

柴油机用涂层技术新发展概述

石绪忠

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 表面涂层技术包括电镀/电刷镀、热喷涂、阳极氧化/微弧氧化、气相沉积等, 这些技术在柴油机零部件制造和维修中已得到广泛应用。针对柴油机用表面涂层技术及相关材料的最新发展, 对这些新涂层技术对柴油机零部件耐高温、耐磨、减摩等性能的提升效果进行了综述。

关键词: 柴油机; 表面涂层; 材料

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)03-0049-05

The Overview of New Progress of Coating Technologies Used in Diesel Engines

Shi Xuzhong

(Luoyang Ship Material Research Institute, Henan Luoyang 471023)

Abstract: Surface coating technologies include electroplate, electro-brush plating, thermal spray, anodic oxidation, micro arc oxidation, vapor deposition, etc., which have been widely used in manufacturing and maintenance of diesel engines' components. Aiming at the latest progress of the coating technologies and relative materials, the promoting effects of coating technologies on properties of diesel engines' components, such as high temperature resistance, anti-wear, anti-friction are summarized.

Key words: diesel engine; surface coating; material

0 引言

柴油机功率范围大、效率高、能耗低、使用维修方便, 是现代舰船、工程机械、机车车辆、发电机组等的核心动力装置。柴油机工作时, 各主要部件的工况较为恶劣。活塞直接与瞬时温度高达 2 200 ℃ 的高温气体接触, 其顶部温度可达 300 ~ 400 ℃, 并承受很大的气压; 气缸套内表面承受高温高压燃气、强烈摩擦、燃气腐蚀, 外表面则承受冷却水的冷却及腐蚀、穴蚀、热应力, 所以气缸套易发生腐蚀、穴蚀、磨损、烧蚀等形式的破坏; 排气阀长期承受高温, 最高温度达 550 ~ 700 ℃, 承受较高温度下的拉伸、高温废气的热腐蚀以及无润滑条件下的运动磨损和冲击; 活塞环是柴油机的主要密封件和易损件, 既承受摩擦力及轴向、径向运动载荷, 又承受高温、高压燃气的腐蚀, 易发生过

度磨损、粘着甚至折断等。

表面涂层技术可用来改善柴油机部件的性能以适应工作环境的要求。多年来, 针对柴油机关键零部件表面涂层技术, 国内外相关公司和研究机构已经开展了许多深入的研究和应用。本文对柴油机用电镀/电刷镀、热喷涂、阳极氧化/微弧氧化、气相沉积及有机涂层等的新发展进行综述, 总结涂层对零部件耐高温、耐磨、减摩等性能及寿命提高的作用。

1 柴油机用涂层技术的新发展

1.1 电镀

现代柴油机对负荷水平的要求越来越高, 相对地须提高活塞环对热负荷和机械负荷的承载能力。在润滑条件差或热负荷很大的场合, 传统镀铬活环与缸壁的摩擦恶化, 容易出现熔着磨损, 严重

收稿日期: 2016-06-16; 修回日期: 2016-09-07

作者简介: 石绪忠(1981-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为舰船装备用表面涂层技术, E-mail: shixuzhong@126.com。

时发生“拉缸”或铬层剥落,已经无法满足这类活塞环的需要。

美国 Federal Mogul 公司发明了“在硬铬基体的微裂纹网络中嵌入硬粒子”技术,即 CKS (带有氧化铝陶瓷的铬层) 和 GDC (具有极细金刚石的铬层) 技术。这 2 种技术具有延展到镀层厚度部分或全部裂纹网络的能力,通过在其中嵌入硬粒子而使镀层表面得到强化。图 1 示意性地阐明了这种涂层的结构,并显示了重复性的加工步骤,包括镀铬、开微裂纹网络槽、嵌入硬粒子、整合硬粒子、关闭微裂纹、建立涂层的下一层等。CKS 镀层尤其适用于高速柴油机的顶环,与硬铬涂层相比,该涂层的磨损率约低 50%,并且显著提高了抗拉缸能力。该公司在活塞的顶面、外环带、销座和活塞裙的活塞本体上应用了 GDC 涂层,金刚石团簇尺寸小于 40 nm,电镀层非常光滑,厚度为 2~10 μm ,摩擦系数约为 0.08。GDC 涂层减少或消除了上环岸的炭堆积,避免了氧化和腐蚀,大大降低了活塞环槽及销孔的磨损,消除了气缸套气穴现象^[1]。

