

精密螺纹 电火花加工

孙景刚 著

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

精密螺纹电火花加工/孙昌树著. —北京: 国防工业出版社, 1996. 4

ISBN 7-118-01496-6

I. 精… II. 孙… III. 螺纹, 精密-电火花加工 IV. TG661: TG62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 10797 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 33 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 15 $\frac{1}{2}$ 420 千字
1996 年 4 月第 1 版 1996 年 4 月北京第 1 次印刷
印数: 1—3000 册 定价: 22.80 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列出出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版，随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄 宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾 铎		
秘 书 长	刘琯德		
委 员	尤子平	朱森元	朵英贤
(按姓氏笔划为序)	刘 仁	何庆芝	何国伟
	何新贵	宋家树	张汝果
	范学虹	胡万忱	柯有安
	侯 迁	侯正明	莫梧生
	崔尔杰		

目 录

第一章 绪论	(1)
一、传统方法加工螺纹不易克服的难点	(1)
二、精密螺纹电火花加工的发明构思和发展	(7)
三、电火花加工精密螺纹应用实例	(9)
第二章 电火花加工螺纹的几种方式	(14)
一、同步共轭回转式	(14)
二、倍角共轭回转式	(26)
三、行星共轭式	(34)
四、共轭回摆式	(38)
五、平动扩张式	(42)
六、导向旋合式	(47)
七、差动旋转式	(50)
八、梳形电极差动式	(53)
九、几种加工方式的比较	(55)
十、锥度螺纹加工	(59)
第三章 螺纹牙型成形分析	(65)
一、牙底深度成形计算	(65)
二、径向进给牙型角度成形计算	(71)
三、尖角效应	(85)
四、共轭式与差动式成形分析比较	(91)
五、螺纹牙型精确成形的基本要求	(97)
六、轴向进给角度成形计算	(100)
七、复合进给角度成形计算	(107)
八、曲线牙型成形计算	(111)
九、电极牙顶高度相对损耗值的折算及测定	(114)

第四章 螺纹牙型干涉问题	(120)
一、一般分析	(120)
二、同步内接式干涉计算	(125)
三、倍角内接式干涉计算	(151)
四、同步外接式干涉计算	(184)
五、倍角外接式干涉计算	(189)
六、干涉对加工精度的影响及解决办法	(201)
七、不同加工方式干涉比较	(214)
第五章 机械偏差和精度分析	(223)
一、偏差分析的意义和依据	(223)
二、回转偏差及精度要求	(227)
三、转角偏差及精度要求	(232)
四、径向进给偏差及精度要求	(242)
五、分段移位偏差及精度要求	(257)
六、装夹偏差及精度要求	(262)
七、变形偏差及振动	(272)
八、各类偏差和精度要求的综合分析	(277)
第六章 典型工艺和加工准备	(284)
一、加工螺纹环规的一般工艺过程	(284)
二、螺纹环规的技术要求	(289)
三、螺纹环规坯件及其制造	(292)
第七章 工具电极和校对量规的设计和制造	(301)
一、工具电极设计和制造	(301)
二、螺纹环规、校对量规的设计和制造	(323)
第八章 精密螺纹加工通用技术方法	(331)
一、工件及工具电极的装夹	(331)
二、加工过程的电参数选择	(336)
三、径向定量进给值估算	(343)
四、分段移位法	(348)
五、更换螺纹电极对牙方法	(357)
六、螺纹加工尺寸控制	(361)
七、反极性加工法和获得高光洁表面的方法	(377)

