

柴油发动机活塞用铝基材料研究进展及失效分析

白亚平, 刘萌萌, 李建平, 郭永春, 杨忠, 罗佳佳, 成超

(西安工业大学 材料与化工学院, 西安 710021)

摘 要: 活塞作为柴油发动机的核心部件之一, 恶劣的服役工况对其材料有特殊的要求。概述了活塞用铝基材料的发展状况, 包括合金系 (Al-Cu-Si 系、Al-Cu-Ni-Mg 系、共晶型 Al-Si-Cu-Mg 系和过共晶型 Al-Si-Cu-Mg 系) 与复合材料系 (SiC/Al 基复合材料、Al₂O₃/Al 基复合材料和 TiC、TiB₂/Al 基复合材料等), 并介绍了不同材料的适用范围。同时, 归纳了常见活塞铝基材料的失效机制, 包括磨损、机械损伤以及顶部开裂等。其中, 活塞因磨损造成的失效在统计活塞失效机制中所占比例较大, 具体可分为粘着磨损失效和磨粒磨损失效。针对活塞磨损失效提出了相关改善措施, 如材料成分选取和制备方法选取等。此外, 针对柴油发动机在实际运行工况中, 因活塞所处部位存在润滑油不完全燃烧造成的含硫、氮等腐蚀性气氛而加速磨损的问题, 可依托该气氛与相应增强相的反应, 使其接触表面生成自润滑膜而减少甚至抑制磨损, 进而延长柴油发动机活塞的使用寿命。

关键词: 活塞; 铝基材料; 磨损失效; 改善措施; 腐蚀性气氛; 自润滑膜

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)06-0161-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.023

Research Progress and Failure Analysis of Aluminum Matrix Materials for Diesel Engine Piston

BAI Ya-ping, LIU Meng-meng, LI Jian-ping, GUO Yong-chun, YANG Zhong, LUO Jia-jia, CHENG Chao

(School of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: As one of important components of diesel engines, the service conditions of piston is very severe and such atmosphere requires the pistons have special requirements for its materials. The development of aluminum alloys for pistons are summarized, including alloys (Al-Cu-Si, Al-Cu-Ni-Mg, eutectic Al-Si-Cu-Mg and hypereutectic Al-Si-Cu-Mg) and composite materials (SiC/Al composites, Al₂O₃/Al composites and TiC, TiB₂/Al composites), the application of these materials are described. At the same time, failure mechanism of piston aluminum matrix composites are listed, including wear failure, mechanical damage and cracking at the top. According to the statistics of piston failure mechanism, the wear failure occupies a major position, which can be divided into adhesive wear and abrasive wear failure. This paper proposes improvement measures for the

收稿日期: 2018-01-23; 修订日期: 2018-03-08

Received: 2018-01-23; Revised: 2018-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51705391); 陕西省教育厅专项科学研究计划 (17JK0383); 装备预研领域基金重点项目 (6140922010301); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2016JQ5071); 陕西省创新人才推进计划-科技创新团队 (2017KCT-05); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目 (16JS044)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(51705391); Special Scientific Research Plan of Shaanxi Provincial Department of Education(17JK0383); Key Project of Equipment Pre-research Field Fund(6140922010301); The Science and Technology Department of Shaanxi Province (2016JQ5071); Shaanxi Creative Talents Promotion Plan-technological Innovation Team(2017KCT-05); Special Research Program of Shaanxi Provincial Department of Education (16JS044)

作者简介: 白亚平 (1985—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为铝合金的制备和性能。

Biography: BAI Ya-ping (1985—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: preparation and properties of aluminum alloy.

piston wear failure, such as material composition selection and preparation methods. In addition, when the diesel engine material works under its actual operating conditions containing sulfur and nitrogen and other corrosive atmosphere by the lubricating oil incomplete combustion, it will deteriorate the abrasion problems. But the reaction of enhanced phase and this complex corrosive atmosphere in the piston will generate self-lubrication film, which can reduce or even inhibit wear failure, thereby extending the life of diesel engine pistons.

KEY WORDS: piston; aluminum material; wear failure; improvement; corrosive atmosphere; self-lubrication film

活塞是柴油发动机中工作强度最大的零部件之一, 被称为发动机的“心脏”^[1]。作为发动机的“心脏”, 活塞在运行工况中承受着巨大的机械负荷和热负荷, 工作条件十分苛刻, 其质量的好坏直接决定了发动机的使用寿命。而材料是决定活塞性能的关键因素, 常用的活塞材料有铸铁活塞、铸钢活塞、镶体活塞、陶瓷活塞、铝合金活塞以及铝基复合材料活塞。其中铸铁、铸钢活塞密度大, 加工麻烦, 成本高, 对缸套的磨损严重; 镶体活塞在镶圈和铝合金界面上易生热疲劳裂纹, 使得活塞的疲劳强度、抗咬合性能降低; 陶瓷活塞脆性大, 热导率低; 这些缺点均在一定程度上限制了它们在活塞中的使用^[2-4]。活塞用铝基复合材料以铝为基体, 通过纤维和颗粒增强两种形式加工制成, 对活塞的整体和局部起到增强的作用^[5-7]。同时, 其材质轻、耐磨性好、动载荷小, 与基体合金相比, 材料的抗热疲劳性能和高温强度有明显提高, 且其线膨胀系数较低, 故而受到了各国学者的关注^[8-11]。活塞在发动机中的功能是承受气体压力, 通过活塞销传给连杆驱动曲轴旋转。由于所处工况恶劣, 活塞极易受损而致失效, 常见的活塞失效机制有磨损、机械损伤以及顶部开裂^[12-13]。其中, 活塞因磨损造成的失效在统计活塞失效机制中所占比例较大, 主要有两种形式——粘着磨损导致拉缸和磨粒磨损导致密封面破坏^[14]。此外, 针对柴油发动机实际工况运行中, 活塞所处部位存在润滑油不完全燃烧造成的含硫、氮等腐蚀性气氛而加速磨损的问题, 可依托该腐蚀性气氛, 使之与相应的增强相反应, 在其表面生成自润滑膜, 进而减小甚至抑制磨损^[15]。随着内燃机升功率的提高, 活塞的服役状况将变得更为恶劣, 从而对活塞所用材料的性能提出了更高的要求。

