

现代珩磨技术

◎ 张云电 著



科学出版社

www.sciencep.com

现代珩磨技术

张云电 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了现代珩磨理论、设备和工艺,重点讨论了八个方面的问题:①单进给珩磨;②平顶珩磨;③强力珩磨;④超声珩磨;⑤挤压珩磨;⑥表面微结构振动加工方法;⑦激光珩磨;⑧复合电解珩磨。

本书可作为高等工科院校机械制造,汽车、拖拉机、摩托车、船舶设计等专业的教材,也可供从事机械、内燃机等行业的科研、生产技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代珩磨技术/张云电著. --北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-019078-9

I. 现… II. 张… III. 珩磨-技术 IV. TG580.67

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 084755 号

责任编辑:胡 凯 于宏丽/责任校对:鲁 素

责任印制:赵德静/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 华 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 6 月第 一 次印刷 印张: 13 1/4

印数: 1—3 000 字数: 250 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

前 言

珩磨技术是随着汽车的诞生和发展应运而生的。为了提高发动机的性能,延长汽车的寿命,人类发明了珩磨技术。目前,珩磨技术已成为汽车行业必不可少的关键制造技术之一,是否拥有珩磨技术和装备已成为衡量现代汽车制造企业制造水平和制造质量的标志之一。

实践表明,珩磨技术不但可以用于汽车、摩托车、拖拉机气缸、曲轴的制造,而且可以广泛用于飞机、导弹、坦克、战车、火炮、舰船、工业缝纫机、空调制冷机、液压气动、雷达、广播电视设备、机床、模具、制动器、油泵油嘴、轴承、工程机械、管乐器等制造领域。

人类用自己的智慧和创造力不断地发展珩磨技术。随着科学技术的发展和工业生产的进步,光、机、电、声技术的相互融合,相继出现了平顶珩磨、挤压珩磨、复合电解珩磨、数控珩磨、超声波珩磨、超声波珩铰和激光珩磨等现代珩磨技术,进一步满足了人类的社会需要。珩磨理论、计算机、数控技术和主动测量技术的发展,极大地推动了现代珩磨技术的发展。

作者长期研究平顶珩磨、超声波珩磨、超声波珩铰、激光珩磨和表面微结构振动加工方法,取得了一些进展,积累了丰富的经验。作者期望现代珩磨理论和技术能够进一步发展,应用领域能够进一步拓宽。

本书的研究成果得到了国家自然科学基金(项目编号:50275043)、国家中小企业技术创新基金、浙江省科技攻关项目和浙江省自然科学基金(项目编号:Z105528)、财政部、浙江省财政厅的资助,王纯、喻家英、钟美鹏、赵峰、叶雪明、王碧波、周异、汪新中等作了大量研究工作,本书还引用了其他同行的成果,在此一并表示衷心的感谢。

本书的许多研究工作是在信息产业部特种加工重点实验室和杭州电子科技大学机械制造及其自动化研究所完成的。在此,谨向该实验室和研究所的同行表示衷心的感谢!

愿本书的出版能对相关领域的设计、开发、研制、生产、应用、维修和教学人员有所帮助。本书不当之处,敬请批评指正,以便日后修改。

张云电

杭州电子科技大学

2007年1月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 珩磨技术发展史	1
1.2 珩磨应用范围	4
1.3 珩磨技术发展前景	5
第 2 章 单进给珩磨	7
2.1 单进给珩磨原理	7
2.2 珩磨头	9
2.3 珩磨夹具.....	13
2.4 珩磨油石的选择.....	16
2.5 珩磨工艺参数与珩磨液.....	20
2.6 小孔、锥孔、盲孔和短孔珩磨.....	25
2.7 间断孔、花键孔珩磨.....	28
2.8 外圆表面珩磨.....	30
2.9 珩磨缺陷原因分析与解决措施.....	30
第 3 章 平顶珩磨	36
3.1 平顶珩磨原理.....	36
3.2 平顶珩磨机与珩磨头.....	38
3.3 平顶珩磨工艺.....	41
3.4 平顶超声珩磨.....	43
3.5 超硬磨料油石珩磨.....	43
第 4 章 强力珩磨	47
4.1 强力珩磨机床.....	47
4.2 强力珩磨过程.....	48
4.3 强力超声珩磨.....	49
4.4 强力珩磨应用.....	51
第 5 章 超声珩磨	52
5.1 超声珩磨装置的工作原理	52
5.2 纵向振动超声珩磨装置.....	54

