示的滚刀切削刃方程转换到与砂轮固连的坐标系 S_2 中得到:

$$\bar{r}_2 = M_{21} \bar{r}_1 = \begin{cases} x_2 = x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta + kp\theta - A \\ y_2 = (x_1 \sin \theta + y_1 \cos \theta) \cos \lambda + (z_1 + p\theta) \sin \lambda \\ z_2 = -(x_1 \sin \theta + y_1 \cos \theta) \sin \lambda + (z_1 + p\theta) \cos \lambda \end{cases} \quad (2-16)$$

式中 M_{21} 由式 (2-10) 表示, \bar{r}_1 由式 (2-4) 表示, 上式中的参变量是 α 和 θ 。

由于砂轮曲面是回转曲面,所以切削刃上一点成为滚刀侧铲面与砂轮曲面的接触点时, \bar{n}_1 必定通过砂轮转轴, 即:

$$(\bar{k}_2 \times \bar{r}_2) \cdot \bar{n}_1 = 0 \quad (2-17)$$

其中 \bar{n}_1 为将式 (2-15) 变换到 S_2 中得到:

$$\bar{n}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda & \sin \lambda \\ 0 & -\sin \lambda & \cos \lambda \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D \\ E \\ F \end{pmatrix} = \begin{cases} D\bar{i}_2 \\ (E \cos \lambda + F \sin \lambda)\bar{j}_2 \\ (F \cos \lambda - E \sin \lambda)\bar{k}_2 \end{cases} \quad (2-18)$$

将式 (2-16) 和式 (2-18) 代入式 (2-17) 展开为:

$$\begin{aligned} & [px_1' \sin \theta - (x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta)z_1'] \cdot [(x_1 \sin \theta + y_1 \cos \theta) \cos \lambda + (z_1 + p\theta) \sin \lambda] \\ & + (x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta + k_p \theta - A) \cdot \{ [px_1' \cos \theta - (k_p - x_1 \sin \theta - y_1 \cos \theta)z_1'] \cos \lambda \\ & + x_1' (k_p \sin \theta - x_1) \sin \lambda \} = 0 \end{aligned} \quad (2-19)$$

(2-16)、(2-19) 两式联立, 表示砂轮回转面上与 (2-4) 式表示的切削刃相对应的一条曲线。

为了求出砂轮理论廓形, 在 α 的值给定范围的情况下, 可由 (2-19) 式用数值方法解出 $\theta = \theta(\alpha)$, 具体求解可通过编程实现。将 $\theta = \theta(\alpha)$ 带入式 (2-16) 中得到砂轮回转面上的一条接触线, 将该接触线绕砂轮轴回转可以求得砂轮的轴向廓形如下:

$$\begin{cases} R = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \\ z = z_2 \end{cases} \quad (2-20)$$

式中 x_2 、 y_2 、 z_2 由式 (2-16) 表示。

2.1.2.5 铲磨滚刀左侧齿面的砂轮轴向廓形计算

因为负前角滚刀前刀面左右两侧不对称, 所以铲磨砂轮的轴向廓形也不对称。下面求解铲磨滚刀左侧齿面的砂轮轴向廓形。

取右旋滚刀基本蜗杆左侧齿面方程:

$$\begin{cases} x_1 = X_t \cos \varphi + Y_t \sin \varphi \\ y_1 = X_t \sin \varphi - Y_t \cos \varphi \\ z_1 = p\varphi + Z_t \end{cases} \quad (2-21)$$

为取得负前角, c 取正值, 按 $y_1 = c$ 解得:

$$\varphi_0 = \arcsin \frac{c}{\sqrt{X_t^2 + Y_t^2}} + \arctan \frac{Y_t}{X_t} \quad (2-22)$$

所以在 $O_1x_1y_1z_1$ 内前刀面刀刃方程为:

$$\bar{r}_1 = \begin{cases} x_1 = X_t \cos \varphi_0 + Y_t \sin \varphi_0 \\ y_1 = c \\ z_1 = p\varphi_0 + Z_t \end{cases} \quad (2-23)$$

式中 α 为自变量, X_t, Y_t, Z_t, φ_0 均为 α 的函数。

所以由式 (2-23) 表示的滚刀刀刃上任意一点的切线矢量 \bar{t}_1 可求解如下:

$$\varphi_0' = d(\arcsin \frac{c}{\sqrt{X_t^2 + Y_t^2}} + \arctan \frac{Y_t}{X_t}) / d\alpha = \frac{a_2}{a_3} - a_4 \quad (2-24)$$

其中: $a_2 = -c(X_t X_t' + Y_t Y_t')$, $a_3 = \sqrt{X_t^2 + Y_t^2} - c^2(X_t^2 + Y_t^2)$, $a_4 = -\frac{X_t Y_t' - Y_t X_t'}{X_t^2 + Y_t^2}$;

X_t', Y_t', Z_t' 由式 (2-5) 表示。所以:

$$\bar{t}_1 = \begin{cases} x_1' = X_t' \cos \varphi_0 + Y_t' \sin \varphi_0 - (X_t \sin \varphi_0 - Y_t \cos \varphi_0) \varphi_0' \\ y_1' = 0 \\ z_1' = p\varphi_0' + Z_t' \end{cases} \quad (2-25)$$

式中 X_t', Y_t', Z_t' 由式 (2-5) 表示, φ_0 由式 (2-22) 表示, φ_0' 由式 (2-24) 表示。

如前面图 2-2, 实际齿形是在 $O_2x_2y_2z_2$ 中以齿顶 O_2 为准计算的, 因此, 需要将 (2-23) 式变换到 $O_2x_2y_2z_2$ 中。为取得负前角, c 取正值, γ_a 也为正值,

$\sin \gamma_a = c/r_a$ 。考虑到 γ_a 的符号, 两个坐标之间的变换关系为:
$$\begin{cases} x_1 + x_2 = r_a \cos \gamma_a \\ y_1 + y_2 = c \\ z_1 = z_2 + p\gamma_a \end{cases},$$

因此滚刀前刀面母线在 $O_2x_2y_2z_2$ 中的方程为:

$$\begin{cases} x_2 = r_a \cos \gamma_a - (X_t \cos \varphi_0 + Y_t \sin \varphi_0) \\ z_2 = p(\varphi_0 - \gamma_a) + Z_t \end{cases} \quad (2-26)$$

式中 φ_0 由式 (2-22) 表示。

求解铲磨滚刀左侧齿面的砂轮轴向廓形与前面求解铲磨滚刀右侧齿面的砂轮轴向廓形的方法相同, 求得的滚刀刀刃在 S_2 中的包络面方程的形式与式 (2-

16) 相同, 啮合条件方程也与式 (2-19) 相同。只不过式 (2-16) 和 (2-19) 中的 \bar{r}_1 由式 (2-23) 表示, x_1' , z_1' 由式 (2-25) 表示。最后通过数值方法编程求解啮合条件式 (2-19), 将 $\theta = \theta(\alpha)$ 带入式 (2-16) 中得到砂轮回转面上的一条接触线, 将该接触线方程代入式 (2-20) 就可以求出铲磨滚刀左侧齿面的砂轮轴向廓形。

2.2 滚刀铲背曲面方程及滚刀基本蜗杆轴截形偏差的计算^[36-40]

因为滚刀使用一段时间后进行重磨, 为了对重磨后的滚刀刀刃的精度有个精确的了解, 需要求解滚刀铲背曲面方程和重磨后滚刀基本蜗杆轴向廓形的偏差。

2.2.1 滚刀铲背曲面方程的计算 (以滚刀右侧齿面为例)

滚刀铲背曲面方程的求解与前面求解砂轮廓形方程的方法相同, 在砂轮回转面方程已知的情况下, 还是利用啮合原理来求解。

2.2.1.1 啮合条件式

在 S_2 中, 由式 (2-16) 和 (2-19) 表示的曲线 $\bar{r}_2(\alpha)$ 绕砂轮轴 Z_2 回转, 得到砂轮回转面 $\bar{r}_2 = \bar{r}_2(\alpha, \phi)$:

$$\bar{r}_2(\alpha, \phi) = (x_2 \cos \phi - y_2 \sin \phi) \bar{j}_2 + (x_2 \sin \phi + y_2 \cos \phi) \bar{j}_2 + z_2 \bar{k}_2 \quad (2-27)$$

式中 ϕ 表示砂轮回转面上任一点的径向线与平面 $x_2 - o_2 - z_2$ 的夹角。上式中未知参数为 α 和 ϕ , x_2 、 y_2 和 z_2 由式 (2-16) 表示。

将 S 中砂轮包络面在滚刀切削刃上的法矢量 \bar{n}_1 (式 (2-15)) 变换到 S_2 中为: $\bar{n}_1 = D \bar{i}_2 + (E \cos \lambda + F \sin \lambda) \bar{j}_2 + (F \cos \lambda - E \sin \lambda) \bar{k}_2$ (式 (2-18))。根据齿轮啮合原理可知, 此时砂轮回转面在曲线 $\bar{r}_2(\alpha)$ 处的法矢量 $\bar{n}_2 = \bar{n}_1$ 。 \bar{n}_2 绕砂轮轴 Z_2 回转即得到砂轮回转面上任意一点的法矢量 $\bar{n}_2(\alpha, \phi)$:

$$\begin{aligned} \bar{n}_2(\alpha, \phi) = & [D \cos \phi - (E \cos \lambda + F \sin \lambda) \sin \phi] \bar{j}_2 + \\ & [D \sin \phi + (E \cos \lambda + F \sin \lambda) \cos \phi] \bar{j}_2 + (F \cos \lambda - E \sin \lambda) \bar{k}_2 \end{aligned} \quad (2-28)$$

上式中参变量为 α 和 ϕ , D 、 E 和 F 中的未知参数 θ 可由式 (2-19) 解出。

设砂轮铲磨滚刀时, 滚刀转角记为 θ , 由前面铲磨关系图 2-2 可知在 S 中:
 $\bar{r}_1 = \bar{r}_2 + (A - k_p \theta) \bar{i} - p \theta \bar{k}$ (\bar{r}_2 由式 (2-27) 变换到 S 中得到)。将该式变换到 S_2 中为:

$$\bar{r}_1 = \bar{r}_2 + (A - k_p \theta) \bar{i}_2 - p \theta (\sin \lambda \bar{j}_2 + \cos \lambda \bar{k}_2) \quad (2-29)$$

式中 \bar{r}_2 由式 (2-27) 表示。

设滚刀的转动角速度 $\omega_1 = \frac{d\theta}{dt} = 1$, 则在 S 中, $\bar{\omega}_1 = \bar{k}$, $\bar{\omega}_2 = 0$, $\bar{v}_0^{(1)} = p \bar{k}$,
 $\bar{v}_0^{(2)} = -k_p \bar{i}$ 。在 S_2 中:

$$\begin{cases} \bar{\omega}_1 = \sin \lambda \bar{j}_2 + \cos \lambda \bar{k}_2 \\ \bar{v}_0^{(1)} = p (\sin \lambda \bar{j}_2 + \cos \lambda \bar{k}_2) \\ \bar{v}_0^{(2)} = -k_p \bar{i}_2 \end{cases} \quad (2-30)$$

将式 (2-29) 和式 (2-30) 带入式 (2-11) 得到 S_2 中任一接触点处的相对运动速度:

$$\bar{v}^{(12)} = \bar{\omega}_1 \times \bar{r}_1 + \bar{v}_0^{(1)} - \bar{\omega}_2 \times \bar{r}_2 - \bar{v}_0^{(2)} = L \bar{i}_2 + M \bar{j}_2 + N \bar{k}_2 \quad (2-31)$$

其中:

$$\begin{cases} L = k_p - (x_2 \sin \phi + y_2 \cos \phi) \cos \lambda + z_2 \sin \lambda \\ M = [(x_2 \cos \phi - y_2 \sin \phi) + A - k_p \theta] \cos \lambda + p \sin \lambda \\ N = -[(x_2 \cos \phi - y_2 \sin \phi) + A - k_p \theta] \sin \lambda + p \cos \lambda \end{cases} \quad (2-32)$$

式中 x_2 、 y_2 、 z_2 由式 (2-16) 表示。

由啮合条件 $\bar{n}_2 \cdot \bar{v}^{(12)} = 0$ 与式 (2-28)、(2-31) 和 (2-32) 得:

$$\begin{aligned} & [D \cos \phi - (E \cos \lambda + F \sin \lambda) \sin \phi] L + [D \sin \phi + \\ & (E \cos \lambda + F \sin \lambda) \cos \phi] M + (F \cos \lambda - E \sin \lambda) N = 0 \end{aligned} \quad (2-33)$$

由上式通过数值方法可以解出:

$$\phi = \phi(\alpha, \theta) \quad (2-34)$$

2.2.1.2 滚刀铲背曲面方程

从 S 到 S_1 的坐标变换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = M_{10} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad M_{10} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -p\theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

从 S_2 到 S 的坐标变换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = M_{02} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}, \quad M_{02} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & A - kp\theta \\ 0 & \cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ 0 & \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

从 S_1 到 S_2 的坐标变换矩阵为: $\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = M_{02} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}$

$$M_{12} = M_{10} \cdot M_{02} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \cos \lambda & -\sin \theta \sin \lambda & \cos \theta (A - kp\theta) \\ -\sin \theta & \cos \theta \cos \lambda & -\cos \theta \sin \lambda & -\sin \theta (A - kp\theta) \\ 0 & \sin \lambda & \cos \lambda & -p\theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-37)$$

将式 (2-27) 变换到与滚刀固连的 S_1 中形成的砂轮曲面族为:

$$\begin{aligned} \bar{r}_1(\alpha, \theta, \phi) &= M_{12} \cdot \bar{r}_2(\alpha, \phi) = \\ \begin{cases} x_1 = [(x_2 \cos \phi - y_2 \sin \phi) + A - k_p \theta] \cos \theta + [(x_2 \sin \phi + y_2 \cos \phi) \cos \lambda - z_2 \sin \lambda] \sin \theta \\ y_1 = -[(x_2 \cos \phi - y_2 \sin \phi) + A - k_p \theta] \sin \theta + [(x_2 \sin \phi + y_2 \cos \phi) \cos \lambda - z_2 \sin \lambda] \cos \theta \\ z_1 = (x_2 \sin \phi + y_2 \cos \phi) \sin \lambda + z_2 \cos \lambda - p\theta \end{cases} \end{aligned} \quad (2-38)$$

式中 M_{12} 由式 (2-37) 表示, $\bar{r}_2(\alpha, \phi)$ 由式 (2-27) 表示。

将上式与式 (2-33) 联立消去参数 ϕ 就可以得到以 α 和 θ 为变量的滚刀铲背曲面方程, 具体求解可以通过编程实现。

2.2.2 滚刀重磨后基本蜗杆轴向廓形偏差

滚刀基本蜗杆廓面是指由滚刀的切削刃所确定的圆柱螺旋面。由于滚刀铲背曲面是通过径向铲磨得到的, 所以在不同的刃磨情况下, 滚刀切削刃的径向位置和形状是不相同的, 从而滚刀的基本蜗杆廓面也是不同的。为了对滚刀从刚投入使用到报废的整个使用过程有个比较清楚的了解, 下面求解任意刃磨情况下的滚刀基本蜗杆的轴向廓形偏差。

如图 2-4, ε 为滚刀的重磨角, P 点为滚刀铲背曲面上 K 点重磨后所到达的位置; R 为 P 点到 z_1 轴的距离, γ_a 为滚刀齿顶切削前角。

由图 2-4 知, 滚刀重磨后前刀面方程为:

$$x_1 \sin \varepsilon + y_1 \cos \varepsilon = c \quad (2-39)$$

将式 (2-33)、式 (2-38) 和式 (2-39) 联立, 得到滚刀在任意刃磨情况下的切削刃方程为:

$$\bar{r}_1(\alpha, \varepsilon) = \begin{cases} x_1 = x_1(\alpha, \varepsilon) \\ y_1 = y_1(\alpha, \varepsilon) \\ z_1 = z_1(\alpha, \varepsilon) \end{cases} \quad (2-40)$$