1 活塞用铝基材料的发展

铝合金的密度小, 能显著减少活塞的质量及其往复运动时所产生的惯性力, 故而活塞用铝合金常常应用于中、小缸径的中、高速内燃机上, 且以应用在汽车发动机中最为常见^[1,16-18]。在承受同样强度的情况下, 铝合金制得的活塞在使用工况下产生的惯性力比钢铁材料制得的急剧减小, 铝合金材料在活塞中的使用对增加高速内燃机的减振能力和降低其比质量有着重要的意义。同时, 材质较轻的铝合金活塞运动时,

在缸壁处所产生的侧压力及冲击力均较小, 由此进一步减小了活塞组与活塞销及缸壁的摩擦力, 且降低它们的磨损量。此外, 铝合金的导热性能好, 铝合金活塞在运行过程中, 其表面温度比铸铁低, 顶部的积炭也较少^[3]。常见的铝活塞材料有 Al-Cu 系和 Al-Si 系, 目前使用较广泛的是 Al-Si 系合金, 而 Al-Si 系合金的发展又可分为 Al-Cu-Si 系、Al-Cu-Ni-Mg 系、共晶型 Al-Si-Cu-Mg 系和过共晶型 Al-Si-Cu-Mg 系。其中 Al-Cu-Si 系和 Al-Cu-Ni-Mg 系由于线膨胀系数大、比重大等劣势, 已被淘汰。过共晶铝硅合金未经过变质处理时, 合金中存在粗大长针状共晶硅及大块状初晶硅组织, 致使基体严重割裂, 降低材料的机械性能及切削加工性能, 同时活塞的热导率也严重下降。针对这些问题, 可采用适当的变质细化及热处理进行改善, 但热处理会增加活塞的成本, 因而除了特殊需要, 如赛车、高速摩托的活塞外, 该类合金很少使用^[19-20]。当下国内使用的活塞用铝合金主要是共晶型铝硅合金, 如 ZL108、ZL109。ZL108 中所含主要元素是 Al、Si、Cu、Mg, 具有优良的铸造性能和气密性; 而 ZL109 中调整了 Al、Si、Cu、Mg 元素所占比例, 且添加了 Ni 元素, 因而具有较好的高温性能, 通常用来铸造中强度的复杂铸件, 如电动机壳体、汽缸体、发动机活塞等^[21]。

铝基复合材料以 Al 为基体, 具有较好的可塑性和强韧性, 随着增强相的加入, 材料的抗拉、抗压强度以及耐磨、耐压、耐蚀性得到质的提高^[22-24]。目前常见的铝合金基体主要有 Al-Si、Al-Mg 和 Al-Cu 等。不同的铝合金基体具有不同的性质, 故在选取时应考虑其与增强相的润湿性、性能互补性及实际应用对基体材料的要求^[25]。而常见的增强相有 SiC、Al₂O₃、TiC、TiB₂、TiN 等。它们的共同特点是熔点高, 比强度及比刚度高, 并具有良好的化学稳定性^[26]。活塞用铝基复合材料在服役过程中, 由于活塞同时承受较强的热负荷和机械负荷, 导致复合材料中的增强相与基体的界面产生损伤, 进而使材料的力学与磨损性能大幅下降, 使得活塞用铝基复合材料容易发生失效现象。随着柴油发动机强化程度的提高和更新换代的要求, 活塞的服役状况将变得更为恶劣, 这就要求材料具有更优异的性能和更高的服役安全性。此外, 材料的发展离不开失效问题的解决, 因此活塞用铝基材料失效问题的解决对该类材料在活塞中的发展起着至

关重要的作用。

2 活塞用铝基材料的失效机制

活塞是柴油发动机中工作强度最大的零部件之一，且其所处工作环境十分恶劣，加之错误的使用和不当的维修，使得活塞容易发生损伤而失效。目前活塞常见的失效形式有：磨损、机械损伤及顶部开裂。据不完全统计，活塞因磨损造成的失效在整个失效机制中所占比例较大。

2.1 磨损

作为内燃机工作条件最苛刻的零部件之一，活塞在高速往复运动中传递着整个内燃机的原动力。一方面，活塞在内燃机中直接与高温燃气接触，承受极高的热负荷；另一方面，它同时受到燃气爆发压力、活塞销支反力、与缸套的接触力及摩擦力、与活塞环的接触力及摩擦力、惯性力等机械力作用，又承受极高的机械负荷。活塞在高温（工作温度顶部高达约 430℃）、高压（3~5 MPa）及腐蚀工况（含 SO₂、SO₃、NO_x 等）下运行，承受反复交变载荷，且在气缸中往复运动的速度很高（10~14 m/s），导致其承受腐蚀、摩擦和磨损等破坏^[13,27]。

