

表面改性活塞环与气缸套在甲醇燃料环境中的配对研究

A Study on the Matching of Surface-modified Piston Rings and Cylinder Liners in Methanol Combustion Environment

供稿|何宇航¹, 付景国¹, 廖晓钢¹, 陈长钦², 王连佳² / HE Yuhang¹, FU Jingguo¹, LIAO Xiaogang¹, CHEN Changqin², WANG Lianjia²

内容导读

在全球航运业加速向绿色低碳转型的背景下, 甲醇燃料因其清洁、可再生的特性, 正成为船舶动力系统的重要替代能源。然而, 甲醇在燃烧过程中会产生甲醛、甲酸等不完全燃烧产物, 这些物质混入润滑油后, 可能加剧发动机关键摩擦部件——气缸套与活塞环的磨损与腐蚀, 影响发动机的可靠性与使用寿命。为此, 本研究模拟甲醇发动机的实际润滑环境, 在润滑油中加入了典型甲醇燃烧产物(甲醛、甲酸及未燃甲醇), 系统比较了3种常见表面改性活塞环——镀陶瓷(CKS)、镀铬(Cr)和氮化(Nitriding)活塞环, 与球墨铸铁气缸套的配对性能。通过模拟发动机启动、稳定运行及突发缺油等不同工况的摩擦磨损试验, 综合评价了各配对副在减摩、耐磨和抗突发故障方面的表现。试验结果表明: 氮化活塞环在含甲醇燃烧产物的润滑条件下表现最为全面, 其平均摩擦系数最低, 抗突发缺油能力最强, 且与气缸套的磨损协调性良好。镀陶瓷活塞环在耐磨性方面也有不错表现, 而镀铬活塞环在甲醇环境下则相对逊色。本研究为甲醇燃料发动机中气缸套-活塞环的优选配对提供了实验依据, 有助于推动甲醇动力船舶向更可靠、更高效、更长寿的方向发展, 助力航运业绿色转型。

航运业承担着全球超过 85% 的贸易运输量, 每年排放的温室气体超过 10 亿 t。为实现海运温室气体减排目标, 2018 年, 国际海事组织(IMO)制定并发布了《船舶温室气体减排初步战略》, 将大规模开发和推广碳中和燃料作为其长期战略的关键环

节^[1]。为加速推进我国船舶工业向“双碳”目标发展, 《2030 年前碳达峰行动方案》确立了“双碳”目标, 要求运输装备需实现低碳转型, 并执行交通领域的绿色低碳行动计划^[2]。近年来, 随着全球海运温室气体减排的进程加速推进, 绿色船舶已成为未来航运

作者单位: 1. 大连海事大学轮机工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 中海油能源发展股份有限公司采油服务分公司, 天津 300452

的主流发展方向。甲醇燃料船舶的应用将成为推动航运绿色、低碳转型的重要方向之一^[3]。

甲醇燃料作为一种新型清洁能源,具有较为丰富的来源,可从多种原材料(如天然气、煤、重质燃料、木材和垃圾)中制取^[4],是汽油的替代燃料。与其他替代燃料相比,甲醇燃料具有抗爆性能好、燃烧清洁(其燃烧产物毒性低于普通含铅汽油,且一氧化碳排放量较少)等优点^[5-6],是发动机较好的替代燃料。但是,甲醇在燃烧过程中同样也会生成一些不完全燃烧产物,如甲醛、甲酸和水等。国外对甲醇燃料的试验研究发现,在甲醇燃烧不完全或熄火时,其液体残渣中含有质量分数分别为1.5%的甲醛、1%的甲酸、15%的甲醇^[7]。在内燃机工作中,这些物质会通过活塞环的运动进入润滑油,造成发动机关键摩擦副的腐蚀和磨损,这极大地限制了甲醇发动机的发展^[8]。活塞环与气缸套构成了内燃机中至关重要的摩擦副组件,常在高温、重载、高速及润滑不良等工况下运行,是整个系统中摩擦损耗最大和最易失效的部件,其摩擦磨损特性对发动机的工作效率和可靠性有着重要的影响^[9]。为此,在甲醇燃料发动机中选用适当的摩擦副材料以延长服役寿命、降低摩擦功耗,对绿色船舶的发展具有深远意义。

近年来,针对甲醇燃烧产物及甲醇燃料发动机的零部件磨损,部分国内外学者开展了研究。尹超等^[10]在其研究中对对比分析了甲醇发动机与汽油发动机在常规及非常规污染物排放特性方面的差异。研究结果显示,甲醇发动机的常规污染物排放量低于汽油发动机;然而,其释放的甲醛、乙醛等非常规污染物量则高于汽油发动机。Yin等^[11]构建了激光织构柱塞副的润滑模型,并利用该模型深入研究了在甲醇润滑条件下,表面织构化柱塞的摩擦磨损性能。研究发现,织构柱塞在甲醇润滑时,其摩擦因数比无织构柱塞降低6.2%,表面磨损量减少16.2%。Lai等^[12]通过室温至400℃退火法制备了不同纳米结构的a-C:H薄膜,研究其在干燥空气和甲醇环境下的摩擦学性能。研究发现,在2种工况下,a-C:H膜的摩擦磨损行为表现出不同的规律。在干燥空气环境下,材料的摩擦学性能主要由传递薄膜和力学特性决定。在甲醇介质中,由于氢原子的存在,其