参数 ε 取不同的值, (2-40) 即表示不同刃磨情况下的滚刀切削刃。在图 2-4 所示的坐标系 S_1 中, 该切削刃绕 z_1 轴作常数为 p 的螺旋运动, 得到该刃磨情况下的滚刀基本蜗杆廓面方程为:

$$\bar{r}_1(\alpha, \varepsilon, \psi) = \begin{cases} x_1 = x_1(\alpha, \varepsilon) \cos \psi - y_1(\alpha, \varepsilon) \sin \psi \\ y_1 = x_1(\alpha, \varepsilon) \sin \psi + y_1(\alpha, \varepsilon) \cos \psi \\ z_1 = p\psi + z_1(\alpha, \varepsilon) \end{cases} \quad (2-41)$$

式中 ψ 表示重磨后刀刃基本蜗杆廓面上任一点的径向线与平面 $x_1 - o_1 - z_1$ 的夹角, 在图 2-4 所示的坐标系中 ψ 角逆时针为正。从上式可以看出重磨角 ε 不同, 重磨后的滚刀基本蜗杆廓面方程也不同。令上式中的第一项等于零可以求出滚刀重磨后刀刃基本蜗杆轴向廓形, 即:

$$\begin{cases} y_{1b} = x_1(\alpha, \varepsilon) \sin \psi_0 + y_1(\alpha, \varepsilon) \cos \psi_0 \\ z_{1b} = p\psi_0 + z_1(\alpha, \varepsilon) \end{cases} \quad (2-42)$$

式中: $\psi_0 = \arctan \frac{x_1(\alpha, \varepsilon)}{y_1(\alpha, \varepsilon)}$ 。

令式 (2-3) 中的第一项等于零得重磨前滚刀基本蜗杆廓面右侧的轴向廓形为:

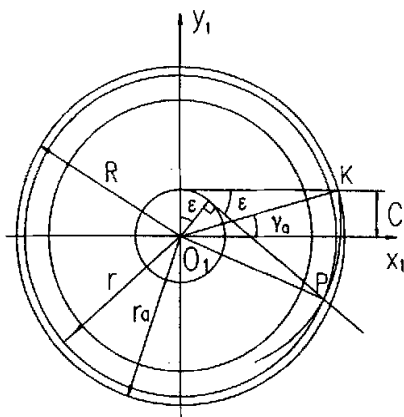


图 2-4 滚刀重磨示意图

$$\begin{cases} y_1 = X_1 \sin \varphi_1 + Y_1 \cos \varphi_1 \\ z_1 = p\varphi_1 - Z_1 \end{cases} \quad (2-43)$$

式中:

$$\varphi_1 = \arctan \frac{X_1}{Y_1} \quad (2-44)$$

为了求出滚刀重磨后基本蜗杆轴向廓形偏差, 需求出过式(2-43)上任一点的法线方程。设式(2-43)上任一点的切线矢量为 $\bar{\tau}_1$, 则: $\bar{\tau}_1 = \frac{dy'_1}{dz'_1}$, 式中:

$$\begin{cases} dy'_1 = X'_1 \sin \varphi_1 + Y'_1 \cos \varphi_1 + (X_1 \cos \varphi_1 - Y_1 \sin \varphi_1) \varphi'_1 \\ dz'_1 = p\varphi'_1 - Z'_1 \\ \varphi'_1 = (X'_1 Y_1 - X_1 Y'_1) / (X_1^2 + Y_1^2) \end{cases} \quad (2-45)$$

式中, X_1 、 Y_1 、 Z_1 由式(2-2)表示, X'_1 、 Y'_1 、 Z'_1 由式(2-5)表示。所以:

$$\bar{n}_1 = \frac{-dz'_1}{dy'_1} = \frac{-p\varphi'_1 + Z'_1}{X'_1 \sin \varphi_1 + Y'_1 \cos \varphi_1 + (X_1 \cos \varphi_1 - Y_1 \sin \varphi_1) \varphi'_1} \quad (2-46)$$

则过式(2-43)上任一点的法线方程为:

$$y - y_1 = \bar{n}_1(z - z_1) \quad (2-47)$$

当 $\varepsilon = 0$ 时、即当式(2-40)表示的切削刃与式(2-4)表示的切削刃相同时, 式(2-42)表示的轴向廓形与式(2-43)表示的轴向廓形完全重合。当 $\varepsilon \neq 0$ 、即当式(2-40)表示的切削刃与式(2-4)表示的切削刃不同时, 式(2-42)表示的轴向廓形相对于式(2-43)表示的轴向廓形既有轴向移动又有径向移动。

由图 2-4 和前面推导过程知, 式(2-42)和式(2-43)相比:
$$\begin{cases} y_1 = y_{1b} + k_p \varepsilon \\ z_1 = z_{1b} - p\varepsilon \end{cases}$$

所以消除平移量后式(2-42)变为:

$$\begin{cases} y_{1b} = x_1(\alpha, \varepsilon) \sin \psi_0 + y_1(\alpha, \varepsilon) \cos \psi_0 + k_p \varepsilon \\ z_{1b} = p\psi_0 + z_1(\alpha, \varepsilon) - p\varepsilon \end{cases} \quad (2-48)$$

一般来说两轴向廓形不能通过径向和轴向移动而重合, 也就是说它们之间总存在偏差, 下面求解该偏差。

如图 2-5, 对于给定的 α 和 ε , 式(2-48)确定了重磨后滚刀轴向廓形上

一点 $G_{1b}(y_{1b}, z_{1b})$ ，式 (2-43)、式 (2-47) 和式 (2-48) 联立确定重磨前滚刀轴向廓形上一点 $G_1(y_1, z_1)$ 。则点 G_1 和 G_{1b} 之间的距离 l 为：

$$l = \frac{y_{1b} - y_1}{|y_{1b} - y_1|} \sqrt{(y_{1b} - y_1)^2 + (z_{1b} - z_1)^2} \quad (2-49)$$

式中， y_{1b} 、 z_{1b} 由式 (2-48) 表示， y_1 、 z_1 由式 (2-43) 表示。

$l > 0$ 表示 G_1 点在理论轴向廓形之外， $l < 0$ 表示 G_1 点在理论轴向廓形之内。

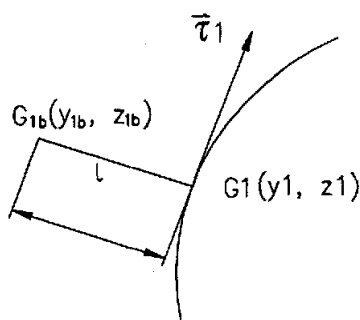


图 2-5 点 G_1 和 G_{1b} 的相对位置

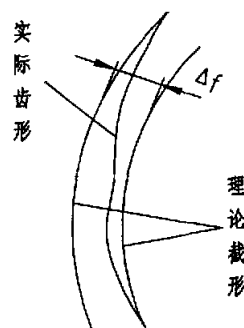


图 2-6 截形偏差

如图 2-6，所谓截形偏差 Δf 是指包容实际截形的两条理论截形之间的法向距离。显然，若以 l_{\max} 表示最大正偏距，以 l_{\min} 表示最小负偏距，则 Δf 为：

$$\Delta f = |l_{\max}| + |l_{\min}| \quad (2-50)$$

另一种求解截形偏差的方法

对于给定的 α ，式 (2-48) 和式 (2-43) 分别确定了重磨后和重磨前右旋滚刀基本蜗杆轴向廓形上的点 G_{1b} 和 G_1 。对于螺旋升角不大 ($\lambda < 4^\circ$) 的滚刀，可以认为他们在给定 α 处的法矢量的方向近似相同。为了求解截形偏差，需要消除 G_1 和 G_{1b} 之间的径向和轴向平移距离，即：

$$\begin{cases} y_{1b} = x_1(\alpha, \varepsilon) \sin \psi_0 + y_1(\alpha, \varepsilon) \cos \psi_0 + k_p \varepsilon \\ z_{1b} = p \psi_0 + z_1(\alpha, \varepsilon) - p \varepsilon \end{cases}$$

从而可得两点之间的距离 l 为： $l = \frac{y_{1b} - y_1}{|y_{1b} - y_1|} \sqrt{(y_{1b} - y_1)^2 + (z_{1b} - z_1)^2}$ ，最后可以根据式 (2-50) 求出轴向廓形偏差。

2.3 计算实例和结果讨论

设计“91”型直槽负前角法面双圆弧齿轮滚刀。滚刀参数如下：滚刀法向模数 $m_n = 10\text{mm}$ ，外径 $d_a = 200\text{mm}$ ，容屑槽数 $z_k = 12$ ，铲背量 $k = 14\text{mm}$ ，分度圆上的螺旋升角 $\lambda = 3^\circ 16' 33''$ ，分度圆直径 $d = m_n / \sin \lambda$ ，滚刀前角 $\gamma = -10^\circ$ ，螺旋参数 $p = r \tan \lambda = 5.00819\text{mm}$ ，滚刀齿形参数由 GB12759-91 中给出。铲磨开始前，两轴最短距离设为 $A = d / 2 + 50\text{mm}$ 。

因为双圆弧齿轮基本齿廓每段的齿形参数都不相同，所以重磨后滚刀每段的基本蜗杆轴向廓形偏差是不同的，而且齿形左右侧截形的偏差也是不同的。下面以工作齿廓 BC 段为例讨论双圆弧齿轮滚刀重磨后滚刀基本蜗杆轴向廓形的偏差。

2.3.1 直槽零前角滚刀的偏差情况

直槽零前角滚刀是生产实际中应用较多的一种滚刀，其偏差情况见图 2-7。图中的曲线(1)和(2)分别是不同刃磨情况下左侧和右侧截形的偏差。由图可见 $\varepsilon = 0$ 时，偏差极小(理论上无偏差，图中偏差是由计算精度造成的)，随着 ε 的增大，偏差呈非线性增大，并且左侧截形的偏差远大于右侧截形的偏差，故以下只讨论左侧截形的偏差情况。

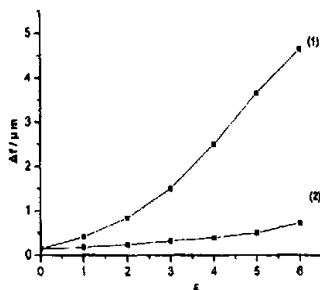


图 2-7 直槽零前角滚刀偏差

2.3.2 直槽负前角单头滚刀左侧截形的偏差情况

在图 2-8 中，曲线(1)、(2)分别是描写直槽零前角，直槽负前角 ($\gamma = -10^\circ$) 滚刀在不同刃磨情况下左侧截形的偏差。由图可见，在容屑槽形式相同时，零前角滚刀的偏差小于负前角滚刀的偏差。但是，值得指出的是：

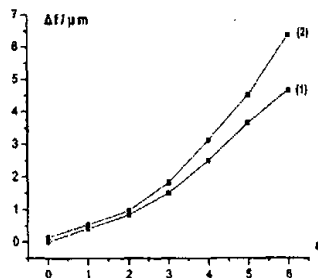


图 2-8 直槽负前角滚刀左侧截形偏差

在 $\varepsilon = 0^\circ \sim 6^\circ$ 的范围内, (工程中滚刀的实际重磨区域一般都不超出此范围), 偏差最大的直槽负前角 ($\gamma = -10^\circ$) 滚刀的最大偏差也仅为 $6.7\mu\text{m}$, 这是足够精确的。并且, 上述偏差是在轴平面内度量的, 而廓形误差是沿公法线方向传递的, 所以实际传递给被加工齿轮齿面的廓形误差比上述偏差更小。这说明在直槽零前角或负前角的情况下, 用本文方法设计的砂轮铲磨滚刀, 从新到旧的整个使用过程中都是精确的。

2.3.3 滚刀头数对轴向廓形偏差的影响

在图 2-9 中, 曲线(1)和(2)分别是直槽负前角双圆弧齿轮滚刀在单头和双头情况下的轴向廓形偏差。由图可见, 在重磨角 ε 较小时, 重磨后不同头数滚刀轴向廓形偏差差别不大; 而且重磨后滚刀轴向廓形偏差随头数的增加而增大。迄今为止精密滚刀大都采用直槽零前角型式, 因为这样铲背时齿形不会畸变, 所以能获得较高的精度。

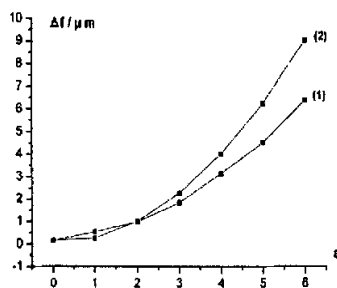


图 2-9 头数不同的直槽负前角滚刀偏差

2.3.4 滚刀分度圆半径对轴向廓形偏差的影响

图 2-10 反映了 $\varepsilon = 5^\circ$ 时, 单头直槽零前角滚刀的截形偏差 Δf 随滚刀分度圆柱半径 r 的变化情况。当 r 改变时, 铲磨砂轮的安中心距 A 随之适当改变, 以保持铲磨砂轮半径基本不变。铲背量 K 也随 r 适当修正, 并按文献[3]的推荐值圆整。图中曲线(1)和(2)分别是左侧和右侧齿形的偏差。由图可见, 当 r 增大时, 左侧轴向廓形的偏差迅速减小, 右侧轴向廓形的偏差逐渐增大, 但是增大的幅值很小。

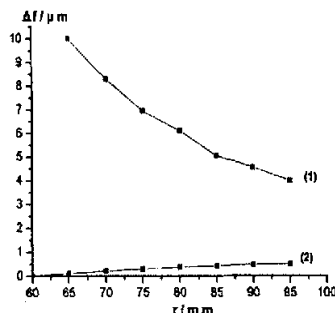


图 2-10 分度圆半径不同的滚刀轴向廓形偏差

2.4 本章小结

在应用空间双圆弧齿轮啮合原理的基础上,根据硬质合金刮削滚刀前刀面刀刃方程得出了铲磨砂轮轴向廓形方程和滚刀重磨后基本蜗杆轴向廓形方程,并根据算例对基本参数不同时的滚刀轴向廓形偏差进行了分析。通过以上研究得出如下结论:

- 1) 直槽零前角滚刀的轴向廓形的偏差随着重磨角的增加而呈非线性增大,并且左侧截形的偏差远大于右侧截形的偏差。
- 2) 直槽零前角滚刀的轴向廓形偏差小于直槽负前角滚刀轴向廓形的偏差;用本文方法设计的铲磨砂轮铲磨出的直槽零前角和负前角滚刀在重磨角 $\varepsilon = 0^\circ \sim 6^\circ$ 的范围内都是精确的。
- 3) 直槽负前角滚刀的轴向廓形偏差随头数的增加而增大,但是单头和双头滚刀重磨后轴向廓形的偏差相差不大。
- 4) 增大滚刀分度圆半径可以减小滚刀轴向廓形偏差,并且左侧截形偏差减小的幅度大于右侧截形偏差减小的幅度。

第三章 编程计算并绘制滚刀和砂轮轴向廓形

本章计算机程序是在第二章建立的数学模型的基础上编写的。因为第二章中有许多方程都是超越方程，只能通过数值方法来求解，所以本程序的主要功能是求解超越方程。程序均采用 Microsoft Visual Basic 6.0 编写，共有 2000 多行语句。该程序能根据给定的双圆弧齿轮基本参数计算并绘制滚刀前刀面廓形、铲磨砂轮轴向廓形和重磨后滚刀基本蜗杆的轴向廓形。

3.1 滚刀轴向廓形的绘制

3.1.1 编程前的准备工作

图 3-1 是双圆弧齿轮滚刀基本齿廓。滚刀的一个完整齿形由 8 段曲线组成，图中只给出了从 A 到 E 的四段曲线。AB 段为齿顶非工作段，BC 段为凸齿工作段，CD 段为过度段，DE 段为凹齿工作段。其余四段可以通过对称上面四段得到，所以没有画出。AB 段和 BC 段在 B 点相切。CD 段和 DE 段在 D 点相切。图中各参数的意义已经在 2.1.1 中做了说明，这里就不再赘述。