按照磨损形式，活塞磨损失效可分为两类。一是粘着磨损导致拉缸。柴油发动机在工作过程中温度较高，活塞环与缸套之间的滑动油膜随温度升高而变薄，油膜表面承载能力下降，当油膜破裂后摩擦副之间直接接触，产生固相焊合，从而导致粘着磨损。二是磨粒磨损导致密封面破坏。在发动机运行过程中，由于吸入硬颗粒或油料不洁带入硬颗粒引起缸套和活塞环接触面的材料破坏，分离出的磨屑造成磨粒磨损^[28]。目前，国内外对活塞材料磨损失效的研究主要集中在室温，干、油润滑状态下，对含硫、氮等腐蚀性气氛下的磨损失效研究较少^[29]。根据 ASTM G181-11 标准^[30]，柴油发动机活塞材料在含硫、氮等腐蚀性气氛下的边界润滑示意图如图 1 所示。

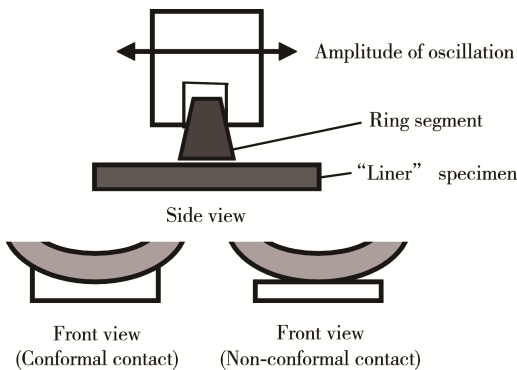


图 1 活塞边界润滑示意图^[30]
Fig.1 Boundary lubrication of piston^[30]

按照磨损部件，活塞磨损又分为活塞环槽磨损、顶部燃烧室烧毁、活塞裙部擦伤磨损。在柴油发动机运转过程中，活塞环槽与活塞、活塞销座孔与活塞销、活塞裙与缸壁分别构成相应的摩擦副。随着高温高压燃气的增加，活塞所承受的热负荷与机械负荷越来越大，且在润滑条件极差的缸套内高速往复运动，承受着极大的惯性力，所以这些摩擦副磨损程度迅速增大^[12]。

2.2 机械损伤和顶部开裂

2.2.1 机械损伤

柴油发动机活塞发生机械损伤有两个主要原因：燃烧室存在异物和活塞顶与气门头部的撞击^[12]，具体见表 1。

表 1 柴油发动机活塞机械损伤原因
Tab.1 The mechanical damage reasons of diesel engine piston

类型	机械损伤原因
燃烧室中有异物	保修过程中由于疏忽使异物（如小垫圈、小螺母等）残留在气缸中，发动机在运转时，使活塞头部被打出凹坑甚至空洞。
	a)工作过程中，凸轮升程不变，随气门间隙减小，摇臂端头压向气门杆尾端，使气门头伸入气缸内部的长度增大而撞击活塞顶。 b)气门弹簧处所承受的外力及其本身的弹力变化频率较高，当二者变化频率成正比时，则产生共振现象，使弹簧应力急剧增大，造成疲劳破坏而折断，进而发生气门掉入气缸中而捣碎活塞。
气门头部撞击活塞顶	c)正时齿轮安装有误，使配气正时不准，也易造成排气门头部与活塞顶相碰。
	d)排气门杆长期承受高温热气的冲刷，使其与导管发生干摩擦，造成温度骤增，进而引起金属膨胀或熔化，导致气门杆卡死在气门导管中，出现气门头部与活塞顶部相撞的现象。
	e)柴油机的压缩比大，当活塞位于上止点时，气缸盖下的平面与活塞顶之间的间隙很小，若调整减压机构稍有不慎，就会使气缸头部撞击活塞顶。
	f)保修作业时，由于操作不当，使锁片与气门杆尾端不能严密配合而致锁片脱落，气门将掉入气缸中，活塞可能被捣烂。

2.2.2 顶部开裂

活塞顶开裂主要是由于柴油机载荷反复变化而产生的热应力循环，气缸内燃烧压力周期性变化而产生的机械应力循环，活塞顶表面的高温，以及钢顶和铝裙装配间隙不当而产生的附加应力等因素综合作用的结果^[31-32]。

3 活塞用铝基材料性能改善方法

随着柴油发动机升功率的提高,活塞的服役工况将变得更加恶劣,从而对活塞的磨损抗力提出了更高的要求,所以解决滑动面的磨损非常关键。众所周知,材料的耐磨性能与其本身所含成分及存在形式密切相关。对于最近几年发展势头较好的活塞用铝合金及铝基复合材料而言,可通过复合材料中增强相及其制备方法的选取、合金元素的选择来改善材料的耐磨性。此外,也可采用活塞表面强化等保护方法来提高柴油发动机活塞的磨损抗力,减少活塞失效行为发生的频率。

