

高精度高光洁度磨削

何秀寿 李兆高 编著



机械工业出版社

高精度高光洁度磨削

何秀寿 李兆高 编著



机械工业出版社

本书以上海机床厂在超精磨削和镜面磨削方面多年研究成果为主,结合国内使用单位的实践经验,并参阅了国内外有关资料,着重讲述外圆磨削。对高精度高光洁度外圆、平面、内圆磨削的基本问题都作了较详细的叙述。为使读者在掌握基本知识和理论的基础上,能解决生产中的实际问题,对操作技术和消除磨削缺陷等方面也都作了较详细的介绍。此外,为了便于有关单位将普通机床改装成能进行高精度高光洁度磨削的机床,书内还提出改装要点,以及机床性能的检查和调整方面的经验。

本书可供初中文化程度以上和有一定经验的磨工、维修钳工以及有关技术人员参考使用。

高精度高光洁度磨削

何秀寿 李兆高 编著

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业性可复印字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $6^{5/8}$ ·字数 142 千字

1981年8月北京第一版·1981年8月北京第一次印刷

印数 00,001—11,000·定价 0.47 元

*

统一书号: 15033·5212

前 言

1. 高光洁度高精度磨削的重要性

随着生产的发展,对产品的精度和性能的要求越来越高。为了提高产品的质量,必须相应地提高零、部件的质量,而提高零件本身的质量是提高产品质量的重要环节。零件的精度和光洁度是零件质量的重要指标。目前,大部分高精度和高光洁度的零件都是通过磨削来达到的,经过淬硬的高精度零件更是如此。由此可见,高精度高光洁度磨削工艺对提高产品质量具有重要意义。

由于在不同光洁度和精度等级范围内的磨削规律性互有差异,为了便于分析和叙述,同时也为了便于针对不同零件的工艺要求合理地选择磨削方法和磨削用量,参照生产中的实际情况将高精度高光洁度磨削划分为精密磨削、超精磨削和镜面磨削。零件的精度,国家规定有精度标准,如一级精度、二级精度等等,也可以根据结构设计要求来规定。对零件光洁度的要求,必须根据使用性能而定。使工件表面获得 $\nabla 10$ 级以上光洁度的磨削,通称为高光洁度磨削。工件表面光洁度为 $\nabla 10 \sim \nabla 11$ 级的磨削称为精密磨削;工件表面光洁度为 $\nabla 12 \sim \nabla 13$ 级的磨削称为超精磨削;工件表面光洁度为 $\nabla 14$ 级的称镜面磨削。

精密磨削在生产中应用最广,在工具制造、机床制造、轴承工业、航空工业等方面的应用都很普遍。随着技术的发展,超精磨削在生产中的应用也越来越普遍,特别是在航空、

宇航、精密机械以及电子工业等方面的应用越来越普遍。如精密座标镗床主轴、精密磨床主轴、基准塞规、环规、精密轧辊、精密轴承的滚道、电子工业的硅片磨削、精密模具以及仪器的圆导轨和平导轨液压伺服阀等等。镜面磨削应用于特殊精密的轧辊、精密刻线尺等特殊零件的加工。

高光洁度高精度磨削具有如下优点：

(1) 可以获得超精加工不容易达到的 $\nabla 13 \sim \nabla 14$ 级光洁度，而且获得的零件形状精度和尺寸精度比较高。

(2) 与手工研磨相比，可以减轻劳动强度，易于实现自动测量，零件精度和光洁度比较稳定，生产效率高，操作技术便于掌握。

(3) 加工范围较广。如可加工内外圆柱面（包括不通孔）、内外圆锥面、端面以及简单的成形面（如鼓形轧辊、轴承滚道等）。

2. 高光洁度高精度磨削的发展概况

国外对这项工艺一直很重视。据有关资料介绍，五十年代初瑞士就曾对高光洁度磨削工艺进行过试验研究，并采用五道工序，更换好几次砂轮，在最后一道工序中采用 600 号粒度以上的细粒度树脂砂轮，使工件获得 $\nabla 14$ 的光洁度。此后，西德、英、美等国也做过一些试验研究。六十年代初，日本横川和彦曾采用电子显微镜对砂轮微观结构进行观察，发现诺登（NORTON）公司的 44A 磨料砂轮和仿 44A 的日本 TA 磨料砂轮的磨粒呈多晶体结构，当磨削时能产生微细的破碎，从而形成微细切削刃，可以达到 $\nabla 14$ 的光洁度。据有关单位前几年的统计表明，国外外圆磨削加工精度约每十年提高国际公差（ISO 标准）精度级一级；平面磨削加工精度约每十年提高一倍；内圆磨削的精度提高速度比较慢些，但