第九章 直线牙型螺纹加工	(390)
一、公制普通螺纹量规加工	(390)
二、英制螺纹及圆柱管螺纹量规加工	(396)
三、梯形螺纹加工	(398)
四、方牙螺纹加工	(404)
五、锯齿形螺纹加工	(415)
第十章 圆牙型及圆锥螺纹加工	(426)
一、圆牙型螺纹加工	(426)
二、圆锥管螺纹加工	(433)
第十一章 工具和模具螺纹加工	(450)
一、塑料、玻璃模和金属压铸模螺纹加工	(450)
二、多头螺纹和滚丝模螺纹加工	(459)
第十二章 零件螺纹加工	(466)
一、带缺口槽螺纹	(466)
二、端盖不通头内螺纹	(469)
三、专用盘铣刀内螺纹	(473)
四、长管型零件内螺纹	(474)
五、薄壁零件螺纹	(475)
六、两头不通的螺旋油槽	(477)
七、硬质合金螺母	(481)
第十三章 辅助工艺	(482)
一、圆孔加工	(482)
二、有垂直度要求的自修装夹法	(496)

第一章 绪 论

一、传统方法加工螺纹不易克服的难点

虽然螺纹制件已经属于最普遍应用的机械零件之一,机械加工螺纹的手段已发展得比较成熟,然而并不完善。螺纹品种规格繁多,随工件结构、尺寸、精度、材料、牙型、旋向、导程和头数等而有所区别。其中有些规格类型设计上早有考虑,甚至已列入技术标准,但用传统工艺方法一直无法制造或很难制造,影响到实用推广。机械方法加工螺纹是“以硬克软”,工件要受机械切削或挤压力的作用。这对目前通用的常规螺纹件来说完全可以,能够具有较高的生产效率。但对于某些类型的螺纹件,特别是精密螺纹和特殊螺纹,往往不能适应这样的加工状态,从而反映出机械加工方法的固有弱点。其难度因素通常有以下几方面:

1. 结构尺寸 有些螺纹工件的结构形状和刚度使机械切削工具的空间布局或运动条件和施力条件受到限制,因而不能得到良好的切削效果。如加工小直径淬硬精密内螺纹和锥度内螺纹、大型特硬工件上加工螺纹、长管型零件的中部加工精密内螺纹、薄壁件上加工螺纹、加工特别细长的丝杆、加工带开口槽的精密螺纹件等。

2. 材料物理性能 对高硬度、高脆性或高韧性材料的工件加工精密螺纹往往会遇到困难,如在硬质合金或钨棒上磨削螺纹,很难达到精确成形;有些脆性特种钢材,用机械方法加工,工具易磨损,还无法避免螺纹棱角处产生裂缝或崩落;不锈钢、纯镍等切削韧性高,螺纹面成形质量常常很差等。

3. 螺纹参数 主要是牙型、导程和头数。一般来说,牙型角愈

小、导程愈大、愈难精确切削成形,采用磨削时砂轮对工件螺纹产生的干涉会严重影响加工精度。所以锯齿形和方牙精密螺纹都比较难加工。而曲线牙型和特殊牙型又比直线牙型的加工难度要大。另外,精密淬硬的多头螺纹切削加工或磨削时也往往会有较大的分头偏差和存在工具易磨损变形的问题。

近代科技发展需要的新型螺纹件,常常同时汇集了几种难度因素而使机械加工十分困难,甚至有时处于束手无策的状态。如加工硬质合金梯形螺纹环规,小直径滚珠丝杆螺母,不锈钢上加工小直径、深径比大的特殊牙型精密内螺纹,淬硬压模上加工盲孔型精密多头螺纹,加工硬质合金十个头的螺纹丝规等。

下面以精密内螺纹类型中的典型工件——螺纹环规加工为例,再具体分析一下机械加工方法的弱点。

机械加工成批生产中广泛应用螺纹环规作为加工外螺纹零件的测量工具,特别对小直径螺纹,生产过程中用环规测量,掌握尺寸公差方便可靠,效率也较高。可是环规本身技术要求很高,如中径公差一般为 0.01mm 左右,表面粗糙度要求 $R_a < 0.32\mu\text{m}$,而且工件必需淬硬,否则不耐用,因此制造比较困难。长期以来环规生产一直是机械加工中的薄弱环节,成为急待解决的普遍性问题。