5.3	压电换能器恒扭矩装配	58
5.4	珩磨负载对超声振动系统谐振频率的影响	62
5.5	钢质薄壁缸套超声珩磨	66
5.6	松孔镀铬层超声珩磨	70
5.7	铸铁缸套超声珩磨	73
第6章	珩铰	75
6.1	普通珩铰	75
6.2	超声珩铰	75
第7章	挤压珩磨	97
7.1	挤压珩磨研究现状	97
7.2	挤压珩磨原理	97
7.3	挤压珩磨机床	98
7.4	挤压珩磨应用	99
第8章	表面微结构振动加工方法	100
8.1	低频振动加工方法	100
8.2	自激振动加工微坑方法	121
8.3	超声加工方法	136
8.4	超声加工装置	138
8.5	超声变幅杆与工具的有限元分析	140
8.6	超声加工试验	144
第9章	激光珩磨	147
9.1	数控激光珩磨研究现状	147
9.2	激光珩磨原理	148
9.3	光导纤维在固体激光加工设备中的应用	152
9.4	激光珩磨机床	155
9.5	数控激光成型数学模型	158
9.6	数控激光珩磨参数数据库	159
9.7	数控激光珩磨控制软件通信	179
9.8	表面微结构激光成型试验	191
第10章	复合电解珩磨	201
	参考文献	204

第1章 绪 论

1.1 珩磨技术发展史

珩磨技术是随着汽车的诞生和发展应运而生的。一百多年前，人类发明了汽车。汽车的发明是人类走向物质文明和精神文明的重要里程碑。气缸——活塞环是汽车中最重要的摩擦副，其性能的优劣和工作的状态直接影响到汽车产品的质量、品位、使用寿命和人类的生存环境。汽车发明以来，人们一直在探索气缸工作表面精密制造技术。其中，珩磨是气缸工作表面最重要的精密制造技术。

珩磨是指采用一组装配在珩磨头体上的油石，给油石沿径向对工件施加一定的压力，并通过旋转运动和往复运动进行加工的精密加工方法。

1924年，善能（Sunnen）公司在美国成立，致力于珩磨技术开发和珩磨机生产。善能公司从简单的手动珩磨机到全自动的珩磨系统，应有尽有。整套的珩磨系统包括孔精加工所需的每项功能：珩磨、测量、夹具、上下料系统，甚至珩磨后的去毛刺等工艺，是一个自动的交钥匙包。善能公司还提供珩磨加工所需的珩磨工具、油石及珩磨液等。

1926年，德国 C. W. Gehring 创办了一个制造通用和非标准珩磨机的公司，并以自己的名字为公司命名。图 1-1 为 1928 年 Gehring 公司所在地照片。图 1-2 为 1928 年，工人使用珩磨工具修磨发动机缸孔。