现在正在致力于提高内圆磨削的精度。

国内对高光洁度高精度磨削也很重视，许多工厂进行了各种各样的试验。但这些试验往往针对某一零件的加工，直至六十年代初才开始进行较系统的试验。首先对外圆磨削进行试验研究，并达到 $\nabla 14$ 级光洁度，工件不圆度达0.1微米。在试验的基础上发展了MBG1432、MG1432A、MG1420A、MG1412、MGB135等高精度高光洁度万能外圆磨床。在此基础上，对平面磨削进行了试验研究，并可达到工件平直度 < 5 微米/1000毫米，工件光洁度为 $\nabla 14$ 。并发展了MM7120、MM7132、MGB7120、MGB7132等高精度平面磨床。高精度高光洁度内圆磨削的试验研究尚未深入进行，但在万能外圆磨床上对内圆磨削进行了试验，并达到 $\nabla 14$ 级。至于在内圆磨床上的高光洁度高精度磨削试验研究，也在进行中。

我国在万能外圆精密磨床的制造和磨削工艺方面，在六十年代中曾达到世界先进水平，高精度高光洁度平面磨床的制造和磨削工艺方面也达到很高水平。

编写这本书的目的，一方面是为了使广大磨工和有关人员熟悉和掌握高光洁度高精度磨削的规律和操作技术；另一方面是为了使维修工人及有关人员了解和掌握对高精度高光洁度磨床的技术要求，以便更好地维修与保养机床。此外，不少单位还没有高精度磨床，为了解决生产中高精度高光洁度磨削问题，希望对现有一般精度的磨床进行精化和改装，为此本书对机床改装中有关问题也作了较详细的介绍。

本书以外圆磨削为重点，详细介绍了高精度高光洁度磨削中的工艺、机床和砂轮诸方面的问题。还对一些有关的理论问题作了介绍，如光滑表面的形成机理等等，以利读者更深入理解本书内容，从而能灵活掌握，创造出更好的工艺方

Ⅶ

法和得出更合理的工艺参数。

考虑到国内外在高精度磨削方面的新进展，对一些目前我国生产中还较少接触的问题也作了简要的介绍，如零件表面层的冷硬和残余应力等有关内容以及机床动特性等概念。

本书的内容主要是根据上海机床厂等单位的试验研究成果和作者的经验写成的，同时也吸收了一些操作者的实践经验，并参考了国内外有关资料。

由于作者水平有限，错误在所难免，请广大读者指正。

目 录

前言

第一章 零件质量的评定	1
1 零件尺寸精度及形位精度	2
2 工件表面光洁度	5
3 磨削后工件表面缺陷	9
4 磨削后的工件表面层	13
第二章 光滑表面的形成	22
1 磨削加工的特点	22
2 高光洁度磨削时形成光滑表面的因素	26
第三章 外圆超精磨削和镜面磨削的工艺参数的选择	40
1 砂轮的修整及其对磨削质量的影响	40
2 磨削用量及其选择	56
第四章 高光洁度高精度外圆磨削的机床性能	64
1 高光洁度高精度磨削对机床性能的要求	64
2 机床关键部件性能及其调整	75
3 普通外圆磨床改装举例	93
4 磨削指示仪	95
第五章 砂轮的特性及其选择	99
1 磨料及其选择	100
2 粒度及其选择	106
3 硬度及其选择	109
4 结合剂及其选择	112
5 组织及其选择	114
6 强度及其选择	115
7 形状和尺寸的选择	116
第六章 操作技术及加工实例	117

1 操作技术	117
2 加工实例	135
第七章 高光洁度高精度平面磨削	143
1 工艺参数的影响及其选择	143
2 高光洁度高精度平面磨削对机床性能的要求	149
3 M7120 A 平面磨床实现高光洁度磨削的改装	151
4 操作注意事项及加工实例	155
5 高光洁度高精度的大平面在外圆磨床上加工	160
第八章 高光洁度高精度内圆磨削	165
1 工艺参数的影响及其选择	165
2 对机床性能的要求	168
3 操作技术及加工实例	176
第九章 表面缺陷的产生和防止	187
1 波纹的产生和防止	188
2 拉毛的产生和防止	195
3 螺旋形的产生和防止	198
4 烧伤的产生和防止	201