摩擦特性主要受 sp^3 -CH饱和作用的影响,而其磨损程度则受“崩塌效应”的影响,即 sp^3 -CH₃、 sp^3 -CH₂含量越高,a-C:H膜越容易发生磨损。Su等^[13]通过磁控溅射法制备钼-类金刚石(Mo-DLC)薄膜,研究其在甲醇中的摩擦学性能。结果表明:在优化后的偏置电压下制备的Mo-DLC涂层 sp^3 杂化键含量最高,并且该涂层在甲醇中具有良好的减摩和耐磨性。朱琼花等^[14]针对甲醇发动机润滑油的作用,通过台架试验,研究了甲醇发动机在不同润滑剂条件下的磨损特性。研究发现,通过调节添加剂成分及润滑油的粘度级别,可以有效地减轻甲醇发动机的磨损和积碳现象。

综上所述,目前针对甲醇燃料的摩擦磨损研究主要集中于材料层面,而关于甲醇燃料发动机缸套-活塞环摩擦磨损性能的研究相对较少。甲醇发动机在燃烧过程中会产生甲醛、甲酸以及未燃烧甲醇,这导致传统发动机的缸套-活塞环配对副在甲醇发动机中的适用性尚未得到充分验证,不同配对副在甲醇发动机中的摩擦学性能表现亟待深入研究。为此,本文通过往复式摩擦磨损试验机和相关检测设备,模拟甲醇发动机润滑条件,开展系列试验,探究球墨铸铁气缸套与3种表面改性活塞环配对副在含甲醇燃烧产物润滑油中的摩擦磨损及抗拉缸性能,综合多方面性能表现,得出最优配对副,为甲醇发动机中缸套-活塞环的选配提供理论指导。

试样制备与试验方法

试样制备

试验所用气缸套内壁珩磨的球墨铸铁气缸套(由常柴股份有限公司生产),内径108 mm,外径120 mm,高度206 mm,表面粗糙度为0.75 μm,硬度为HV_{0.1} 245。采用电火花加工工艺将气缸套沿圆周方向以9°等分切割成样条状试件,尺寸为44 mm×8.5 mm×6 mm。试样切割后超声清洗30 min,以去除表面残留的切割液和加工铁屑。

活塞环选用3种经表面改性的合金铸铁活塞环(由仪征双环活塞环有限公司生产),分别为镀陶瓷活塞环(CKS)、镀铬活塞环(Cr)、氮化活塞环(Nitriding)。

润滑油选用全合成机油(SN/GF-5 5W-30)。试

验以基础油润滑为对照组,混合油(含甲醇燃烧产物(质量分数):1.5%甲醛、1%甲酸和15%甲醇)润滑为试验组,以此模拟甲醇燃料发动机的实际润滑环境。

试验方法

利用往复摩擦磨损试验机研究不同表面改性活塞环与球墨铸铁气缸套配对的摩擦学性能。试验装置由往复机构、加热机构、加载机构、供油机

构、摩擦信号的实时测量系统组成,见图1(a)。在该摩擦系统中,活塞环与气缸套的接触形式见图1(b),摩擦表面为曲面摩擦。在此基础上,通过压力旋钮调节加载力,垂直放置的压力传感器对摩擦副施加的加载力信号进行监测,水平放置的压力传感器对摩擦力进行采集,同时利用LabVIEW程序记录摩擦力信号。该试验机可作30 mm的往复运动,工作温度可在25~300℃范围内调节^[15-16]。

