

蜂窝状微坑 设计和制造技术

◎ 张云电 著



科学出版社
www.sciencep.com

蜂窝状微坑设计和制造技术

张云电 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了蜂窝状微坑的概念、参数、设计和制造方法,重点讨论了六个问题:①基于降低排放的汽缸工作表面储油结构设计;②微坑参数数据库;③振动加工微坑方法;④数控激光研磨方法;⑤超声加工微坑技术;⑥电镀金刚石超声微研磨方法。

本书可作为高等院校机械制造、汽车、拖拉机、摩托车、船舶和冶金设备设计等专业的教材,也可供从事摩擦副生产技术的科研、生产人员及机械、内燃机等行业的高、中级技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

蜂窝状微坑设计和制造技术/张云电著. —北京:科学出版社, 2004
ISBN 7-03-012816-8

I. 蜂… II. 张… III. ①内燃机-汽缸-设计 ②内燃机-汽缸-生产工艺 IV. TK40

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 005714 号

责任编辑:钟 谊 段博原/文案编辑:贾瑞娜/责任校对:钟 洋
责任印制:安春生/封面设计:陈 敬

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年6月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2004年6月第一次印刷 印张:14 1/4

印数:1—2 000 字数:270 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

前 言

汽车是科学技术和工业发展的产物。汽车拥有量是一个国家财富的象征。社会需要导致了汽车拥有量激增,这既带来了社会的进步、经济的繁荣和人类的舒适,又带来了环境的严重污染,交通拥挤甚至堵塞。

据统计,全世界汽车保有量约 6.7 亿辆,汽车年生产量约 6 000 万辆。这些汽车每年排出 2 亿吨 CO, 4 000 万吨 HC, 2 000 万吨 NO_x 等有害气体。由于汽车大部分是在城市行驶,加上汽车排放污染的高度恰好在地面附近,正处于人的呼吸带,所以汽车排放造成的大气污染对人体的健康影响很大。

21 世纪是节约能源、保护环境的新时代。降低汽车排放是人类社会共同的愿望,人们对“我们只有一个地球”的意识与日俱增。

实践证明,汽车发动机中汽缸工作表面的储油结构对汽车排放有重要影响,蜂窝状点坑储油结构可以有效地降低汽车排放,提高发动机寿命。蜂窝状微坑储油结构不仅在汽车工业具有广泛用途,而且在飞机、舰船、坦克、冶金、雷达、导航等工业领域也有广泛应用。因此,蜂窝状微坑设计和制造技术成了国内外的研究热点。

作者长期从事汽缸套设计和制造技术、表面微坑低频振动冲击加工和超声加工技术、数控激光珩磨技术、松孔镀铬技术、表面微坑基准制造和光整加工技术——超声珩磨和超声微研磨、超声车削、超声清洗技术的研究。作者在多年从事摩擦副工作表面储油结构的科研工作基础上,在本书中总结了蜂窝状微坑设计和制造技术。

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、浙江省重大科技攻关项目和浙江省自然科学基金的资助,叶雪明、王碧波、钟美鹏、周异等同志作了大量研究工作,本书还引用了其他同志的成果,在此一并表示衷心的感谢。

愿本书的出版能对相关工程及领域的设计、开发、研制、生产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

2004 年 3 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 蜂窝汽缸	1
1.2 汽缸工作表面储油结构发展史	4
1.3 提高缸套寿命的途径	5
1.4 蜂窝状微坑制造方法的分类	6
1.5 蜂窝状微坑技术的发展前景	7
第2章 基于降低汽车排放的汽缸工作表面储油结构设计	8
2.1 蜂窝状微坑和微型压力室的概念	8
2.2 蜂窝状微坑的参数和分布规律	13
2.3 微型压力室的动压润滑机理	16
2.4 蜂窝状微坑对排放和机油耗的影响	25
第3章 蜂窝状微坑的参数优化与数据库	28
3.1 优化设计的概念	28
3.2 蜂窝状微坑参数的优化目标	34
3.3 蜂窝状微坑参数数据库	35
第4章 自激振动加工微坑方法	60
4.1 自激振动加工微坑的概念	60
4.2 自激振动形成的条件	61
4.3 自激振动加工微坑的工艺过程	75
4.4 自激振动加工微坑的特点	77
第5章 振动冲击加工微坑方法	78
5.1 振动冲击加工微坑原理	78
5.2 振动冲击加工微坑装置	80
5.3 矩阵工具头	82
5.4 振动冲击加工微坑试验	87
5.5 振动冲击加工微坑的冲击力和冲击能量	92
5.6 振动冲击加工微坑对缸套耐磨性的影响	97
5.7 微坑加工刀杆的失稳问题	98
5.8 蜂窝状点坑数控恒力进给成型机	100