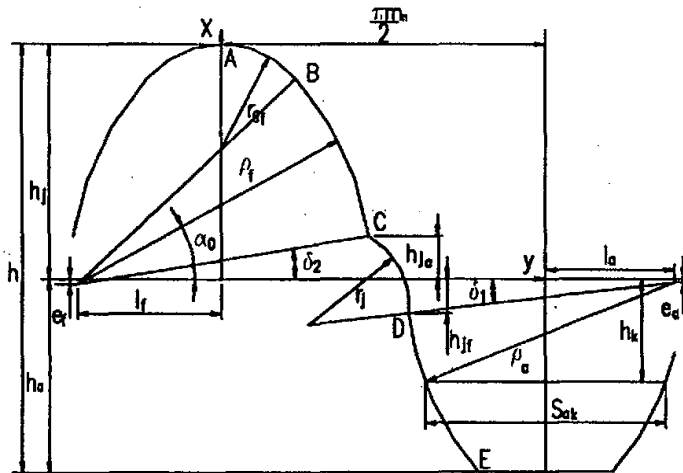


图 3-1 双圆弧齿轮基本齿廓

下面表 1 是 GB12759-1991 双圆弧圆柱齿轮基本齿廓参数表，在该表的所有参数中，法向模数 m_n 、压力角 α_0 、全齿高 h 、齿顶高 h_a 、齿根高 h_f 、侧隙 j 、凸齿齿廓圆弧半径 ρ_a 、凹齿齿廓圆弧半径 ρ_f 、凸齿齿廓圆心移距量 e_a 、凸齿齿廓圆心偏移量 l_a 、凸齿连接点高 h_{ja} 和凹齿连接点高 h_{jf} 是原始参数，其它参数根

据图 1 可以由它们推出。下面只给出编程需要的参数与原始参数的关系式：

$$\begin{cases} e_f = (\rho_f - \rho_a) \sin \alpha_0 - e_a \\ l_f = (\rho_f - \rho_a) \cos \alpha_0 + l_a - j/2 \\ r_{af} = \frac{\rho_f + h_f + e_f}{2} - \frac{l_f^2}{2(\rho_f - h_f - e_f)} \\ \sin \delta_1 = (h_{ja} - e_a) / \rho_a \\ \sin \delta_2 = (h_{jf} + e_f) / \rho_f \\ h_k = e_a + \rho_a \sin \alpha_0 \\ r_j = \frac{(0.5\pi m + l_a + l_f - \rho_a \cos \delta_1 - \rho_f \cos \delta_2)^2 + (h_{ja} + h_{jf})^2}{2 \cos \delta_1 (0.5\pi m + l_a + l_f - \rho_a \cos \delta_1 - \rho_f \cos \delta_2) - 2 \sin \delta_1 (h_{ja} + h_{jf})} \end{cases} \quad (3-1)$$

所以程序主窗体的基本齿廓参数中只需要法向模数等十二个主参数就可以。

表 1 GB12759-1991 双圆弧圆柱齿轮基本齿廓参数

参数名称	法向模数 m_n					
	1.5-3	>3-6	>6-10	>10-16	>16-32	>32-50
压力角 α_0	24°					
全齿高 h	$2m_n$					
齿顶高 h_a	$0.9m_n$					
齿根高 h_f	$1.1m_n$					
侧隙 j	$0.06m_n$		$0.04m_n$			
凸齿齿廓圆弧半径 ρ_a	$1.3m_n$					
凹齿齿廓圆弧半径 ρ_f	$1.42m_n$	$1.41m_n$	$1.395m_n$	$1.38m_n$	$1.36m_n$	$1.34m_n$
凸齿齿廓圆心移距量 e_a	$0.0163m_n$					
凹齿齿廓圆心移距量 e_f	$0.0325m_n$	$0.0285m_n$	$0.0224m_n$	$0.0163m_n$	$0.0081m_n$	$0.000m_n$
凸齿齿廓圆心偏移量 l_a	$0.6289m_n$					
凹齿齿廓圆心偏移量 l_f	$0.7086m_n$	$0.6994m_n$	$0.6957m_n$	$0.6820m_n$	$0.6638m_n$	$0.6455m_n$
凸齿工艺角 δ_1	6°20'52"					
凹齿工艺角 δ_2	9°25'31"	9°19'30"	9°10'21"	9°0'59"	8°48'11"	8°35'1"
接触点到节线距离 h_k	$0.5450m_n$					
凸齿接触点齿厚 S_{at}	$1.1173m_n$					
凹齿接触点齿槽宽 w_a	$1.1773m_n$		$1.1573m_n$			
凹齿接触点齿厚 S_{af}	$1.9643m_n$		$1.9843m_n$			
齿根圆弧半径 r_{af}	$0.5049m_n$	$0.5043m_n$	$0.4884m_n$	$0.4877m_n$	$0.4868m_n$	$0.4858m_n$
连接圆弧半径 r_f	$0.4030m_n$	$0.4004m_n$	$0.3710m_n$	$0.3663m_n$	$0.3595m_n$	$0.3520m_n$
凸齿连接点高 h_{ja}	$0.16m_n$					
凹齿连接点高 h_{jf}	$0.20m_n$					

先介绍编程绘制双圆弧齿轮右旋滚刀基本蜗杆轴向廓形的过程。

由第二章知，法面双圆弧齿轮右旋滚刀基本蜗杆齿面各段的通用方程为：

$$\begin{cases} x = X_i \cos \varphi \pm Y_i \sin \varphi \\ y = X_i \sin \varphi \mp Y_i \cos \varphi \\ z = p\varphi \pm Z_i \end{cases} \quad (3-2)$$

方程中 α 和 φ 为自变量。

$$\text{其中: } \begin{cases} X_i = \rho \sin \alpha + e + r \\ Y_i = (\rho \cos \alpha + e \cot \alpha) \cos \beta \\ Z_i = \rho \cos \alpha \sin \beta - e \cot \alpha \cos \beta \cot \beta - N / \sin \beta \end{cases} \quad (3-3)$$

要编制绘制方程 (3-1) 的轴向廓形, 需要对式 (3-1) 和式 (3-2) 中的已知参数 ρ 、 α 、 e 、 N 、 r 、 β 进行详细分析。对于滚刀基本齿廓的不同段, r 、 β 都是相同的, 而 ρ 、 α 、 e 、 N 是不相同的, 所以编程前需要计算出每段的 ρ 、 α 、 e 、 N 的值。具体如下:

$$\text{齿顶 AB 段: } \begin{cases} \rho = r_s = \frac{\rho_f + h_f + e_f}{2} - \frac{l_f^2}{2(\rho_f - h_f - e_f)} \\ e = h_f - r_s \\ N = 0 \\ \alpha_A = \pi/2, \alpha_B = \arctan \frac{h_f + e_f - r_s}{l_f} \end{cases} \quad (3-4)$$

$$\text{凸弧 BC 段: } \begin{cases} \rho = \rho_f \\ e = -e_f \\ N = -l_f \\ \alpha_c = \delta_2, \alpha_B = \arctan \frac{h_f + e_f - r_s}{l_f} \end{cases} \quad (3-5)$$

过度 CD 段, 设点 C、D 的坐标分别为 (x_C, y_C) 、 (x_D, y_D) , 则:

$$\left. \begin{cases} x_C = \rho_f \sin \delta_2 - e_f \\ y_C = \rho_f \cos \delta_2 - l_f \\ x_D = -(\rho_a \sin \delta_1 + e_a) \\ y_D = \pi m / 2 + l_a - \rho_a \cos \delta_1 \end{cases} \right\} \begin{cases} e = \frac{(x_D^2 - x_C^2) - (y_D - y_C)^2 + 2x_D(y_D - y_C) \cot \delta_1}{2[x_D - x_C + (y_D - y_C) \cot \delta_1]} \\ N = y_D + (e - x_D) \cot \delta_1 \\ \rho = (e - x_D) / \sin \delta_1 \\ \alpha_D = \delta_1, \alpha_C = \arctan \frac{x_C - e}{y_C - N} \end{cases} \quad (3-6)$$

$$\text{凹弧 DE 段: } \begin{cases} \rho = \rho_a \\ e = -e_a \\ N = \frac{\pi m}{2} + L_a \\ \alpha_D = -\delta_1, \alpha_E = -\arcsin\left(\frac{h_a - e_a}{\rho_a}\right) \end{cases} \quad (3-7)$$

式 (3-2) 中双重正负号者, 上面的对应左侧齿面, 下面的对应右侧齿面。程序主要由四部分组成, 分别代表对应于图 1 基本齿廓从 A 到 E 四段的滚刀曲线, 每部分结构都相同。程序的主要结构为嵌套循环, 外层循环控制滚刀轴向廓形的左右, 由变量 j 来控制; 内层循环计算滚刀每段曲线上点的坐标值, 由变量 i 来控制。非工作段 AB 和 CD 的点数可以取得少点, 工作段 BC 和 DE 的点数则要取得多些, 这样有利于提高工作段的精度。

3.1.2 程序的实现

图 (3-2) 是在 Visual Basic 6.0 中打开的计算滚刀廓形的主窗体, 该窗体也可以计算滚刀的轴向廓形, 只需使窗体中的“分度圆前角”为 0 即可。下面举例说明这个程序的功能和使用方法。



图 3-2 计算滚刀轴向廓形主窗体

以表 1 中规定的双圆弧齿轮滚刀的基本齿廓参数为准，选取滚刀参数如下：
 滚刀法向模数 $m_n = 10\text{mm}$ ，外径 $d_o = 200\text{mm}$ ，容屑槽数 $z_t = 12$ ，铲背量 $k = 14\text{mm}$ ，
 分度圆上的螺旋升角 $\lambda = 3^\circ 16' 33''$ ，分度圆直径 $d = m_n / \sin \lambda$ ，滚刀采用负前角，
 分度圆上的前角为 $\gamma = 15^\circ$ ，螺旋参数 $p = r \tan \lambda = 5.00819\text{mm}$ ，铲磨开始前，设
 两轴最短距离为 $A = d/2 + 50\text{mm}$ 。

运行程序，出现上面窗体，单击窗体中的“读入数据”命令按钮，“基本齿廓参数”框架和“滚刀参数”框架中的所有已知参数数据都被读入，如图 3-3。单击“计算滚刀廓形”命令按钮，程序将计算出该例的滚刀前刀面刀刃上点的坐标值，并将这些坐标打印到与窗体所在目录相同路径的名为“滚刀前刀面廓形”的记事本中。单击“显示坐标”命令按钮，程序将显示滚刀前刀面所有 8 段刀刃的点的坐标值。单击“结束”按钮，程序将停止运行并返回到 Visual Basic 6.0 的主界面。



图 3-3 读入数据后的窗体

双圆弧齿轮滚刀轴向廓形的绘制是通过 Visual Basic 6.0 在 Solidworks2003 平台中编程实现的, 过程如下:

1) 打开 Solidworks2003, 单击“文件”下的“新建”项, 出现“新建 Solidworks 文件”窗口, 单击“模板”, 选择列表框的“零件”, 然后单击“确定”新建一个名为“Part1”的 Solidworks2003 零件。

2) 单击菜单栏的“工具”选项出现下拉菜单, 选择其中的“宏操作”下的“新建”选项出现“新建宏”窗口, 输入所要命名的文件名并选择所保存的路径后单击“保存”, 出现标题为刚才所命名的文件名的“Microsoft Visual Basic”程序编辑窗体。在下面的窗口中输入下面的代码:

```
Option Explicit
Dim Part As Object
Dim boolstatus As Boolean
Dim longstatus As Long
Dim Annotation As Object
Dim Gtol As Object
Dim DatumTag As Object
Dim FeatureData As Object
Dim Feature As Object
Dim Component As Object
Dim swApp As Object
Sub main()
.....
Set swApp = Application.SldWorks
End Sub
```

上面的代码是实现 VB 与 Solidworks 接口的通用代码。在其中的“Sub main()”下面输入计算滚刀廓形的主体程序就可以实现双圆弧齿轮滚刀前刀面廓形或者滚刀轴向廓形的绘制。

程序编好后, 进行调试直到最后无任何错误, 保存程序。然后单击工具栏中的“运行”或者按 F5 运行程序, 程序将自动在 Solidworks2003 中画出双圆弧齿轮滚刀的前刀面廓形并将廓形上点的坐标值输出到指定的文本文件中。图 3-4 (a) 是根据前面的例子绘制的滚刀前刀面廓形, 前角不为零的滚刀前刀面左右廓形是不对称的。

至于滚刀轴向廓形的绘制, 只需使程序中的滚刀分度圆前角: $\gamma = 0$, 运行程序即可实现, 如图 3-4 (b)。

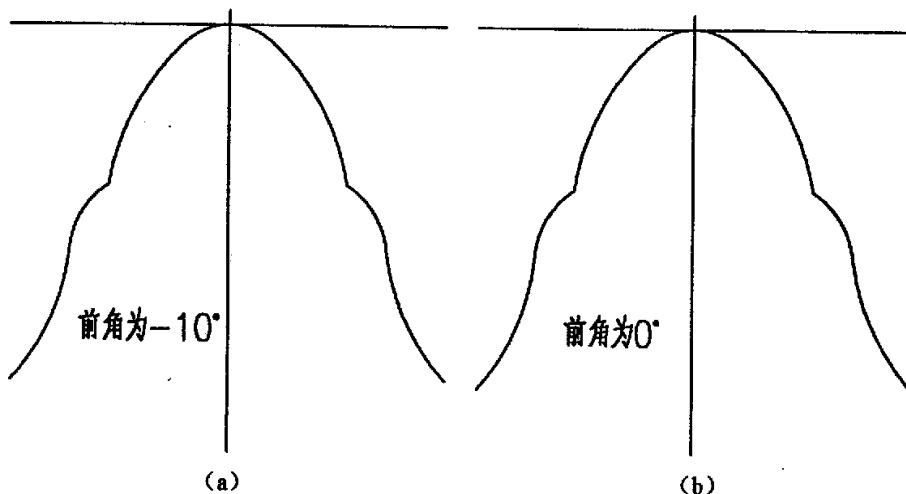


图 3-4 不同前角的双圆弧齿轮滚刀的前刀面廓形

在 Solidworks2003 中继续对滚刀轴向廓形进行扫描、拉伸、切除—拉伸和阵列等特征编辑就可以做出滚刀的三维造型，如图 3-5。

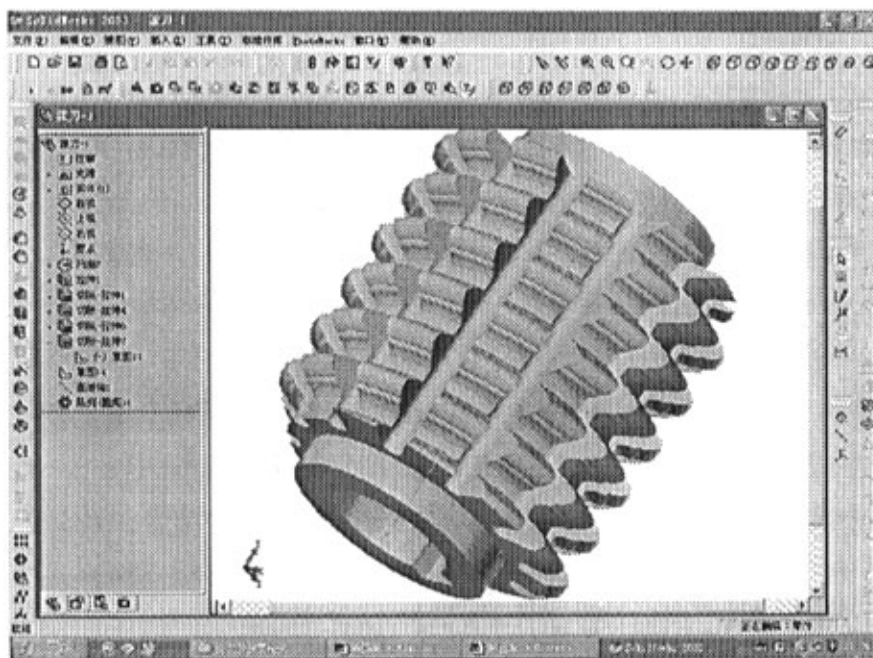


图 3-5 滚刀三维造型图

3.2 砂轮轴向廓形的绘制

3.2.1 编程前的准备

由第二章知，要实现砂轮轴向廓形的绘制，关键是求解超越方程 (2-19)。

在给定初始参数的情况下，方程(2-19)可以表示为： $\theta = \theta(\alpha)$ 。解超越方程只能通过数值方法来实现，具体有二分法，简单迭代法，牛顿迭代法，抛物线法和弦割法等等。然而对于方程 $\theta = \theta(\alpha)$ ，因为很复杂，单纯从表达式看我们对它了解很少，只知道根据实际意义它在图3-1所示的从A到E的每个点上有一个根，而且对方程求导太麻烦，所以采用二分法。二分法的优点是算法简单，不需要对方程进行繁杂的求导计算，有根一定能找到。这个算法需要给定一个误差 ε ，其步骤如下：