第一章 零件质量的评定

对零件质量的要求是设计师根据零件的使用场合，以及零件在工作时的作用而提出的。例如，为了满足某一定的运动精度，对零件的尺寸精度和几何形状精度必须有相应的要求。如高精度轴承，为了使轴承在工作时有高的回转精度，对轴承的内外圈及滚道都有很高的几何形状精度和光洁度要求。

有时零件受交变载荷（即载荷大小和方向都变化的载荷）较大，零件在交变载荷作用下，容易产生疲劳破坏。零件抵抗这种疲劳破坏的能力称为疲劳强度。而疲劳强度的大小与零件的表面质量有关。

有些零件在使用中要求耐磨性好，而耐磨性的好坏与零件的表面光洁度及表面层的质量等都有密切关系。在精密仪器仪表工业及国防工业中常常要采用精密轧辊来轧制精密游丝、薄膜及录像磁带等，为使被轧制的元件达到设计要求，往往要求轧辊具有很高的光洁度和很高的几何形状精度及相互位置精度，而对尺寸精度并不要求很高。由此可见，由于使用场合千差万别，因此对零件的质量要求就有所不同。但在生产实际中，往往许多零件既对尺寸精度和几何形状精度有严格的要求，也对零件的表面质量有很高的要求，在高精度高光洁度磨削中所遇到的零件尤其是如此。

下面分别介绍一些有关零件质量评定指标方面的知识。

1. 零件尺寸精度及形位精度

1.1 零件尺寸精度

评定零件的尺寸精度，都以公差的大小来衡量。高精度的尺寸精度的测量，一般可用千分比较仪和块规；当精度要求不太高时，也常用分厘卡测量。此外，还常用高精度的尺寸自动测量仪来测量，如气动测量仪、电感式或电容式自动测量仪等等。

1.2 零件的形位精度

零件的表面形状和位置公差（或简称形位公差）和尺寸公差一样，是评定零件质量的一项重要指标。形位公差分为两类，一类是形状公差，另一类是位置公差。属于形状公差的是：不直度、不平度、不圆度、椭圆度、不柱度和不圆柱度六项。属于位置公差的是：不平行度、不垂直度、不同轴度、不对称度、位移度、径向跳动和端面跳动。下面只简要的介绍几项在高光洁度高精度磨削时常遇到的形位公差。

1.2.1 零件形状公差 根据国家标准 GB1183-75 规定，对不直度、不平度、不圆度、椭圆度、不柱度和不圆柱度都有明确的定义和表示符号，在此不再重复，下面仅简要的介绍不圆度和椭圆度两项。

(1) 不圆度：它是用来评定圆柱面横剖面方向的形状误差的重要指标。不圆度的误差是包容同一横剖面实际轮廓且半径差为最小的两同心圆间的距离 Δ ，这两个同心圆的半径差 Δ 就是不圆度的误差值，参看图 1-1。不圆度是计量圆柱面横剖面半径误差的，也就是 $R_{最大} - R_{最小}$ 。因为圆柱在实际运转中是半径的误差起作用，而不是直径的误差起作用，所以用不圆度来表征圆柱体横剖面的形状误差是比较合理

的。

不圆度的测量，目前最好的计量方法就是在圆度仪上计量。圆度仪是精密仪器，测量精度很高，有的可达0.025微米，所以它要求在恒温室工作。由于这个原因，目前还有保留椭圆度这项指标的必要。

(2) 椭圆度：椭圆度也是用来表征圆柱体横向剖面内形状误差的指标。椭圆度误差是指同一横剖面内最大直径和最小直径之差，这里不要求同心，不是同心圆的直径差，而是最大直径减最小

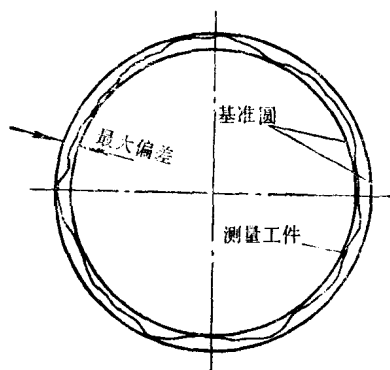


图1-1 不圆度偏差

直径，也不要求最大直径和最小直径互相垂直。椭圆度的计量很方便，用千分比较仪就可以直接测量。为精确起见，应在同一截面内多量几个不同方位。也可在万能工具显微镜上进行测量。由于它测量方便，我国仍用椭圆度标准，在国外已基本上取消椭圆度标准了。