图 1-1 1928 年德国 Gehring 公司所在地



图 1-2 1928 年，工人使用珩磨工具
修磨发动机缸孔



图 1-3 德国 Gehring 公司于 1935 年制造的用于加工发动机缸体的第一台立式珩磨机

图 1-3 为德国 Gehring 公司于 1935 年制造的用于加工发动机缸体的第一台立式珩磨机。

1970 年左右，日本宇都宫大学的隈部淳一郎教授率先研究超声珩磨技术。

1988 年，中国研制成功了卧式超声珩磨装置（图 1-4），对钛合金、铜、铝进行了超声珩磨试验。

1991~1993 年，中国研制成功了立式超声珩磨装置（图 1-5），对钢质薄壁缸套、铸铁缸套进行了大量超声珩磨试验。

图 1-6 为德国 Gehring 公司生产的现代数控珩磨机。

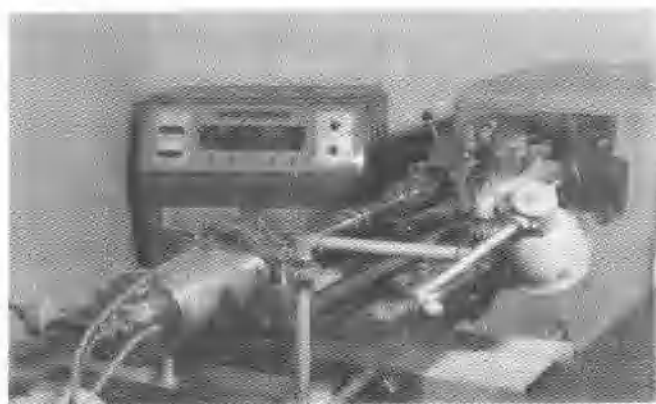


图 1-4 卧式超声珩磨装置

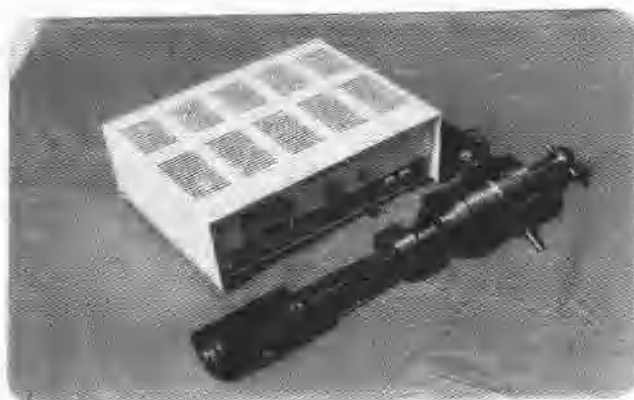


图 1-5 立式超声珩磨装置

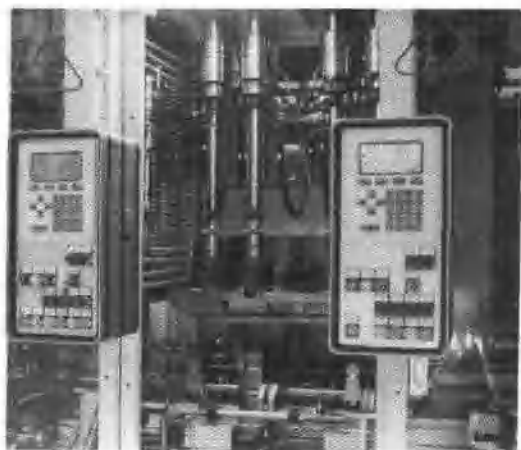


图 1-6 Gehring 公司生产的现代数控珩磨机

图 1-7 为德国 Gehring 公司生产的现代珩磨加工单元。

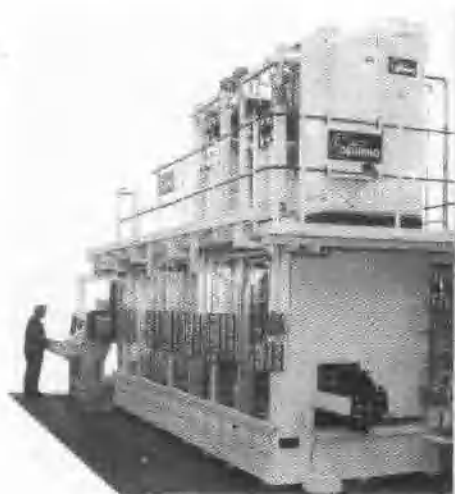


图 1-7 Gehring 公司生产的现代珩磨加工单元

图 1-8 为德国 KADIA 公司生产的双轴数控激光珩磨机照片。图 1-9 为德国 KADIA 公司生产的三轴数控激光珩磨机照片。

从 1992 年开始，德国、中国等国家开始研究激光珩磨技术，取得了较大的进展。



图 1-8 KADIA 公司生产的
双轴数控激光珩磨机照片



图 1-9 KADIA 公司生产的三轴数
控激光珩磨机照片

1.2 珩磨应用范围

珩磨属于光整加工技术。珩磨机可分为立式珩磨机和卧式珩磨机，它们各有其特点和应用范围。

珩磨技术作为先进制造技术，具有加工精度高、表面质量好、加工效率高、应用广泛的优点。珩磨技术不仅广泛应用于汽车制造，而且广泛应用于航空航天、火炮、导弹、模具、摩托车、拖拉机、坦克、舰船、工业缝纫机、空调制冷、液压气动、雷达、广播电视设备、油泵油嘴、轴承、工程机械、管乐器等制造领域。