随着生产的发展,需要的环规品种规格和数量愈来愈多,而专业制造厂只生产一些通用品种。因为对于某种规格的环规,只有需要量在百、千件以上,组织批量生产比较经济,否则效率低、成本高。专业厂现有生产方式不适宜于单件或小批量生产,而且品种规格一多,生产能力也不适应。

对一些批量很大的产品,如自行车、手表、显微镜、常规武器、配套或通用的仪器仪表等,虽然需要环规的品种规格不多,但用量很大,质量要求高,使用寿命要长。一些单位曾研究制造高度耐磨的硬质合金环规。可是硬质合金内螺纹的精密机械加工非常困难,有时虽然也能制出样件,但工作量大、效率低,合格率不高、成本太贵,未能实用化。尽管如此,当用了高昂的代价制成的硬质合金环规作生产试用后,取得了令人鼓舞的结果,发现它的使用寿命比淬

硬钢制件长数十倍。这样就又使得人们没有轻易放弃这方面的努力,致力于硬质合金制造方法的研究。

为什么长期以来对提高机械加工环规的生产能力在技术上没有多大进展呢?可通过现用的典型工艺路线来分析,其主要工艺过程如下:

车制坯件及螺纹→用专用丝锥分次精铰螺纹→热处理淬硬→用专用螺纹研磨棒分次精研。

上列工艺存在几个问题:

(1)专用精铰丝锥本身制造比较麻烦,一种环规要做两种丝锥分供粗铰和精铰用。需要配备精密螺纹磨床,制造成本较高。

(2)专用螺纹研磨棒尺寸精度较高,通常还需要做成几种尺寸供分次研磨用,或做成结构稍为复杂的扩张式。要配备精度较高的车床,特别是供最后精研用的棒尺寸要求最高,制造成本高,研磨时劳动量也大,单件或小批量生产时还常用手工操作。

(3)热处理的变形量较难掌握,研磨修正余量留小了容易产生废品。留大了虽可减少热处理报废,但又会大大增加研磨困难和研磨时间。

(4)为了提高环规的使用寿命就要选用耐磨性好的材料,但材料愈耐磨,机械加工性能愈差,愈难研磨。这是采用机械加工方法始终存在的一个矛盾。

(5)研磨加工效率较低,容易形成锥度而使工件报废。另外,研磨时工件会发热,尺寸公差也不易控制。

(6)需要的辅助工具较多,同一规格环规生产数量愈少成本愈高。但很多工厂为满足本单位品种规格上的急需,常常采取单件或几件生产,生产量少工艺因素多变,技术不易熟练,效率更低。

由上可见,一般中小型工厂受技术力量和精密机床设备条件的限制,自行制造环规往往有困难,即使具备了技术条件,要满足全部所需品种规格,也很费事。

既然存在上述一些问题,为什么机械工业中普遍需要的环规制造长期采用传统工艺路线,不能实现高效率的机械化自动化生

产呢？如像加工螺纹丝规那样直接采用螺纹磨床精磨的办法。因为环规制造实质上是对淬硬件进行精密内螺纹加工。通常直径小于 25mm 的精密内螺纹，一般螺纹磨床不易直接磨制，这可以说是机械磨削方法的固有弱点。那又为什么精密外螺纹可直接磨削而精密内螺纹又不易直接磨削呢？结合下列图例可予说明：

1. 为了达到一定的生产率和表面粗糙度指标，砂轮承担磨削的部位要有一定的线速度。按螺纹量具的尺寸精度和表面粗糙度要求，一般线速度需达到 25m/s 左右。磨削外螺纹时容易做到，可取用直径较大的薄片砂轮（常用直径为 400mm 左右）。这样，磨头转速不需太高，转轴也可用得较粗以具有一定的刚度，保证能平稳地运转。见图 1-1，砂轮高速转动，工件低速转动同时作轴向移动，以形成螺纹。

