

仪器仪表精密 加工技术专辑

国家机械工业委员会

沈阳仪器仪表工艺研究所

前

言

仪器仪表零件的特点是精度高、形状复杂和材料特殊，因此，精密加工技术是仪器仪表的关键基础工艺之一。我国仪器仪表行业的精密加工技术水平较低，同工业发达国家相比有较大的差距。为了提高我国仪器仪表产品质量，加强竞争能力和扩大产品出口，必须提高精密加工的技术水平，因此，需要认真借鉴国外仪器仪表制造工艺的经验，为我所用。我们汇编这本《仪器仪表精密加工技术专辑》的目的是介绍国外先进的精密加工技术和设备及精密测量方法，为有关人员提供较新的情报信息和资料，有助于做好技术引进和赶超工作，为提高行业的精密加工技术作出努力。

本《专辑》收集了有关精密机械加工，特种加工、精密光学加工和精密测量等方面文章五十余篇，三十多万字。

参加本《专辑》编辑、撰写、翻译和校对的有科研院所、高等学校和企事业单位的高、中级专业人员。《专辑》可供仪器仪表制造和其他行业从事零件加工、检测等工作的工程技术人员、管理干部及操作人员参考。

本《专辑》由王德臣同志任责任编辑，由曹向群、胡炯泉、张国林、唐朝碧、孟涛、高峰同志审校。

由于编辑过程时间仓促，编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

国家机械工业委员会沈阳仪器仪表工艺研究所

一九八六年三月

目 录

小孔加工·····	柳世传 刘贺云	1
国外精密刻划和照相复制的新发展·····	曹 向 群	14
光束焊工艺发展及其在精密加工中的应用·····	唐 朝 碧	25
精细陶瓷的精密加工·····	金 东 燮	37
超导材料在仪器中的应用与连接·····	唐 朝 碧	46
微孔钻削技术·····	陆广振译	50
应用小钻头加工精密孔·····	王德臣译	55
精密小零件的高精度加工技术·····	许宝瑜译	62
超精密圆柱面机械加工·····	王心冰译	68
精密车削加工的工艺参数选择·····	翁善臣译	75
应用外圆磨床加工小型精密零件·····	许宝瑜译	78
不锈钢精密内螺纹加工·····	台蓄芳译	82
高精度多边形横截面轴的研磨·····	王心冰译	87
高精度金刚石平面搪磨工艺的研究·····	刘兴农译	93
应用磁性流体的精密研磨技术·····	李时英译	96
用超声波振动提高超精密磨削的加工效率·····	翁善臣译	100
圆柱表面振动精磨·····	刘兴农译	104
用内圆磨床自动控制加工精度·····	刘兴农译	105
提高凸轮轮廓精度的方法·····	刘兴农译	107
表面精密机械加工·····	陆广振译	109
精密滚刀的磨刃方法·····	刘兴农译	118
数控机床的高速化和高精度化·····	刘秀云译	121
准确定位的摩擦驱动系统·····	焦 红译	125
超精密2.1米金刚石车床的设计和结构·····	焦 红译	126
用振动磨削进行机械整平·····	陆广振译	130
振动抛光装置·····	刘兴农译	132
新的去毛刺和表面精加工技术——磁力研磨法·····	张国林译	133
金属抛光：几点有益的建议·····	陆广振译	136
超精密金刚石切削加工及其存在问题·····	高光伟译	142
超高速高精密加工技术的展望·····	高光伟译	147
精加工齿轮工具的磨损和加工层厚度的测定·····	刘兴农译	150
在外圆磨削过程中在线测量表面粗糙度·····	梁福平译	154
超精密测量技术动向·····	杨 林译	158
光学标尺、分划板、光栅、掩膜和标准器·····	曹向群译	162

径向光栅母板制造·····	沈 颂译	170
球面样板·····	周淑文译	174
计算机控制光学表面加工·····	袁玉麟译	180
高精度光学零件加工工艺过程设计自动化·····	卢世标译	187
计算机控制光学表面的研磨·····	权成根译	190
光学零件金刚石研磨用的ALLIC—15型自动机床·····	卢世标译	194
应用非球面加工机进行镜面加工·····	杨 明译	197
用于复制亚微米天线的光刻技术·····	曹向群译	201
精密径向光栅制造的新发展·····	曹向群 朱永飞译	206
激光加工孔·····	刘兴农译	208
电极自动交换装置的工艺技术和复杂形状的高精度加工·····	许宝瑜译	209
高精度模具加工·····	张德本译	213
超微细孔放电加工·····	杨 林译	218
电子元器件的高速精密冲压加工及金属模的设计和制作·····	高光伟译	222
加工精密孔用的激光装置·····	刘兴农译	226
电火花切割机的近期动向·····	张德本译	230
冲压机的加工现状和未来的发展·····	杨 林译	235
用双束光学装置测量表面轮廓·····	沈涵芬译	238
用小误差计算全息图检验非球反光镜·····	黄杰法译	243
柱面光学——柱面光学零件的检验·····	黄杰法译	248
在聚甲基丙烯酸甲脂薄膜上折射率花样的光学记录·····	川 中译	252
测量光纤性能参数·····	沈涵芬译	258
非球面的罗契扫描条纹测试·····	孔庆之译	264
运用衍射图样测量角度的研究——利用衍射条纹间隔进行测量的方法·····	梁福平译	268