3.1 活塞用铝合金及铝基复合材料的选取

3.1.1 基体和增强相选取

常见的铝合金基体主要有 Al-Si、Al-Mg 和 Al-Cu 等。Al-Si 系铝合金有良好的铸造性能和耐磨性能,热胀系数小;Al-Cu 系铝合金的高温强度较高,可用于制作承受大的动、静载荷和形状不复杂的砂型铸件;Al-Mg 系铝合金的密度小、强度高,室温下有良好的综合力学性能和可切削性。可根据柴油发动机不同服役工况及升功率的要求选择相应的基体材料。

颗粒增强铝基复合材料的性能主要由增强相的尺寸、体积分数、分布以及增强相与基体相的界面结合等决定。目前,国内外对颗粒增强复合材料的研究已经较为广泛。李桂荣等^[33]利用 Al-Zr(CO₃)₂-KBF₄ 反应制备了 ZrAl₃、ZrB₂ 和 Al₂O₃ 增强铝基复合材料,摩擦磨损性能测试表明,增强相显著提高了复合材料的耐磨性,同时磨损机理由纯 Al 的粘着磨损转变为磨粒磨损。邢建东等^[34]探索了 Al₂O₃ 增强 Fe₃Al 基复合材料的磨损性能,结果表明,添加 Al₂O₃ 的 Fe₃Al 基复合材料,其摩擦因数和磨损率均较 Fe₃Al 低,证明增强相 Al₂O₃ 的加入,提高了材料的耐磨性。Kang 等^[35]的研究发现纳米 Al₂O₃ 颗粒的加入改善了铝基复合材料的硬度、抗磨损以及拉伸性能,当纳米 Al₂O₃ 颗粒的体积分数超过 4% 时,增强相颗粒的团聚可使增强效果减弱。Tang 等^[36]研究了 SiC 颗粒增强纯铝复合材料,结果表明复合材料的强度随 SiC 颗粒体积分数的增加呈线性增加。Williams 等^[37]进一步研究表明,该类复合材料的强度随 SiC 相颗粒尺寸的减小而增大。兰晔峰等^[38]利用 TiO₂ 和 B₂O₃ 与 ZL102 铝合金通过熔体反应法制备出 (TiB₂+Al₂O₃) 双相增强铝基复合材料,力学性能测试结果表明,利用 Al-TiO₂-B₂O₃ 体系原位制备的颗粒增强铝基复合材料的硬度较 ZL102 铝合金提高了 37.3%,故材料的耐磨性能也较 ZL102 铝合金有所提高。但是,Al₂O₃、SiC 等增强相所固有的与铝基体润湿性差等问题限制了其应用。吉林大学姜启川教授等^[39-40]研究表明:

TiC_x/Al 复合材料比 TiB₂/Al 复合材料具有更强的应变速率敏感性,而 TiB₂ 陶瓷颗粒因具有高于 TiC_x 的硬度值而具有更好的耐磨性。TiB₂、TiC_x 增强相不仅具有高硬度、高熔点、良好的耐磨耐蚀性及热稳定性等优点,还存在与铝基体润湿性较好,且不与铝发生反应等特征,因此 TiB₂、TiC 增强铝基复合材料在柴油发动机活塞领域具有显著的应用前景^[41-44]。

3.1.2 合金元素的选取

复合材料中引入增强相不可避免地降低了复合材料的韧性,同时增强相与基体相之间的弱结合恶化了材料的耐腐蚀性,这将直接影响材料的使用寿命和服役安全性。合金化技术可通过添加合金元素改善铝基复合材料的微观组织、界面润湿行为,从而起到固溶强化、沉淀析出强化的作用,并进一步提高复合材料的力学性能、耐蚀和耐磨损性能等。Beffort 等^[45]研究了合金元素 Mg 和 Zn 对 60 vol.% SiC/Al 复合材料力学性能的影响,结果表明合金元素的加入使其弯曲强度由 477 MPa 提高到 533 MPa。孙洪强等人^[46]的研究发现:添加 Mn 元素可使 (Al₃Zr+Al₂O₃)p/A356 复合材料的界面结合有所改善,且当添加 0.2wt.%Mn+0.2wt.%Cr+0.3wt.%RE 时,该复合材料的抗拉强度 σ_b 和伸长率 δ 分别达到了 378.8 MPa 和 7.5%,比添加 0.2wt.%Mn+0.2wt.%Cr 时分别提高了 16.16% 和 50%,比未添加合金元素的复合材料分别提高了 37.1% 和 102.7%。白亚平等^[34]在课题研究中发现同时加入适量的合金元素 Cr、Mo,不仅提高了 Al₂O₃/Fe₂₅Al 复合材料的塑韧性,还大幅改善了复合材料的力学性能和摩擦磨损性能(摩擦因数降幅最大可达近 70%)。于文花等^[47]研究发现 Ni 元素可大幅改善铝基复合材料的高温稳定性和耐腐蚀性能。因此,可通过加入合金元素来进一步改善铝基复合材料的抗磨损性能。

3.1.3 制备方法的选取

众所周知,材料性能与制备工艺密切相关,因此适宜的材料组配设计结合相匹配的制备工艺才能制备具有优异综合性能的产品。目前,铝基复合材料的制备方法分为液态制备方法和固态制备方法,最常见的液态制备方法有搅拌熔铸法和喷射沉积法,固态制备方法有粉末冶金法和热压法。各制备方法的具体原理及特点^[48-51]如表 2 所示。