(1) 大量应用于各种形状的孔的光整或精加工，孔径在 $\varnothing 1 \sim 1200\text{mm}$ ，长度可达 $12\,000\text{mm}$ 。国内珩磨机工作范围： $\varnothing 5 \sim 250\text{mm}$ ，孔长 3000mm 。

(2) 可用于外圆、球面及内外环形曲面加工。如镀铬活塞环、挺杆球面与滚球轴承的内外圈等。

(3) 用于汽车、拖拉机与轴承制造业中的大量生产，也适用于各类机械制造中的批量生产。如珩磨缸套、缸孔、连杆孔、油泵油嘴与液压阀体孔、轴套、摇臂和齿轮孔等。

(4) 适用于金属材料与非金属材料的加工。如铸铁、淬火与未淬火锅、硬铝、青铜、黄铜、硬铬与硬质合金、玻璃、陶瓷、晶体与烧结材料等。

珩磨可达到下述技术指标：

珩磨内孔尺寸： $\varnothing 1 \sim 1200\text{mm}$ ；

珩磨内孔深度： $1 \sim 20\,000\text{mm}$ ；

尺寸精度： $0.002 \sim 0.01\text{mm}$ ；

表面粗糙度 R_a : $0.025 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 。

1.3 珩磨技术发展前景

今后,珩磨机床将继续朝着智能化和在线测量方向发展。数控激光珩磨、超声波珩磨和超声波珩铰仍是重要的发展方向。

1. 数控激光珩磨

数控激光珩磨技术是现代汽车、摩托车、拖拉机、舰船等发动机制造的关键技术,属于光机电一体化技术领域。数控激光珩磨机开发可为国家开发新型高效环保型内燃机提供重大关键装备,属国家重点开发的新产品范畴。

数控激光珩磨技术是现代珩磨技术的发展趋势,是世界上最先进的珩磨技术之一。数控激光珩磨机是典型的光机电一体化产品。我国有很多发动机主机厂家及配套厂家。数控激光珩磨技术的发展,将带动发动机及其配件产业上一个新台阶,有助于我国在国际先进制造技术的竞争中形成领先优势,增强竞争力,占领国际市场,产生重大经济效益。数控激光珩磨技术对提高发动机制造水平、降低排放、保护环境有重大的意义。

今后,将继续开展下述研究工作:

(1) 开发由粗珩磨机床、数控激光成型机和精珩磨机三台设备组合在一起的数控激光珩磨机。

(2) 激光珩磨加工工业化试验。

(3) 发动机装机试验,加快推广应用。

2. 超声波珩磨

超声波珩磨具有珩磨力小、珩磨温度低、油石不易堵塞、加工效率高、加工质量好、零件滑动面耐磨性高等许多优点,可以解决普通珩磨存在的问题,尤其是钢质薄壁缸套基体、铝合金缸套等韧性材料以及钢质薄壁缸套镀铬层、铸铁淬硬缸套和陶瓷发动机等硬脆材料的珩磨问题。

超声波珩磨机是机、电、声一体化的高技术产品。超声波能量是利用超声波珩磨装置传输到珩磨加工区的。因此,超声波珩磨装置是超声波珩磨机的核心部分。

今后,超声波珩磨需要解决下述问题:

(1) 超声波珩磨装置的传声效率。

(2) 超声波珩磨装置的可靠性。

(3) 智能超声波珩磨机开发。

3. 超声波珩铰

超声波珩铰是采用金刚石铰刀或 CBN 铰刀进行高效成型加工的精密加工方法。

虽然，国内外已经开展了超声波珩铰技术的研究，取得了较大的进展，但仍面临下述问题：

(1) 电镀金刚石或 CBN 与工具之间的结合力。在超声波能量传输过程中，工具瞬时最大加速度可达重力加速度 g 的一万多倍，必须保证电镀金刚石或 CBN 与工具之间有足够的结合力。否则，工具表面的金刚石或 CBN 磨料层将会瞬间脱落下来。