第6章 数控激光珩磨技术	103
6.1 激光的产生及性质	103
6.2 激光器	118
6.3 激光珩磨原理	136
6.4 光导纤维在固体激光加工设备中的应用	137
6.5 激光珩磨机床	140
6.6 激光珩磨形成的储油结构	141
6.7 激光珩磨试验结果	142
6.8 轧辊激光毛化装备	144
第7章 超声加工微坑技术	157
7.1 表面微坑超声加工原理	157
7.2 超声加工装置	159
7.3 工件转速与超声加工声学系统谐振频率之间的控制系统	160
7.4 实验	161
7.5 结论	162
第8章 电镀金刚石超声微研磨技术	164
8.1 超声微研磨原理	164
8.2 超声微研磨声学系统	164
8.3 超声微研磨的轴向力和扭矩	184
8.4 超声微研磨加工试验	188
8.5 超声微研磨的特点	196
8.6 数控激光成型——超声微研磨加工中心	198
第9章 表面污垢超声清洗技术	199
9.1 超声清洗的原理	199
9.2 超声清洗机的组成	202
9.3 超声清洗的分类	207
9.4 超声清洗中应注意的几个问题	209
9.5 超声清洗的主要应用场合	211
第10章 松孔镀铬与复合镀层	213
10.1 松孔镀铬	213
10.2 超声波电镀	216
10.3 复合镀层	217
参考文献	221

第1章 绪 论

1.1 蜂 窝 汽 缸

内燃机是将燃料在其燃烧室中燃烧产生的热能直接转化为机械能的一种动力机械,其中往复式内燃机应用最为广泛。

目前,全世界约有 10 亿台内燃机正在运转,它们被广泛应用于轿车、货车、大客车、城市公共汽车、舰船、工程机械、发电设备、摩托车、农业机械、铁路机车、拖拉机等领域,成为各国国民经济生活中不可缺少的动力。

汽缸与汽缸盖、活塞、活塞环组成了内燃机的核心——燃烧室。在汽缸里通过进气、压缩、燃烧、膨胀等过程,将热能转换为机械能。

汽缸在内燃机中的作用主要有三个。

1. 密封

汽缸与汽缸盖、活塞、活塞环构成内燃机的密封工作空间,保证对高温、高压燃气的密封,以完成发动机的压缩、燃烧、膨胀等工作过程,提高内燃机的热效率。

2. 导向

汽缸内孔表面是活塞、活塞环往复运动的导向表面,亦称支承表面,它对活塞起导向作用。

3. 散热

汽缸通过缸壁向周围冷却介质(空气或水)传递大部分热量,以保证适宜的工作温度。

早期的内燃机上没有汽缸套,而只有与机体铸成一体的汽缸(图 1-1(a)),壁厚一般为 6~7mm,主要依铸造工艺和大修(镗、磨孔)次数而定。随着科学技术和工业生产的发展,对汽缸的可靠性、耐磨性的要求也逐步提高。起初,人们采取的办法是在铸造机体时添加些合金,如镍、铬、铜、铝等,虽然能够起到一定的作用,却难以满足内燃机技术性能不断提高的要求。另外,加入大量合金元素,不仅使缸体加工困难,同时成本也随之提高。通过长期实践,人们认识到汽缸内孔表面工作条件恶劣(高温、高压、重负荷),应有严格的技术要求和优良的机械性能,而缸体其他部位工作条件较好,不必要提出苛刻的技术和机械性能要求。因此,缸体整体合金化,浪费巨大。