铝基复合材料中常见的增强相加入方式有外加法和自生法。外加法因颗粒表面有污染、弥散性差、添加量受限、界面结合差且易生成脆弱性副产物,而严重影响复合材料的综合力学性能。自生法因增强相从金属基体中原位生成,从而具有热稳定性好、增强体表面洁净无污染、与基体界面相容性好、界面结合强度高、分布均匀等优点,成为铝基复合材料研究中

的一个重要方向。Khodaei 等^[52]分别采用 Fe-Al-Al₂O₃ 混合粉体进行机械合金化和机械合金化诱发 Fe-Al-Fe₂O₃ 混合粉体发生自蔓延反应的方法制备了 Al₂O₃/Fe₃Al 复合粉体,并对两种制备方法获得的粉体烧结后得到的块体形貌进行对比,得出结论:采用自生法制备的块体复合材料具有更高的致密度和烧结质量,而采用添加法制备的块体复合材料则具有较多孔洞,且烧结致密性较差。邢建东等^[34]采用机械合金化诱发自蔓延反应技术制备自生/添加 Al₂O₃ 增强 Fe25Al 基复合材料,结论与 Khodaei 等人的研究结果一致,即自生法制备的 Al₂O₃ 增强 Fe25Al 基复合材料的组织更致密,性能更优异。李建平等^[53-55]采用原位反应法制备了 AlN、Al₃Ti、Al₂O₃ 增强铝基复合材料,结果证实复合材料的力学、磨损性能均较铝合金有显著的提高。

表 2 铝基复合材料的制备方法
Tab.2 Preparation of aluminum matrix composites

方法	基本原理	特点
搅拌熔铸法	将增强颗粒直接加入基体金属熔体中,通过一定的搅拌方式使颗粒均匀地分散于金属基体中,然后浇铸成锭坯、铸件等。	成本低、工艺流程简单,可用于生产大体积制件,便于进行大规模生产。
喷射沉积法	将基体金属在坩埚中熔炼后,在压力作用下通过喷嘴送入雾化器,使液态金属形成“雾化锥”。同时通过一个或多个喷嘴向“雾化锥”喷射入增强颗粒,使之快速凝固形成颗粒增强金属基复合材料。	材料致密度高,可快速凝固,金属晶粒和组织细化、成分均匀,很少或没有界面反应,工艺流程短、工序简单、效率高。
热压法	将增强纤维与基体金属制成复合材料预制片,然后将预制片按设计要求裁剪成所需的形状并叠层排布,在叠层时添加基体箔,将叠层放入模具内进行加热加压,最终制得复合材料或零件。	材料具有极高的致密度,烧结温度低,烧结时间短,效率高。
粉末冶金法	将金属基体与增强体粉末混合均匀后压制成形,在低于金属液相线的温度下进行烧结,利用原子扩散使金属基体与增强体粉末结合在一起。	可自由选择基体金属成分和强化颗粒的种类、尺寸;复合温度低,基体金属不易与强化颗粒反应,充分发挥各原料特性;颗粒强化均匀,强化颗粒添加范围大,可实现多种颗粒共同强化。

3.2 其他保护措施

3.2.1 表面强化

表面强化也是改善活塞磨损性能的途径之一,目

前常见的活塞表面强化方法有:活塞表面镀铝、镀锡、镀铅、喷涂石墨、喷涂二硫化钼、喷涂聚四氟乙烯以及镀铁、镀铬等。为了进一步改善活塞的耐磨性和耐热性,还可以对活塞进行陶瓷化处理等^[2]。

3.2.2 合理选择配合间隙

对于柴油发动机活塞而言,其顶裙外圈接触面间的初始配合间隙对活塞应力状态的影响很大。若间隙过小,则活塞顶热变形在配合面受阻,使其所承受的热应力增大,将加快环槽磨损;当间隙过大时,活塞顶的热应力虽小,但机械应力太大,所以应当合理选择配合间隙。

3.2.3 外界保护

顶面磕碰极易造成活塞失效,因而应在后生产、检验、包装、运输及装机使用中做好各零部件的防护,避免磕碰。适当调整活塞燃烧室的结构,增加喉口的强度,可降低活塞燃烧室喉口开裂的几率。避免发动机长时间超负荷、超速工作,可减缓活塞所承受的热负荷和机械负荷^[56]。

4 展望

为了提高传统活塞材料的耐磨损及使用性能,满足 21 世纪柴油发动机大功率、低油耗、低排放和长寿命的要求,铝基材料用于活塞的开发和研究将变得越来越重要。其中,自生 TiB₂、TiC_x 双相作为增强相的铝基复合材料,因其兼顾优异的力学性能和磨损性能,有望成为新型活塞用铝基复合材料。同时,针对活塞在实际工况运行过程中,内部润滑油不完全燃烧导致产生含 SO_x、NO_x 复杂的腐蚀性气氛,进而加快活塞磨损失效速度的问题,可借鉴美国阿贡实验室的最新研究成果:利用摩擦过程中,润滑油促使材料表面涂层外侧形成一层均匀致密且有一定硬度的催化活性涂层——碳基润滑膜,以保护材料表面免受摩擦滑动磨损。将此研究成果用于柴油发动机活塞材料中,有望在含硫、氮等腐蚀性气氛的服役工况下,降低活塞磨损失效行为的发生,进而延长发动机的使用寿命。