小 孔 钻 削

哈尔滨科技大学 柳世传 刘贺云

小孔加工在机械加工中占有很大的比重。随着电子技术、精密光学仪器、空间技术以及其它行业的快速发展,小孔加工的数量越来越多,对加工精度的要求越来越高。采用钻削的方法加工小孔,是一种广泛应用的工艺方法。现在已经开发、研究并应用了一些新的小孔加工方法,如电火花、激光、超声波磨料加工、电子束、离子束以及其它电化学加工等。但是由于钻削加工有较高的生产率和较高的加工精度,所以在生产中的应用仍在不断扩大,对于小孔钻削的技术、设备问题以及其它方面的问题的研究工作,仍然得到人们的重视。

小孔钻削,尤其是1毫米以下小孔的钻削,与大孔钻削相比,有某些相似的地方,但是小孔钻削有它自己的特殊问题。一般情况下,小孔的孔深和孔径之比有较大的数值,这种小深孔加工往往是在小型台钻上,用手工操作进行的。为了避免钻头折断,往往采用较小的进给量,并且在加工过程中又需要多次退钻以便排除钻屑。这种加工方法的加工质量和生产效率,在很大程度上取决于工人的技术和经验。

其次,由于钻头的直径较小,为了得到合适的切削速度,钻头应有较高的转速。然而,如果机床的转速过高,将会引起振动并造成钻头损坏。所以,这种小孔钻削经常采用比较低的切削速度。如加工孔径为0.2毫米时,为得到10米/分的切削速度,应使机床主轴的转速达到16000转/分,实际上,制造这种高速钻轴是比较困难的。除此之外,较小直径的孔,其允许的误差也是很小的,即对机床精度有较高的要求。所以说,小孔钻削要求机床有较高的速度和较高精度。但此种高速、高精度钻床的制造是十分困难的,有时是不可能的,所以在生产实际中往往采用比较小的切削速度。

再者,钻削小孔时,尤其是小深孔的钻削时,不易得到充分的冷却液,钻头的工作条件很差,温升高,易磨损,寿命低。

由于小孔的加工过程存在着上述一些特点,小孔加工工艺及其设备亦有其自己的特殊性。下面将国外精密小孔加工的一些问题叙述如下:

一、小孔钻削工艺

小孔钻削方式一般可分为以下几种:

- 1、钻头回转并进给,工件不动;
- 2、钻头回转,工件进给;
- 3、工件回转,钻头进给;
- 4、工件回转,钻头也回转并进给。

第1、2种钻削方式是一般的钻床工作方式,在车床上钻孔是第3种钻削方式,第4种钻削方式所钻削的孔,在圆度,直线度,同心度和尺寸精度等方面都能达到很高的水平。

正确的钻削工艺是小孔钻削的关键。正确地选择小孔钻削工艺,能够有效地钻削出高精度的小孔。精密小孔钻削的工艺方法通常是:首先,使用比钻头直径小些的钻头,或者中心钻,先钻出一个中心孔。之后采用轴尖式钻头继续钻孔。由于第一把钻头已经钻出了初始孔

(中心孔)，轴尖式钻头就很容易引入工件，且由于轴向力减少了50%，加工孔的表面质量和尺寸精度都很好。如果孔深很大，可用直柄钻头再继续钻下去。

小孔钻削常见的错误，就是试图用一把直柄钻头来加工一个精密孔。这样，小径直柄钻头在开始接触工件时，由于它的刚度较小，很容易在工件表面上打滑，弯曲或者倾斜，甚至折断。为了避免上述问题，往往需要降低切削用量或者使用钻套。如果被加工材料的加工硬化现象比较严重，或者是中等耐磨的材料，那么降低切削用量的方法反而会加剧钻头的磨损，此时钻头的切削刃是在硬化层上切削，钻头不易切入，并且容易使孔径变大，使孔的中心线偏移或者弯曲。

所以说钻孔中的工艺问题是极端重要的问题。根据具体情况，选择合理的加工参数，才能实现正常的钻削，得到良好的加工质量。

(一)、工件材料对小孔钻削的影响

在小孔钻削过程中，工件材料的物理性质、加工性能以及其毛坯表面的状态，对钻削工艺的影响是很大的。其中，钻削的前道工序所造成的材料表面硬化现象，是小孔钻削时钻头折断的重要原因。所以，在制订工艺过程时，应尽可能设法避免或者减少表面的加工硬化。

某些工件材料中含有研磨剂成份，这种材料在加工时，会使钻头很快磨损，而用已经磨损的刀刃切削时，势必会增大钻孔时的切削力。如果所加工的孔又是深孔时，即使是在使用较好的切削液的情况下，用一把钻头也可能加工不完一个孔，钻头就失去切削能力。这时就需要使用多工位钻床或者在钻削过程中多次更换钻头，以便完成一个深孔的加工。

工件材料的性质和钻削时形成的切屑形状有很大关系，然而形成的切屑形状还与钻头性能、切削速度、进给量和切削液的综合因素有关。对于某一给定的工件材料，钻削时应当合理的选择切削参数，以便形成流动的切屑，而不致堵塞排屑槽。如果切屑呈粉末状，则它有粘着在孔壁上的倾向，这时必须使用良好的冷却润滑剂。

被钻削的毛坯表面几何形状和表面缺陷对小孔钻削的影响也是很大的，如果毛坯表面凹凸不平，可能会使钻头引偏。所以在钻削初始孔(中心孔)时，钻头的直径应尽可能大些，钻头切削部份的长度应尽可能小些。在小孔钻削时，要特别注意这个问题。因为微小的表面缺陷，对大直径钻头不会造成很大影响，它却可能引起小直径钻头的严重偏斜，甚至产生折断。

(二)、工件的定位和钻头的校正

在小孔钻削过程中，工件的定位一定要可靠，而且要保证被钻削表面与钻头回转轴线的垂直度。这不仅与机床的本身精度有关，而且与夹具精度和工件定位面的加工精度有关。如工件定位基准面上有毛刺或沾有铁屑，都会使工件定位不准，或引起钻头的偏斜，甚至在钻削过程中折断钻头。