(2) 工具与变幅杆的连接技术。工具与变幅杆的连接，既要保证超声波能量从变幅杆向工具的高效传输，又要保证变幅杆与工具的同轴度及其可拆装性。

(3) 数控恒力进给系统。超声波珩铰过程中，必须开发数控恒力进给系统，保证工具以恒力在轴向进给，既可保证工具寿命或工件表面完整性，又可保证超声波珩铰声学系统与超声波发生器阻抗合理匹配。

社会的需要是人类发明的强大推动力。在社会需要的强大推动下，人类将会继续开发复合精密、超精密珩磨新设备、新技术、新工艺，珩磨机将发展成为智能化先进制造装备。

第 2 章 单进给珩磨

2.1 单进给珩磨原理

单进给珩磨是指采用一组装配在珩磨头体上的油石，给油石沿径向对工件施加一定的压力，并进行旋转运动和往复运动进行加工的精密加工方法。

珩磨油石装在特制的珩磨头上，由珩磨机主轴带动珩磨头作旋转和往复运动，或工件旋转，珩磨头作往复运动，并通过其中的胀缩机构使油石伸出，向孔壁施加压力以作径向胀开运动，实现珩磨加工。为提高珩磨质量，珩磨头与主轴一般都采用浮动连接，或用刚性连接而配用浮动夹具，以减少珩磨机主轴回转中心与被加工孔的同轴度误差对珩磨质量的影响。

珩磨不但可以用于内孔精密加工，而且可以用于外圆、平面和曲面精密加工。图 2-1 为内孔珩磨、外圆珩磨和平面珩磨原理示意图。

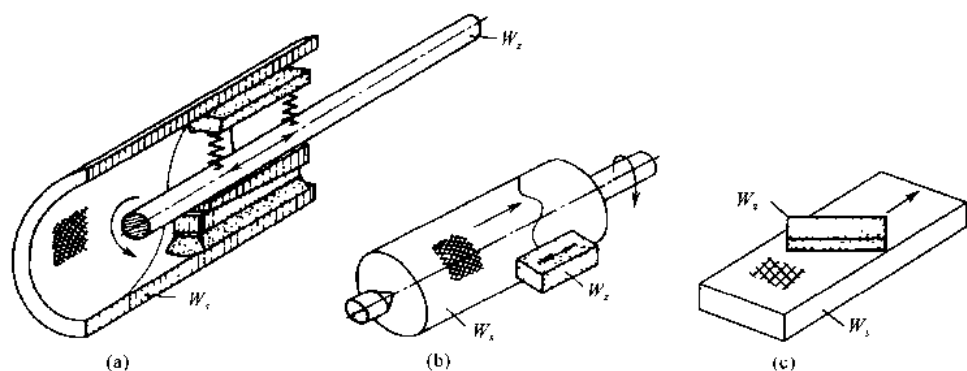


图 2-1 内孔珩磨、外圆珩磨和平面珩磨原理示意图

(a) 内孔珩磨原理示意图 (b) 外圆珩磨原理示意图 (c) 平面珩磨原理示意图

珩磨头在每一往复行程内的转数为—非整数，因而在每一行程的起始位置都与上次错开一个角度，这就使油石上的每颗磨粒在加工表面上的切削轨迹不致重复，从而形成均匀交叉珩磨网纹，如图 2-2 所示。

由于油石具有一定长度，油石的切削轨迹与前一转在轴向上有一段重复，所以保证了前后切削轨迹衔接得比较平滑。当珩磨头在孔中往复运动时，油石就像桥板一样搭在加工表面突出的高点上，在珩磨压力的作用下，将高点削去。同时加工表面上的高点也冲击着钝化了的磨粒，使之破碎或脱落，而重新露出锋锐的

