

表面工程技术在发动机零部件修复与强化中的应用

史佩京, 徐滨士, 刘世参

(装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室 北京, 100072)

摘要: 简述了发动机零部件的主要失效形式和损坏特点, 针对如何提高发动机零部件表面的耐磨性能、抗腐蚀性、耐疲劳性, 介绍了多种常用的表面工程技术。

关键词: 表面工程 发动机 修复

0 前言

发动机是工农业生产中的主要动力机械之一, 在船舶、汽车、飞机、工程建筑机械等各方面获得了广泛的应用。随着工业的发展, 对发动机的要求也越来越高。由于高负荷、高参数, 发动机的工况条件更加苛刻, 引起发动机机件的损伤和失效, 从而影响发动机的可靠运行^[1]。

发动机损伤和故障的表现形式是多种多样的, 主要表现在以下几个方面:

(1) 磨损。磨损是限制发动机及其零部件使用寿命的一个主要因素, 它取决于缸套、活塞、曲轴、轴承等机件的磨损程度。

(2) 摩擦副的擦伤、拉缸等会酿成重大事故, 从而产生恶劣后果。

(3) 发动机结构强度方面引起的损坏也是影响发动机可靠性和耐久性的重要因素。例如曲轴折断、连杆折断、活塞断裂、缸套断裂、活塞烧裂、缸盖裂纹、机架断裂、轴瓦烧坏、轴颈拉毛、传动齿轮损坏等。这些结构强度上的损坏是一种以疲劳破坏为特征的损坏。

(4) 发动机的个别零部件还会出现穴蚀、烧蚀等损伤^[2]。

综上所述, 发动机零部件的损伤大致可归纳为两种情况: 一是由于体积负荷引起的机械应力而造成零件的裂纹、断裂和不允许的变形等损伤; 另一是表面受到机械或化学的作用、引起磨损、腐蚀、烧蚀等损伤。

1 发动机零部件损坏的形式和特点

发动机中由于磨损产生的故障在各种故障中占有很大比重。由于润滑不良, 配对材料欠佳, 制造和装配质量差, 使用条件的恶化, 灰尘和温

度的影响, 以及交变负荷的作用, 都会促使磨损的四种主要形式: 磨粒磨损、粘着磨损、腐蚀磨损和表面疲劳磨损^[3]在发动机一些主要零件工作过程中有不同程度的出现。

1.1 气缸套、活塞、活塞环组的损伤

气缸套、活塞、活塞环组是发动机的核心部分, 也是工作条件极为恶劣的部位。归纳起来, 气缸套、活塞、活塞环组的损伤形式有磨损、腐蚀、穴蚀、裂纹、烧蚀等。

(1) 气缸套的损伤

缸套的磨损率决定发动机的大修间隔期限, 通常缸套最大允许磨损量为内径的 0.4%~0.8%。缸套的表面质量、燃油的质量、润滑油的质量、冷却水温度和工作条件等因素都会对缸套的磨损产生很大的影响^[6], 导致缸套出现磨损、拉缸和穴蚀等损伤, 从而引起发动机转速不稳、振动加剧、出现噪音、冒白烟或冒黑烟等状况的发生^[4,5]。

(2) 活塞的损伤

活塞工作条件恶劣, 尤其顶部是受机械负荷与热负荷最严重的部位。其主要损伤形式有裂纹、断裂、烧蚀和腐蚀等。

(3) 活塞环的损伤

活塞环的磨损率决定了发动机检修周期的长短, 它在高温高压燃气环境里承受弯曲、冲击及磨损, 易发生折断和过度磨损, 从而使密封性能下降, 进一步恶化了发动机性能^[8]。

1.2 气缸盖的损伤

气缸盖结构复杂, 其上有进、排气阀孔、示功器孔、安全阀孔、启动阀孔、喷油器孔等, 内部有一系列不规则形状的冷却水腔和进、排气道, 横向和垂向分别与进、排气管和机身相连接。工作条件比较恶劣, 它的底(热)面受着燃气的高温、高压和腐蚀作用, 水夹层也受着冷却水的腐蚀, 且冷、热不均, 受力复杂, 缸盖的其它部分也因固紧螺栓而产生机械应力。其主要损伤形式有: 缸盖裂纹、阀座损伤(阀座扭曲、磨损、

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50235030), 总装“十五”预研项目(41327010301)
作者简介: 史佩京(1977-), 男(汉), 山东莒南人, 博士研究生