当钻削通孔时，孔的出口处易产生毛刺，也易折断钻头。为了避免这种现象，最简单的方法就是在工件底面垫一块金属垫块。

如果在钻床上钻削小孔，应使钻床主轴套筒的轴向进给方向与主轴回转中心线有足够的平行度精度。

如果采用小型转塔车床钻孔，应使转塔刀架进给方向与主轴回转轴线有较高的平行度，并应保证钻头中心线与主轴回转轴线的对中性精度。

另外,在每次安装钻头时,都要检查钻头的回转精度。钻夹头的定位表面上如有微小铁屑,或者有过量的磨损、毛刺等都将使钻头产生径向跳动,影响加工精度和钻头寿命。

(三)、切削速度及进给量

切削速度及进给量是小孔钻削的主要工艺参数。当切削速度一定时,为使在加工过程中获得自由流动的切屑,往往需要随时改变进给量。而机动进给系统在钻削过程中则不能瞬时调整进给量。实际上,在钻削过程中,在钻头刚刚接触到被加工零件的瞬时,进给量应比正常钻削时小些。当钻削通孔时,为了防止在孔的出口处产生毛刺和折断钻头,这时的进给量也应比正常钻削时的进给量小些。如果采用机动进给机构,就很难实现进给量随时变化的要求。

当钻削小深孔时,钻头的容屑槽长度往往小于钻孔深度,为了防止切屑堵塞和钻头折断,必须多次退出钻头,并清除钻头上的切屑和冷却钻头。

有许多精密钻床上有手动进给机构,可依靠工人的“手感”来实现微量进给。工人可以感觉到切削情况的变化,而及时的退出钻头或者改变进给量。在钻削过程中,工人可以观察切削的变化情况和钻头的偏移和弯曲情况,从而随时调节进给量。很显然,在精密钻床上自动地实现上述的控制是非常复杂的。

钻削速度的选择也是小孔钻削中极为重要的问题。为了得到合理的切削速度,应当根据钻孔直径来选择合理的速度。但是多数钻床只有很少几级速度,因此,实际上很难实现最佳的切削速度。

目前,小孔钻削切削用量的选择尚无比较成熟的通用的资料,因此,对不同的材料进行钻削实验是确定最佳切削速度和进给量的最好方法。表1为推荐的加工参数。

钻削小深孔时,排屑更为困难。随着孔深的增加,钻头在孔中折断的概率也增加了。如果微型钻头的容屑槽长度小于孔深,切屑无法排出,所以在钻削小深孔时,必须采取分级进给的方法,可以是手动的,也可以自动的,每次退出钻头,都必须彻底清除钻头上的切屑和充分润滑钻头。如果钻头上残留小的切屑,当再次进给时,一定会引起钻头的折断。为了防止钻头的折断,苏、美等国在微孔钻削中采用了扭矩过载保护装置。

(四)、微孔钻削的质量

1、孔直线度误差的产生原因

微型钻头相当于细长杆,刚度比较弱,钻削轴向力和某些不稳定因素会导致钻头弯曲和偏移。随着钻削轴向力的增加,钻头轴线的偏移量也随之增大。当偏移刚刚开始时;如果钻头停止进给,在孔中停留一下,则可校正一些偏移量。引起钻头偏移的初始不稳定(偶然)因素有:

- (1) 被钻削表面凹凸不平,或钻削表面与钻头回转轴线不垂直;
- (2) 切屑碎片堵在孔一侧,或材料中有不对称硬质点;
- (3) 钻头刃磨的不对称性;
- (4) 分级进给钻头与机床主轴回转轴线未校准。

2、钻削参数对孔直线度的影响

采用不同的钻尖角和主后角的钻头,切削速度、进给量和钻头横截面的同心度对孔直线度的影响进行了实验研究,结果发现获得较高直线度精度的有效参数是:

- (1) 钻头的耐久的刃口锋利性;

表1 微孔加工的条件

工 件	钻头直径 (mm)	钻头转速 (转/min)	钻头进给量 (mm/转)	参 考 文 献
软 钢	0.1	2000		
	0.2	2500		
铸铁、不锈钢	0.5	3500		
	0.1	1800		
	0.2	2000		
炮铜 (Cu80% Zn20%)	0.5	2800		
	0.1	3000		
	0.2	4000		
	0.5	6000		
钢, 铸铁	0.1—0.2	500—1000		
黄铜, 青铜	0.25—0.35	4000—6000		
	0.1—0.2	100—1000		
	0.25—0.35	4000—6000		
	0.1—0.2	500—1000		
紫铜	0.25—0.35	4000—6000		
	0.1—0.2	800—1000		
铝, 硬铝	0.25—0.35	4000—6000		
	0.1—0.2	1500—2000		
硬橡胶	0.25—0.35	6000—8000		
合 金 钢	0.2—0.5	2—5 m/min	0.001—0.0015	
铸铁, 软钢	0.2—0.5	3—10 m/min	0.0015—0.002	[19]
轻合金	0.2—0.5	3—15 m/min	0.002—0.0025	
软钢, 铸铁	0.2—0.5	3.5—10 m/min	0.0015—0.002	
软 钢	0.5	8 m/min	0.001—0.0015	[19]
Cr13不锈钢	0.4	7.5 m/min		
黄铜 (厚1.7mm)	0.2	5000 (3.1 m/min)	1.7 mm/3—6s	
SK 7 (厚0.7mm)	0.05	4000	感觉进给	[6]
黄铜, 软钢	0.3, 0.5	2020	0.0012—0.0108	
硬 铝	0.3, 0.5	2020	0.0012—0.0108	
SK 7	0.2—0.5	3.5—10 m/min	—	JIS(日本工业标准)
多层印刷电路板	0.5	20000—50000	0.01—0.05	[19]