1. 先找到方程 $\theta = \theta(\alpha)$ 有根的一个区间 (α_1, α_2) 求 $\theta(\alpha_1)$ ， $\theta(\alpha_2)$ ；
2. 令 $\alpha_3 = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$ ，求 $\theta(\alpha_3)$ ；
3. 若 $\theta(\alpha_3)$ 与 $\theta(\alpha_1)$ 同号，则用 α_3 代替 α_1 ，否则 α_3 代替 α_2 ；
4. 若 $\alpha_2 - \alpha_1 > \varepsilon$ ，返回第二步，否则结束。

3.2.2 程序的实现

从第二章的推导知，砂轮轴向廓形是根据啮合原理由滚刀基本齿廓方程和滚刀方程以及啮合条件共同推导出来的，所以前面从式(3-4)到式(3-7)的基本齿廓参数的计算同样适用于砂轮。程序的主要结构为由式(2-19)表示的自定义的函数和嵌套循环。循环的控制与前面滚刀轴向廓形相同， j 控制外层； i 控制内层，不同的式内层循环还增加了用二分法求式(2-19)的根的程序。

图3-6是在Visual Basic 6.0中打开的计算砂轮轴向廓形的主窗体，可以看出它和图3-2几乎一样，只是右下角多出“砂轮轴和滚刀轴距离”一项。下面仍以前面计算滚刀轴向廓形的例子为例说明这个程序的功能和使用方法。

运行程序，出现上面窗体，单击窗体中的“读入数据”命令按钮，“基本齿廓参数”框架和“滚刀参数”框架中的所有已知参数数据都被读入，如图3-6。单击“计算砂轮廓形”命令按钮，程序将计算出该例的砂轮轴向廓形上点的坐标值，并将这些坐标打印到与窗体所在目录相同路径的名为“砂轮轴向廓形”的记事本中。单击“显示坐标”命令按钮，程序将将打开该记事本并显示砂轮轴向廓形所有8段刀刃的点的坐标值。单击“结束”按钮，程序将停止运行并返回到Visual Basic 6.0的主界面。



图 3-6 计算砂轮轴向廓形主窗体

砂轮轴向廓形的绘制和前面滚刀轴向廓形的绘制相同，也是在 Solidworks 中进行宏操作实现的。下面图 3-7 是在 Solidworks2003 中绘制的砂轮轴向廓形图。

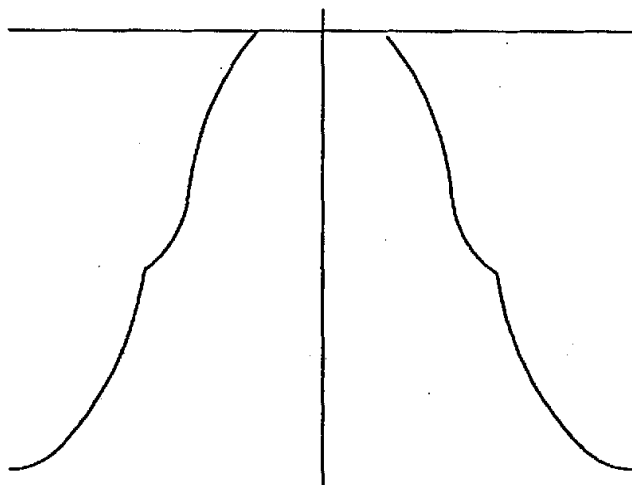


图 3-7 砂轮轴向廓形

图 3-8 是在 Solidworks2003 中绘制的滚刀前角不同时的砂轮轴向廓形图。

由图中可以看出，不同滚刀前角的砂轮廓形左右都不对称，而且滚刀前角越小的砂轮廓形越矮胖，前角越大的砂轮廓形越瘦长。

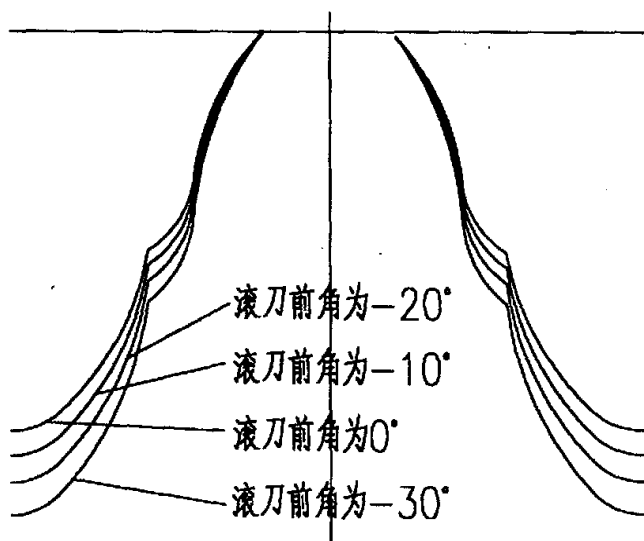


图 3-8 滚刀齿顶前角不同时的砂轮轴向廓形

砂轮轴向廓形画出来之后，在 Solidworks2003 中继续对该二维图形进行旋转和切除特征编辑就可以做出砂轮的三维造型，如图 3-9。

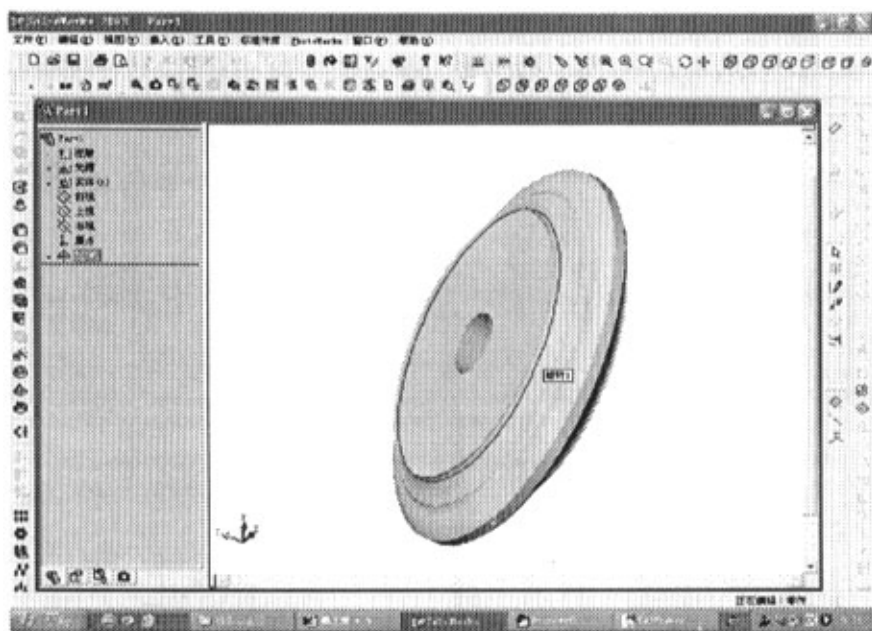


图 3-9 砂轮三维造型图

3.3 本章小结

本章利用 Visual Basic 6.0 语言编程求解啮合方程，并在 SolidWorks 软件平台上编程实现了双圆弧齿轮滚刀轴向廓形和铲磨砂轮轴向廓形的绘制，做出了滚刀和砂轮的三维造型图。主要结论如下：

- 1) 由于双圆弧齿轮齿廓比较复杂，编程前要对基本齿廓每段的基本参数的情况进行详细分析。
- 2) 从程序运行结果看，不论是零前角还是负前角的直槽滚刀的铲磨砂轮轴向廓形左右侧都是不对称的。
- 3) 滚刀前角越小的铲磨砂轮轴向廓形越矮胖，滚刀前角越大的铲磨砂轮轴向廓形越瘦长。

第四章 刮刀铲磨干涉校验的解析方法

在双圆弧齿轮刮刀的制造过程中,必须对刮刀的齿背曲面进行铲磨,以便形成顶刃后角和侧刃后角,这样才能进行正常刮削加工;否则后刀面必然和已加工表面发生摩擦。此外,铲磨还能消除热处理变形和提高刀具寿命。硬质合金刮削滚刀只需要对刀片进行铲磨即可。由于刀具结构参数的限制,铲磨砂轮的外径不能过大,否则会在铲磨的过程中发生干涉现象,即铲磨刀片全部齿背时,大外径的铲磨砂轮易与后继刀齿发生碰撞。因此,在双圆弧齿轮刮刀的设计及铲磨加工中,必须进行铲磨干涉校验^[24-26]。目前一般采用图解法进行铲磨干涉校验,也有某些工厂采用试磨的方法。图解法虽然直观,但校验精度和效率都不高,其主要缺点为:

- 1) 近似步骤多,造成校验精度降低;
- 2) 人为因素影响较大,校验结果的稳定性和可靠性较差;
- 3) 破坏了设计过程的计算连贯性,不利于实现刮刀的 CAD/CAPP/CAM;
- 4) 校验工作量大,效率低,难以进行参数优化;
- 5) 刀具结构参数改变后,校验的重复工作量不变;
- 6) 方法不一,结果各异。

而试磨法无论从经济上还是效率上考虑都是不可取的。所以有必要用解析法对刮刀的铲磨干涉进行校验,这样不仅可以提高校验精度、效率和经济性,而且为铲磨砂轮外径的合理选择提供了便利,对双圆弧齿轮刮刀的优化设计及制造提供了一定的理论依据和实用价值。

4.1 基本原理

如图 4-1 所示,以双圆弧齿轮刮刀的端面投影图为基础,首先推导出刮刀铲背曲线方程;其次根据刀齿齿顶铲磨部分所占的比例(由 c、d 点的位置而定)确定刀齿齿底铲背曲线上的铲磨终点 a,并求出 a 点的法线斜率,铲磨砂轮的圆心 O_s 位于 a 点的法线上;然后由下一个刀齿前刀面上被铲磨齿形最低点 b 的坐标求出通过 b 点时铲磨砂轮的外径 D_s ,即可得到给定刀具结构参数条件下发生铲磨干涉时的最小砂轮外径 D_{sgmin} ,若 D_{sgmin} 不大于拟采用的铲磨砂轮外径,则会发生铲磨干涉,需要减小拟采用的砂轮外径;若拟采用的是铲磨砂轮可用的最

小外径 D_{smin} (一般为 $60mm$)，则需要改变刀具的结构参数，然后重复进行上述校验计算，直至满足要求为止。整个校验计算过程可以按优化原则自动进行。

4.2 校验计算过程

以一般的整体式双圆弧齿轮滚刀为例，具体说明解析法的校验计算过程。

4.2.1 参数说明

D_c ——被铲磨滚刀的外径

h ——被铲磨齿形高度

K ——一次铲背量

K_1 ——二次铲背量

D_s ——铲磨砂轮外径

O_s ——铲磨砂轮中心

O ——被铲磨滚刀中心

r_c ——槽底圆角半径

H ——被铲磨滚刀容屑槽深

Z_k ——被铲磨滚刀圆周齿数

$D_{sg\ min}$ ——发生干涉时的最小砂轮外径

$D_{s\ min}$ ——可以使用的铲磨砂轮最小外径 (一般为 $60mm$)

a ——刀齿齿底一、二次铲背曲线的交点 (铲磨中止点)

b ——下一个刀齿前刀面上被铲磨齿形的最低点 (干涉校验点)

c ——刀齿齿顶一、二次铲背曲线的交点 (刀齿齿顶铲磨部分的实际长度)

d ——刀齿齿顶二次铲背曲线与容屑槽的交点

θ —— c 点及 a 点的极角

α_{an} —— a 点的法线与 x 轴的夹角

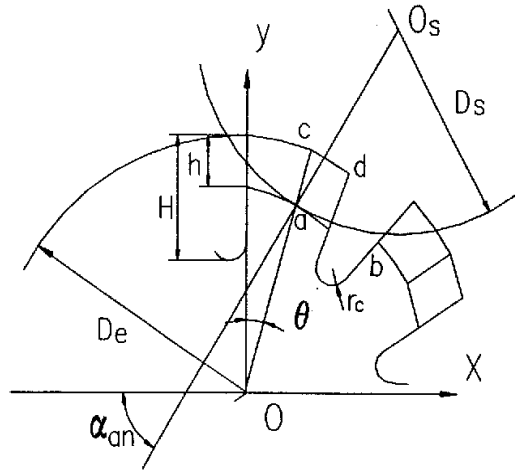


图 4-1 铲磨干涉校验解析法的计算原理示意图

4.2.2 刀齿铲背曲线的方程

铲磨滚刀时，铲背曲线为等距圆锥螺旋线。图 4-2 为图 4-1 中一个刀齿的铲磨详图。图中点 e 为一次铲背曲线与滚刀容屑槽边的交点， σ 为滚刀槽形角，

θ_c 和 θ_e 分别为 c 点和 e 点的极角, Δ 为二次铲背量 K_1 相对于一次铲背量 K 在滚刀齿顶方向的超出量。由该图所示的刀具端面投影几何关系可以得到右旋滚刀铲磨部分齿顶一次铲背曲线以极角 θ 为参变量的极坐标方程为:

$$\begin{cases} \rho_s = \frac{D_c}{2} - \frac{K_v}{2\pi} \theta \\ z = \frac{P_z}{2\pi} \theta \end{cases} \quad (4-1)$$

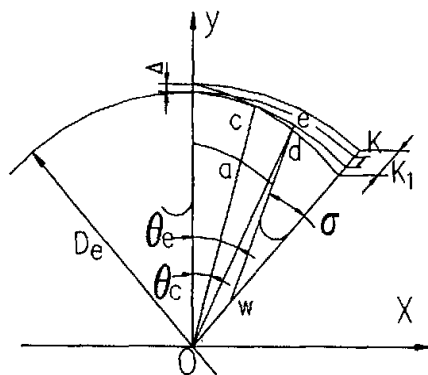


图 4-2 I 型齿背

式中, D_c 为滚刀外径, K_v 为一转铲背量, P_z 为滚刀基本蜗杆轴向导程。 K_v 按下式计算:

$$K_v = \frac{P_k + P_z}{P_k} K Z_k \quad (4-2)$$

式中, P_k 为滚刀螺旋槽导程 (对于直槽滚刀, $P_k = \infty$), K 为一次铲背量, Z_k 为刮刀的圆周齿数。

齿底一次铲背曲线方程为:

$$\begin{cases} \rho_s = \frac{D_c}{2} - h - \frac{K_v}{2\pi} \theta \\ z = \frac{P_z}{2\pi} \theta \end{cases} \quad (4-3)$$

式中, K_v 由 (4-2) 式表示。

非铲磨部分 cd 段是在二次铲背中形成的, 其齿顶铲背曲线方的极坐标方程与所采用的齿背形式有关。当采用图 4-2 所示的 I 型齿背时, 极坐标方程为:

$$\begin{cases} \rho_s = \frac{D_c}{2} + \Delta - \frac{K_v}{2\pi} \theta \\ z = \frac{P_z}{2\pi} \theta \end{cases} \quad (4-4)$$