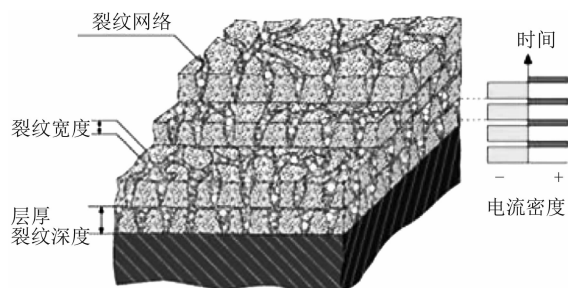


图 1 用硬粒子加固的铬层示意图

瓦锡兰瑞士公司在活塞环面向气缸套的滑动表面应用了由铬陶瓷制备的涂层,实现了气缸套材料和活塞环耐磨性的理想匹配。铬陶瓷为 $\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Cr-Si}_3\text{N}_4$ 、铬-氧碳化硅和铬-金刚石^[2]。达劳斯活塞环公司研制了第二代陶瓷硬铬电镀涂层,该涂层的热稳定性优异,使发动机顶环的耐高温性提高,磨损程度降到最低,并使大修间隔时间延长。

目前,国内的仪征威龙发动机零部件有限公司也已开发出具有国际水平的铬-陶瓷复合镀铬技术和金刚石复合镀铬技术,并在国内建立了复合镀铬生产线。

1.2 电刷镀

纳米电刷镀是一种较新颖的电刷镀技术,是指把具有特定性能的纳米颗粒加入电刷镀液中,以获得纳米颗粒弥散分布的复合电刷镀层。该技术已在柴油机制造、维护保养和表面强化等方面得到实际

应用。

针对柴油机气阀导管内孔因长期使用磨损导致的间隙超标问题,4805 厂采用 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ 纳米颗粒复合电刷镀技术维修,镀层耐磨性能较传统快镀镍涂层有显著提升^[3]。广州航海高专先后采用了电刷镀 Ni-Co-SiC 和 Ni-W-SiC 合金对活塞环进行表面处理,4 000 h 实船试验表明: Ni-Co-SiC 活塞环寿命提高了 60%~100%; Ni-W-SiC 复合镀层耐磨性是合金铸铁件的 14.5 倍,是刷镀快速 Ni 件的 4.4 倍^[4-5]。

1.3 热喷涂技术

1.3.1 陶瓷涂层

在柴油机上应用陶瓷涂层的主要目的是绝热/热障,应用部位为活塞顶部、缸头底面、气阀阀面及缸套上圈,以期获得隔热良好的燃烧室,从而降低受热工件的热负荷和整机的热损失,改善燃烧状况,节约燃油。我国在这方面也有研究,20 世纪 90 年代研究最为活跃,后续逐渐减少。2012 年,太原理工大学在活塞 150 μm 厚的 NiCrAl 粘接层上喷涂了 350 μm 厚的 MgZrO_3 涂层^[6],发现有助于发动机工作效率的提高。2015 年,印度在活塞顶喷涂了 100 μm 的 TiO_2 涂层,以期使活塞绝热^[7]。试验证实:该涂层有助于降低发动机燃油消耗,有效热效率提高约 3%,机械效率增加约 2%,发动机的排气温度升高约 40 $^\circ\text{C}$ 。