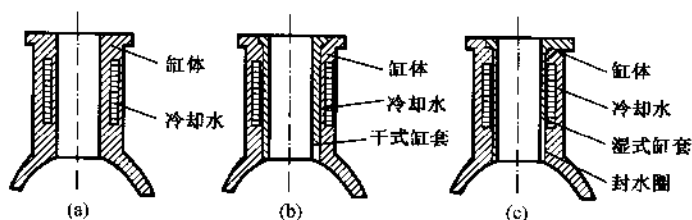


图 1-1 汽缸套结构型式示意图
(a)整体式缸套; (b)干式缸套; (c)湿式缸套

为解决上述矛盾,大约 70 多年前(1922~1929 年),英国最早设计制造了汽缸与缸体分开的柴油机,即从独立的缸体逐步演变成缸体内镶入用耐磨材料制成的、可更换的圆筒零件——汽缸套。从此,人类经历了许多艰苦的努力和大量试验研究,在设计、制造、材质、表面处理和检测等各方面做了许多改进提高,才有了形式多样、性能良好的汽缸套。

汽缸中镶入缸套的优点可以归纳为以下几点:

- 1)形成了单独的耐蚀、耐磨工作面。
- 2)延长了缸体使用寿命。
- 3)改善了缸体加工工艺。
- 4)节约了贵重的合金元素,降低了成本。
- 5)缸套更换方便,有利于内燃机的维护保养。

内燃机的汽缸套是气体压缩、燃烧和膨胀的空间,并对活塞起导向作用。燃烧过程中,燃气最高温度可达 $2\,000\sim 2\,500^{\circ}\text{C}$,最高压力可达 $5\sim 15\text{MPa}$,汽缸套内壁直接受到高温高压的燃气作用,外壁又多受到冷却水的冷却作用。在内外壁巨大温差和爆发压力作用下,汽缸套承受着相当大的机械应力和热应力。因此,要求汽缸套具有足够的强度和刚度,并保证其在工作过程中不产生过大的变形。

此外,汽缸套还承受着活塞环的侧压力,并且活塞环在它的表面作高速往复运动,使汽缸套内孔表面受到强烈的摩擦。在润滑不良、进气不洁、冷车启动以及不正常燃烧的情况下都会造成汽缸套内孔表面的剧烈磨损。汽缸套是内燃机磨损最严重的零件之一,也是决定内燃机大修期的最重要零件之一。因此汽缸套内表面必须具有一定的耐磨性。

汽缸套外壁还受到冷却水的穴蚀,这种穴蚀也决定了汽缸套的使用寿命。因此汽缸套外壁还应当有抗穴蚀能力。

总之,无论是整体汽缸,还是汽缸套,均应满足下述要求:

1. 耐磨性

磨损是缸套失效的主要原因,因此缸套材质应具有良好的耐磨性,达到以下几

点要求。

1) 滑动性能好。缸套材质要保证工作时能形成良好的滑动摩擦面,与活塞环保持最小的摩擦系数,即使在恶劣的工况下,也能具备很好的耐磨性。当缸套材质为钢或铝合金时,应在缸套内壁镀铬或复合镀层。目前缸套内孔(工作)表面的储油结构是国内外面临的重大研究课题。

2) 磨合性好。在规定的磨合规范下,缸套内孔表面应尽快地磨合,以保证及早进入正常工作阶段。

3) 材质均匀。磨损产物——磨屑的粒度最小,以减少磨料磨损。

4) 应比活塞环寿命长,最好长一倍左右。

2. 硬度

硬度是缸套材质的重要指标。我国规定:含硼铸铁缸套、钒钛铸铁缸套硬度 $HB \geq 210$;高磷铸铁缸套硬度 $HB \geq 220$;钢质薄壁镀铬汽缸套镀铬层硬度 $HV \geq 850$ 。

3. 强度

在工作过程中,缸套除承受高压和高负荷外,还承受装配压力、热应力。在这些力的作用下,轻则使缸套变形,磨损加剧,重则产生支承台肩处断裂或纵向裂纹,酿成内燃机重大故障。因此要求缸套材质应有足够的机械强度。