裂纹等)。

1.3 凸轮挺杆的损伤

凸轮挺杆是发动机中一对常出现磨损失效的摩擦副之一。随着发动机不断向高速、大功率发展、配气机构的弹簧力、摩擦面间的相对滑动速度不断增加,凸轮挺杆间的润滑条件更加苛刻。其主要损伤形式是由于粘着磨损和疲劳磨损而引起的擦伤和点蚀。

1.4 曲轴的损伤

曲轴是发动机上最重要的部件之一,工作中承受弯曲、扭转负荷和一定的冲击负荷。曲轴的工作可靠性和寿命在很大程度上决定了发动机的可靠性与寿命。曲轴损伤的主要形式有:(1)轴颈的磨损;(2)曲柄销或主轴颈与曲柄臂相连接的圆角部位裂纹、断裂;(3)曲柄销或主轴颈油孔部位裂纹、断裂;(4)腐蚀所造成的断裂;(5)组合式曲轴缸套部位滑移;(6)由于烧瓦而造成的曲轴表面裂纹及拉伤;(7)曲轴的弯曲与扭曲。

2 表面工程技术在发动机中的应用

分析发动机零部件损坏的形式和特点可以得出发动机零部件失效的主要形式为:磨损、腐蚀与疲劳等,它们多发生于表面,或者是先从表面开始,所以提高材料表面性能对延长零部件使用寿命和发挥潜力有着重要的作用。

提高材料表面耐磨性的强化方法往往是从提高表面硬度和减少摩擦系数两方面着手。迄今为止,传统的表面淬火和渗碳淬火还是提高零部件耐磨性的主要手段,曲轴、活塞销、凸轮与凸轮轴等大量零部件都是采用这种工艺方法。气体渗氮、碳氮共渗、离子氮化等主要是利用弥散分布的氮化物来提高材料的表面硬度;渗硼、渗钒、渗铬和沉积碳化物、氮化物处理所得到的高硬度和超高硬度的化合物层,具有更优异的抗磨料磨损能力和高的抗粘着磨损能力;表面镀层,如镀铬层等也是一种广泛应用的耐磨性镀层。

改善摩擦条件,降低摩擦系数的表面处理可从另一方面提高材料的耐磨性。渗硫、硫氮共渗、硫氮碳共渗、磷化、石墨化渗层都是在金属表面生成减摩的化合物层和非金属层,以降低摩擦系数,避免摩擦副之间直接接触,因而能防止粘着、避免擦伤。

提高材料表面抗疲劳性能的主要方法有:高频表面淬火、渗碳淬火的淬硬层,其马氏体硬度高,并存在有残余压应力,从而使疲劳强度有一定提高。喷丸、表面滚压等表面形变强化处理在提高表面硬度,造成表面压应力的同时,还能消除表面缺陷,因而能提高材料的疲劳强度和降低材料对缺口的敏感度。在表面淬火、渗碳淬火和渗氮后再进行喷丸和表面滚压处理的效果更好,特别是轴的轴径,齿轮的齿根等应力集中处,用表面滚压加工效果更好。

提高材料表面抗腐蚀性能的主要方法有:

(1)镀铬,因为它在碱、硝酸、硫化物、碳酸盐及有机酸中非常稳定;(2)氮化,因为它在零部件表层形成稳定性高的相层,对水、潮湿空气、燃烧产物,特别是对硝酸的抗蚀性很高;(3)渗铝、渗硅对酸有良好的抗蚀性;(4)含铬的镍基、钴基自熔性合金喷涂层具有良好的热腐蚀、燃气腐蚀的能力,因为形成了致密的 Cr_2O_3 氧化膜;(5)对钢铁零件,如活塞环进行磷化和发蓝处理,它们可以防止腐蚀和减轻机械磨损。下面重点介绍几种常用的表面工程技术。

2.1 热喷涂

热喷涂法不仅能使零件具有耐磨、耐蚀、耐腐蚀、耐高温、隔热等不同功能,而且能使它具有复合性能,即能保护零件,又能修复零件。目前,在发动机中,主要用于曲轴、活塞顶部、活塞环、气缸套、排气门、阀座、凸轮、齿轮等零件的表面处理和修复^[6],表1给出了采用热喷涂修复发动机缸体及更换新件的经济效益对比,由表可见,热喷涂3Cr13材料修复仅需花费新件成本的4.2%。