1.3.2 金属涂层

传统的热喷涂金属涂层包括钼基涂层、镍铬涂层,近年来也出现了一些新型涂层体系,如铝青铜涂层、金属-陶瓷、玻璃-金属等。

(1) 钼基涂层

近年来的研究侧重于钼粉与其它金属粉体形成的多元复合粉末喷涂。日本活塞环株式会社提出在柴油机滑动部件上热喷涂钼基复合粉末涂层^[8]。该粉末含有钼粉、镍铬粉、陶瓷粉及少量固体润滑剂粉末。复合涂层提高了滑动部件的耐磨性和耐擦伤性能,可延长船用柴油机使用寿命。国外有公司将喷涂 Fe-Mo 涂层的气缸套与镀铬活塞环层配副^[9],其耐磨能力是常规高磷铸铁气缸套与镀铬活塞环组合的 1.9 倍。

(2) 镍/铬基涂层

镍基和铬基涂层的应用范围包括排气阀阀杆、气缸套等。为恢复柴油机排气阀阀杆的磨损尺寸并提高其耐磨性、耐腐蚀性,武汉理工大学采用氧-乙炔火焰喷熔工艺,在灰口铸铁环上制备了 Ni45AMo 涂层^[10],其干摩擦和油摩擦性能优异。

在球墨铸铁气缸套内壁上制备了 100 μm 厚的 NiCrBSi 合金涂层, 涂层内聚结合, 强度为 110 ~ 130 MPa, 硬度高达 1 120 ~ 1 160 HV, 可耐受 30% 稀硫酸和 8% 稀盐酸的腐蚀, 有效提高了气缸套的性能和使用寿命^[11]。武汉理工大学还制备了 3Cr13 高速电弧喷涂层, 涂层的磨损率降到铸铁磨损量的 1/100 以下。该涂层组织致密, 结合强度、显微硬度高, 抗热震性能及耐磨性优异, 能达到气缸套内孔尺寸修复与强化的双重作用^[12]。

(3) 铜合金涂层

针对满负荷时最大燃烧压力超过 10 MPa 的柴油机, MAN B&W 公司采用热喷涂两层不同硬度的铝青铜涂层, 达到减摩和防咬合作用^[13]。该涂层外层为磨合层, 而内层为耐磨层, 应用对象包括直径 600 mm 缸套内表面、600 mm 铸铁活塞环。

(4) 金属-陶瓷涂层

近年来, 瑞士 Sulzer Metco 公司提出了保护气缸套工作表面的 SUMEBore® 涂层解决方案。该方案采用等离子喷涂方式, 涂层材料包括 NiCr、Mo-Ni 包覆的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 和 Cr_3C_2 等多种类型。气缸套涂层的最终加工采用金刚石珩磨, 可达到抛光镜面的水平, 部分产品见图 2。德国大众公司已采用该技术喷涂了近 300 万只缸套, 解决了燃用高硫分燃油废气再循环发动机的耐腐蚀问题, 同时降低了机油耗和燃油耗, 减少了颗粒排放^[14]。



(a) 喷涂后的 2 冲程气缸套 (b) 镜面抛光后的 $\Phi 200$ mm 气缸

图 2 具有 SUMEBore 涂层的气缸

广州有色金属研究院将 Cr_3C_2 -NiCr 涂层应用于气缸套上, 涂层缸套的使用寿命比原来提高了 2 倍, 并提高了燃油效率, 降低了含硫氧化物和氮氧化物的排放^[15]。2012 年, 重庆跃进机械厂将超音速喷涂镍铬-碳化铬涂层技术用于柴油机气阀阀杆^[16], 涂层厚度为 0.02 mm, 硬度为 950 ~ 1 050 HV, 与基体的结合强度高达 60 ~ 70 MPa。

(5) 玻璃-金属涂层

2008 年, 德国 MWH 公司在新研制的 16 缸四气门柴油机上应用了玻璃-金属涂层。采用火焰喷涂的玻璃-金属涂层由镍基金属相和 VV17 玻璃相组成, 其成分各占 50% 左右。玻璃-金属涂层因其