参考文献:

[1] 金梅. 铝合金活塞材料的研发与应用进展[J]. 中国材料科技与设备, 2012(2): 1-3.
JIN Mei. Reviews of Research and Application on Aluminum Alloys Piston Material [J]. Chinese Materials Science Technology & Equipment, 2012(2): 1-3.
[2] 彭涛. 内燃机活塞材料的发展与前景[J]. 山西科技, 2007(3): 91-97.
PENG Tao. Development and Future of Materials for

- the Piston of Internal Combustion[J]. Shanxi Science and Technology, 2007(3): 91-97.
- [3] 赖华清. 活塞材料的应用及发展[J]. 上海汽车, 2005(12): 33-35.
LAI Hua-qing. Application and Development of Materials for the Piston[J]. Shanghai Auto, 2005(12): 33-35.
- [4] 陈长江, 王渠东. 内燃机活塞材料的研究进展[J]. 材料导报, 2009(15): 62-65.
CHEN Chang-jiang, WANG Qu-dong. Research Process in Piston Materials of Combustion Engine[J]. Materials Review, 2009(15): 62-65.
- [5] CLYNE T, WITHERS P. An Introduction to Metal Matrix Composites[M]. London: Cambridge University Press, 1995.
- [6] 吴申庆, 李军. 陶瓷纤维增强铝基复合材料在发动机活塞上的应用[J]. 内燃机工程, 2003(3): 18-19.
WU Shen-qing, LI Jun. Application of Ceramic Short Fiber Reinforced Al Alloy Matrix Composite to Piston of Internal Combustion Engines[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2003(3): 18-19.
- [7] 郭领军, 李贺军. 内燃机活塞材料的研究及应用述评[J]. 铸造, 2003(9): 657-660.
GUO Ling-jun, LI He-jun. Review on the Research and Applications of Piston Materials in Internal Combustion Engine[J]. Foundry, 2003(9): 657-660.
- [8] RAMESH C S, KHAN A R, RAVIKUMAR N, et al. Prediction of Wear Coefficient of Al6061-TiO₂ Composites[J]. Wear, 2005, 259(1): 602-608.
- [9] 李俊宪, 孙保良, 邵光杰. SiC 颗粒增强铝基复合材料的摩擦磨损性能[J]. 机械工程材料, 2006, 30(5): 62-65.
LI Jun-xian, SUN Bao-liang, SHAO Guang-jie. Friction and Wear Properties of SiC Particle Reinforced Aluminum Matrix Composite[J]. Mechanical Engineering Materials, 2006, 30(5): 62-65.
- [10] KÖK M, ÖZDİN K. Wear Resistance of Aluminium Alloy and Its Composites Reinforced by Al₂O₃ Particles[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2007, 183(2): 301-309.
- [11] 樊建中, 石力开. 颗粒增强铝基复合材料研究与应用发展[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(1): 1-7.
FAN Jian-zhong, SHI Li-kai. Development and Application of Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(1): 1-7.
- [12] 李松和, 王占伟. 柴油机活塞失效形式浅谈[J]. 汽车与配件, 1998(2): 25-26.
LI Song-he, WANG Zhan-wei. Taking about the Failure Mode of Diesel Engine Piston[J]. Automobile & Parts Technology, 1998(2): 25-26.
- [13] 邹茂华. 离心铸造 SiC 颗粒局部增强铝基复合材料活塞的组织性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
ZOU Mao-hua. Research on Structure and Properties of Pistons of SiC Particle Locally Reinforced Aluminum Composite Formed by Centrifugal Casting[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [14] 郝放. 活塞环铬基陶瓷复合镀[J]. 内燃机与配件, 2010(5): 22-25.
HAO Fang. Chrom-Keramik-Schicht Piston Ring[J]. Internal Combustion Engine, 2014(5): 22-25.
- [15] ERDEMİR A, RAMIREZ G, ERYILMAZ O L, et al. Carbon-based Tribofilms from Lubricating Oils[J]. Nature, 2016, 67-71: 536.
- [16] 张翼, 李杰, 蔡强, 等. 硅铝合金柴油机机体紧固面微动疲劳研究[J]. 表面技术, 2018, 47(1): 66-67.
ZHANG Yi, LI Jie, CAI Qiang, et al. Fretting Fatigue of Si-Al Alloy Diesel Engine Block Fastening Surface[J]. Surface Technology, 2018, 47(1): 66-67.
- [17] ALIC J. Advanced Automotive Technology: Visions of a Super-efficient Family Car[M]. Chicago: Advanced Automotive Technology, 2009(29): 1-5.
- [18] 冯美斌. 汽车轻量化技术中新材料的发展及应用[J]. 汽车工程, 2006, 28(3): 213-216.
FENG Mei-bin. Development and Applications of New Materials in Automotive Light Weighting Technologies [J]. Automotive Engineering, 2006, 28(3): 213-216.
- [19] 钟佩文, 方亮, 胡佳, 等. 铝合金表面化学镀 Ni-Co-P/SiC 复合镀层的组织与性能研究[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 47-51.
ZHONG Pei-wen, FANG Liang, HU Jia, et al. Study on the Microstructure and Properties of Electroless Ni-Co-P/SiC Composite Coatings on Al Alloys[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 47-51.
- [20] 丁惠麟, 辛智华. 实用铝、铜及其合金金相热处理和失效分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 80-85.
DING Hui-lin, XIN Zhi-hua. Heat Treatment and Failure Analysis of Aluminum, Copper and their Alloys [M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 80-85.
- [21] 刘怀喜, 高琳. 新型活塞材料的研究[J]. 材料热处理技术, 2011, 40(4): 90-92.
LIU Huai-xi, GAO Lin. Research on New Piston Material[J]. Materials & Heat Treatment, 2011, 40(4): 90-92.
- [22] PARKA B G, CROSKYA G, HELLIER A K. Fracture Toughness of Microsphere Al₂O₃-Al Particulate Metal Matrix Composites[J]. Composites: Part B, 2008, 39: 1270.
- [23] CHEN S H, WANG T C. Size Effects in the Particle-reinforced Metal-matrix Composites[J]. Acta Mech, 2001, 157: 113.
- [24] DEGNAN C C, SHIPWAY P H. A Comparison of the Reciprocating Sliding Wear Behavior of Steel Based Metal Matrix Composites Processed from Self-propagating High-temperature Synthesized Fe-TiC and Fe-TiB₂ Masteralloys [J]. Wear, 2002, 252 (9) : 832-841.
- [25] 肖荣林, 郑化安, 付东升, 等. 铝基复合材料的制备及应用进展[J]. 铸造技术, 2015(5): 1118-1121.
XIAO Rong-lin, ZHENG Hua-an, FU Dong-sheng, et al. Preparation and Application Progress of Aluminum Matrix Composites[J]. Foundry Technology, 2015(5):