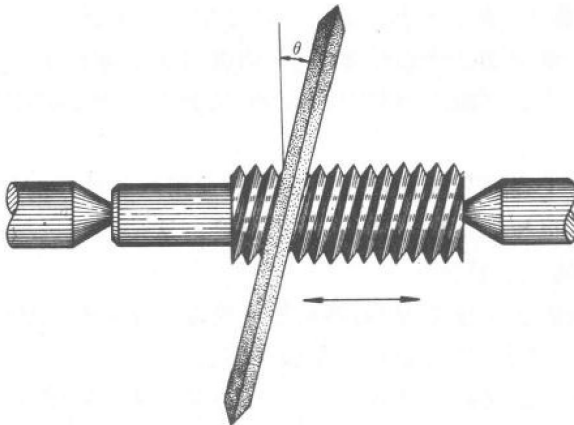


图 1-1 砂轮偏角磨削外螺纹

磨削内螺纹时砂轮直径必需小于工件螺纹内径，才能延伸到工件孔内进行磨削。螺纹直径愈小所用砂轮外径也愈小，装夹砂轮的转轴直径也要相应随之减小。为了使砂轮磨削部位达到一定的线速度，轮轴转速就必需很高。如需要线速度为 25m/s，砂轮直径为 20mm，转速应为 23900r/min。砂轮直径减小至 10mm，转速就

要提高到 47800r/min。这样高的转速,还只能配以较细的转轴,要保持一定的运转精度已经很不容易,再加上转轴刚度较差,承受磨削力作用时易于变形和产生振摆,要加工到环规所要求的尺寸精度和表面粗糙度,就比较困难。

2. 磨削内螺纹所用砂轮直径较小,极易磨钝和磨损。特别是小螺距螺纹的牙底窄,砂轮要经常整修才能保证牙形精度。操作时准确修整砂轮和重新对牙等都是比较复杂的技术。磨削外螺纹时因砂轮直径较大,相对来说磨钝和磨损都较缓慢,即使要整修砂轮和重新对牙等,操作技术上也较易解决。

3. 磨削螺纹时为了减小螺纹干涉影响,获得精确的牙形,砂轮转角需按螺旋角大小偏斜一定角度。磨削外螺纹,结构布局上容易做到,但磨削内螺纹时情况就不一样。特别在磨削直径较小、厚度与直径比值较大或螺旋角较大的工件时(如大螺距或多头螺纹),见图 1-2,将会发生砂轮轴与工件入口处相碰。为了减少相碰