表面不存在孔隙或微裂纹, 可以形成一个不渗透的屏蔽; 玻璃-金属涂层与金属衬底形成非常牢固的粘结, 在喷涂过程中, 熔化的玻璃隔绝了金属的氧化并溶解氧化物, 涂层中熔化的金属能牢固地粘在零部件表面, 且具有强的耐腐蚀性和抗剥落性。在燃用重油的试验机上进行试验, 未喷涂的气阀运行 2 452 h 后, 腐蚀了大约 200 μm , 而喷涂的气门基本没有腐蚀。玻璃-金属涂层作为一种绝热材料的特性已经通过评估^[17]。

1.4 阳极氧化/微弧氧化

以阳极氧化作为防止活塞顶部热龟裂的手段, 国外早在 20 世纪 50 年代就开始采用了, 国内到 20 世纪 80 年代后半期, 也已出现专业化、大批量的生产线, 成为活塞正规处理方法之一。如康明斯 NH-K 系列柴油机活塞的顶部阳极氧化膜的厚度要求为 100 μm , 可使活塞吸热减少 20%, 活塞顶部的温度与未经处理的相比可下降 30% ~ 50%^[18]。

微弧氧化是在阳极氧化基础上发展起来的表面处理技术, 已在柴油机上得到了一定应用。膜层是由电解液中的等离子电弧烧结而成, 其硬度更高, 更为耐磨和耐腐蚀。

针对东风康明斯发动机 ZL108 活塞顶部中央进行局部陶瓷化处理的要求, 江汉大学采用微弧氧化技术对活塞进行处理^[19]。武装警察部队学院将微弧氧化处理的 ZL108 活塞进行发动机装车运行, 结果表明其耐磨性比未处理过的活塞提高了约 3 ~ 4 倍^[20]。针对 ZL109 $\Phi 62$ mm 型活塞经常出现顶部击穿烧蚀、环岸断裂、裙部拉伤等现象, 曲阜金皇活塞公司采用微弧氧化对该活塞顶部进行处理。微弧氧化后的活塞顶部膜层外观良好、致密度较高, 厚度为 40 ~ 50 μm ^[21]。

大连海事大学在铝合金活塞上制得厚度为 20 μm 以上的微弧氧化膜层, 在相同热源条件下, 活塞试样另一侧的温度要比未处理的活塞试样低 84 $^{\circ}\text{C}$, 膜层可耐受 10 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$ 的多次热冲击, 且摩擦系数、耐磨性能优异^[22]。2012 年, 利用微弧氧化技术, 西安工业大学在活塞铸造铝硅铝合金上制备了热障涂层^[23], 膜层厚度达到 89.5 μm 。将基体温度升高到 200 $^{\circ}\text{C}$ 时, 微弧氧化膜层的隔热温度达到了 54.3 $^{\circ}\text{C}$ 。石家庄金刚内燃机零部件公司对活塞头部进行了微弧氧化处理, 厚度为 25 ~ 30 μm , 经浙江某船厂装机试验, 该微弧氧化活塞顺利通过了两个大修期而未损坏, 其耐腐蚀性高于阳极氧化处理样。表明微弧氧化处理可以降低重油对活塞的腐蚀^[24]。

1.5 气相沉积与注入

物理气相沉积 (PVD) 与注入是柴油机零部件表面处理新技术, 包括物理气相沉积、化学气相沉积及离子注入等方法。

物理气相沉积技术是制备活塞环硬质涂层的新方法。德国马勒公司在活塞环滑动面上用 PVD 方式沉积了柱状晶 CrN 涂层, 其硬度在 1 500 ~ 2 200 HV 之间, 使得活塞环具有高耐磨性以及微裂纹产生良好的抑制性^[25]。在经渗氮处理后的活塞环上, 武汉大学采用大功率电弧放电方法制得铬基陶瓷复合涂层^[26], 该涂层具有良好的结合力、高硬度及良好的润滑性能。西华大学采用真空多弧离子镀膜法, 在钢制或铸铁活塞环表面沉积 Al/AlCrN 复合涂层^[27], 复合涂层与活塞环结合牢固、硬度高、摩擦系数低、耐高温。在乘用车用发动机活塞的第一道气环外圆工作面上, 南京飞燕活塞环公司采用物理气相沉积了类金刚石涂层^[28], 使该活塞环摩擦系数比常规的镀铬、复合镀铬的环降低了 15% ~ 25%。