- (2) 刃磨的同心度;
- (3) 正确地修磨钻头横刃;
- (4) 钻头本身的直线度;
- (5) 切屑的排除等。

国外研究发现,在不使钻头烧伤的情况下,切削速度对孔的直线度无大影响。

对孔直线度影响较大的参数是钻头刃口的锋利性。当钻削不锈钢时,钻头的主后角应在 $12^{\circ}\sim 19^{\circ}$ 之间,平均为 16° 。钝的切削刃将引起加工表面硬化,且一旦表面硬化,钻削轴向力急剧增加,则更加剧了表面的硬化,而锋利的刃口能够防止表面硬化。但主后角也不宜过大,如果主后角越大,刃口楔角越小,则刃口越易崩碎,而形成较钝的不平的刃口。

一般只有30%的通用钻头能满足微孔钻削对钻头同心度的要求。所以要对通用钻头进行重新刃磨。重新刃磨的磨头和通用钻头比较,有显著的效果。

一般钻头顶角对加工过程影响很小。当钻削不锈钢小孔时,钻尖角一般取 $135^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 。如果钻尖角小于 125° 时,加工精度则变差。

(五) 小孔的测量

孔直线度的测量方法有以下三种:

- (1) X光测量法;
- (2) 零件切片和物理测量法;
- (3) 用硬质合金塞规测量。

前两种方法,测量精度是非常精确的。后一种方法的测量精度比较低,但它是容易实现的。

孔表面洁度的测量也可采用零件切片和直接测量方法。

微孔直径尺寸的测量,目前国外尚无较好的方法。小孔测量采用显微镜测量法。

二、小直径钻头

小直径钻头的强度较小,刚度较低,在钻削过程中很容易弯曲甚至折断。常用的麻花钻也是将钻心作成倒锥形式,即钻头处钻心厚度小些,钻头根部的钻心厚度大些,以便得到稍大些的强度和刚度。除此之外,小直径钻头的钻心厚度和大直径钻头相比,有相对大的数值。

小孔加工所用的钻头种类很多。最常用的钻头是直柄麻花钻。(图1a)这种小钻头是用高速钢制造的,可制成的最小直径为0.045毫米,用硬质合金制成的最小直径为0.2毫米。通常,这种钻头的切削部份的长度大约为直径的10—12倍。因为它的刚度较小,在孔开始加工时,即使应用钻套,钻削初始孔的切削情况也不理想。这种钻头的主要用途是在已加工的初始孔的基础上继续加工,扩大孔的直径,加长孔的深度。

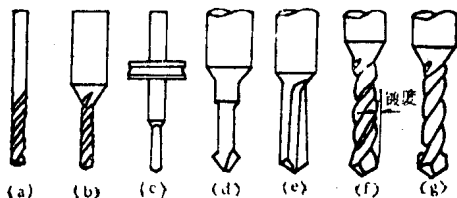


图 1

另一种常用的装夹精度较高、强度较大的小钻头是做成轴尖式的,称为加粗柄的钻头(图1b、f、g)。这种钻头柄的直径比切削部份直径大得多。它的切削部份的长度为钻头直径的5—7倍。麻花钻形式的高速钢钻头可制成的最小直径为0.05毫米,硬质合金钻头的最小直径为

0.5毫米。扁钻的最小直径为0.0025毫米。用天然金刚石作钻尖的扁钻可制成0.8毫米，这种钻头有锋利的切削刃，较好的耐磨性。图1f所示的钻头，外圆有倒锥。图1g所示的钻头背部有突缘。这两种钻头的外径和被加工表面的摩擦很小，适于加工非金属材料及印制线路板。带有皮带轮的钻头（图1c），是以钻杆本身作为回转轴，它支承在金刚石的V形轴承上，卡头的径向跳动、传动链的振动都不会影响钻头的回转精度，所以这种钻头多用于钻削非常细的孔，其加工直径可以小至0.0125—0.0025毫米。

中心钻是小孔加工中常用的钻头，它也是做成轴尖式的，有较大直径的钻柄。它的切削长度很短，仅为直径的2—4倍，中心钻和其它类型的钻头相比，具有最大的刚度，但它能够钻削的深度较小，是孔的初始加工时最理想的钻头。

小直径钻头的寿命很低，尤其是高速钢钻头，在使用过程中需要经常进行刃磨，由于小钻头往往是用手工刃磨的，故质量很难保证。市售的小钻头也多是手工刃磨的，即使是同一工厂生产的钻头，其钻尖角、横刃的偏心也相差很大。在加工精密小孔时，也应仔细选择或者重新刃磨。最好的办法是在刃磨机上进行刃磨，否则是不易保证质量的。

合理的修磨钻头，减薄钻头厚度，可以降低刃口处的摩擦，减少材料的加工硬化。这是一种很有效的办法，但对于1毫米以下的钻头，因其直径太小，修磨钻尖是很困难的。

由特殊的钨钼合金钢制成的枪钻可以加工最小的孔径是0.5毫米。硬质合金枪钻可加工的最小孔径是2毫米。枪钻是一种高效的孔加工刀具。

三、小孔钻削机床

由于钻头的直径很小，为保证得到合适的切削速度，应使钻床主轴有很高的回转速度。可是，在一般情况下，高转速的钻轴是很难避免振动的，在这种条件下难以提高钻孔的表面质量。小孔加工过程中往往要求加工出有较高精度的孔，即其尺寸精度要求很高。所以，对小直径孔加工机床的各项精度指标的要求都是很高的。