4. 储油自润滑性

铸铁材料必须具有良好的储油性,以保证润滑状况良好。钢质薄壁缸套内孔要有镀铬层,镀铬层要有储油结构。

5. 工艺性

缸套材质应有很好的铸造性和切削加工性。

6. 经济性

缸套材料应主要立足国内,取材容易,资源丰富,价格低廉,易于推广。

为了适应现代发动机的性能要求,保护人类赖以生存的环境,研究人员提出了一种具有蜂窝状储油结构的汽缸或汽缸套,其特点是在汽缸或汽缸套工作表面设有大量相互独立、互不贯穿、深度一致、按一定规律分布的蜂窝状微坑(点坑)。我们把这种汽缸或汽缸套称为蜂窝汽缸或蜂窝缸套。

德国大量台架试验和汽车使用表明,蜂窝汽缸或蜂窝缸套有四个显著的特点:

1) 汽缸寿命提高 80%~200%。

2) 机油消耗量降低 30%~60%。

3)环境污染少。例如,HC 排放比使用其他汽缸减少 10%~20%。

4)缩短磨合期,避免拉缸现象。

21 世纪是节约能源、保护环境的新时代。蜂窝汽缸或蜂窝缸套作为节约能源、保护环境的高耐磨性新产品,必然会被人们所接受,并被作为节能产品和绿色产品加以开发、推广和应用。

1.2 汽缸工作表面储油结构发展史

缸套-活塞环摩擦副是一个集往复、冲击运动于一体的复杂的摩擦学系统。为了使所设计的缸套-活塞环摩擦副能达到最高的可靠度、最佳的经济性能和合理的使用寿命,我们必须用摩擦、磨损、润滑的理论,从系统的观点出发,去分析影响缸套-活塞环摩擦到磨损的各个因素。国内外的最新研究表明,采用改进材质、激光淬火、镀铬、提高加工精度、降低表面粗糙度等传统方法来改善缸套-活塞环摩擦副的性能已经接近极限;而在缸套工作表面加工一定形状的凹腔式结构,则可以形成良好的储油结构和油膜,从而提高缸套-活塞环摩擦副的润滑效果和耐磨性。

缸套工作表面的储油结构已经经历了三个发展阶段:

- 1)越光越好,最好是镜面。
- 2)平顶网纹或网状裂纹型储油结构。
- 3)独立微坑储油结构。

目前,缸套工作表面的储油结构可分为三种:网状裂纹型、网状交叉型和独立微坑型。而其加工方法可分为松孔镀铬、平顶珩磨、液体喷砂、滚花、自激振动、激光珩磨和振动冲击加工微坑等。这几种加工方法都可以在缸套工作表面产生储油结构,能不同程度地改善润滑状态。

20 世纪 40 年代,英国 Laystall 公司研制成功采用松孔镀铬的钢质薄壁缸套(cromard 专利技术),最初用于坦克和军用汽车上,后逐步转向于民用车。对于松孔镀铬,由于镀铬时间长、成本高,且网状结构互相连通,润滑油沿着沟槽被挤出去,耐磨和节油效果并不显著。因此,网状松孔镀铬又演变成点状松孔镀铬。

20 世纪 60 年代开发的平顶珩磨技术由于油石磨料的大小、形状、分布和磨损的不均匀性以及珩磨过程中的随机因素的影响,平顶珩磨方法形成的网纹必定会有不均匀性,因此难以预先算出与发动机性能有关的匹配情况。

激光珩磨是一种由珩磨和激光加工结合的加工方法,它能够加工出交叉网状结构和螺旋型凹腔结构,还可以比较理想地加工出独立微坑型的储油结构。但是激光对缸套材料有微观熔化和烧蚀作用,可造成局部材料性能发生变化,并且激光珩磨设备的价格高,微坑加工成本高,操作复杂,维修困难。

1.3 提高缸套寿命的途径

缸套-活塞环摩擦副的润滑分析是摩擦学应用的最重要领域之一。多年以来,许多学者进行了大量的工作。

德国、美国、日本、英国等国家对平顶珩磨技术进行了大量的研究,将平顶珩磨技术作为铸铁缸套内孔表面最终加工工序,以形成交叉网纹沟槽平顶储油结构。许多国家一直致力于解决平顶网纹的均匀性和沟槽深度的一致性,甚至开展攻关项目研究,以期达到发动机设计者预期的目标。遗憾的是,长期以来,由于磨料形状的多样性、磨料大小的不一致性、磨料在油石中分布的不均匀性以及加工过程中各种随机因素的影响,平顶网纹无法做到均匀,沟槽深度波动很大。即使平顶网纹能够做到均匀分布、深度一致,由于平顶网纹相互贯通,存储在网纹沟槽里的润滑油在缸套-活塞环摩擦副工作过程中也会被活塞环沿着沟槽挤出去,无法建立动压润滑,缸套气密性仍不理想。