在发动机中,用于提高零件表面耐磨性的喷涂材料主要有以下几种:

1)钼。钼作为喷涂材料,其纯度需在99.95%以上。钼主要作为活塞环的喷层,它可以得到具有氧化物层的层状钼层和大约10%~15%的孔隙率,其喷涂层厚度一般为0.25mm,具有良好的储油性能。钼层熔点高(约为2620℃)、摩擦系数低、硬度高(HV1070左右)。因此耐磨性好,一般用在第一道活塞环处。

2)钼基合金。钼基合金的等离子喷涂层的特点是抗拉缸性好,因为它是由低硬度的纯钼(HV350)和硬度相当高的(HV700)镍基合金两相组成。其热稳定性优于钼丝喷涂层,耐磨性

能相当于镀铬，特别是在润滑条件不够充分时^[10]。

3) 铬基合金。铬基合金等离子喷涂层不仅在边界条件下的耐磨性及抗咬和性能较好，而且还能提高配磨材料的耐磨性，可同时提高缸套和活塞环的耐磨性^[11]。在边界润滑条件下，这种涂层的活塞环比镀铬还更耐磨，因此，可做高速、中速和低速发动机活塞环的涂层材料。

4) 陶瓷。陶瓷涂层如氧化铬和氧化铝/二氧化钛硬度较高 (HV1500)，在一定条件下，活塞环的耐磨性能好，但对缸套磨损却很大，因此，只能在特殊要求的情况下使用。

5) 金属陶瓷。金属陶瓷是比较复杂的，它是以碳化物为基（如碳化钨）的涂层，即使在恶劣的运转条件下，不但活塞环的磨损低，缸套的磨损也低。但金属陶瓷很贵。在发动机中，一般将陶瓷喷在排气阀面、活塞顶面、活塞环工作面上。

6) 镍基合金。镍基合金有 Ni-B-Si 和

Ni-Cr-B-Si 系。镍基合金涂层除耐磨性较好外，还有很好的抗蚀性和较高的热硬性。主要用于发动机活塞环、阀座、阀门、凸轮的喷焊（也用于修复），以提高这些零件的耐磨性。

7) 高碳钢与不锈钢。高碳钢，如碳素工具钢 T8 常用于修复并强化发动机铸钢，球墨铸铁轴颈表面的线材气喷、电喷涂。而不锈钢由于具有优越的耐蚀性、耐热性，而用于气缸套内表面的喷涂（火焰喷），具有很好的效果。

2.2 电刷镀修复

发动机凸轮轴轴颈的主要失效方式是磨损或划伤，以前凸轮轴轴颈出现磨损或划伤一般就报废了，或者采用加厚轴瓦的办法磨削轴颈后使用，给用户的维修带来很大的麻烦。电刷镀技术具有设备简单、操作方便、安全可靠、镀积速度快的特点，用于修复凸轮轴轴颈取得明显效果^[7]。表 2 给出了采用电刷镀纳米 Al₂O₃/Ni 修复发动机轮轴和连杆的效益分析，电刷镀技术可大大降低维修成本。

表 1 热喷涂 3Cr13 经济效益分析

零件名称	喷涂成本/元	新件价格/元	成本比较
发动机缸体	460	11000	4.2%

表 2 电刷镀 n-Al₂O₃/Ni 经济效益分析

零件名称	电刷镀成本/元	新件价格/元	成本比较
发动机凸轮轴	40	529	7.6%
发动机连杆	43	480	9.0%

2.3 挤渗碳化硅

挤渗碳化硅工艺是把碳化硅微粒直接挤渗到金属表面层，在其表面呈非连续分布。这种方法的主要特点是工艺简单、生产效率高、成本低廉、无污染、无须特殊设备。因此，它是一种很有前途的新工艺。主要用于提高发动机气缸套、活塞环的耐磨性，特别对高强载发动机更有效^[8]。

2.4 镀铬

镀铬工艺主要用于提高发动机零件的耐磨损与耐腐蚀性，如曲轴轴颈，十字头轴颈，活塞销、活塞环槽，活塞杆、缸套、活塞环、气阀及阀杆镀铬、油泵柱塞和套筒。目前，发动机零部件中常用的耐磨镀铬有两种，硬质镀铬和松孔镀铬^[9]。