小孔加工中广泛应用的机床是小型精密台式钻床。这种机床有一精密主轴，其转速范围一般是从1700到10000转/分。通常采用手动进给，操作者能够很灵敏地感觉到钻削过程。在这种钻床上加工小零件上的直径为0.05毫米以下的小孔是很困难的。这种小孔可在下面几类机床上进行加工。

为了使钻头有比较合理的切削速度，并使钻削主轴有较高的回转精度，在一些机床中应用了高频电机主轴，并采用了油雾润滑的滚珠轴承使主轴转速达到60000转/分，这种钻削主轴有很好的负载特性，速度变化率在5%以下。

最近国外又开发了一种新的钻削主轴（图2）应用了粉末冶金材料作为轴承，这是一种多孔的超硬合金制成的空气静压轴承。这种轴承的摩擦小，精度高，振动小，用高压空气推动涡轮，速度可达150000转/分。

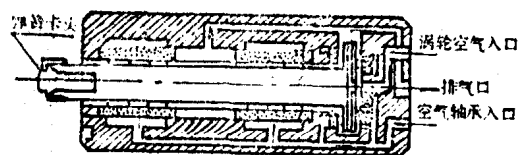


图2 多孔超硬合金

图 2

另外一种小孔加工机床是卧式的小型转塔车床，被加工零件装夹在车床主轴上，被加工零件是旋转的，而钻头是不转的，钻头有几个工位，不同的钻头安装在各个工位上，可以自动转位。在此机床上可实现多工序加工，如一个工位上用中心钻加工初始孔，另一工位上用轴尖钻扩大孔径和孔深，

第三工位上用直柄麻花钻继续钻削等等。这种机床的特点是可安装各类孔加工刀具，对零件进行多工序加工，在这种机床上，每个刀具都可以单独和主轴调正定位。利用浮动钻夹头对准主轴，钻头不回转是这种机床的一个缺点。由于钻头不回转，在加工孔的长径比很大时，加工出的孔的直线性较差。

微孔钻床的钻削主轴和被加工零件都在高速回转，即钻头和工件之间有很高的相对速度。这种机床可以保证钻削有合适的切削速度，又可使加工孔有很高的直线精度。在这种微孔钻床上可以加工的小孔直径可达 0.04 毫米。这么小的孔径加工，要求机床的钻削主轴部件和被加工零件回转轴部件以及机床导轨都应有很高的精度，钻削主轴轴线和工件轴线应有很高的同心度。这种微孔钻床为单轴机床。如果被加工零件上的孔需要多工序加工时，就应采用一组孔加工刀具，在此机床上分成几次装夹来完成。为保证加工的孔有较高的位置精度，工件的定位表面应保证非常严格的公差，它往往比零件的设计要求还高一些。

另一种微孔加工机床可以加工微米级的孔，可加工的最小孔径达到2.5微米。钻头支承并回转在精密的金刚石制成的V形轴承上。在此机床上使用的钻头是带有皮带轮的专用钻头，亦可使用如图 3 b所示的钻头。在此机床上是用显微镜来观察切削状况的，机床上有精密的进给装置，工人凭手感连续地进给来实现钻削（National Jet公司）。

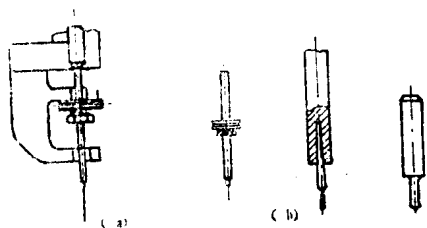


图 3

在小孔钻削机床上可以采用精密钻套的办法使钻削主轴的振动减小到微米级（图 4）。此机床可以加工的最小孔径为50微米。它采用了皮带传动，减轻了钻削主轴的振动，利用显微镜观察钻削情况和零件与钻头的对中情况。

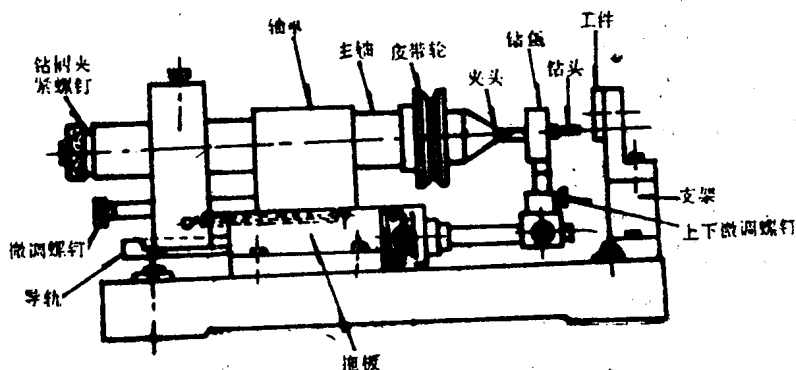


图 4

图 5 所示为日本町田制铁所制造的微机控制的精密钻床。机床的主运动由感应电机带动，切削进给由直流电机带动，快速进给和后退由感应电机带动。被加工零件固定在座标工作台上，座标工作台由两个步进电机传动，实现X、Y方向的位移，在完成一个孔的钻削之后，座标工作台移到一个新的位置上，再钻另一个孔。