除椭圆度外，在生产中还采用棱圆度这项指标。但在国家颁布的形位误差标准中没有作为独立项目，因为棱圆度是不圆度的一种特殊情况，是等径多弧形圆。棱圆度不能像椭圆度一样，用分厘卡或千分比较仪等简单方法测量。因为棱圆度是半径差而不是直径差，因此棱圆度应该用圆度仪测量。但由于圆度仪现在使用还不普遍，所以目前有些单位用V形铁来测量。但应注意，棱圆度不能把在V形铁上滚一圈，用

千分表测出的数值作为棱圆度的数值。因为对于不同角度的V形铁和不同棱数的棱圆测出的数值就不同。例如用 60° 的V形铁测量正三棱，这时得出的数值应该是棱圆度的三倍，用 90° 的V形铁测量正三棱的圆柱体时，得出的数值是棱圆度的二倍。因此棱圆的棱数不用圆度仪测量是难以知道的，而且也未必是正三棱或正五棱，因此这个倍数关系没有一定的规律性。随着圆度仪的广泛使用，棱圆度这项形状精度指标将会淘汰。

1.2.2 零件位置公差 关于位置公差中的不平行度、不垂直度、不同轴度、不对称度、位移度、径向跳动和端面跳动的定义及符号可参看国家标准 GB 1183-75 的规定。下面只简单介绍不同轴度、径向跳动和端面跳动三项。

(1) 不同轴度：从前叫不同心度，现在标准改称为不同轴度。因为它是对轴心线的同轴要求，而不是对中心线的同心要求，因此应该叫不同轴度，不应该叫不同心度。假如说在某一剖面上有不同轴度的要求，那就变成不同心度了。在磨削具有不同轴径的圆柱体零件时，往往有不同轴度要求。

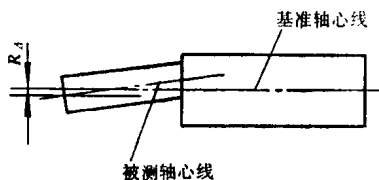


图1-2 不同轴度偏差

不同轴度的误差是被测轴心线和基准轴心线的最大距离 Δ 。不同轴度可以是指定基准，也可以公共轴心线为基准。图1-2是不同轴度的示意图。

(2) 径向跳动：径向跳动误差是旋转表面同一横剖面内，被测表面的点和基准轴心线的最大距离与最小距离之差 Δ_r 。

测量径向跳动的方法比较简单，只要用千分表在零件转动时就可以测量。当测量圆锥面的径向跳动时，必须在垂直于圆锥母线的方向上计量。

(3) 端面跳动：端面跳动误差是在给定直径的圆周上，被测端面各点和垂直于基准轴心线的平面之间最大和最小距离之差 Δ 。如图纸上未给定圆周的直径，就应在端面的最大直径上计量。但应注意，不能用检查端面跳动来衡量端面不垂直度，因为端面跳动是端面给定直径上的圆周各点对于垂直于基准轴心线的平面的跳动，而不垂直度是整个端面对轴心线的不垂直情况，两者的概念不同。

在测量端面跳动时，只要将工件旋转一周就行了，而不垂直度要由垂直于基准轴心线的两平行平面把整个端面包容在里面。这两者在数值上也没有一定关系，例如对于倾斜于基准轴心线的端面，在最大直径上量端面跳动得出的数值和不垂直度的大小是一样的。但如果这个端面对于基准轴心线不是倾斜，而是向里凹或向外凸，那么在任何直径上量端面跳动都是零，而不垂直度却不是零。因为在加工时，端面出现凹或凸的形状是经常碰到的，所以用端面跳动代替不垂直度是不合适的。

2. 工件表面光洁度

工件表面光洁度是指零件加工表面所具有的较小间距和微小峰谷的不平度，它是微观几何形状尺寸特性的综合评价。而尺寸精度和形位精度是零件宏观几何形状尺寸特性的评价。由于零件表面光洁度是研究零件表面的微观几何形状尺寸特性，因此不能使用一般的量仪来计量，而要采用特殊的测量方法。由于光洁度的评价标准各个国家有所不同，因