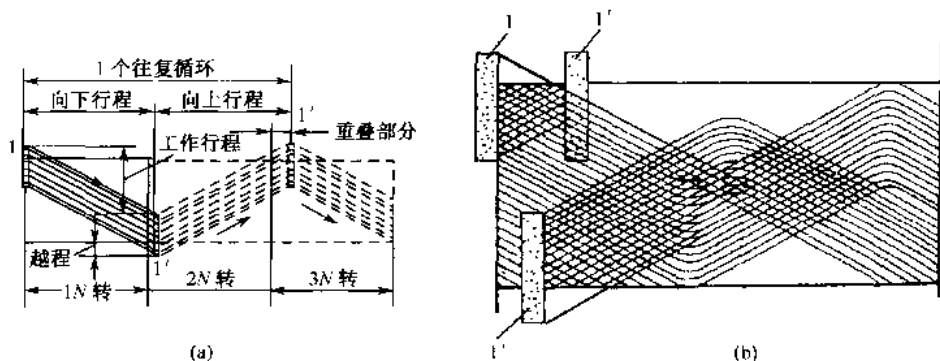


图 2-2 珩磨油石的切削轨迹

磨粒。所以珩磨过程也就是油石与加工表面不断相互磨削与修整，使原来刀痕与残余应力变形层被磨去，孔形误差得以校正，油石也相应地被磨损。当二者由点接触转为面接触后，单位面积上的珩磨压力相应降低，切屑变薄，油石开始被堵塞钝化，切削作用逐渐下降而消失，加工表面的粗糙度也逐渐降低，珩磨过程转为抛光过程，达到要求尺寸，最后油石退回。

珩磨加工具有下述特点：

(1) 表面质量特性好。珩磨可以获得较低的表面粗糙度， R_a 一般可为 $0.8 \sim 0.2 \mu\text{m}$ ，甚至可低于 $R_a 0.025 \mu\text{m}$ 。同时珩磨表面上有均匀的交叉网纹，有利于储油润滑。

(2) 加工精度高。珩磨技术不仅可以获得较高的尺寸精度，而且还能修正孔在珩磨前加工中出现的轻微形状误差，如圆度、圆柱度和表面波纹等，如图 2-3 所示。珩磨小孔时，圆度与圆柱度可达 $0.5 \mu\text{m}$ ，轴线直线度可小于 $1 \mu\text{m}$ 。珩磨中等孔径，圆度可达 $5 \mu\text{m}$ ，圆柱度不超过 $10 \mu\text{m}$ 。珩磨短孔时，若用刚性连接珩磨头与平面浮动夹具，还可适当提高短孔轴线与端面的垂直度。间断孔珩磨可提高同轴度。

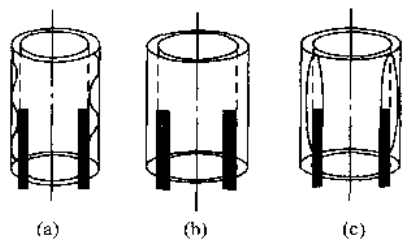


图 2-3 珩磨能修正的孔形误差

(a) 波纹 (b) 锥度 (c) 鼓形或凸形

(3) 珩磨效率高。可以使用多条油石或超硬磨料油石，也可提高珩磨头的往复速度以增大网纹交叉角（图 2-15），能较快地去除珩磨余量与孔形误差。也可应用强力珩磨工艺，以有效地提高珩磨效率。

(4) 珩磨工艺较经济。薄壁孔和刚性不足的工件，或较硬的工作表面，用珩磨进行光整加工不需要复杂的设备与工装，操作方便。

2.2 珩 磨 头

珩磨头是一种结构较为复杂的精密加工工具。

1. 珩磨头的典型结构

(1) 中等孔径的通用珩磨头。图 2-4 为中等孔径的通用珩磨头结构示意图。珩磨头有前导向而无导向条，用于无主动测量的内孔珩磨。珩磨头为棱圆柱体，不作其他减轻加工，本体刚性好。油石为奇数，可减少振动（一般多为偶数）。油石座直接与进给胀锥接触，中间不用顶销与过渡板，结构简单、进给系统刚性好。若采用主动测量，则需加导向条。