式中, Δ 为二次铲背量 K_1 相对于一次铲背量 K 在滚刀齿顶方向上的超出量; K_v 按下式计算:

$$K_v = \frac{P_k + P_z}{P_k} K_1 Z_k \quad (4-5)$$

4.2.3 铲磨砂轮外径圆的方程

在给定刀齿齿顶铲磨部分占刀齿齿顶部分的比例系数 t 的情况下, 需要根据图 4-2 先求出 c 点和 e 点的极角 θ_c 和 θ_e , 过程如下。

由图 4-2 知, $\angle eow = \frac{2\pi}{Z_k} - \theta_e$, 而 $\angle oew = \sigma - \angle eow = \sigma - \frac{2\pi}{Z_k} + \theta_e$ 。在三角

形 Owe 中:

$$\frac{\rho_{se}}{\sin \sigma} = \frac{\overline{ow}}{\sin(\sigma - \frac{2\pi}{Z_k} + \theta_e)} \quad (4-6)$$

由容屑槽底圆与容屑槽两边相切的关系有:

$$\overline{ow} = \frac{D_e}{2} - H + r_c - \frac{r_c}{\tan(\sigma/2)} \quad (4-7)$$

所以, 由前面 (4-6) 与 (4-7) 式得:

$$\rho_{se} = \frac{\left(\frac{D_e}{2} - H + r_c - \frac{r_c}{\tan(\sigma/2)} \right) \sin \sigma}{\sin(\sigma - \frac{2\pi}{Z_k} + \theta_e)} \quad (4-8)$$

将上式与 (4-1) 式联立得:

$$\frac{D_e}{2} - \frac{K_v}{2\pi} \theta_e = \frac{\left(\frac{D_e}{2} - H + r_c - \frac{r_c}{\tan(\sigma/2)} \right) \sin \sigma}{\sin(\sigma - \frac{2\pi}{Z_k} + \theta_e)} \quad (4-9)$$

由上式用数值方法可以求出极角 θ_e 。

比例系数 t 的含义为一次铲背曲线上从前刀面到 c 点的弧长与从前刀面到 e 点的弧长的比值。设这两段弧长分别为 s_c 和 s_e , 则根据 (4-1) 式和曲线弧长的积分公式有:

$$s_c = \int_0^{\theta_c} \sqrt{\rho_s^2 + (\rho_s')^2 + (z')^2} d\theta = \int_0^{\theta_c} \sqrt{\left(\frac{D_e}{2} - \frac{K_v}{2\pi} \theta \right)^2 + \frac{K_v^2 + P_z^2}{4\pi^2}} d\theta \quad (4-10)$$

$$s_c = \int_0^{\theta_c} \sqrt{\left(\frac{D_c}{2} - \frac{K_v}{2\pi}\theta\right)^2 + \frac{K_v^2 + P_z^2}{4\pi^2}} d\theta \quad (4-11)$$

求解该定积分得:

$$s_c = \frac{1}{V} \left[\frac{U}{2} \sqrt{U^2 + W} - \frac{U - V\theta_c}{2} \sqrt{(U - V\theta_c)^2 + W} + \frac{W}{2} \ln \frac{U + \sqrt{U^2 + W}}{U - V\theta_c + \sqrt{(U - V\theta_c)^2 + W}} \right] \quad (4-12)$$

$$\text{式中, } \begin{cases} U = D_c / 2 \\ V = KZ_k / 2\pi \\ W = (K^2 Z_k^2 + P_z^2) / 4\pi^2 \end{cases} .$$

s_c 的展开式与 (4-12) 式完全相同, 只是将其中的 θ_c 换成 θ_s 即可。所以由 $t = s_c / s_s$ 与前面 (4-9) 式到 (4-12) 式联立用数值方法编程可以求出 θ_s 。

下面求解铲削超量 Δ 。图 4-2 中, c 点为一、二次铲背曲线的交点, 所以在此处两铲背曲线的极径相等。令 (4-1) 式与 (4-4) 式相等得:

$$\frac{P_k + P_z}{P_k} K_1 Z_k \theta_c = 2\pi\Delta + \frac{P_k + P_z}{P_k} KZ_k \theta_c \quad (4-13)$$

该式中, 在 θ_c 已求出的情况下, 除 Δ 外都是已知量, 所以由该式可以求出与 t 相对应的铲削超量 Δ 。

由铲齿工艺可知, a 点的极角与 c 点的相同, 将 θ_c 代入 (4-3) 式即可得到 a 点的极径 ρ_{sa} 以及 a 点的直角坐标 x_a 和 y_a :

$$\rho_{sa} = \frac{D_c}{2} - h - \frac{K_v}{2\pi} \theta_a \quad (4-14)$$

$$\begin{cases} x_a = \rho_{sa} \sin \theta_a \\ y_a = \rho_{sa} \cos \theta_a \end{cases} \quad (4-15)$$

c 点和 a 点决定了刀齿齿背的铲磨部分, 铲磨时应保证该部分齿背都能被磨出, 因此, a 点是铲磨终止点, 而 c 点则给出了刀齿齿顶铲磨部分的实际长度。

只考虑端面投影, 将 (4-3) 式的第一项化成直角坐标为:

$$\begin{cases} x_s = \left(\frac{D_c}{2} - h - \frac{K_v}{2\pi} \theta \right) \sin \theta \\ y_s = \left(\frac{D_c}{2} - h - \frac{K_v}{2\pi} \theta \right) \cos \theta \end{cases} \quad (4-16)$$

将上式对 θ 求导得:

$$\begin{cases} \frac{dy_s}{d\theta} = -\frac{K_v}{2\pi} \cos\theta - \left(\frac{D_c}{2} - h - \frac{K_v}{2\pi}\theta\right) \sin\theta = -\frac{K_v}{2\pi} \cos\theta - x_s \\ \frac{dx_s}{d\theta} = -\frac{K_v}{2\pi} \sin\theta + \left(\frac{D_c}{2} - h - \frac{K_v}{2\pi}\theta\right) \cos\theta = -\frac{K_v}{2\pi} \sin\theta + y_s \end{cases} \quad (4-17)$$

所以, 过齿底一次铲背曲线上 a 点的法线斜率为:

$$\tan \alpha_{an} = -\frac{dx_s}{dy_s} = \frac{\left(\frac{D_c}{2} - h - \frac{K_v}{2\pi}\theta_a\right) \cos\theta_a - \frac{K_v}{2\pi} \sin\theta_a}{\left(\frac{D_c}{2} - h - \frac{K_v}{2\pi}\theta_a\right) \sin\theta_a + \frac{K_v}{2\pi} \cos\theta_a} \quad (4-18)$$

式中, K_v 由 (4-2) 式表示, θ_a 与 θ_c 相等。

由于铲磨砂轮外径圆在 a 点处与刀齿齿底一次铲背曲线相切, 因此铲磨砂轮的圆心 O_s 位于 a 点的法线上。由图 (4-1) 可以得出 O_s 的坐标为:

$$\begin{cases} x_{os} = x_a + \frac{D_s}{2} \cos \alpha_{an} \\ y_{os} = y_a + \frac{D_s}{2} \sin \alpha_{an} \end{cases} \quad (4-19)$$

所以根据 (4-19) 式可以写出铲磨砂轮外径圆的方程为:

$$(x - x_{os})^2 + (y - y_{os})^2 = \left(\frac{D_s}{2}\right)^2 \quad (4-20)$$

4.2.4 铲磨干涉检验

由图 (4-1) 可以得出 b 点的极径和极角为:

$$\begin{cases} \rho_{sb} = \frac{D_c}{2} - h \\ \theta_b = \frac{2\pi}{Z_k} \end{cases} \quad (4-21)$$

所以可知 b 点的直角坐标为:

$$\begin{cases} x_b = \rho_{sb} \sin \theta_b \\ y_b = \rho_{sb} \cos \theta_b \end{cases} \quad (4-22)$$

由图 (4-1) 可以看出, 当刚发生铲磨干涉时, b 点的坐标满足 (4-20) 式, 所以将 (4-19) 式和式 (4-22) 式代入 (4-20) 式得:

$$(x_b - x_a - \frac{D_s}{2} \cos \alpha_{an})^2 + (y_b - y_a - \frac{D_s}{2} \sin \alpha_{an})^2 = \left(\frac{D_s}{2}\right)^2 \quad (4-23)$$

化简、整理上式可以得到发生铲磨干涉时的砂轮最小外径 $D_{sg\min}$ 为:

$$D_{sg\min} = \frac{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}{(x_b - x_a) \cos \alpha_{an} + (y_b - y_a) \sin \alpha_{an}} \quad (4-23)$$

将(4-15)式、(4-17)式和(4-21)式代入(4-23)式得到由已知参数表示的 $D_{sg\min}$ 为:

$$D_{sg\min} = \frac{\left(\frac{D_c}{2} - h\right)^2 - (D_c - 2h)\left(\frac{D_c}{2} - h - \frac{K_v}{2\pi}\theta_a\right)\cos\left(\frac{2\pi}{Z_k} - \theta_a\right) + \left(\frac{D_c}{2} - h - \frac{K_v}{2\pi}\theta_a\right)^2}{\left(\frac{D_c}{2} - h\right)\sin\left(\frac{2\pi}{Z_k} + \alpha_{an}\right) - \left(\frac{D_c}{2} - h - \frac{K_v}{2\pi}\theta_a\right)\sin(\theta_a + \alpha_{an})} \quad (4-24)$$

式中, K_v 由(4-2)式表示, θ_a 由(4-9)式到(4-12)式求出, α_{an} 由(4-18)式解出。

由(4-24)式求得 $D_{sg\min}$ 后就可以进行铲磨干涉校验:

- 1) 若 $D_{sg\min}$ 大于预选的 D_s , 则不会发生铲磨干涉;
- 2) 若 $D_{sg\min}$ 大于可以使用的砂轮最小外径 $D_{s\min}$, 则可在两者之间选择合适的铲磨砂轮外径 D_s ;
- 3) 若 $D_{sg\min}$ 小于 $D_{s\min}$, 则需改变滚刀的结构参数, 或者减小刀齿齿顶铲磨部分的比例, 然后重新进行上述校验计算;
- 4) 可按预定的优化次序和范围逐次改变滚刀的结构参数, 直至满足要求。

4.3 基于无铲磨干涉的滚刀基本参数的确定原则

当实际采用(或设计时拟采用)的铲磨砂轮外径 $D_s > D_{sg\min}$ 时, 需要重新选取更小的 D_s 或进行参数修改使 $D_{sg\min}$ 增大。由于结构上的限制, D_s 不能任意小, 通常具有一个下限 $D_{s\min}$, 一般定为 60mm。因此, 无干涉的铲磨砂轮外径 D_s 应大于 $D_{s\min}$, 且小于 $D_{sg\min}$, 并应尽量接近 $D_{sg\min}$ 以提高铲磨效率和铲磨质量。若 $D_{sg\min} < D_{s\min}$, 则只能采用参数修改的方法来避免干涉。

4.3.1 给定算例的 $D_{sg\min}$ 和 Δ

以 GB/T14348.1—1993 双圆弧圆柱齿轮基本齿廓参数表中模数为 8 和 10 的双圆弧齿轮滚刀为例，下面给出它们的基本参数表。

表 4-1 $m_n=8mm$ 的双圆弧齿轮滚刀结构参数及铲背量

法向模数 m_n	滚刀外径 D_e	轴向导程 P_z	齿形高度 h	容屑槽轴向导程 P_k	容屑槽数 Z_k	一次铲背量 K	二次铲背量 K_1	容屑槽深度 H	槽底圆角半径 r_c	容屑槽角 σ
8	160	25.174	16	∞	12	12	18	32	2.513	25°

表 4-2 $m_n=10mm$ 的双圆弧齿轮滚刀结构参数及铲背量

法向模数 m_n	滚刀外径 D_e	齿形高度 h	轴向导程 P_z	容屑槽轴向导程 P_k	容屑槽数 Z_k	一次铲背量 K	二次铲背量 K_1	容屑槽深度 H	槽底圆角半径 r_c	容屑槽角 σ
10	200	20	31.467	∞	12	14	21	38	3.351	22°

根据表 4-1 和表 4-2 中的数据，应用 (4-1) 式到 (4-24) 式就可以计算出相应的发生铲磨干涉的最小砂轮外径 $D_{sg\min}$ 和齿顶铲削超量 Δ ，计算结果列于下表。

表 4-3 $m_n=8mm$ 的被铲磨双圆弧齿轮滚刀校验计算结果

齿顶铲磨部分比例系数 t	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
发生铲磨干涉的最小砂轮外径 $D_{sg\min}$	126.369	94.015	71.184	54.485	41.990
齿顶铲削超量 Δ	1.05694	1.41504	1.77629	2.14070	2.50826

表 4-4 $m_n=10mm$ 的被铲磨双圆弧齿轮滚刀校验计算结果

齿顶铲磨部分比例系数 t	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
发生铲磨干涉的最小砂轮外径 $D_{sg\min}$	170.422	122.856	90.5769	67.641	50.877
齿顶铲削超量 Δ	1.31066	1.75499	2.20301	2.65497	3.11114

由表 4-3 和 4-4 的计算结果可以看出，当齿顶铲磨部分所占的比例 t 越大时，发生铲磨干涉的最小砂轮外径 $D_{sg\min}$ 越小；当 t 大于 0.6 时， $D_{sg\min}$ 将小于 60mm。若要保持 t 不变，则需要改变被铲磨滚刀的结构参数及铲背量。此外，齿顶铲削超量 Δ 与 t 有关， t 越大则 Δ 也越大。

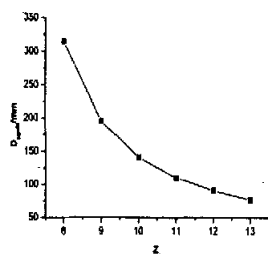
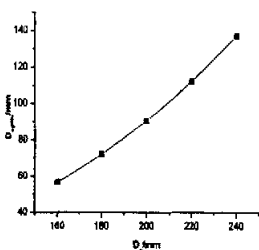
4.3.2 给定算例的 $D_{sg\min}$ 的敏感性分析

以 $m_n=10mm$ 的滚刀为例，根据表 4-2 的基本参数，采用单因素法，对各参数改变后对 $D_{sg\min}$ 变化的影响程度进行敏感性分析。分析采用变化幅值比和变

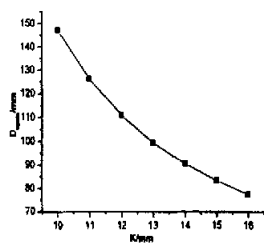
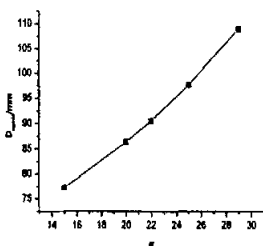
化比值作为评价指标。变化幅值比为变化幅值与表 4-2 中所列的基本幅值之比，变化比值则为相关的变化幅值比之比。

图 4-3 给出了基本参数改变后 $D_{sg\ min}$ 的变化情况。

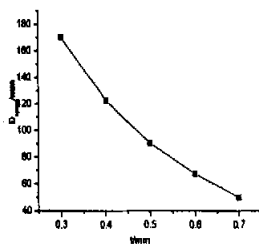
由图 4-3 中可以看出：当 D_e 增加(变化幅值比为 20.00%)时， $D_{sg\ min}$ 逐步增大(变化幅值比为 23.76%，变化比值为 1.188)；当 Z_k 增加(变化幅值比为 20%)时， $D_{sg\ min}$ 逐步减小(变化幅值比为 55.56%，变化比值为 2.778)；当 σ 增加(变化幅值比为 31.18%)时， $D_{sg\ min}$ 逐步增大(变化幅值比为 20.27%，变化比值为 0.65)；当 K 增加(变化幅值比为 14.286%)时， $D_{sg\ min}$ 逐步减小(变化幅值比为 14.44%，变化比值为 1.006)；当 t 增加(变化幅值比为 40%)时， $D_{sg\ min}$ 逐步减小(变化幅值比为 56.17%，变化比值为 1.404)。