德国学者 Klink. U、美国学者 Chris J. Evans 和 James B. Bryan 等人开展了激光珩磨技术的研究,取得了有益的进展。但是,激光珩磨设备成本高(每台激光珩磨机的价格为 450 万元),导致生产成本大幅增加。

国外研究人员采用 SiC 研磨技术改进缸套工作表面储油结构,取得了一定的成效,还有人探讨过石墨对缸套耐磨性的影响。

钢质薄壁缸套采用松孔镀铬方法对缸套内孔表面镀铬,即镀铬后进行逆电解,其表面形成沟状储油槽,再采用研磨方法对镀铬层进行精密研磨。英国、西班牙是在薄壁缸套上采用松孔镀铬技术最早的国家。其后,日本、美国引进英国的松孔镀铬技术。我国早在 1995 年分别从英国和日本引进了松孔镀铬技术。但是,松孔镀铬技术存在耗电量大(每只耗电 $8\text{kW}\cdot\text{h}$)、时间长(镀铬时间 3h)、成本高(国内每只缸套松孔镀铬成本 20 元)、废品率高达 20%~30%、工艺复杂等问题,从而导致了薄壁缸套制造成本高、质量不稳定。并且松孔镀铬方法形成的储油结构是交叉网纹或不均匀点坑,也制约了薄壁缸套的性能提高。

日本学者 Koji Kato 研究了通过改进材质和表面粗糙度来控制磨损。国外工业发达国家还研究了各种合金铸铁材料的缸套,如高合金铸铁、低合金铸铁、含磷铸铁(有低磷、中磷和高磷铸铁)、含硼铸铁、含铌铸铁,可依据不同机型、不同的工况条件,配置不同材质的缸套,以提高其使用寿命。在缸套摩擦副中以不同材质的缸套与活塞环匹配,可得到最佳的配副性能。

对缸套工作表面进行激光淬火可以提高淬硬区的硬度,更为重要的是可以创造一个有利的润滑条件,激光淬火在缸套工作表面实现了以淬硬带为筋,未淬硬带磨损后为微凹槽的微油池,提高了缸套-活塞环摩擦副的润滑效果及综合的耐磨能力。美国通用汽车公司首先建立了激光淬火生产线,对 645 系列柴油机缸套进行

激光淬火处理,彻底解决了擦伤现象。随后,在 20 世纪 80 年代德国 MANB&W 公司对 L58/64 型船用柴油机缸套进行激光淬火处理,磨损量比一般缸套低 30%~60%,比渗氮缸套的抗摩擦磨损及抗腐蚀性能高,润滑油消耗率小。20 世纪 90 年代前苏联也进行了大量的激光淬火试验,结果表明耐磨性和抗擦伤性提高。

M. Priest 和 C. M. Taylor 研究了缸套-活塞环摩擦副工作表面形貌对发动机性能指标的影响。美国 T. Tian 等人研究了柴油机缸套-活塞环摩擦副动力学对环-环槽磨损和机油耗的影响,还有一些学者提出了活塞环的预测磨损模型,在理论研究上有了一定的深入。

国内对缸套-活塞环摩擦副的研究,主要还是通过改进材质、镀铬、提高加工精度、降低表面粗糙度等传统方法来改善缸套-活塞环摩擦副的润滑性能。在材质方面,考虑到原材料的来源及区域资源情况,一般以钒铁铸铁、中磷和高磷铸铁及硼铸铁缸套为主。据我国 65 个生产厂家统计,硼铸铁缸套最多。我国一些高等院校、科研机构及工厂也开展了缸套激光淬火的研究,并取得了较大的成绩。大连机车车辆厂使用 2kW CO₂ 激光对 16V240Z 型柴油机缸套进行螺旋状激光淬火,装车试验结果表明:比电火花淬火的缸套耐磨 0.3~1 倍。使用这些方法所带来性能的提高已经接近了极限。1999 年,笔者所在项目组提出在汽缸套工作表面加工出蜂窝状微坑储油结构,并且研制了加工这种微坑的低频振动冲击加工装置。这种加工的方法具有许多优点:

- 1)微坑分布和结构参数可控,且所有微坑均匀分布,相互独立。
- 2)微坑加工简单易行。
- 3)工具头寿命长。
- 4)可采用矩阵工具头或多头螺纹车削法实现高效率、高密度微坑加工。
- 5)加工成本低,大约为激光珩磨成本的 1/10。
- 6)材料不受烧蚀作用,且形成的压应力对耐磨性有好处。

采用低频振动冲击加工装置,已成功地对摩托车缸套、485Q 发动机缸套、4JAI 和 4JB1 钢质薄壁缸套、东风 4 型高速火车发动机缸套进行了加工试验,可以制造出相互独立、均匀分布、呈蜂窝状数以万计的点坑。振动冲击加工微坑方法是缸套工作表面储油结构的新型加工方法,具有明显的优越性,有广阔的应用前景。

1.4 蜂窝状微坑制造方法的分类

根据目前的表面微坑制造技术,可将蜂窝状微坑制造方法分为八类:

- 1)自激振动加工方法。
- 2)低频振动冲击加工方法。
- 3)数控激光珩磨方法。

- 4)电火花放电加工方法。
- 5)超声加工方法。
- 6)松孔镀铬方法。
- 7)腐蚀方法。
- 8)微研磨方法。

1.5 蜂窝状微坑技术的发展前景

社会需要是发明之母。人类保护环境的美好愿望必将推动蜂窝状微坑技术的持续发展。

展望未来,今后在蜂窝状微坑技术方面仍有大量研究工作可以开展。

- 1)蜂窝状微坑参数的优化和确定。
- 2)针对不同类型的发动机,需继续进行大量台架试验和装车试验;进行批量化考核。
- 3)开发各种蜂窝状点坑数控成型机,实施商品化生产。

第2章 基于降低汽车排放的汽缸 工作表面储油结构设计

2.1 蜂窝状微坑和微型压力室的概念

2.1.1 问题的提出

20 世纪是人类追求汽缸高耐磨性的时代。于是,添加 Cu、石墨等合金材料、SiC 嵌入式研磨、松孔镀铬、激光淬火、激光熔覆、等离子体淬火等众多新技术应运而生,层出不穷。表 2-1 给出了这些方法的适用范围及提高耐磨性的情况。

表 2-1 提高耐磨性的方法及效果

提高耐磨性的方法	适用汽缸类型	提高耐磨性的效果
添加 Cu、石墨等材料	铸铁汽缸	60%
SiC 嵌入式研磨	钢质薄壁缸套 高强度合金钢缸套	120%
松孔镀铬	钢质薄壁缸套 制氧机汽缸套	180%
激光淬火	厚壁铸铁缸套	100%
激光熔覆	厚壁铸铁缸套	160%
等离子体淬火	厚壁铸铁缸套	140%

21 世纪已经到来,“人类只有一个地球”的理念已经形成,保护环境成了全人类的共识。人类的认识必然从“追求汽缸的耐磨性”向“追求降低排放、保护环境”转变,环保型节能汽缸、绿色汽缸概念应运而生,自然形成。

汽车是当今世界大气污染的最大污染源。

据统计,全世界汽车保有量约 6.7 亿辆,汽车年生产量约 6 000 万辆^[1,2]。这些汽车每年排出 2 亿吨 CO、4 000 万吨 HC、2 000 万吨 NO_x 等有害气体。由于汽车大部分在城市行驶,加上汽车排放污染的高度恰好在地面附近,正处子人的呼吸带,所以汽车排放造成的大气污染对人体健康的影响很大。

21 世纪是节约能源、保护环境的新时代。降低汽车排放是人类社会共同的愿望,“我们只有一个地球”的意识与日俱增。

新世纪呼唤着内燃机的清洁化。世界各国竞相制定了汽车排放标准,尤其是

近二三十年来治理的力度不断加大,不断推出日趋严格的内燃机(车辆)排放法规,平均每3~4年就要更新一次,并且今后几年将要推出的新法规的预案提前公布。随着人们对环境保护的日趋重视,世界各国限制内燃机废气排放的法规变得愈来愈严格。例如,美国的US98,欧洲的欧Ⅲ和日本的Japan 2000。在中国内燃机界看来十分苛刻的排放法规在这些国家得以认真贯彻,我国的内燃机(车辆)排放法规滞后西方发达国家近20年,我国内燃机低污染的控制技术和相关产业也相当落后。法规和技术历来是相辅相成,互相促进的。随着我国的技术进步和国家经济实力的增强,我国把制定环保法规提到了重要的议事日程。