- 1118-1121.
- [26] 汤佩钊. 复合材料及其应用技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1998.
TANG Pei-zhao. Composite Materials and Its Application Technology[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1998.
- [27] 李俊鹏, 沈健, 闫晓东, 等. 温度对 7075 铝合金热变形显微组织演化的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008 (18): 1951-1957.
LI Jun-peng, SHEN Jian, YAN Xiao-dong, et al. Effect of Temperature on Microstructure Evolution of 7075 Alloy during Hot Deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008(18): 1951-1957.
- [28] 金伟. 农用车发动机活塞及活塞环失效分析[J]. 农机使用与维修, 2014(4): 31.
JIN Wei. Failure Analysis of Engine Piston and Piston Ring for Agricultural Vehicles[J]. Farm Machinery Using & Maintenance, 2014(4): 31.
- [29] OYEWUNMI O A, KIRMSE C J W, HASLAM A J, et al. Working-fluid Selection and Performance Investigation of a Two-phase Single-reciprocating-piston Heat-conversion Engine[J]. Applied Energy, 2016, 186: 376-395.
- [30] ASTM G181-11, Standard Test Method for Conducting Friction Test of Piston Ring and Cylinder Materials under Lubricated Conditions[S].
- [31] 杜子文. 柴油机组活套失效分析及改进措施[J]. 重庆三峡学院学报, 2010, 26(3): 114-116.
DU Zi-wen. The Failure Analysis of Combination Piston of Diesel Engine and Its Improvement[J]. Journal of Chongqing Three Gorges University, 2010, 26(3): 114-116.
- [32] 杨英, 周湘晔, 兆文忠. 240/275 系列柴油机钢顶铝裙组合活套裂损分析及解决对策[J]. 铁道学报, 2005 (2): 40-43.
YANG Ying, ZHOU Xiang-ye, ZHAO Wen-zhong. Study on Cracking of Piston with Steel Crown and Aluminum Skirt for 240/275 Series Diesel Engines[J]. Journal of the China Railway Society, 2005(2): 40-43.
- [33] 李桂荣, 戴起勋, 赵玉涛, 等. Al-Zr-OB 体系原位合成颗粒增强铝基复合材料及其性能[J]. 中国有色金属学报, 2005(15): 572-577.
LI Gui-rong, DAI Qi-xun, ZHAO Yu-tao, et al. Fabrication and Properties of Particles Reinforced Aluminum Matrix Composites in-situ Synthesized in Al-Zr-O-B System[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005(15): 572-577.
- [34] 白亚平. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料的制备及摩擦与冲蚀磨损行为研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2013.
BAI Ya-ping. Investigation on Fabrication, Dry Sliding and Erosive Wear Behavior of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{Al}$ Composites[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2013.
- [35] KANG Y C, CHAN S L. Tensile Properties of Nanometric Al_2O_3 Particulate-reinforced Aluminum Matrix Composites[J]. Materials Chemistry and Physics, 2004, 85: 438-443.
- [36] TANG F, ANDERSON I E, GNAUPEL-HEROLD T, et al. Pure Al Matrix Composites Produced by Vacuum Hot Pressing: Tensile Properties and Strengthening Mechanisms[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 383: 362-373.
- [37] WILLIAMS J, PIOTROWSKI G, SAHA R, et al. Effect of Overaging and Particle Size on Tensile Deformation and Fracture of Particle-reinforced Aluminum Matrix Composites[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33: 3861-3869.
- [38] 兰晔峰, 张保林, 王国斌. $\text{TiB}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ 增强铝基复合材料的组织分析与硬度测试[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(4): 19-22.
LAN Ye-feng, ZHANG Bao-lin, WANG Guo-bin. Analysis of Microstructure and Hardness Test of Al-based Composite with $(\text{TiB}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ Strengthened [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(4): 19-22.
- [39] SHU S L, LU J B, QIU F, et al. Effects of Alloy Elements (Mg, Zn, Sn) on the Microstructures and Compression Properties of High-volume-fraction TiC_x/Al Composites[J]. Scripta Materialia, 2010, 63: 1209-1211.
- [40] 邹兵林. Al-Ti- B_4C 体系燃烧合成行为及钢基复合材料的制备[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
ZOU Bing-lin. Combustion Synthesis Behavior of Al-Ti- B_4C System and Preparation of Steel Matrix Composites[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [41] 熊中, 王艳, 徐强, 等. TiC 对铁基合金喷焊层组织与性能影响[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 79-84.
XIONG Zhong, WANG Yan, XU Qiang, et al. Effects of Ti C on Microstructure and Properties of Fe-based Alloy Spray-welding Layer[J]. Surface Technology, 2017, 46(8): 79-84.
- [42] MANDAL A, CHAKRABORTY M, MURTY B. Effect of TiB_2 Particles on Sliding Wear Behaviour of Al-4Cu Alloy[J]. Wear, 2007, 262: 160-166.
- [43] MANDAL A, MURTY B, CHAKRABORTY M. Wear Behaviour of Near Eutectic Al-Si Alloy Reinforced with In-situ TiB_2 Particles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 506: 27-33.
- [44] SHU S, LU J, QIU F, et al. High Volume Fraction TiC_x/Al Composites with Good Comprehensive Performance Fabricated by Combustion Synthesis and Hot Press Consolidation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528: 1931-1936.
- [45] BEFFORT O, LONG S, CAYRON C, et al. Alloying Effects on Microstructure and Mechanical Properties of High Volume Fraction SiC-particle Reinforced Al-MMCs Made by Squeeze Casting Infiltration[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67: 737-745.
- [46] 孙洪强. 微合金化与原位颗粒协同作用铝基复合材料的组织与性能[D]. 无锡: 江苏大学, 2007.