(a) D_e 改变后 $D_{sg\ min}$ 的变化情况 (b) Z_k 改变后 $D_{sg\ min}$ 的变化情况



(c) σ 改变后 $D_{sg\ min}$ 的变化情况 (d) K 改变后 $D_{sg\ min}$ 的变化情况



(e) t 改变后 $D_{sg\ min}$ 的变化情况

图 4-3 基本参数改变后 $D_{sg\ min}$ 的变化情况

按变化幅值比， Z_k 最大，其次分别为 K 和 t ，再后为 D_e 和 σ 。变化幅值比

反映了在基本参数附近取值时的绝对变化状态,说明了参数对 $D_{sg\min}$ 的绝对影响。按变化比值 Z_k 最大, t 次之, 再其次分别为 D_e 和 K , σ 最小。变化比值说明了各参数对 $D_{sg\min}$ 的客观影响程度。

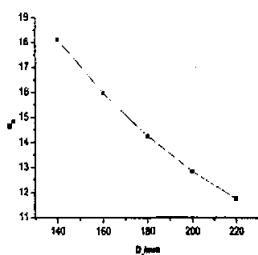
总之, $D_{sg\min}$ 对 Z_k 和 t 的敏感性大, D_e 和 K 次之, σ 最小, 这与实际情况相符。

4.3.3 基本参数改变后对滚刀端面齿顶后角 α_B 的影响

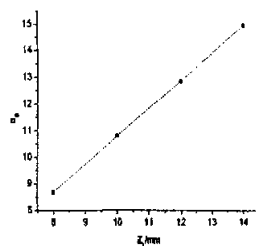
D_e 、 Z_k 和 K 变化时, 会对刀具后角 α_B 产生影响。由图 4-4 中可知, 当 D_e 增加(变化幅值比为 25%)时, α_B 逐步减小(变化幅值比为 19.57%, 变化比值为 0.7828); 当 Z_k 增加(变化幅值比为 40%)时, α_B 逐步增大(变化幅值比为 38.45%, 变化比值为 0.96);

当 K 增加(变化幅值比为 40%)时, α_B 逐步增大(变化幅值比为 38.45%, 变化比值为 0.96),

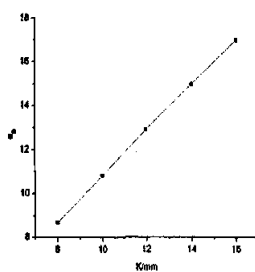
三者与 α_B 之间的变化关系基本呈线性, 且增减趋势均与对 $D_{sg\min}$ 的增减趋势相反。



(a) D_e 改变后对 α_B 的影响



(b) Z_k 改变后对 α_B 的影响



(c) K 改变后对 α_B 的影响

图 4-4 基本参数改变后 α_B 的变化情况

4.3.4 基本参数确定的原则及次序

(1) D_e 在无严

格要求时才可以适当改变, 但变化幅度不能大, 否则切削扭矩大, 浪费刀具材料。

D_e 小幅变化时, 对 $D_{sg\min}$ 和 α_B 的影响不是很大, 可作为辅助修改参数。

(2) Z_k 的变化将会显著改变滚刀结构, 是最为重要的一个结构参数, 在保证刀齿强度和重磨次数的条件下, 应尽量取大值。在其它参数修改无效和难以修改时, 减小 Z_k 可以明显达到无干涉的目的。由此所引起的 α_B 的减小可通过其它参数的反向修改而补偿。

(3) σ 的变化对 $D_{sg\min}$ 的影响不大, 可作为对 α_B 有较高要求时的辅助修改参数。

(4) K 对 $D_{sg\min}$ 的影响程度没有对 α_B 的影响程度大, 只适合在对 α_B 变化要求不高的情况下采用。

(5) t 只在采用 I 型齿背时才具可变性。此时, 通过 t 的变化可以有效地控制 $D_{sg\min}$, 并且与 α_B 无关。同时 t 还可以任意连续变化, 实现微量调整。

(6)参数修改时需根据 $D_{s\min}$ 与 $D_{sg\min}$ 之间差值的大小有选择地进行。若差值不大, 则可按 t 、 σ 、 D_e (允许改变时)、 K 、 Z_k 的次序进行修改。若差值较大, 则说明参数设计(选择)不合理, 应首先考虑修改 Z_k 和 t , 然后按 K 、 D_e (允许改变时)和 σ 的次序进行调整, 以满足实际要求(包括 α_B)。

4.4 本章小结

本章从理论上对发生铲磨干涉时的铲磨砂轮最小半径 $D_{sg\min}$ 与滚刀基本参数的关系进行了推导, 据此讨论了基于无铲磨干涉的滚刀基本参数的确定原则。主要结论有:

1) 对于 I 型齿背, 当其他参数不变时, 齿顶铲磨部分所占的比例 t 越大, 则齿顶铲削超量 Δ 越大, 而发生铲磨干涉时的最小砂轮外径 $D_{sg\min}$ 越小; 对于 GB/T14348.1—1993 中规定的滚刀参数, 当 t 相同时, 模数越大则发生铲磨干涉时的最小砂轮外径 $D_{sg\min}$ 越大。

2) 按变化幅值比, Z_k 对发生铲磨干涉的最小砂轮外径 $D_{sg\min}$ 的影响最大, 其次分别为 K 和 t , 再后为 D_e 和 σ ; 按变化比值, Z_k 最大, t 次之, 再其次分别为 D_e 和 K , σ 最小。

3) D_e 、 Z_k 和 K 与滚刀端面齿顶后角 α_B 的变化关系基本呈线性关系, 且

它们对 α_B 的影响与对 $D_{sg\ min}$ 的影响相反。

4) 基于无铲磨干涉原则确定滚刀基本参数时需根据 $D_{s\ min}$ 与 $D_{sg\ min}$ 之间差值的大小有选择地进行。若差值不大, 则可按 t 、 σ 、 D_e (允许改变时)、 K 、 Z_k 的次序进行修改。若差值较大, 应首先考虑修改 Z_k 和 t , 然后按 K 、 D_e (允许改变时)和 σ 的次序进行调整, 以满足实际要求。

第五章 刮削滚刀的设计、制造与刮削试验

双圆弧齿轮滚刀和渐开线齿轮滚刀主要在齿形上不同。渐开线齿轮滚刀齿形是直线，双圆弧齿轮滚刀在同一个刀齿上，既有凸形齿廓，又有凹形齿廓。所以，渐开线齿轮滚刀和双圆弧齿轮滚刀的设计，在齿形方面有很大不同，在结构设计方面则有很多共同点^[1]。

长期以来，由于圆弧齿轮基本齿廓的概念不够清楚，往往把齿轮的法向齿形，滚刀的法向齿形及基本齿廓混为一谈，以至出现切出的圆弧齿轮实际尺寸和理论尺寸不符的现象。经过多年理论研究和论证，圆弧齿轮基本齿廓应定义为“圆弧齿轮基本齿条在法截面内的齿形为基本齿廓”。此定义明确后，可以得到一下结论：圆弧齿轮齿面或基本蜗杆齿面应当是它们与基本齿条作展成运动所形成的包络面。只要存在齿廓圆心移距量 e （即 $e \neq 0$ ）滚刀基本蜗杆齿面都不是瞬时成形的，所以滚刀基本蜗杆法向齿形不可能与基本齿条的法面截形相重合。把基本齿廓作为滚刀基本蜗杆法向截形的作法，必然引起理论上的造型误差，导致齿轮的理论尺寸与实际尺寸不符。因此，滚刀基本蜗杆的齿形，必须按与基本齿条共轭的关系进行精确计算。

从而双圆弧齿轮滚刀的设计有两点要求：

- 1) 滚刀基本蜗杆的齿形，必须按与基本齿条共轭的关系求得；
- 2) 滚刀重磨后，各刀齿的侧切削刃形状不变，仍在基本蜗杆螺旋面上。

滚刀的切齿过程，是由滚刀刀齿左右两个刀刃分别切削齿轮。滚刀的左侧刀刃移动一个轴向距离，完成齿轮右侧齿廓的包络；滚刀的右侧刀刃移动一个轴向距离，完成齿轮左侧齿廓的包络。所以，从成形理论要求，滚刀只要有两圈齿，就能完整地包络出圆弧齿轮的整个齿廓。但是为了降低每个刀齿的切削负荷和被加工齿轮的表面粗糙度，滚刀一般有五到六圈。

双圆弧齿轮传动在工业中已经获得了广泛成功的应用，从软齿面、中硬齿面到调质氮化硬齿面的工艺研究已经日趋成熟。双圆弧齿轮具有接触强度高，润滑性能好等许多优点；但因其齿形有多个圆弧连接，很难进行磨齿加工，所以限制了双圆弧硬齿面齿轮的生产，从而限制了双圆弧齿轮承载能力和使用寿命的进一步提高。采用渗碳淬火回火热处理来提高齿面硬度是现实可行的工艺，但是该工

艺所产生的轮齿变形会较大程度地降低齿轮的精度,从而影响齿轮的承载能力和使用寿命,甚至会引起齿轮副卡死而无法正常运转,因此,热处理后的齿面精加工工艺成为关键。由于双圆弧齿轮齿形特殊,由多个圆弧连接,故很难制造,常时间未见有人试制。后来原机械工业部确定基金项目《渗碳硬化双圆弧齿轮超硬加工技术研究》的专题,决定采用负前角硬质合金刮削滚刀对淬火双圆弧齿轮进行刮削加工研究。

我所和中信重机公司共同研究、设计制造了 $m_n = 6mm$ 的双圆弧硬齿面刮前滚刀和硬质合金刮削滚刀,取得了一些初步经验。这项研究的成功将进一步提高双圆弧齿轮传动的承载能力和可靠性,扩大其在工业中的应用范围,对双圆弧齿轮传动技术的发展具有积极的意义。

硬质合金刮削滚刀一般做成分离式的,有焊接和镶齿两种结构,这次试验采用的是焊接结构。下面介绍刮削滚刀各部分尺寸的设计。

5.1 刀体部分尺寸的设计

1. 刀体外径

当滚刀外径尺寸确定后,可通过实际作图来确定刀体的外径。刀体外径尺寸应能保证刀片高出刀体齿顶不超过 $1 \sim 1.5mm$,以保证刀片齿顶圆弧有足够的强度。通常有: $De - D_{刀体} \leq 2 \sim 3mm$

式中, De ——滚刀外径, $D_{刀体}$ ——刀体外径。

2. 刀体端剖面牙型

刀体端剖面牙型如图 5-1 所示,牙型各部分的尺寸要求如下:

- (1) 刀体焊接表面高度 H'

$$H' = H_0 - (1 \sim 1.5)mm$$

式中, H_0 ——刀片焊接面高度。

- (2) 齿槽全齿深 H

$$H = \text{刀片槽深度} + \text{铲背量 } K + (0.5 \sim 1)mm$$

- (3) 刀片径向定位台阶宽度 b

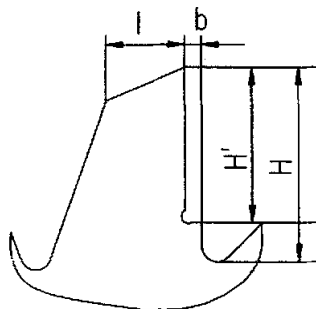


图 5-1 刀体端剖面牙型

b 约为 $2\sim 3\text{mm}$ ，并在直角处切出一个越程槽，以保证刀体与刀片焊接表面紧密贴合；也可采用刀片倒角的形式。

(4) 刀体牙型在端剖面中的厚度 l

该厚度不得小于刀片厚度的 $2\sim 3$ 倍，以防止刀片焊接后由于焊接面产生过大的应力而产生裂纹。

5.2 刮削滚刀的结构参数

1. 外径 D_e

外径是滚刀的重要结构参数，其大小直接影响到其它结构参数的合理程度。根据加工齿轮精度等级的不同，可以选择不同的滚刀外径。加工精度高的齿轮，滚刀的外径应选择大一些；加工精度低的齿轮，滚刀的外径可选择小一些。

大的滚刀外径可使孔径增大，滚刀芯轴的刚度也随之提高，从而能采用较大的切削规范大幅度提高切削效率。增大滚刀外径后，还可使容屑槽的数目增加，减少切削时齿轮齿面的包络误差，减小滚刀单齿的切削负荷，降低轮齿表面粗糙度和提高滚刀的使用寿命。

我所设计和使用过的滚刀外径如下表所示。

表 5-1 硬质合金滚刀主要结构参数 (mm)

模数 m_n	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6	7	8	9
外径 D_e	115	130	150						160	180		
长度 L	70				90	100	110	125	130	145		
内孔 D	50									60		
容屑槽数 Z_f	14					12						
模数 m_n	10	12	14	16	18	20	22	24	25	26	28	
外径 D_e	200	210	220	250			280	295	300	315		
长度 L	160	180	200	230	250		280	350				
内孔 D	60			80								
容屑槽数 Z_f	10					9	8					

2. 滚刀长度 L

滚刀的长度由工作部分长度和两端轴台的长度组成。滚刀工作部分的最小长

度应满足两个要求：1) 能完整地包络出齿轮的齿廓；2) 滚刀的边缘刀齿不应负荷过重。此外，还要考虑使滚刀磨损均匀而进行轴向窜刀所必须的长度增加量。

滚刀的轴台为检验滚刀安装准确程度的基准，它要求与滚刀内孔保持严格的同轴度。我们所用滚刀的长度见表 5-1。

3. 滚刀孔径 D

滚齿时，滚刀受到周期性切削力的作用，力的大小和着力点不断改变，受力情况复杂，容易引起振动。因此，要求增大孔径来保证刀杆必要的刚度。孔径的大小应和滚齿机所带刀杆的直径值相符合。根据实践经验，常用滚刀孔径如表 5-1 所示。

在增大孔径的同时，尚需考虑滚刀要有足够的强度，刀体的壁厚不得小于 $0.3D$ 。内孔直径确定后，应按以下公式校验其强度：

$$D_c/2 - H - (t_1 - D/2) \geq 0.3D$$

式中， H ——滚刀容屑槽深度；

t_1 ——内孔底到键槽顶的距离。

4. 容屑槽数 Z_k

滚刀的容屑槽一般做成与轴心线平行的直槽形式。这种槽型不仅能提高制作和刃磨的精度，而且便于检查。滚刀的容屑槽数关系到切削过程的平稳性、齿形精度、齿面粗糙度，以及每次重磨后的耐用度和总体使用寿命。容屑槽越多，切削重叠系数越大，分配在每一个刀齿上的负荷相应减小，因此切削过程十分平稳，滚刀的耐用度也就越高。滚刀的容屑槽数越多，齿面的包络误差就越小，这对提高齿轮的齿形精度和降低齿面粗糙度十分有利。但另一方面，滚刀圆周齿距小，相应的滚刀齿厚亦小，滚刀重磨次数少，降低了滚刀使用寿命。

常用滚刀的容屑槽数见表 5-1。

5. 分度圆直径与螺纹升角

滚刀的分度圆直径 d 为： $d = D_c - 2.2m_n - (0.2 - 0.25)K$ 。

滚刀分度圆的螺纹升角与滚刀安装状况有关。螺纹升角 λ 可通过下式计算：

$$\sin \lambda = m_n \cdot n / d$$

式中， m_n ——滚刀法向模数；

n ——滚刀螺纹头数，精滚刀 $n = 1$ 。

6. 滚刀铲背量

双圆弧齿轮滚刀也是用径向铲齿法铲齿，以得到刀齿后角。但是双圆弧齿轮滚刀的轴向齿形是曲线，径向铲齿形成的侧铲面是“圆锥性螺旋面”，不能保证任意轴向剖面内齿形相同。滚刀重磨后，齿形发生微小变化。一般说，圆弧齿轮应“跑合”后，才投入满载使用，从而能把重磨滚刀后产生的齿形误差给以一定的消除。