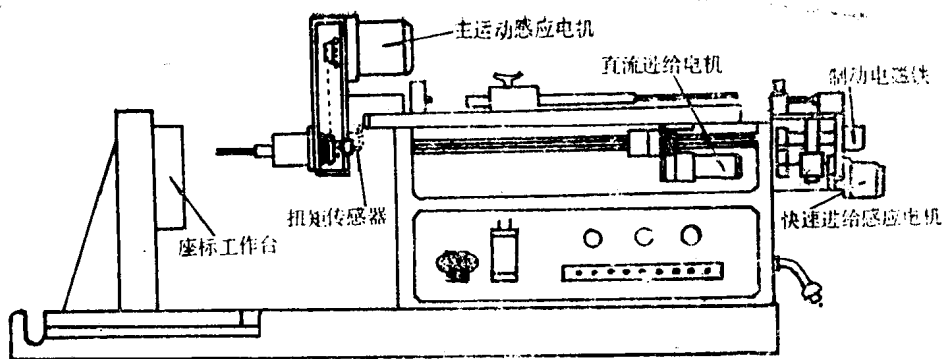


图 5

全机由微处理机控制，工作循环如图 6 所示。机床中采用了机械式扭矩传感器，当传感器监测到钻削扭矩过大时，起动快速进给电机带动钻削头快速退回。

此机床加工的孔径为 0.1—4 毫米，孔的深度可为直径的 150 倍。

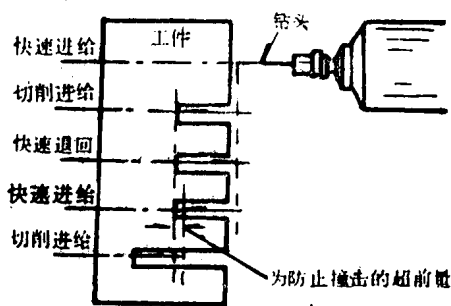


图 6

1. 振动钻削的方式及概况

振动钻削按其振动频率可分为：

(1) 低频振动钻削

(a) 机械振动钻削，又分为凸轮机构式，行星齿轮式及万向联轴节式；

(b) 电磁式（电气式）振动钻削；

(d) 液压伺服式振动钻削。

(2) 高频振动钻削，即超声波振动钻削。

振动钻削按其振动方向可分为：轴向振动钻削、周向振动（扭振）钻削及以上两种混合式振动钻削。

低频振动钻削可以获得较大的振幅，可以控制切屑的形状，且结构简单，使用方便。超声波钻削对于防止钻头的折断，提高加工精度及表面光洁度有良好作用。

表 2 为低频振动钻削和超声波振动钻削的比较。表 3 列出了几种振动钻削的实例。

Satel 利用电磁振动对 CrNiTi 耐热钢的钻孔过程进行了研究。对不锈钢或耐热钢零件钻孔时，非常容易引起加工表面硬化，使钻头寿命急剧下降，小直径钻头尤其如此。他发现，在轴向振动钻削过程中，钻头和加工表面按一定周期脱离，这有利于冷却液的渗入。据称，钻头寿命延长 300%，加工效率提高 250%。

苏联的 Подураев 等人曾用 $\phi 2.8$ 毫米的钻头对轻合金进行振动钻削。因为轻合金比较

表2 两种钻削方法的比较

频率	目的	用途	振动方法	优缺点
低频振动 钻削	1、可控制切屑的破碎 2、改进冷却液渗透能力 3、改进排屑效果	1、切屑处理 2、深孔加工 3、难加工材料的加工	1、机械式 2、电—液式 3、机械—油液式	1、振幅大 2、结构简单、通用性强 3、不能在回转方向产生振动
超声波振动 钻削	1、减少振动面的摩擦系数,改进排屑性能 2、提高加工精度	1、深孔加工 2、难加工材料的加工	电气式	振幅小、缺乏通用性、成本高

表3 各种振动钻孔方式

振动方式	振动条件	钻头	加工材料	备注
电气方式	转数为2800~4000转/分 频率为200赫兹 振幅为0~0.12毫米 进给量为30毫米/分	0.8~2毫米	耐热钢 不锈钢	对硬金属钻孔有效,排屑通畅,表面光洁度高
电气方式	转数为7500转/分 进给量为0.02毫米/转 振幅为0.1毫米 频率为625赫兹	2.8毫米	轻合金	钻削铝制零件的生产率大为提高
凸轮机构式	转数为4124转/分 振幅为0.15毫米 频率为3次/转	$\frac{5'}{32} \sim \frac{23'}{32}$	钢	钻削10倍于钻头直径以上的深孔时,切屑为细片状,光洁度、精度均有提高
行星齿轮机构式(回转方向振动)	转数为1500转/分 频率为1.63次/转	4.1毫米	钢	回转方向有 $\pm 6^\circ$ 的扭振,钻头寿命提高1.5倍,排屑好
液压伺服式	转数为800~1500转/分 振幅为0~0.1毫米 频率为0~80赫兹	5毫米	钢、铝	切屑破碎,对切屑处理大为改善
万向联轴节式	转数为1000转/分 振幅为0.06毫米 进给量为0.06毫米/转 频率为2次/转	3毫米	钢	提高了钻头寿命及钻孔垂直度的精度

软,而且具有一定的韧性,为了避免发生粘着刀具的现象而采用大振幅振动钻削。虽然切削力略有增加,但总的来说,对韧性材料的钻削还是有利的。

Hanseu在多轴自动车床上使用凸轮机构进行深孔振动钻削,钻头每转振动3次。钻头直径为 $\phi 4$ 毫米,钻削深度为58毫米,钻削结果表明:表面光洁度、同心度都有提高,且钻头很少烧伤,从而提高了钻头寿命,并且排屑通畅。

苏联Гончаров利用行星齿轮机构(见图7),进行扭振钻削。该装置可使钻头有 $\pm 6^\circ$ 的扭振。结果表明:轴向负荷没有变化,但扭矩减少7~15%,切屑破碎成段,有利于排屑,钻头寿命提高了1.5倍。