硬质镀铬是指硬度较高而又耐磨的光亮镀铬层，它主要用于润滑条件较好，负荷又不很大

的条件下，一般镀层厚度为 0.03~0.3mm，最厚可达 1.0mm。

松孔镀铬主要用于润滑不良，承受载荷较大的零件如发动机缸套、活塞环、十字头销等。

2.5 氮化

氮化有三种：（1）普通氮化，指纯粹氮原子的渗入；（2）软氮化，盐浴液体软氮化，含有活性氮、碳原子的气体介质中的气体软氮化及离子软氮化（包括加钛离子氮化）；（3）辉光离子氮化。

目前，最常用和最有发展前途的是离子软氮化和辉光离子氮化。它们主要用来提高发动机零件如曲轴轴颈、缸套、活塞环、凸轮轴、进排气阀、气门挺杆等的耐磨性、耐疲劳和耐腐蚀等。

2.6 激光加热表面淬火

激光加热用于钢和铸铁零件表面淬火，以提高其耐磨性。美国 GM645 系列柴油机，为了解

决缸套气口的拉伤和提高其耐磨性,对气口部位曾分别进行过氮化、感应加热淬火和火焰淬火等处理,但由于处理面很大、温度高,出现了严重变形,甚至发生裂纹,最后用激光加热表面淬火处理,取得了良好的效果^[12]。激光加热淬火的气缸活塞环在我国已有应用,而且反映良好。该方法的特点是工艺简单、变形很小(如对缸套表面淬火,局部温度可达 916℃,其它部位温度低于 200℃,因此变形很小)。

2.7 喷丸加工

喷丸加工法不需改变零部件的形状、材料、热处理,而且易于提高强度,特别是疲劳强度,因此,在发动机中已有很多应用,目前主要应用于曲轴、连杆、气阀弹簧、摇臂及传动齿轮等部位。经喷丸加工后的强化层可达 0.5~0.6mm,表面硬度可达 HRC40~50 左右。

2.8 冷压光加工

作为光整和表面强化的手段,冷压光加工在生产中得到了日益广泛的应用,以改善其零件表层的质量(粗糙度、冷硬程度、冷硬层深度、残余应力的性质和大小)。在发动机中主要用于气缸套、活塞销孔、连杆小头铜衬套、气阀导管、阀杆表面、凸轮轴颈、曲轴轴颈,特别是曲柄臂过渡圆的最后精加工,用以降低表面粗糙度及其强化并呈现残余压应力。

3 结 论

综上所述,由于发动机零部件的工作条件复杂,损坏常常是几种失效形式的复合,对零部件表面性能的要求往往不是单一的。因此,只有根据零部件的工况条件和失效特点正确选用表面强化方法,才能达到延长零部件的使用寿命和节约材料的目的。

参考文献:

- [1] 许汉立,方之昌. 发动机润滑与用油[M].北京:中国石化出版社,2000.12~15.
- [2] 严立,余宪海. 内燃机磨损及可靠性技术[M].北京:人民交通出版社,1992.1~6.
- [3] 徐滨士,朱绍华. 表面工程的理论与技术[M].北京:国防工业出版社,1999.30~31.
- [4] 陈学定,韩文政. 表面涂层技术[M].北京:机械工业出版社,2000.50~58.
- [5] 张家玺,高群钦,朱均. 发动机缸套—活塞环摩擦学研究回顾与展望[J]. 摩擦学学报,1999(5):28~32.
- [6] 宋光华. 等离子弧喷涂工艺在强化柴油机缸套上的应用[J]. 焊接,1985(8):8~12.
- [7] 邢忠,冯义成,姜爱良. 表面工程技术在发动机再制造上的应用[C],(济南)机电装备再制造工程学术研讨会论文集,2004.18~23.
- [8] 余宪海. 气缸套活塞环挤渗碳化硅工艺及耐磨机理探讨[J]. 内燃机学报,1985(3):16~19.
- [9] 赵世群. 用钼合金化来提高活塞环镀铬层的耐磨性[J]. 发动机配件,1996(3):40~44.

Application of Surface Engineering to The Repairing of Engine

Shi Peijing, Xu Binshi, Liu Shican

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy
of Armored Force Engineering, Beijing 100072)

Abstract: The main invalidation mode of engine's tribo-parts was introduced in this paper. Some useful methods of surface engineering technology were introduced according to how to improve the properties of antiwear, corrosive resistance and fatigue resistance, etc.

Key words: Surface engineering, Engine, Repair