物理气相沉积在轴瓦上也有重要应用。轴瓦是柴油机中特殊易损件, 其耐磨性等指标直接影响整机的运行。国内外采用磁控溅射工艺已将 AlSn20 镀覆在铜铅合金上, 而米巴等公司已成功将溅射轴瓦商品化。2002 年, 哈尔滨工程大学开展了轴瓦磁控溅射 AlSn20 薄膜技术研究^[29]。为了推进高端柴油机关键部件的国产化进程, 重庆跃进机械厂于 2007 年开始采用磁控溅射工艺制备轴瓦, 使轴瓦主要性能指标大幅提高, 满足引进的高端柴油机对轴瓦性能的要求。

化学气相沉积方面, 主要以类金刚石 (DLC) 薄膜为主, 也包括 BN-SiN 薄膜。DLC 薄膜是一类含有金刚石结构和石墨结构的亚稳非晶态物质, 具有高硬度、优异的减摩抗磨性能、高热导率以及优异的化学惰性性能。

费德罗-莫格尔公司发明了 PACVD 技术制备 DLC 膜层活塞环^[30], DLC 中 sp² 键占多数, 膜层厚度范围为 2.9 ~ 30 μm, 硬度 1 800 ~ 2 800 HV, 与传统的 DLC 膜层活塞环相比, 其摩擦系数减小了至少 30%。该公司在另一项专利中提出了具有至少一个残余应力梯度的非晶四面体碳型 DLC 涂层技术^[31]。DLC 涂层有利于活塞环在长周期内保持可靠而有力的摩擦特征。

近几年 DLC 涂层应用于活塞环已实现了工业化生产, 主要采用先将活塞环进行气体氮化或离子氮化, 然后再与 DLC 涂层结合的复合处理方式。

上海铁路局采用低温等离子体 CVD 工艺, 在气门零件表面沉积 BN-SiN 复合陶瓷薄膜^[32], 使气门的导热、耐磨、耐腐蚀性均有较大幅度提高, 在铁路内燃机车上装车运行 30.5 万公里, 工作状况明显优于普通气门。

离子注入方面, 美国采用了离子直接注入和离子束混合表面处理技术, 来提高柴油机活塞环的抗摩擦磨损性能^[33]。氮化钛和氮化铬离子束混合处理的 M2 钢, 与等离子喷涂的 Cr₂O₃ 和 Cr₃C₂ 涂层相比, 抗摩擦磨损性极好, 摩擦减少 50%, 磨损减少 95%。2011 年, 哈尔滨工程大学采用等离子浸没式离子注入技术在柴油机排气阀杆上制备 Cr₇C₃ 涂层^[34], 涂层厚度 7.2 μm, 硬度 953 HV, 摩擦系数为 0.27, 涂层高温氧化增重为基体的 1/481, 为硬铬层的 1/204。

1.6 有机涂层

有机涂层主要用于轴瓦的减摩。

米巴公司的 SYNTHETEC® 轴瓦涂层, 其主要成分为聚酰胺-酰亚胺 (PAI)-MoS₂-C。费德罗-莫格尔公司的自润滑聚合物涂层 (IROX™) 施涂于铝合金轴瓦表面后, 轴瓦的耐磨性比带有 AlSn20Cu 涂层的 G499 轴瓦提高近 4 倍, 有效解决了发动机轴瓦的起-停磨损。马勒公司开发的聚合物涂层使轴瓦的抗咬合性能和耐磨损性比铝锡溅镀层轴瓦大大加强, 该涂层由耐高温聚合物聚酰胺-酰亚胺、固体润滑剂和金属颗粒组成。聚合物涂层在最高达 160 MPa 的试验载荷下无一失效; 在 1 250 h 耐久试验后, 聚合物涂层与溅射镀层仍完好结合, 耐磨损性能良好^[35]。