此光洁度的测量方法和评定零件光洁度的标准也不同，尽管如此，各种评定零件光洁度的标准之间仍有一定关系，可以互相对照。

我国现在一般采用两种光洁度标准：一种是轮廓的平均算术偏差 R_a ；另一种是轮廓不平度的平均高度 R_z 。下面将对此作一简要介绍。

2.1 轮廓的平均算术偏差 R_a 。

我们知道，磨削加工以后，零件表面的微观形状是高低不平、不规则的，如图 1-3 所示。对于这样一个表面如何评定零件的光洁度呢？为此应先规定轮廓中线为测量表面光洁度值的基准线——轮廓中线。所谓轮廓中线是在轮廓图上把轮廓曲线所围成的面积分成上下两部分相等的线，如图 1-3 所示，如 $F_1 + F_3 + F_5 + \dots + F_{2n-1} = F_2 + F_4 + F_6 + \dots + F_{2n}$ ，则 m 为轮廓中线。

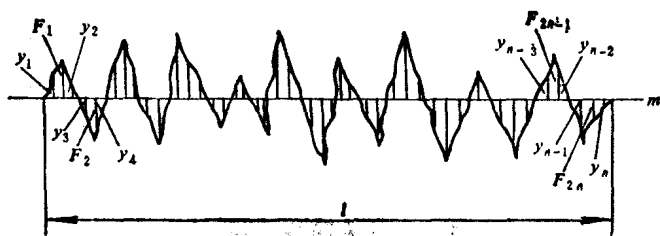


图1-3 零件表面的微观轮廓的平均算术偏差 R_a 。

轮廓平均算术偏差 R_a 定义为：在基本长度 l 内被测轮廓上各点至轮廓中线距离 ($y_1, y_2, y_3, \dots$ 取绝对值) 的总和的平均值。用数学式子表示为：

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx$$

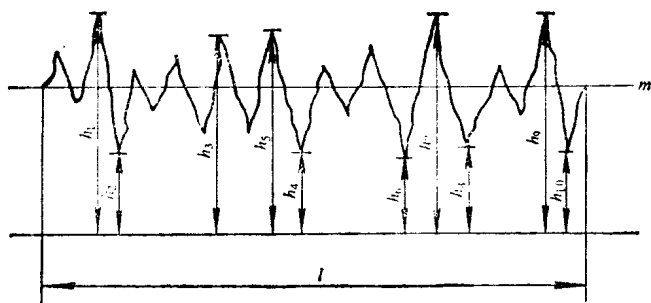


图1-4 零件表面的微观轮廓的不平度平均高度 R_z

或者近似的:

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i|}{n}$$

R_a 的测量实际上不是按上式计算, 而是有现成的仪器测量, 如生产上常用的电动轮廓仪就是一种。根据电动轮廓仪测得的 R_a 值的大小, 把零件表面光洁度划分为 1~14 级别。

2.2 轮廓不平度平均高度 R_z

R_z 的定义为: 在基本长度 l 内, 从平行于轮廓中线的任意一条线起, 到被测轮廓的五个最高点和五个最低点之间的平均距离(参见图 1-4)。

用数学式表示

$$\text{则 } R_z = \frac{(h_1 + h_3 + h_5 + h_7 + h_9) - (h_2 + h_4 + h_6 + h_8 + h_{10})}{5}$$

测量 R_z 的方法, 现在大多采用干涉仪(一般测 $\nabla 9 \sim \nabla 14$)或双管显微镜(一般测 $\nabla 9$ 以下)。根据测得的 R_z 的数值也将零件表面光洁度分为 1~14 级别。 R_a 和 R_z 两种光洁

度标准测量时的基本长度 l 都有一定的规定。在这样情况下根据 R_a 或 R_z 的大小确定的零件光洁度等级见表 1-1。

零件表面光洁度是零件质量的一项很重要的评价指标。零件表面光洁度高，结合面的摩擦力小，零件耐磨性好；抗腐蚀性能好；零件精度保持性好；零件疲劳强度高。由此可

表 1-1 光洁度等级表

光 度 级	R_a 不大于 (微米)	R_z 不大于 (微米)	等	R_a 不大于 (微米)	R_z 不大于 (微米)
$\nabla 1$	80	320			
$\nabla 2$	40	160			
$\nabla 3$	20	80			
$\nabla 4$	10	40			
$\nabla 5$	5	20			
$\nabla 6$	2.5	10	a	2.5	10
			b	2.0	8
			c	1.6	
$\nabla 7$	1.25	6.3	a	1.25	6.3
			b	1.0	5.0
			c	0.8	4.0
$\nabla 8$	0.63	3.2	a	0.63	3.2
			b	0.5	2.5
			c	0.4	2.0
$\nabla 9$	0.32	1.6	a	0.32	1.6
			b	0.25	1.25
			c	0.2	1.0