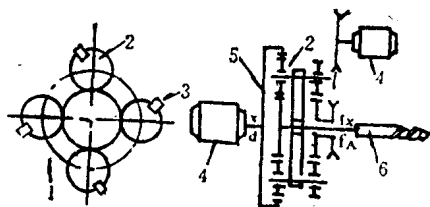


图 7

在日本岸本等人利用液压伺服机构产生0~80赫兹的振动,对软钢和铝进行钻削试验。结果表明:钻头每转内的振动频率越低,断屑效果越显著。但是,不选择合适的切削规范,只靠振动来断屑是行不通的。例如,如果使切屑断得很碎,将产生切屑堵塞现象,以致把钻头折断。

足立胜重采用万向联轴节式振动钻削装置(如图8所示),其结构简单,可以很方便地装在钻床主轴上。它可以在钻头每转内产生两个周期的轴向振动,并按没有相位差的波形曲面加工。对于小直径钻头来说,由于有振动的相位差,可能会使切屑变成很小碎块,这对排屑很不利,并且会有一个间歇力作用于切削刃上。但该装置可以避免上述不良现象的发生,不会产生很细小的切屑,且使刀具各角度有周期变化,从而提高了钻头的切削性能。钻头寿命为一般钻削法的7倍,并且孔的垂直度也有所改善。

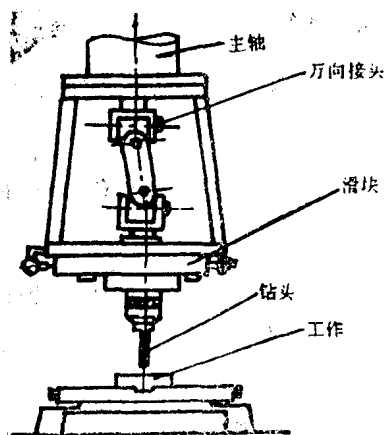


图 8

超声波振动钻削对防止钻头折断,提高加工精度及表面光洁度都起着良好作用。所谓超声波振动钻削就是在工件或钻头回转的同时,使钻头或工件产生数千赫兹至数万赫兹的高频振动的条件下来进行钻削。图9所示为超声波振动钻削装置简图。

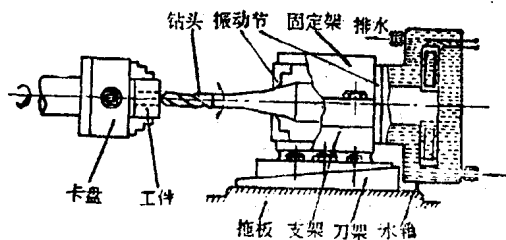


图 9

2、振动钻削原理

(1) 振动钻削的断屑分析

现以低频轴向振动钻削为例,来分析振动钻削的断屑原理。

振动钻削时,钻头除了有旋转运动和轴向进给外,同时附加一定周期的轴向振动。这样,刀具的切削角度、切屑厚度及排屑状态都要发生变化。

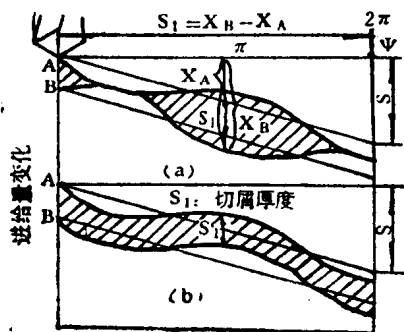


图10

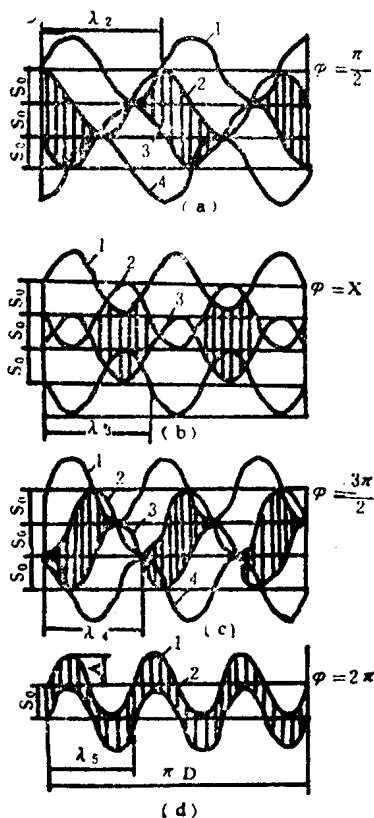


图11

式中:

Ax —钻头振动的振幅

α_0 —钻头刃磨后角

ω —振动角频率

φ —钻头转角

图10所示为钻头刀口在加工孔表面上的运动轨迹。如果钻头转速和振动频率选择适当,就能有图10(a)所示的相位差,而使切屑厚度发生变化。在图10(b)中,因没有相位差,切屑厚度就没有变化。

在相邻两次刀痕有相位差的情况下,孔的周长 πD 内包含非整数个波长(如图10(a)所示)。设波形刀痕的波长为 λ ,并用振动周期表示,则:

$$T_a = (K + i) T_f$$

$$K + i = T_n / T_f = 60f/n$$

$$\therefore i = 60f/n - K$$

对应的相位差为:

$$\varphi = 2\pi i = 2\pi (60f/n - K) \text{ (弧度)}$$

式中:

T_n —钻头转动周期(秒)

T_f —钻头振动周期(秒)

K —一周内所包含的整数波长个数

i —不足一个波长的小数部分

f —振动频率(赫)

n —主转速(转/分)