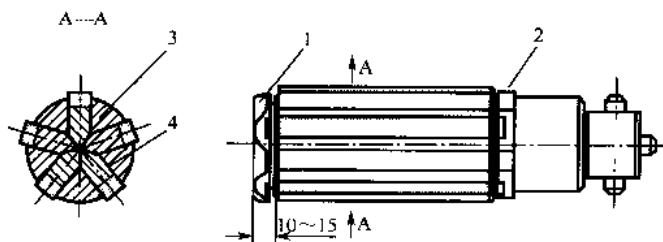


图 2-4 中等孔径通用珩磨头

1. 本体前导向 2. 弹簧圈 3. 进给胀锥 4. 油石座

(2) 小孔珩磨头。 $\phi 5$ 以上的小孔珩磨一般采用如图 2-5 所示的单油石珩磨头。油石是单面楔进给，并镶有两个硬质合金导向条，以增加珩磨头的刚性。导向条与油石较长，可提高小长孔的珩磨精度与效率。

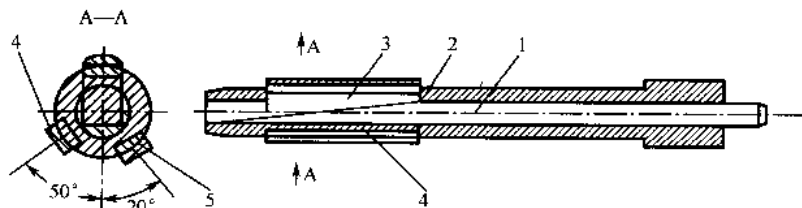


图 2-5 小孔珩磨头

1. 胀锥 2. 本体 3. 油石座 4. 辅助导向条 5. 主导向条

(3) 短孔珩磨头。图 2-6 为短孔珩磨头结构示意图。珩磨头与连接杆可制成一体，刚性连接。珩磨头上嵌有硬质合金导向条 5，为主动测量珩磨提供测

量喷嘴与维持珩磨头工作平稳。前凸部为引入导向，前端为珩磨头工作时在浮动夹具内的定位导向，以保证珩磨孔轴线与端面的垂直度。因油石较短，所以进给胀心为一较长的单锥体，以提高进给系统的刚性与精度。另外，所有油石槽（油石座的滑道）的长度与距 P 端面的轴向距离有严格的公差要求，以保证短孔珩磨后的圆柱度。

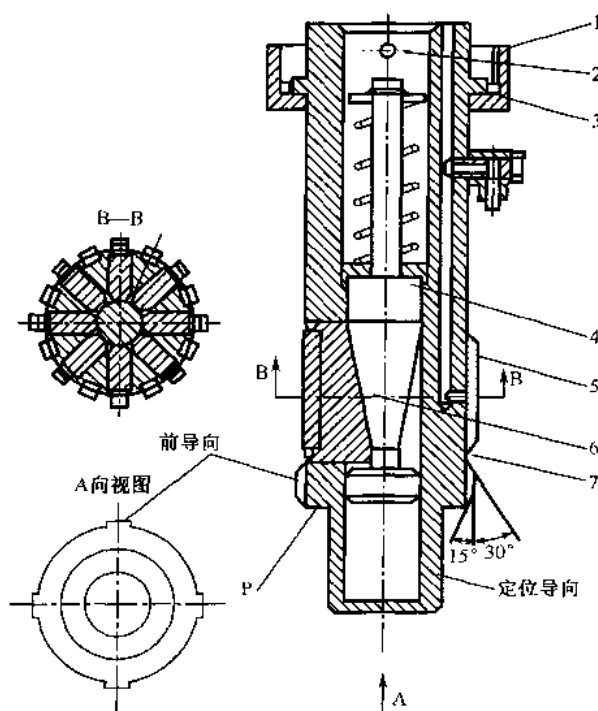


图 2-6 短孔珩磨头

1. 连接螺母 2. 短销图 3. 本体 4. 胀锥
5. 导向条 6. 油石座 7. 弹簧圈

(4) 大孔珩磨头。图 2-7 为大孔珩磨头结构示意图，图 2-7 (a) 为凸环式大孔珩磨头，凸环的外径接近珩磨孔径，以支持油石座和承受珩磨切削力，具有较好的刚性。油石座上的横销 2 紧贴凸环内端面，给油石轴向定位并承受珩磨时的轴向力。移动胀锥 5 使油石座 3 伸出，借弹簧圈 4 缩回油石。图 2-7 (b) 为可调式大孔珩磨头，转动中央小齿轮可使齿条胀缩，珩磨出一定直径范围的孔，不需更换珩磨头。若要珩磨更大直径的孔，只需更换齿条。这种结构有较大的加工范围。