围绕着汽缸工作表面储油结构设计,人类已经经历了三个发展阶段:

- 1) 越光越好,追求镜面。由于此种表面耐磨性极差,早已被淘汰。
- 2) 平顶网纹。
- 3) 具有独立微坑的储油结构。

2.1.2 平顶网纹

平顶网纹是采用平顶珩磨技术加工出来的。

平顶珩磨(plateau honing)是将珩磨过程分为粗珩、精珩两个阶段。粗珩用粗粒度的珩磨油石在工件表面上,加工出较粗糙的、划痕很深的轮廓,沟槽深度达 $8\sim 10\mu\text{m}$;再通过细粒度的珩磨油石精珩,把这些划痕的尖峰变成平顶凸峰,此时表面的沟槽深度约为 $5\sim 6\mu\text{m}$ 。

平顶珩磨与普通珩磨加工后表面的重要区别,就在于所加工的表面微观几何形状不同,如图2-1所示。例如,发动机汽缸套内孔经过平顶珩磨出来的网纹表面,其承载面积比通常的珩磨表面增大4倍左右,特有的深沟又可储存足够的润滑油,这样,便可大大减少汽缸套孔表面的磨损,缩短跑合时间,提高机件寿命,减少

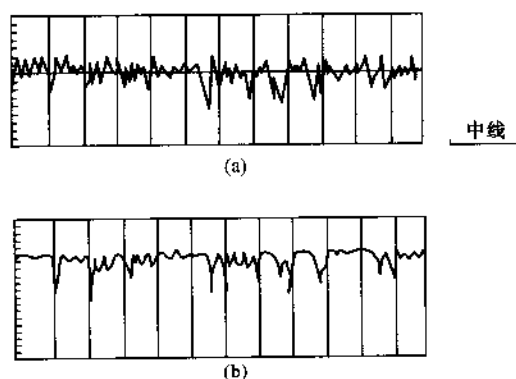


图 2-1 普通珩磨与平顶珩磨加工的表面微观几何形状

- (a) 普通珩磨加工表面微观几何形状;
- (b) 平顶珩磨加工表面微观几何形状

燃料消耗。据有关报道,汽缸内孔经过平顶珩磨后,可使发动机的耗油量低于 $1\text{g}/\text{hp}^{\text{①}}$,而汽缸套内孔若用普通珩磨,发动机的耗油量为 $3\text{g}/\text{hp}$;而且经过平顶珩磨后,汽缸套的使用寿命也大为延长。

我国已于1989年制定了国家专业标准(ZBJ 92011-89);内燃机汽缸套平台珩磨网纹技术规范及检测方法,其技术规范为

- 1) 网纹角度,在汽缸套中心线方向的夹角为 $110^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 。
- 2) 表面粗糙度 R_a 值列于表 2-2。

表 2-2 表面粗糙度 R_a 值 (单位: μm)

汽缸套直径/mm	>60~95	>95~115	>115~135	>135~160	>160~200	>200~240
5 点 R_a 的平均值	0.5~1.0	0.5~1.05	0.55~1.10	0.6~1.20	0.65~1.30	0.70~1.40
5 点 R_a 的范围	0.4~1.30	0.4~1.35	0.44~1.10	0.48~1.48	0.52~1.60	0.56~1.70

- 3) 轮廓偏斜度 $S_K(S_K = -0.8\sim -3.0)$ 。
- 4) 在 4mm 长度内,珩磨网纹的沟槽深度大于或等于 $4\mu\text{m}$ 的沟槽数至少有 5 个。
- 5) 在活塞环行程内,缸套内表面的轮廓支承长度率 t_p 应满足图 2-2 的要求。