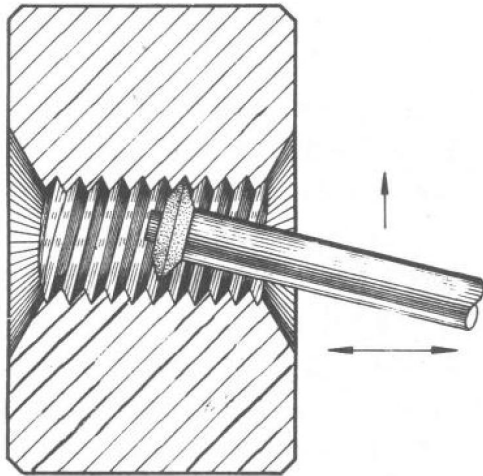


图 1-2 砂轮偏角磨削转轴受阻

的机会,转轴直径要取得更小,这样刚度又成问题。有些情况下不论转轴直径取得多小,入口处相碰会是不可避免。

如果按图 1-3 采用砂轮转轴与工件轴线平行的磨削方式,这时可免除入口处相碰,也能磨削出内螺纹,但因存在螺纹干涉,将磨不出精确的螺纹牙形。

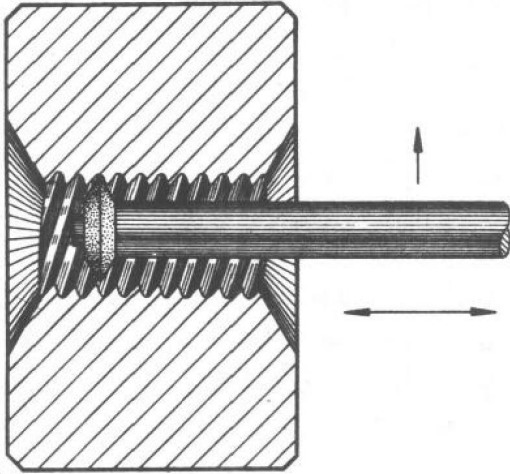


图 1-3 砂轮不偏角磨削牙尖变形

磨削梯形及方牙内螺纹时,通常即使能把砂轮转轴偏斜一定角度,由于螺纹干涉影响较大,对某些小直径螺纹,常常不能直接磨削达到精密内螺纹所要求的几何精度和尺寸精度。

从以上三点可知,用机械磨削淬硬精密内螺纹会受到某些技术条件的限制。通常对于小直径环规,为了达到精度要求,不得不采用效率较低的研磨方法来弥补不足。当然一些技术和设备条件较好的单位,制造环规的最后一道工序也有直接采用磨削的,但一般仍局限在直径大于 25mm 的规格。而且对于硬质合金环规,即使是直径较大,由于砂轮容易磨损等原因,仍然不能直接磨削而成。

除上述典型工艺外,也有一些单位采取临时性应急措施制造环规。如调质精车不淬硬;直接车制,表面镀铬;选择热处理变形小的材料,先调质车制,再精铰淬硬;用扩张式结构的环规等。这些方

法一般都加工不到国家标准要求,共同缺点是精度差、不耐用。

要克服机械工业中的这一薄弱环节,使环规制造,从而也是使其他精密淬硬内螺纹工件的加工技术摆脱现状,能适应生产发展的需要,必需研究新的方法。电火花加工精密螺纹工艺正是在这样的生产发展形势的基础上发明出来的,螺纹中径尺寸精度能掌握在 0.004mm ,表面粗糙度达到 $R_a0.32\sim 0.05\mu\text{m}$ 。基本上能够解决各类工厂对环规多品种、多规格的需求,而且可立足于本单位自行配套生产。不仅如此,还能够方便地加工各种使用寿命比淬硬钢长 $20\sim 30$ 倍的硬质合金环规。因此,也就为在工业生产中推广采用硬质合金螺纹量规创造了良好的条件。

二、精密螺纹电火花加工的发明构思和发展

作者在综合型的精密仪器仪表制造厂从事产品设计和工艺研究工作,有机会经常在工具车间和新产品车间生产现场接触到一些机械加工方面的难题。同时针对一些金属材料尺寸加工中的难题对常规电火花加工技术进行了长期的工艺探索性试验和生产应用实践。

众所周知,仪器仪表工业中金属零件结构的多样化和灵巧、复杂性以及所用材料品种之多常常远超过其他机械行业。随着科学技术的发展,对零件结构的创新思维特别敏感,精度要求也更高。然而机械加工等传统方法已日益不能适应发展需要,制造方面的困难往往束缚了设计人员的创造性。因此,很长时期思想上一直在反复考虑一个问题,能否进一步开发电火花加工技术,解决机械加工中一些传统的普遍性难题以弥补机械加工的不足。从两者的技术特点分析联想到推动人类社会进步的一个科技因素是人们掌握的常用基本工具的进步,至今各个工业化国家,以制造工具(包括装备)为主的机械工业仍然是国民经济各部门的基础工业和主要支柱,它能左右社会生产力的发展水平。从石器→铜器→铁器→钢铁,有的历史学家就常常以此来划分时代,表明社会生产力和物质

文明的发展程度。工具硬度和强度不断提高,因而更为耐用。精度也愈来愈高,因而使用效果更好。这是一条“以硬克软”逐步精化的发展途径。然而工具制造本身的进步则依赖于人类控制温度的技术。铜的熔点为 1000°C 左右,铁约为 1200°C ,炼钢要求的温度从 1400°C 直至几千度。电火花加工是利用 $10000\sim 12000^{\circ}\text{C}$ 的高温,使被加工件逐点熔化电蚀而直接实现尺寸加工。这样高的温度可以熔化目前世界上已有的任何导电的金属和合金材料,因而已有的电火花加工技术在对付淬硬钢和硬质合金等方面显示了它特别有效的技术优势。但加工类型有局限性,而且能达到的尺寸精度对当前的工业发展水平来看也并不是很满意的。然而,人类掌握的可控温度逐步提高,应该是标志着工具制造技术的进步。