由式可知, i 值的大小仅与振动频率 f 、主轴转速 n 有关。在其他切削条件不变的情况下,只要改变 i 的大小,切屑厚度就会发生相应的变化。当相位差为 $\varphi = \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ 等特殊数值时,切屑厚度的变化情况就如图11所示。

由图可见,当 $i = 1$ ($\varphi = 2\pi$)时,无论怎样加大振幅,理论上切屑厚度是不变的。

(2) 钻头动态角度的变化

在振动钻削过程中,刀具的动态角度也是周期性变化的,如图12所示,这时钻头的实际工作后角 α 为:

$$\alpha = \alpha_0 - \arctg \frac{Ax\omega \cos \omega t}{v} \cos \varphi$$

其最小值:

$$\alpha_{min} = \alpha_0 - \arctg \frac{Ax\omega}{v} \cos \varphi$$

V—切削速度

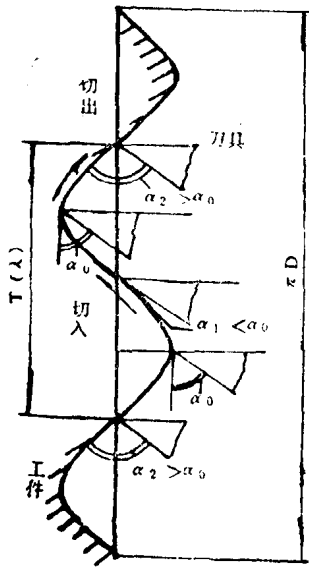


图12

由此可见，钻头动态角度的变化与振动频率、振幅及切削速度有关。当 i 改变时，在切屑形状发生很大变化的同时，钻头的切削角度也随着发生变化，因此钻头的切削条件会有显著不同。

在振动情况下进行钻削，切削角度的变化引起剪切角也发生周期性变化，由此改善了钻头前面与切屑之间的摩擦条件。对小直径钻头和对钻头靠近中心部份的刀刃来说，这种角度变化就更大，因而钻削的平均切削力和切削热比普通钻削时减小，这就会显著地改善了小直径钻头的工作条件。

(3) 振动钻削的效果

(a) 当振动参数和切削用量选择适当时，能可靠地断屑，以便解决深孔钻削中，尤其是小深孔钻中的排屑问题。

(b) 振动钻削改善了钻头的工作条件，提高了钻头的使用寿命。因为在振动钻削过程中，刀刃与切削表面发生周期性的分离，所以对切削液产生一种抽吸作用和挤压作用，使切削液容易渗入切削区域，提高了切削液的使用效果。由于挤压作用，借助切削液还能帮助顺利排屑。

(c) 振动钻削降低了切削力，频率越高，降低的比例就越大。一般切削功率可降低15~30%左右。

(d) 振动钻削提高了表面光洁度，一般可提高光洁度1~3级。同时，振动钻削消除了切屑瘤，缩小了孔径尺寸的分散范围，提高了加工精度。

总之，振动钻削改善了钻头的工作条件，降低了作用于刃口上的载荷。它所带来的优点远远超过了它所产生的不利影响。因此，可在更广泛的范围内采用振动切削方法，尤其是对不锈钢、钛合金等难加工材料的小直径深孔的精密加工，采用振动钻削可收到更大的技术和经济效果。

参 考 文 献

1. Levin R. S. Equipment and techniques for drilling miniature holes <SME MR 79—498> <1979>
2. Burnham M, W, conventionally drilled Stainless steel with the influence of Subsequent Processing, <SME MR80—279> (1980)
3. Schrinner D, Small, L. Drilling Small Deep Holes in Brass, <Cutting Tool Eng. > 1. 2 30P.16 (1978)
4. K. Iwata, T. Mori waki, Basic Study of High Speed Micro Deep Drilling, <CIRP>30. 1. P. 27—30 (1981)
5. 小川荣二郎 ハイ ス・ マイ フ ロ ド リ ル と 利 用 技 術, <机械技术>128 5 P. 101—102 (1980)

6. 小川荣二郎 マイワロツイトドリルじよる穴あけ加工, <応用机工学>12、P. 63 (1967)
7. 本卿良昭 町田守弘 穴あけ加工機械, <オートメーショニ> 25. N P. 46(1980)
8. Karls. Heilmann, Kleine Bohrungen—grobe Probleme, <Werkstatt and Betrieb>108. 8 P. 495—498 (1795)
9. 咏貽译自德刊 小孔的加工<工具技术>1983. 1
10. 〔日〕微细加工技术编辑委员会<微细加工技术>科学出版社 (1983)
11. 陈传梁等, 微孔加工技术, <机械工艺师> 1984. 7 P. 39—41
12. В. А. Остафьев, А. Н. поно таремнко, <Обработка МОЛНЫХ ОТ берстей в приборо СТРОНИИ>3. 43
13. 足立腾重 振動ドリルじよる穴あけ加工法<機械の研究>31. 11. P. 1276—1282 (1979)
14. 小川富夫等, 振動ドリル切削の研究, <精密機械>43. 1 P. 55—60 (1977)
15. 王立江等, 超声波振动的车削试验与理论研究, <工具技术>1980. 1 P. 22~27
16. 薛万夫, 许泽鹏, 振动钻深孔, <机械工艺师> 1983. 10 P. 2
17. 吴青萍、陈如鸿, 微孔的投影仪测量法及其误差分析, <机床>1984. 5 P. 38
18. Ю. А. ГОНЬА ров, повышение стойкости сверла с применением крутильных Колебаний, <Вестник Машино Строеия>52. 1. P. 78 (1972)
19. 場田为康 ドリル加工, <精密機械>37. 1 P. 33 (1971)