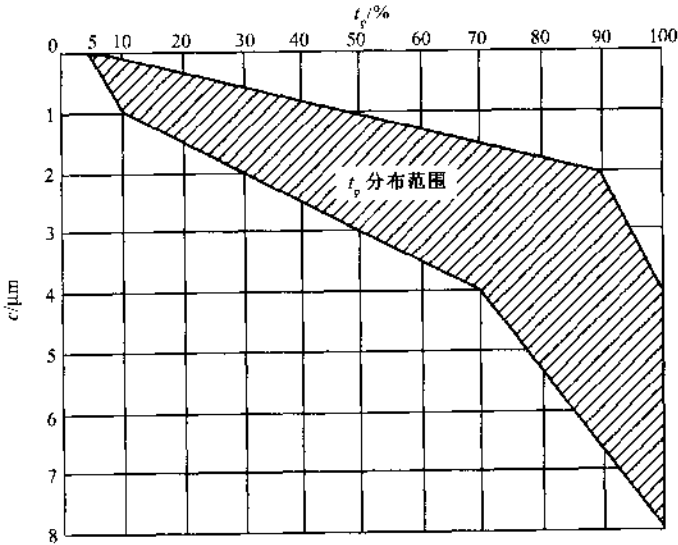


图 2-2 t_p 曲线分布范围

① $1\text{hp}(\text{马力}) = 745.700\text{W}$ 。

支承长度率 t_p 可在粗糙度检查仪或轮廓仪上直接读数,但必须以 t_p 等于 5% 作为轮廓水平截距 c 的计算零点(起点)。计算不同水平截距 c 下的 t_p 值,其值应在图 2-2 所示的范围内。

6) 在两个方向的珩磨网纹均匀。

7) 网纹清晰,无尖角、毛刺和金属折叠,无局部亮斑,无夹杂物。

平顶珩磨的粗珩、精珩有三种实现方法:

1) 使用两个珩磨头,分别装上粗、细粒度不同的磨料制造的油石进行粗珩或精珩。例如,钢质薄壁镀铬缸套采用平顶珩磨加工,镀铬工序自然将粗珩和精珩分开。

2) 在一个珩磨头上,同时装上粗、细粒度不同的磨料制造的两组油石,按粗珩、精珩顺序完后胀开,实现平顶珩磨。例如,德国格林公司生产的珩磨机,将粗珩和精珩两个工序合并为一个工序,在一台珩磨机床上实现。

3) 使用一个珩磨头,一组油石。这组油石使用粗细复合磨料按一定比例制成。

使用平顶超声珩磨工艺(以上述第二种方法为例)应注意以下几点要求

1. 对珩磨孔的预加工要求

1) 孔表面应无冷挤硬化层,表面粗糙度不大于 $R_a 4\mu\text{m}$ 。

2) 中等孔径的珩磨余量不大于 $0.05\sim 0.08\text{mm}$ 。

3) 孔的圆柱度误差不大于 0.02mm 。

2. 平顶珩磨机与珩磨头

1) 在现有的珩磨机上实现平顶珩磨,需要提高珩磨机的往复运动速度,调整主轴圆周速度与往复运动速度的比例,使孔表面获得需要的网纹交叉角。

2) 在平顶珩磨机上使用平顶珩磨装置,珩磨头装有粗珩和精珩两组油石。机床具有自动测量装置,实行粗珩与精珩过程的压力转换与油石交替,可以稳定地获得优良的平顶珩磨表面。

油石的胀开方式有两种:

第一种是双油缸进给胀开方式,如图 2-3 所示,分别以大活塞、小活塞来推动粗珩、精珩加工。图 2-4 是平顶珩磨头原理示意图,油缸和珩磨头之间用两个球形方向接头连接。

珩磨时,先使珩磨头进入缸孔,并以低压状态旋转,大活塞升压至 $8\times 10^5\sim 12\times 10^5\text{Pa}$,通过粗珩推杆,将超硬磨料油石贴紧缸壁进行粗珩,当珩磨至预定余量($10\mu\text{m}$)时,控制系统开始作用,小活塞升压,经过精珩推杆,使精珩油石贴紧缸壁,此时大活塞卸压。从珩磨开始、珩磨头进入缸孔到珩磨结束,给压顺序的设计,是为了防止珩磨头在失压状态下,划伤平顶表面。