铲背量的大小，应该使最小齿侧后角 α_c 不小于 $1'30''$ ，使滚刀刀齿侧面减少磨损。铲背量的计算公式为： $K = \pi D_c \tan \alpha_B / Z_k$

式中， α_B ——滚刀顶刃后角，一般取 $12^\circ \sim 16^\circ$

Z_k ——滚刀容屑槽数。

7. 滚刀的切削角度

(1) 前角 γ

硬质合金滚刀的前角采用大负前角，其值的大小与滚刀的模数和被加工齿轮的硬度等有关。如被加工齿轮的硬度在 50HRC 以上，可选用如下参数： $m_n < 20mm$ ， $\gamma = -30^\circ$ ； $m_n = 20mm$ ， $\gamma = -25^\circ$ ； $m_n = 22 \sim 25mm$ ， $\gamma = -22^\circ$ ； $m_n > 26mm$ ， $\gamma = -20^\circ$ 。如被加工齿轮的硬度为 34~50HRC， γ 可选用 $-12^\circ \sim -15^\circ$ 。硬度小于 340HB 的工件，则可以用铝高速钢或钴高速钢滚刀加工。

(2) 后角 α_c

滚刀的后角有顶刃后角和侧刃后角，两者之间的关系为：

$$\tan \alpha_c = \tan \alpha_B \sin \delta / \cos \lambda$$

式中， δ ——滚刀基本齿廓齿形工艺角

5.3 刮前滚刀的制造

负前角硬质合金刮削滚刀刀齿齿顶不应参与切削，所以齿轮齿根圆弧最好不留余量。为此，我们确定 $m_n = 6mm$ 双圆弧齿轮刮前滚刀的流量和流量形式如图

5-2 所示, 由于齿轮齿顶一般都要倒角, 故齿轮齿根不流量部分稍大于标准齿形的非工作部分。

1. 刮削留量的确定

刮削留量指的是刮前滚刀所留的齿厚留量。足够的刮削留量能保证刮削加工有效进行, 但刮削留量太大会失去其经济性。刮削留量大小由两个因素决定: 一是设计留量, 即不少于两次刮削所要求的最小留量; 二是热处理最大变形量。一次刮削留量不能太小, 一般不小于 0.06mm (单边), 否则会改变刮削性质, 产生挤滑现象。而热处理变形量影响因素很多, 只有批量生产时方可找出其变形规律。对本次试验齿轮热处理前、后齿根圆直径和公法线长度进行测量, 两者的最大变形量分别为 $+0.135\text{mm}$ 和 $+0.105\text{mm}$ 。此次刮削试验的刮削留量为

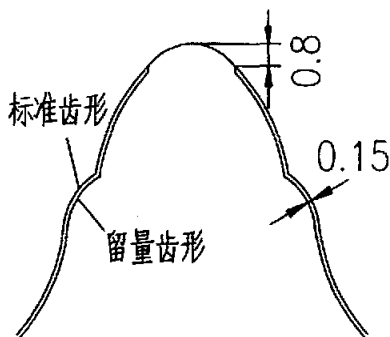


图 5-2 刮前滚刀法向齿形

0.15mm (单边), 是由刮前滚刀的留量齿形保证的。由于热处理变形和加工误差等因素的影响, 实际的刮削留量有一定的变化, 但能满足刮削试验的要求。

2. 刮削留量的位置

双圆弧齿形的过渡弧在使用中不参加工作, 其精度要求较低, 但为了提高刮前滚刀留量齿形的加工工艺性, 应该留量。为了减轻硬质合金刮削滚刀的负担, 设计时刮前滚刀齿顶圆弧部分不留量。但在刮削过程中刮削滚刀的齿顶圆弧是否参加刮削, 取决于热处理变形量。刮削留量的位置是由刮前滚刀的留量齿形保证的(见图 5-2)。

5.4 双圆弧负前角硬质合金刮削滚刀的制造

硬质合金滚刀大都选用高强度、高性能的硬质合金材料制作, 通常采用大负前角的特殊结构设计, 使刀齿前面与切削速度方向斜交成一定的角度, 切削刃先从根部开始切入, 然后逐渐向顶部扩展, 形成一个斜角切入过程 (见图 5-3)。斜角切

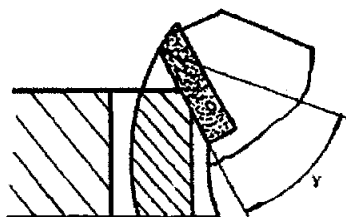


图 5-3 负前角滚刀切削齿轮

入能降低切削力变化所引起的切削振动，减小切削刃的冲击载荷，从而减少刀齿崩刃的可能性。另外，切削刃的工作长度相对加长，刀齿的磨损也相应减小。

综合考虑各种因素，硬质合金滚刀一般选择 $-30^{\circ} \sim -10^{\circ}$ 的径向负前角。如用于加工齿面硬度较低的齿轮，也可采用较小的径向负前角。

为避免负前角滚刀顶刃参加切削，以减少滚切加工的不利因素，硬质合金滚刀的齿顶高应取小一些。如果齿顶高过大，顶刃必然参加切削，这将使切削力骤然剧增，从而造成切削振动加大，刀片也容易挤裂和崩刃。

硬质合金滚刀的切削厚度一般在 $0.1 \sim 0.25mm$ 之间。如厚度大于 $0.25mm$ ，则刀片受力过大，将在切入侧产生崩刃；如厚度小于 $0.1mm$ ，则刀齿切出侧切削量过小，刀片将与工件产生滑移并导致崩刃，使齿面粗糙度难以达到规定的要求 ($R_a = 25\mu m$)。

5.4.1 硬质合金滚刀的结构

负前角硬质合金滚刀有多种结构形式，我国目前主要采用以下两种结构。

1. 焊接结构

为便于刃磨，焊接结构的刀片齿顶、齿侧应高出刀体约 $1 \sim 1.5mm$ ，但最多不能超过 $2mm$ (参见图 5-4)。这种结构的设计和制造均较简单，工作性能可靠。焊接工艺是保证刀具性能良好的重要环节，我们采用 105 焊料进行高频手工钎焊。受焊接温度的影响，焊接结构刀片的耐用度约降低 $20\% \sim 30\%$ ，甚至会出现焊接应力过大，滚刀加工齿轮时大部分刀齿焊接部位出现裂缝而使刀具报废的现象。

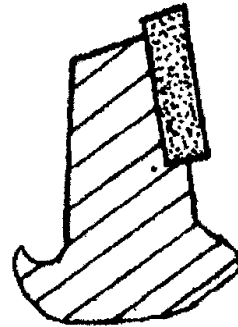


图 5-4 焊接结构

2. 粘接结构

如图 5-5 所示，在刀片底面配合槽、螺钉孔和销子孔内均涂有无机粘接剂，借助粘接剂在这些槽孔内的胀力将刀片固定。试验表明，直径 $6mm$ 、深 $5mm$ 的一个销孔可承受

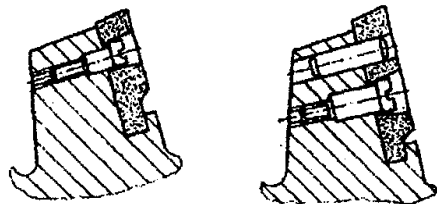


图 5-5 粘接结构

$1500kg \cdot cm$ 的力矩，该力矩已超过刀片强度，因此每次正常试验都是刀片被挤

裂后才开始松动的。一些厂矿单位使用这种粘结结构制作的滚刀多年均未发生刀片松动现象。

粘接结构的优点：①刀片不受焊接高温影响，能保持原有的特性，耐用度比钎焊刀片提高 25 % 左右；②刀体可重复使用，刀片磨薄后用氨水浸泡一定时间即可卸掉；③粘接费用低廉，仅为焊接费用的 1/4~1/6；④无需昂贵的焊接设备，所用装置中小工具厂均可自行制备。

我们这次试验采用的是焊接滚刀，所以下文着重介绍焊接刀片的制造工艺。

5.4.2 刀片焊接

1. 刀片材料

我们对国内生产的多种刀片进行了切削试验，最后筛选出 YT05 和 726 作为刀片材料备用品种。目前，我所使用最多的是 726，刀具毛坯由自贡硬质合金厂提供。

2. 刀片形状

考虑到试制期间刀片数量不多，订制符合前刀面计算坐标点形状的留量刀很不经济，故选择了适当大小的渐开线刮削滚刀刀片，将其线切割成所需形状的留量刀片（选用 $m_n = 7mm$ 、 -30° 前角的渐开线刮削滚刀刀片，专用型号为 T87073）。考虑到焊接质量，尤其是刀片位置的准确性、磨削余量等因素，我们使用刀片的形状如图 5-6 所示。先把焊接面磨平后数控线切割成前刀面齿形周边流量 $0.2mm$ 的双圆弧齿形刀片。模数 $m_n = 6mm$ 的刀片厚度为 $8mm$ ，刀片两边和底部留有定位部位，给焊接带来很多方便，焊接质量也有所提高。

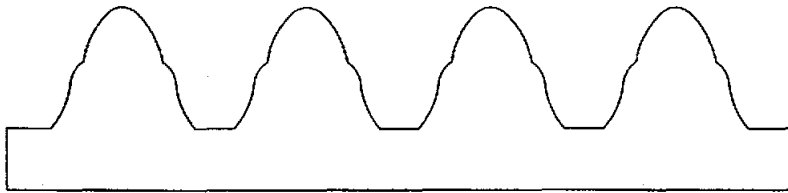


图 5-6 焊接刀片形状

选用 105 焊料，高频手工钎焊，焊接温度由低到高逐渐升温到 $900^\circ C$ （让刀片有个温度扩散时间）。升温过快，会因刀片局部温差大，涨量不等，造成刀片裂纹。焊后 $250^\circ C \sim 260^\circ C$ 即时回火，时间为 3~5 小时，最后随炉冷却，消除

焊接应力。这种焊料和焊接方法，焊接强度可靠。

5.4.3 齿形铲磨

为保证滚刀精度选用了型号为 AGW482 德国进口滚刀磨床，其偏位值 $e=19.14mm$ ，偏差控制在 $0.01mm$ ；容屑槽相邻误差不超过 $0.02mm$ ，容屑槽累积误差在 $0.031mm$ 以内；表面粗糙度 $R_a \approx 0.4\mu m$ 。

由于齿形的加工为成形磨削，为使砂轮形状修整到能磨出完全合格的齿形来，我们选用了人造金刚石 RVD、粒度 150、浓度 100%、树脂结合剂 B 和成形专用金刚石砂轮。砂轮做成单侧的，四段圆弧相连接，可以一次铲磨出滚刀左侧或右侧全部齿形。

使用德国进口的 HSF33B 铲磨床进行铲磨试验。铲磨时，先铲磨滚刀左侧齿面。左侧齿面铲磨完后，将滚刀轴前后调换重新装夹好，调整好铲磨砂轮安装角后就可以铲磨滚刀右侧齿面。

5.5 刮削试验

5.5.1 刮削加工条件

1. 主要技术指标和刮削加工试验齿轮参数

原机械工业部基金项目技术合同规定的主要技术指标为：齿轮模数 $m_n = 4 \sim 10mm$ ；齿轮精度 7 级；齿面硬度 58HRC~62HRC；齿面粗糙度 $R_a \leq 3.2\mu m$ ；载荷系数 $K \geq 2.5MPa$ 。

试验齿轮达到的技术指标：模数 $m_n = 6mm$ ；刮削加工后精度达到 7 级 (GB/T15753-19995)；齿面硬度 59HRC；齿面粗糙度 $R_a = 0.8\mu m \sim 1.6\mu m$ ；载荷系数 $K \approx 2.8MPa$ 。

刮削加工试验齿轮参数的确定，关键是模数，我们选择了模数为 $6mm$ 的齿轮。刮削加工试验齿轮的参数见表 5-2。该模数是工业用双圆弧齿轮中较常见的，具有一定代表性。

表 5-2 刮削试验件的参数

	模数 m_n / mm	齿数 Z	螺旋角 β	齿宽 b/mm	试验载荷系数 K/MPa
小齿轮	6	16	$16^{\circ}15'37''$	85	2.6 MPa
大齿轮	6	32	$16^{\circ}15'37''$	85	2.6 MPa

$m_n = 6mm$ 的双圆弧硬质合金齿轮刮削滚刀的 7 级精度的主要项目、要求公差和实际检测数值如表 5-3。表中要求为 AA 级精度。

表 5-3 $m_n = 6mm$ 硬质合金双圆弧刮削滚刀制造精度

序号	检 查 项 目	数值/ μm	
		要求	实测
1	孔径偏差	11	12
2	轴台的径向跳动	4	5
3	轴台的端面跳动	3	4
4	刀齿前面的径向性及偏位值偏差	15	10
5	容屑槽的相邻周节差	19	20
6	容屑槽周节的最大累积误差	36	31
7	刀齿前刀面与内孔轴线的平行度	50	30
8	工作部分切削刃的齿形误差	15	15
9	齿厚偏差	± 25	± 10
10	相邻切削刃的螺旋线误差	6	10
11	滚刀 1 转内切削刃的螺旋线误差	12	16
12	滚刀 3 转内切削刃的螺旋线误差	20	24
13	齿距最大偏差	± 12	± 12

2. 刮削加工试验齿轮的工艺流程

刮削加工试验齿轮的材料选择了优质渗碳淬火钢 20CrNi2Mo，齿部渗碳淬火 58HRC；齿部外径 $\phi 240mm$ 。表面热处理采用常规的渗碳淬火回火处理，处理后的有效渗层深度要求为 $1.0mm \sim 1.4mm$ ，实测为 $1.3mm$ ，齿面硬度要求为

58HRC~62HRC, 实测为 58HRC。

齿轮加工工艺流程为: 锻造 → 粗车 → 探伤 → 调质 → 半精车 → 刮前滚齿 → 渗碳 → 车碳层 → 淬火回火 → 精车 → 磨基准面 → 加工键槽 → 刮削 → 检验。

3. 刮削滚刀和试验齿轮的装夹要求

刮削加工时较大的切削力会引起机床较大的变形和振动, 这种变形和振动会影响齿轮的刮削精度, 严重时会引起刮削滚刀崩刃, 产生严重后果。因此刮削加工需要刚性较好的机床。本次刮削加工试验选用 Y 3180H 滚齿机, 这种滚齿机在国内较为普遍, 具有一定的代表性。为了保证刮削加工精度, 在安装刮削滚刀时应保证其两凸台径向跳动不大于 0.01mm , 滚刀中心齿中线应正对工作台中心线。刮削试验齿轮的工装夹具要刚性好、强度高, 而且要方便找正装夹。大齿轮(盘形)的夹具比较简单, 也容易满足上述要求, 找正齿轮基准面的径向跳动及端面跳动均不大于 0.01mm ; 对轴类齿轮, 单纯采用卡盘加顶尖效果不理想, 可采用锥套形夹具或卡箍, 找正齿轮基准轴径的径向跳动不大于 0.01mm 。刮削试验中, 第二次进刀时要对刮削滚刀和试验齿轮的找正数据进行复测, 如有较大变化应重新找正安装, 并分析其变化原因。

5.5.2 试验结果

1. 刮削试验中的误差分析

软齿面、中硬齿面滚齿误差的来源对硬齿面刮削加工同样存在, 机床的固有误差、滚刀的误差、工装夹具的误差以及一些人为的因素仍然是刮削加工的误差来源。不同的是, 由于试验件的齿面硬度很高(58HRC 左右), 刮削加工时的切削力明显增大, 所引起系统的振动较软齿面、中硬齿面滚齿为大, 因此更容易产生加工误差。

2. 硬质合金滚刀的寿命

试验过程中不断对滚刀进行观察, 发现刀刃白亮带变化缓慢, 试验件全部刮削完成, 没有进行刃磨, 观察白亮带宽度小于 0.1mm 。按两次刮削计算, 滚刀切削刃的刮削长度超过 80m 。