国内很多单位也开展了轴瓦用固体润滑涂层的研究。中科院兰化所研究了铝基轴瓦用固体润滑涂层^[36], 该种涂层由氮化硼等无机颗粒与聚酰胺-酰亚胺共混后喷涂烘干制得, 其润滑性能优异。烟台春生滑动轴承公司在无合金轴瓦钢背层上依次喷涂了聚酰亚胺 (PI) 树脂层、MoS₂ 层及 PAR 润滑涂层, 并进行真空烧结, 减少了轴瓦内表面划伤, 延长了轴瓦寿命^[37]。

1.7 激光熔覆

激光熔覆是以高能密度的激光为热源在基材表面熔覆一层材料, 并形成与基材具有完全不同成分和性能的涂层的表面改性方法。

针对钢活塞保护面的热氧化, 费德罗-莫格尔公司采用 HVOF 或等离子喷涂方法涂覆抗氧化抗腐蚀材料, 并采用高能激光束照射涂层, 增加涂层密度, 以重构其微结构, 熔融合金, 提高涂层与钢

基体的结合强度, 最终为活塞顶提供持久的保护表面^[38]。

仪征威龙公司采用激光熔覆技术将陶瓷颗粒增强的金属粉体熔覆于活塞环的表面^[39], 克服了涂层与基体结合强度不足的问题, 与 CrN、镀铬相比其摩擦系数降低了 40%, 达到了 0.08, 降低油耗 1% 以上。潍柴动力公司也采用激光熔覆方法实现了发动机曲轴再制造^[40]。

2 结 论

综上, 可以看到传统的表面涂层技术如电镀、阳极氧化、化学转化膜等技术仍在不断改进中; 而新型的涂层技术如, 气相沉积与注入、激光熔覆、微弧氧化等, 因其优异的涂层性能逐渐在柴油机上推广应用。表面涂层对于柴油机性能的提升富有成效, 建议零部件制造和维修阶段充分应用这些先进的表面涂层技术。