从原则上讲,目前已知的各种金属材料均可用火花放电方法实现尺寸加工。这样,绝大部分能够用机械切削等成形的金属零件的尺寸加工,用电火花加工也能完成。加上电火花加工本身具有的一些特点,它应该还能解决一些机械方法所不能解决的加工问题。出于以上考虑和研究,得出的结论是电火花加工在扩展类型和提高精度方面存在实现重大技术发明的可能性,因此就确定为长期科研探索的主攻方向。

机械加工的水平通常由工具制造水平来体现,而最能标志工具制造水平的却是磨削技术。磨削是精密机械加工中最常用的基本工艺手段,特别对淬硬工件更是如此。磨削的基本条件是工具和工件间要有一定的相对运动速度,工具对工件施加一定的机械作用力除去工件材料。在满足这些条件的前提下,加上其他特殊要求,使磨削技术广为发展。但是反过来说,在一些不具备这些条件的加工场合,磨削仍无能为力,成为精密机械加工中的致命弱点,即使目前已进展到能用自然界硬度最高的金刚石微粒做磨轮原料也无济于事。因此,在复杂、小型、精密加工件,特别是模具、量具、刀具、特殊零件加工等方面留下了大量难加工问题和精度无法进一步提高的问题。然而电火花加工可于极低速和无明显作用力的状态下加工,还有对任何金属材料都能直接加工的特点,这就使它

有可能成为弥补精密机械加工不足的较为理想的一门技术。

机械加工的许多成形运动方式大致上是由直线和圆周两种基本运动所构成,一般都能为电火花加工所借鉴(当然由于加工机理不同,不能直接照搬),从而完成类似的加工。然而更为重要的是根据电火花加工本身的特点采取某些机械方法所无法采用的运动方式。目前已广为发展的电火花成型加工和线切割,仅仅是借鉴了类似冲、挤压和线锯中的直线运动为主的成形运动。这样,它所能适用的加工类型就有一定的局限性,成形尺寸精度也有一定的限度。因此,如果不发展采用包括圆周运动在内的成形运动方式,那么,电火花加工的工艺能力可以说是没有得到充分发挥。

基于以上考虑,再加上生产中提出了一个具有很高技术经济价值的科研探索课题,需要解决硬质合金螺纹环规的制造问题(难加工材料上加工精密内螺纹的典型类型),就以此为突破口对发展开创新的电火花加工成形运动方式进行了探索性研究,在方法理论、工艺措施、机床、电气及工作液过滤系统等方面取得了一系列创造性的先进技术成果。经过十多年的生产应用、推广发展、巩固提高和完善过程,形成了一门成熟的共轭回转式电火花加工精密螺纹的新技术,先获得了全国科学大会奖,以后又作为共轭回转式电火花精密加工新工艺系统的主体获得了国家发明二等奖。

三、电火花加工精密螺纹应用实例

1. 电火花加工各种硬质合金螺纹环规,如图 1-4(a)。使用寿命比淬硬钢环规高数十倍,螺纹中径尺寸精度能达到 0.004mm ,表面粗糙度 $R_a 0.32 \sim 0.05\mu\text{m}$ 。在国防工业、机械、仪器仪表、自行车和手表等行业均获得了极好的使用效果。

2. 电火花加工各种淬硬钢螺纹环规,如图 1-4(b)和(c)。这类加工中包括许多用传统方法很难加工的特殊规格,如显微镜行业镜头生产用英制环规、 $M4 \times 1/2$ 双头小直径环规、常规武器上用的 $M12 \times 3$ 梯形环规、生产灯泡接头用的全圆牙形螺纹环规等。特