3. 试验结果

刮削结果, 刀齿无脱焊崩刃; 一次刃磨切削长度大于 80m , 刀齿后刀面最大磨损不超过 0.02mm ; 工件齿面粗糙度接近 $R_a = 0.8\mu\text{m}$ 。

从试验结果来看,用精度较高的滚齿机和高质量的硬质合金滚刀,选择适当的切削用量和工装夹具,精心调整后进行刮削加工,齿轮精度可以达到7级(GB/T 15753-1995),齿面粗糙度可以小于 $R_a 1.6\mu m$ 。通过这次刮削试验研究,为渗碳淬火硬齿面双圆弧齿轮的精加工的推广应用提供了依据。

5.6 本章小结

本章主要讨论了硬质合金双圆弧齿轮刮削滚刀的设计与制造,主要结论有:

1) 淬火双圆弧齿轮的刮削加工,刮前滚刀齿顶不留余量,以免刮削滚刀切削力骤然增大,造成刀片挤裂或崩刃;刮前滚刀留量的大小要综合考虑设计留量和热处理变形最大量。

2) 硬质合金双圆弧刮削滚刀一般采用负前角结构,这样可以形成斜角切削,减小切削冲击。刮刀刀片的焊接最好采用高频手工钎焊,逐渐升温;焊后 $250^{\circ}C \sim 260^{\circ}C$ 即时回火,时间为3~5小时,最后随炉冷却,消除焊接应力。

3) 硬质合金双圆弧刮削滚刀的铲磨砂轮最好选用人造金刚石砂轮,砂轮做成四段圆弧相连的,这样装夹可以铲磨出滚刀左侧或右侧齿形。

4) 从刮削试验的结果来看,对于 $m_n = 6mm$ 的双圆弧齿轮,采用精度较高的滚齿机和高质量的硬质合金滚刀进行刮削加工,齿轮精度可以达到7级,齿面粗糙度可以小于 $R_a 1.6\mu m$,说明渗碳淬火双圆弧齿轮的刮削加工方法是可以推广应用的。

第六章 结论及展望

为了降低高硬齿面渗碳淬火双圆弧齿轮的加工成本, 加快渗碳淬火双圆弧齿轮的推广使用, 本文对硬质合金滚刀制造中的关键部分——滚刀的铲磨从理论上做了详细推导, 从而能为工程中铲磨砂轮廓形的制造提供理论指导。本文以空间双圆弧齿轮的啮合原理为基础, 推导了双圆弧齿轮滚刀前刀面方程、滚刀铲背曲面方程和铲磨滚刀的砂轮轴向廓形方程, 分析了滚刀重磨后基本蜗杆轴向廓形的偏差, 并给出了具体算例进行分析验证。本文还根据已建立的数学模型编程绘制了滚刀轴向廓形以及砂轮轴向廓形, 给出了铲磨滚刀时不发生干涉的最小铲磨砂轮外径的计算方法。论文的主要研究内容及结论有:

1) 根据 GB12759-1991 双圆弧圆柱齿轮基本齿廓参数表的规定和空间齿轮啮合原理, 推出了任意前角的法面双圆弧齿轮滚刀前刀面方程、滚刀铲背曲面方程和铲磨滚刀的砂轮轴向廓形方程以及重磨后滚刀基本蜗杆轴向廓形方程。分析了滚刀参数对重磨后滚刀基本蜗杆轴向廓形偏差的影响。结果表明: 重磨后直槽零前角滚刀的轴向廓形偏差小于直槽负前角滚刀轴向廓形的偏差, 用本文方法设计的铲磨砂轮铲磨出的直槽零前角和负前角滚刀在重磨角 $\varepsilon = 0^\circ \sim 6^\circ$ 的范围内都是精确的。

2) 根据第二章建立的数学模型用 Visual Basic 6.0 语言编程在 Solidworks2003 平台中开发了计算和绘制滚刀前刀面廓形、铲磨砂轮轴向廓形和滚刀重磨后基本蜗杆轴向廓形图的软件。软件运行表明: 不论是零前角还是负前角的直槽滚刀的铲磨砂轮轴向廓形左右侧都是不对称的, 而且滚刀前角越小的铲磨砂轮轴向廓形越矮胖, 滚刀前角越大的铲磨砂轮轴向廓形越瘦长。最后做出了滚刀和铲磨砂轮的三维造型。

3) 根据双圆弧齿轮滚刀的铲背曲线方程和滚刀结构参数推导出铲磨滚刀时发生干涉的铲磨砂轮最小外径 $D_{sg\ min}$ 和齿顶铲削超量 Δ 的计算公式, 并根据算例分析了容屑槽数 Z_k 、铲背量 K 和滚刀外径 D_e 等五个参数变化时对 $D_{sg\ min}$ 的影响及 Z_k 、 K 和 D_e 对滚刀端面齿顶后角 α_b 的影响情况。从分析结果看,

按变化幅值比, Z_k 对发生铲磨干涉的最小砂轮外径 $D_{sg\min}$ 的影响最大, 其次分别为 K 和 t , 再后为 D_e 和 σ ; 按变化比值, Z_k 最大, t 次之, 再其次分别为 D_e 和 K , σ 最小。 D_e 、 Z_k 和 K 与滚刀端面齿顶后角 α_B 的变化关系基本呈线性关系。

4) 硬质合金双圆弧刮削滚刀的铲磨砂轮最好选用人造金刚石砂轮, 砂轮做成四段圆弧相连的, 这样装夹一次可以铲磨出滚刀左侧或右侧齿形。从刮削试验的结果看, 对于 $m_n = 6\text{mm}$ 的双圆弧齿轮, 采用精度较高的滚齿机和高质量的硬质合金滚刀进行刮削加工, 齿轮精度可以达到 7 级, 齿面粗糙度可以小于 $R_a 1.6\mu\text{m}$, 说明渗碳淬火双圆弧齿轮的刮削加工方法是可以推广应用的。

基于论文的以上工作, 作者认为还有以下工作需要进一步展开和完善:

1) 对硬质合金双圆弧齿轮刮削滚刀的铲磨和淬火齿轮的刮削进行三维动态仿真, 这样可以对不同参数的齿轮和刮削滚刀进行仿真, 以提高研究效率, 降低研究成本。

2) 论文中计算出的滚刀前角不同的铲磨砂轮轴向廓形是不同的。为了提高砂轮通用性, 降低砂轮使用成本, 需要根据包络理论论证是否根据零前角滚刀的刀刃曲线推导出的铲磨砂轮也能正确铲磨前角不为零的滚刀。

参考文献

- [1] 卢贤缙, 尚俊开著. 圆弧齿轮啮合原理. 北京: 机械工业出版社, 2003, 2
- [2] 吴序堂著. 齿轮啮合原理. 北京: 机械工业出版社, 1984, 3
- [3] 邵佳辉著. 圆弧齿轮. 北京: 机械工业出版社, 1994, 7
- [4] 四川省机械工业局编. 齿轮刀具设计理论基础. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [5] 袁哲俊, 刘华明, 唐宜胜 合编. 齿轮刀具设计. 新时代出版社, 1983, 9
- [6] 吴从析, 唐余勇编. 微分几何讲义. 高等教育出版社, 1985, 4
- [7] 赵汝嘉, 曹岩 主编. Solidworks2001 基础篇, 精通篇与提高篇, 开发篇. 北京: 机械工业出版社, 2002, 11
- [8] [美] Solidworks 著, 生信实维 编译. Solidworks 基本建模技术: 零件与装配体 (上, 下). 清华大学出版社, 2003, 4
- [9] [美] Evangelos Petroustos 著, 邱仲潘等译. Visual Basic 6 从入门到精通. 电子工业出版社, 1999, 1
- [10] 张树兵, 戴红, 陈哲 编著. Visual Basic 6.0 入门与提高. 清华大学出版社, 2000, 4
- [11] 潘健, 杨天 等 编著. AutoCAD2002 机械图形绘制精解. 人民邮电出版社, 2002, 3
- [12] 张晋西 编著. Visual Basic 与 AutoCAD 二次开发. 清华大学出版社, 2002, 7
- [13] 钱志良. 滚刀铲磨砂轮廓形的精确设计. 苏州丝绸工学院学报, 1988, 9
- [14] 吴洁, 王善政, 蔡春源. 提高圆弧齿轮跑合性能的滚刀设计方法. 机械设计与制造, 2002, 2
- [15] 陈远志, 安军, 范劲松. 双圆弧齿轮滚刀齿形的精确设计. 工具技术, 1994
- [16] 段德荣. 磨前双圆弧齿轮滚刀的齿形计算. 中国机械工程, 1995, 6
- [17] 陶冶, 崔为民, 陈渊, 周明英, 王德旋, 董庵, 张薇. 渗碳淬火双圆弧齿轮刮削工艺试验研究. 机械传动, 2003
- [18] 崔为民, 姚兰. 高速中硬齿面双圆弧齿轮滚切精度的控制. 机械工艺师,

1999, 5

- [19] 秦旭平, 李进宝, 许恒伟. 刮削硬齿面双圆弧齿轮—磨削硬齿面渐开线齿轮承载能力对比试验研究. 机械传动, 2000, 3
- [20] 秦旭平, 渗碳硬齿面双圆弧齿轮超硬加工技术. 山西机械, 2000, 6
- [21] 祁肃郎, 钮晰扬, 陈丽芳. 圆弧齿轮滚切加工成形过程探讨. 机械传动, 2003
- [22] 孙玉文, 王晓明, 曹利新, 刘健. 齿轮滚刀齿侧面精密铲磨的方法研究. 应用科学学报, 2000, 3
- [23] 杜立群, 孟玲茹. 铲磨渐开线蜗轮滚刀的砂轮修形新方法的研究, 机械设计与制造, 1997, 5
- [24] 聂钢, 毛世民, 吴序堂. 铲齿成形刀具齿顶铲磨长度的计算与控制. 机械科学与技术, 1997, 11
- [25] 聂钢, 吴序堂毛世民. 铲齿成形刀具铲磨干涉校验的解析方法. 工具技术, 1997, 3
- [26] 聂钢, 梅雪松, 毛世民, 吴序堂. 基于无铲磨干涉的铲齿刀具基本参数确定的研究, 机械设计, 1998
- [27] 韩振南, 李进宝, 熊诗波. 硬齿面双圆弧齿轮滚刀的齿面方程及二次刀具廓形设计. 中国机械工程, 2002, 6
- [28] 刘鹤然. 铲磨刮削滚刀的金钢砂轮之修磨. 机械传动, 2001
- [29] 姚运萍, 陈惠贤, 李宏惠. 铲齿成形铣刀铲磨砂轮廓形的计算机辅助设计. 甘肃工业大学学报, 2000, 2
- [30] 姚运萍, 陈惠贤. 高精度铲齿成形铣刀铲磨勇砂轮精确修形的研究. 机械研究与应用, 2000, 6
- [31] 孙玉文, 刘健. 基于误差补偿的刀具铲磨砂轮修形的数值模拟. 中国机械工程, 2000, 12
- [32] 陈树勋. 前角为 α 的成形铣刀铲磨勇砂轮轴向廓形计算新方法. 机械传动, 1994
- [33] 张邦栋, 申明付, 陆达兴. 双圆弧硬齿面齿轮刮前滚刀和硬质合金刮削滚刀的研制. 机械传动, 2000, 1
- [34] 申明付, 林晓晖, 焦少青, 张邦栋. 硬质合金滚刀的设计与制造. 工具技术,

1999, 11

- [35] 马丽心, 刘义翔, 郑大字. 齿轮滚刀的重磨和磨后测量的研究. 工业计量, 2002, 4
- [36] 杨老记, 谷群广. 齿轮滚刀造型误差的理论分析. 工具技术, 2003
- [37] 范绍唐, 王巧英. 圆弧齿轮制造工艺探讨. 太原重型机械学院学报, 2001
- [38] 姚南珣. 滚刀重磨后齿形误差的分析研究. 齿轮, 1980, 3
- [39] 唐余勇等. 刀具制造中的几何理论及其应用. 哈尔滨工业大学出版社, 1997
- [40] 马勇等. 硬质合金刮削齿轮滚刀的重磨. 机械工艺师, 1985, 6
- [41] 陈先, 袁之霜. 滚刀(设计与制造中的若干问题). 机械工业出版社, 1992, 5
- [42] 乐兑谦. 金属切削刀具. 机械工业出版社, 1985, 6
- [43] 胡忠孝. 淬硬齿轮滚切技术及其滚刀设计. 根据技术, 1986, 2
- [44] 徐建东. 提高硬质合金硬齿面滚刀重磨后齿形精度的研究. 山东工业大学硕士学位论文, 1988, 12
- [45] Faydor L. Litvin and Jian Lu. New Methods for Improved Double Circular-Arc Helical Gears. NASA CR-4771(ARL-CR-339), July 1997.
- [46] Litvin, F.L. Theory of Gearing. NASA RP-1212 (AVSCOM TR-88-C-035), 1989.
- [47] Litvin, F.L. Gear Geometry and Applied Theory. Prentice-Hall, Inc., 1994.
- [48] Litvin, F.L.; and Lu, J. Computerized Simulation of Generation, Meshing and Contact of Double Circular-Arc Helical Gears. Mathematical and Computer Modelling, vol. 18, no. 5, June 1993.
- [49] Litvin, F.L. and Lu, J. Computerized Design and Generation of Double Circular-Arc Helical Gears With Low Transmission Errors. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 127, no. 1-4, 1995.
- [50] Lu, J.; Litvin, F.L.; and Chen, J.S. Load Share and Finite Element Stress Analysis for Double Circular-Arc Helical Gears. Mathematical and Computer Modelling, vol. 21, no. 10, 1995.

附 录

在读期间发表的论文:

01. 李志胜, 翟红升, 高红梅. 高硬齿面双圆弧齿轮滚刀铲磨的研究. 机械传动 (已收录)

02. 翟红升, 王长明, 刘世军, 李志胜. ^{ZY-I型}硬齿面双圆弧齿轮弯曲承载能力的研究. 机械传动, 2005, 28(1): 10~13

在读期间翻译的文献:

1. 双面磨锥齿轮滚刀. 刊登在《齿轮资料》第 181 期.
2. ARROW 齿轮公司: 弧齿锥齿轮专业生产者. 刊登在《齿轮资料》第 181 期.
3. 高速直齿轮和斜齿轮轮齿的泵效应模型. 刊登在《齿轮资料》第 182 期.
4. 改善由于切屑挤压造成的硬质合金滚刀切削刀的崩刃——在汽车工业中应用这种方法的一些评价. 待刊登.
5. 了解购买经济实用齿轮箱的关键. 待刊登.

在读期间参与的项目:

01. 科学技术部科研院所技术开发研究专项资金项目“新型高参数双圆弧齿轮箱关键技术研究”(NCSTE-2002-JKZX-108)。

致 谢

光阴似箭，转眼间我的硕士学习生涯即将过去，在已逝去的日子里，无论是在学习、科研，还是生活方面都得到了许多老师、领导、朋友和同学的鼎力相助，所有这些我将永远铭记在心。

首先，感谢我尊敬的导师刘世军研究员和张廷健研究员。两位导师渊博的知识、严谨求实的治学态度、诲人不倦的指导作风以及忘我工作的精神，是我今后学习和工作的楷模。从论文的选题、开题直到完成论文的每个阶段，刘老师都严格把关、耐心审阅。同时，刘老师和张老师对人平和、亲切，教会了我平易近人的待人处事方式。

其次，忠心感谢郑州机械研究所的陈渊和刘忠明两位研究员，没有他们在课题的研究过程中和论文撰写中给予的指导和帮助，我是难以顺利完成论文的撰写的。

郑州机械研究所人事教育处陈冀中处长和秦俊荣、钟素娟两位老师在三年的学习和生活中给予了很多关心和帮助，在此致以诚挚的谢意！

感谢合肥工业大学赵韩、刘正士两位教授在我学习期间给予的指导和帮助。

感谢我的同学翟红升、高飞、王伟钦、郑化丽、李丽霞，使得我能够在平时学习中与他们互相交流、互相帮助、不断提高。

作者：李志胜

2005年7月