参考文献

- [1] 米格尔·阿塞韦多. 柴油机涂层动力缸部件: 201210352328 [P]. 2013-01-16.
- [2] 康拉德·莱斯. 耐磨往复式活塞式内燃机: 201110140332.6 [P]. 2012-01-25.
- [3] 周力平. 纳米电刷镀技术的应用 [J]. 中国修船, 2004 (2): 18-19.
- [4] 刘晓红, 余宪海. 应用复合电刷镀提高活塞环使用寿命 [J]. 广州航海高等专科学校学报, 1993 (1): 11-14.
- [5] 刘晓红, 余宪海. 柴油机活塞环 Ni-W-SiC 复合电刷镀研究 [J]. 中国修船, 2005 (2): 25-26.
- [6] 孙力平, 张翠平, 药志英, 等. 基于有限元的柴油机陶瓷涂层活塞的热分析 [J]. 机械设计与制造, 2012 (9): 42-44.
- [7] RUPANGUDI S K, RAMESH C S, VZERADHADHRAPPA K, 等. 活塞涂层对柴油机性能影响的研究 [J]. 闫红梅, 译. 国外内燃机, 2015 (1) 63-65.
- [8] 高村浩行. 耐磨滑动部件: 02805704. X [P]. 2004-06-02.
- [9] 张庆昕. 船用柴油发动机气缸套表面处理的研究和开发 [J]. 内燃机配件, 2005 (6): 1-6.
- [10] 司占博, 郑卫刚. 柴油机排气阀锥面涂层耐磨性的研究 [J]. 起重运输机械, 2012 (6): 26-28.
- [11] 毛俊元, 郑卫刚. 船用柴油机气缸套内壁热喷涂方式的研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (18): 137-139.
- [12] 曾志龙, 丁彰雄, 赵辉. 大型船舶柴油机气缸套再制造中涂层设计及性能研究 [J]. 热喷涂技术, 2010, 2 (1): 42-48.
- [13] 莱赫·莫丘尔斯基. 柴油内燃机的气缸元件, 如缸套、活塞、活塞裙部或活塞环和用于这种内燃机的活塞环: 97196212. X [P]. 1999-08-04.
- [14] Ernst P. 保护气缸套工作表面的 SUMEBore® 涂层解决方案 [J]. 米炳全, 译. 国外内燃机, 2013, 45 (6): 58-62.
- [15] 乐有树, 刘敏, 李建雄, 等. Cr₃C₂-NiCr 涂层的工程化应用研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39 (S1): 448-450.
- [16] 冀庆康. 超音速火焰喷涂柴油机气阀阀杆的工艺: 201210501261.2 [P]. 2013-03-13.
- [17] 李积轩. 适用于极端工况下的柴油机排气门新型玻璃-金属涂层 [J]. 柴油机, 2008, 30 (2): 57.
- [18] 杨丽祥, 瞿怀忠, 陈逢凯. 柴油机铝活塞的硬质阳极氧化 [J]. 柴油机, 2004, 26 (1): 37-38.
- [19] 冯俊, 沈丽如, 冯洁, 等. 汽车发动机活塞的微弧氧化处理 [J]. 特种铸造及有色合金, 2003 (1): 52.
- [20] 卢立红. 微弧氧化技术在消防车发动机活塞上的应用 [J]. 表面技术, 2006, 35 (1): 83-84.
- [21] 颜君衡, 孔令东, 宋文启. 内燃机活塞顶部微弧氧化陶瓷处理技术及应用 [J]. 内燃机与配件, 2008 (2): 17-19.
- [22] 彭俊杰. 微弧氧化在船用柴油机铝合金活塞上的应用 [D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
- [23] 刘雁玲. 活塞铝合金微弧氧化热障涂层生长及组织性能 [D]. 西安: 西安工业大学, 2012.
- [24] 张彩霞. 一种适用于重油的活塞表面处理方法研究 [J]. 内燃机与配件, 2013 (9): 20-23.
- [25] 若泽·萨拉班达. 内燃机活塞环: 200680048203.1 [P]. 2009-02-11.
- [26] 杨兵. 一种 PVD 铬基陶瓷复合涂层活塞环及其制备方法: 200810236816.9 [P]. 2009-05-13.
- [27] 魏晓伟. 活塞环表面铝铬氮复合涂层及其工艺方法: 201010136750.3 [P]. 2010-09-01.
- [28] 张长春. 一种乘用车柴油机用活塞环组: 201020578986.8 [P]. 2011-05-18.
- [29] 郭亚军. 轴瓦磁控溅射镀膜技术及其材料力学性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002.
- [30] 斯特芬·霍佩. 活塞环: 200980112077.5 [P]. 2011-03-02.
- [31] 沃伦·莱恩托恩. 滑动件: 201080022070.7 [P]. 2012-04-25.
- [32] 任诗福, 金其炳, 李玉森. 柴油机气门表面处理技术的改进 [J]. 上海铁道科技, 2006 (4): 50-51.
- [33] Walter Bryzik. 高温柴油机活塞环的离子束氮化混合 [J]. 周贤全, 译. 国外机车车辆工艺, 1996 (1): 6-12.