- SUN Hong-qiang. Microstructure and Properties of Aluminum Matrix Composites by Complex of Micro-alloying and In-situ Particulate [D]. Wuxi: Jiangsu University, 2007.
- [47] 于文花, 朱颖, 康慧, 等. 合金元素 Cu、Si、Ni 对 Al 基钎料的影响[J]. 焊接技术, 2003(2): 33-36.
- YU Wen-hua, ZHU Ying, KANG Hui, et al. Influence of Alloy Element Cu, Si, Ni on the Performance of Al-base Filler Metal[J]. Welding Technology, 2003(2): 33-36.
- [48] 关明, 常志梁. 金属基复合材料制备技术进展[J]. 材料热处理技术, 2010(9): 93-95.
- GUAN Ming, CHANG Zhi-liang. Development on Preparation Process for Metal Matrix Composite[J]. Materials & Heat Treatment, 2010(9): 93-95.
- [49] KIM W, LEE Y, AN C. Superplastic Behavior of PM SiC_p/6061 Aluminum Alloy Composites at High Strain Rates[J]. Metals and Materials International, 2002(8): 37-44.
- [50] SCHAFFER G, MCCORMICK P. Displacement Reactions during Mechanical Alloying[J]. Metallurgical Transactions A, 1990, 21: 2789-2794.
- [51] 赵鹏鹏, 谭建波. 金属基复合材料的制备方法与发展现状[J]. 河北工业科技, 2017, 34(3): 215-221.
- ZHAO Peng-peng, TAN Jian-bo. Preparation Method and Research Status of Metal Matrix Composites[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2017, 34(3): 215-221.
- [52] ENAYATI M, KARIMZADEH F. Mechanochemical Behavior of Fe₂O₃-Al-Fe Powder Mixtures to Produce Fe₃Al-Al₂O₃ Nanocomposite Powder[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43: 132-138.
- [53] 赵玉厚, 严文, 周敬恩, 等. 原位生成 AlN-Al₃Ti 复合增强铝基复合材料研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2003(3): 792-795.
- ZHAO Yu-hou, YAN Wen, ZHOU Jin-gen, et al. Study of In-situ Composite Reinforced by AlN and Al₃Ti[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003(3): 792-795.
- [54] 赵玉厚, 李建平, 郭永春, 等. AlN/Al 原位复合材料研究[J]. 热加工工艺, 2003(5): 3-4.
- ZHAO Yu-hou, LI Jian-ping, GUO Yong-chun, et al. Study of AlN/Al In-situ Composite[J]. Hot Working Technology, 2003(5): 3-4.
- [55] 李建平, 齐蓉, 张文兴, 等. 粉末冶金法制备 Al-12%CuO 系原位铝基复合材料的组织和性能[J]. 西安工业大学学报, 2013(3): 987-992.
- LI Jian-ping, QI Rong, ZHANG Wen-xing, et al. Microstructure and Properties of Al-12%CuO In-situ Aluminum Matrix Composites Fabricated by Powder Metallurgy Method[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2013(3): 987-992.
- [56] 秦朝聚, 原彦鹏. 活塞顶部失效的原因分析与改进[J]. 煤矿机械, 2012, 33(10): 180-181.
- QIN Zhao-ju, YUAN Yan-peng. Analysis and Improvement for Failure of Engine Piston Crown[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(10): 180-181.