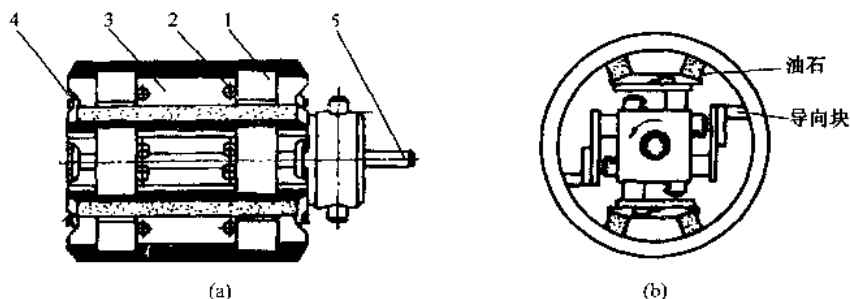


图 2-7 大孔珩磨头

(a) 内环式大孔珩磨头 (b) 可调式大孔珩磨头

1. 本体凸环 2. 油石座横销 3. 油石座 4. 弹簧圈 5. 胀锥

2. 珩磨头的连接杆

珩磨头是通过连接杆与珩磨机主轴连接，连接杆的结构一般有三种形式：浮动连接杆、半浮动连接杆和刚性连接杆（图 2-8）。

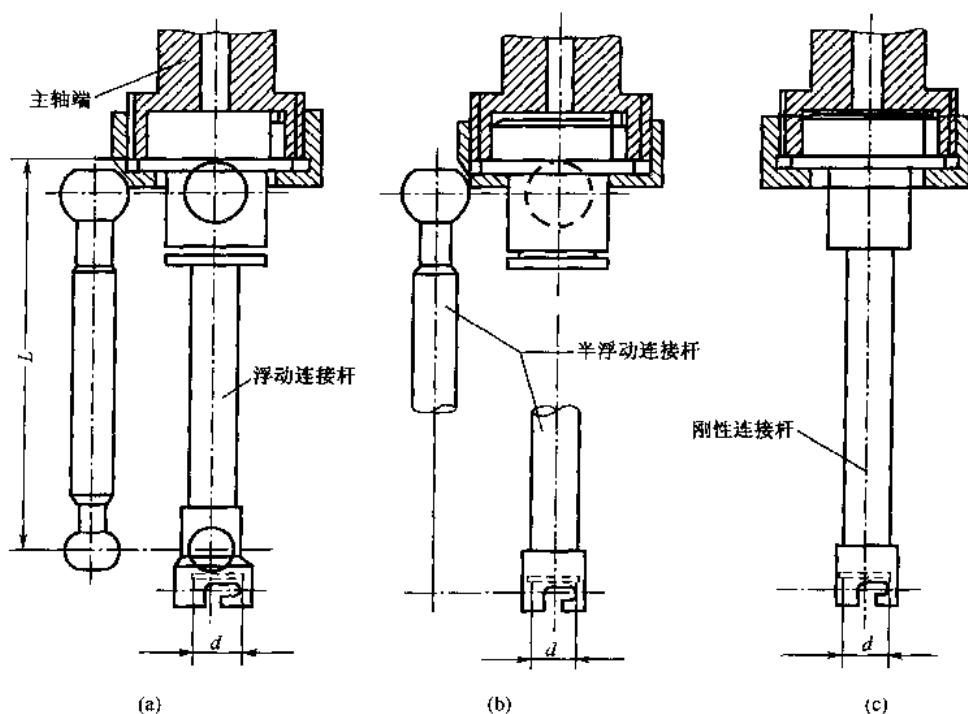


图 2-8 珩磨头的连接杆

(a) 浮动连接杆 (b) 半浮动连接杆 (c) 刚性连接杆