在 0.2 mm 左右，以保证足够的加工余量。

(5) 为安全起见，全部主轴瓦盖螺栓换新，按照标准扭矩 100 (kg · m) 的力矩逐一扭紧瓦盖螺栓。

(6) 将机座固定于机座专用镗床上，找正中心线后将全部主轴瓦孔加工至标准尺寸并恢复中心线直线度。

3.3 修后检测

完工后对修理项目逐项检测，检测结果如下：

(1) 磁粉探伤：将全部主轴瓦座孔内表面、瓦盖上下啮合齿面及周边相邻区域清洗干净，采用 CDX-II 型便携式磁粉探伤仪探伤，没有发现裂纹等缺陷。

(2) 用内径千分尺测量主轴瓦孔内径，检测结果如表 4。

(3) 采用激光自准仪检测主轴瓦座孔中心线直线度，检测结果见表 5 及图 11。

表 4 主轴瓦座内孔修后检测结果

轴承位置		1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
孔径尺寸/mm	L 前	235.010	235.005	235.005	235.010	235.020	235.005	235.020
	L 后	235.010	235.005	235.005	235.010	235.015	235.005	235.020
	M 前	235.020	235.010	235.005	235.010	235.015	235.010	235.015
	M 后	235.020	235.010	235.005	235.010	235.015	235.010	235.015
	R 前	235.015	235.005	235.005	235.005	235.015	235.010	235.015
	R 后	235.015	235.005	235.005	235.005	235.015	235.010	235.015
椭圆度		0.010	0.005	0.000	0.005	0.005	0.005	0.005
备注		标准尺寸：Φ235.000，公差：0.000 ~ 0.025 mm						

表 5 主轴瓦座孔中心线直线度（修理后）

轴承位置		1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
主轴孔中心线 同轴度/mm	V 垂直	0.000	0.000	0.000	-0.010	-0.010	0.000	0.000
	H 水平	0.000	-0.010	-0.020	-0.020	0.000	0.005	0.000

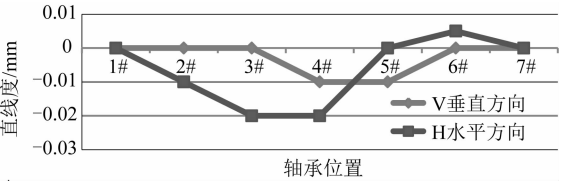


图 11 主轴瓦座孔中心线直线度（修理后）曲线图

表明：机座主轴承孔经修理后达到标准要求。

4 结束语

在柴油机装配和使用过程中应确保主瓦盖螺栓、连杆螺栓、缸头螺栓等重要联接件按标准力矩和程序装配，并定期检验、复核其张紧力；一旦发

现有螺栓松弛现象应尽快查明原因并消除隐患，否则有可能在短期内造成严重的事故。

采用本文的修理方案快速、经济地恢复了机座的适用性，交付后运行一年、一年半时的客户回访证明：该机一直稳定运行，证明了该修理方案的安全性与可靠性。

参考文献

[1] 李京, 马天帅. PA6 柴油机缸套凸肩裂纹分析 [J]. 柴油机, 2011, 33 (1): 52-53.

[2] 中国国家标准化管理委员会. 船用柴油机机座修理技术要求: CB/T3499-93 [S]. 北京: 中国标准出版社: 1993.

[34] 常云鹏. 4Cr10Si₂Mo 钢表面制备 Cr-C 化合物涂层的组织及性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.

[35] PRACA M S, UEHARA S, FERREIRA M, 等. 用于重型柴油机溅镀轴承的新型聚合物涂层 [J]. 国内外燃机, 2014, 46 (2): 58-62.

[36] 易戈文. 一种在铝基轴瓦上制备固体润滑涂层的方法: 201210497806.7 [P]. 2014-06-11.

[37] 于贵海. 无合金层轴瓦喷涂 MoS₂ 工艺: 201310061734.6 [P]. 2013-06-12.

[38] 沃伦·莱恩托恩. 钢活塞的热氧化保护面: 200780023923.7 [P]. 2009-07-08.

[39] 马明星. 激光增材耐磨活塞环: 201410456047.9 [P]. 2014-12-10.

[40] 韩继胜. 一种发动机曲轴及其再制造方法: 201410031926.7 [P]. 2014-04-23.

(上接第 53 页)