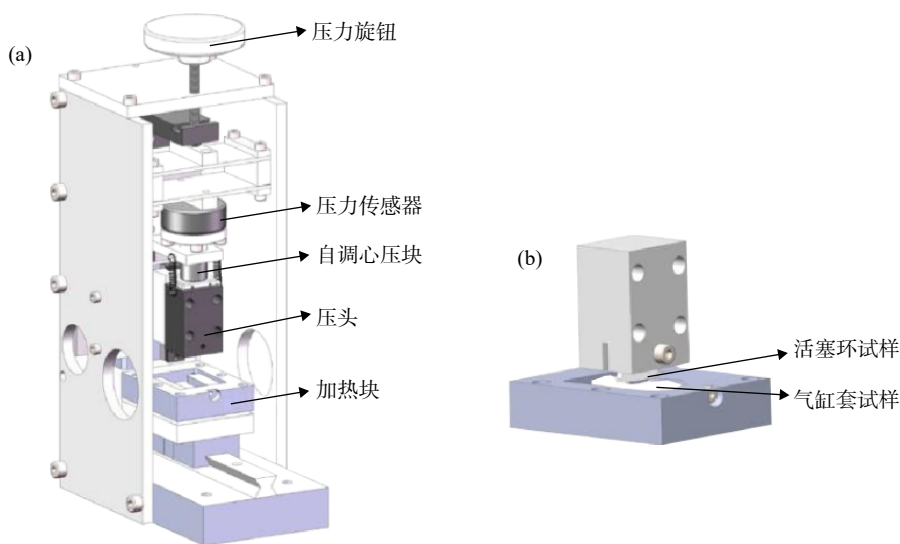


图1 往复摩擦磨损试验机:(a)加载装置结构图;(b)试样夹具结构图

发动机从启动到运行主要可分为2个阶段:分级加载阶段和稳定运行阶段。分级加载阶段是指将发动机负荷从较低水平逐步提升至较高水平,而不是一次性加载到最大值。这种方式可使发动机逐渐适应负荷变化,减少因负荷突变引起的机械应力和热应力,从而有利于延长使用寿命。稳定运行阶段是发动机工作周期的关键部分,在此阶段,发动机以相对恒定的速度和功率输出运行,为船舶或机器提供持续动力。抗拉缸能力用于评价摩擦副在润滑油缺失条件下抵抗黏着磨损的能力,涉及摩擦副的可靠性,是其应对紧急工况的性能指标。

本文开展阶梯载荷试验、长磨试验以及抗拉缸试验,分别模拟分级加载阶段、稳定运行阶段以及润滑油缺失3种工况。试验采用实际使用的活塞环和气缸套为试验件,摩擦副的接触状态、运动形式、载荷、温度与润滑条件均与实际情况基本一

致。为加速磨损过程,对载荷及温度进行了适当提高,同时试验初始阶段设置了低载磨合阶段,以消除试验件表面状态不同对摩擦力的影响。

阶梯载荷试验条件如下:载荷从10 MPa开始,每隔60 min增加10 MPa,直至达到60 MPa,试验总时长为360 min;温度恒定保持为200℃,转速为200 r/min,试验过程中持续供油润滑。试验载荷由加载力除以接触面积计算获得。由于不同活塞环的厚度会影响接触面积,因此所施加的加载力有所不同。通过阶梯载荷试验,分析不同配对副在各载荷条件下的摩擦力变化趋势及平均摩擦系数,以初步评估其摩擦性能。

长磨试验条件:温度恒定保持为200℃,转速为200 r/min;低载磨合阶段载荷为10 MPa,持续3 h;高载磨损阶段载荷为60 MPa,持续21 h;试验总时长为24 h,试验过程持续供油润滑。通过长效磨损

试验,以评估不同气缸套和活塞环的磨损情况。

抗拉缸试验包括3个阶段:低载磨合、高载磨合以及贫油干摩擦。首先在200℃、200 r/min、10 MPa下磨合10 min,以消除试样表面加工毛刺。随后将载荷增至40 MPa,保持转速与供油,继续磨合150 min后停止供油,并维持温度、载荷不变,直至发生拉缸停机。通过分析拉缸过程中摩擦力的变化曲线并记录抗拉缸时间,以评估摩擦副在极端润滑条件下的性能。

表征手段

使用激光共聚焦扫描显微镜(OLYMPUS LEXT OLS 4000)测量气缸套和活塞环试样未磨损区域与已磨损区域的阶梯高度差,以此表征磨损量。采用配备能量色散光谱仪的扫描电子显微镜(VEGA3 TESCAN)观察气缸套和活塞环试样磨损前后的表面形貌,并对其表面元素成分及分布进行测试表征。

试验结果与讨论

阶梯载荷试验下摩擦学性能

通过对3种表面改性活塞环与球墨铸铁气缸套进行分别配对,探究其在200℃和不同载荷条件下的摩擦性能。不同配对副的摩擦力随载荷变化的趋势及各载荷下的平均摩擦系数分别见图2和图3。由摩擦力曲线可以看出,各配对副在10~40 MPa载荷范围内摩擦力保持稳定,处于稳定磨损阶段;当载荷升至50~60 MPa时,Nitriding配对副的摩擦力逐

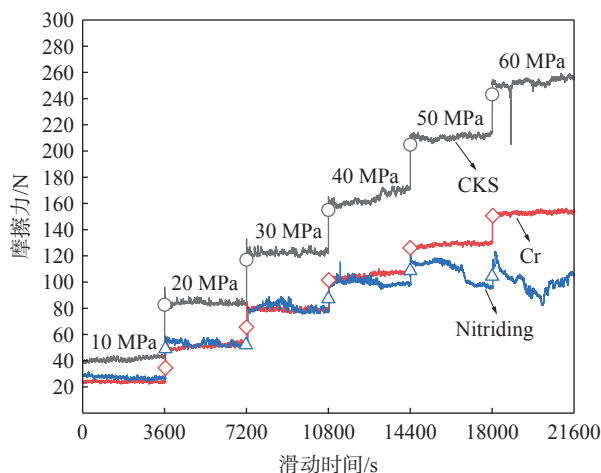


图2 阶梯载荷试验下气缸套-活塞环摩擦力曲线图

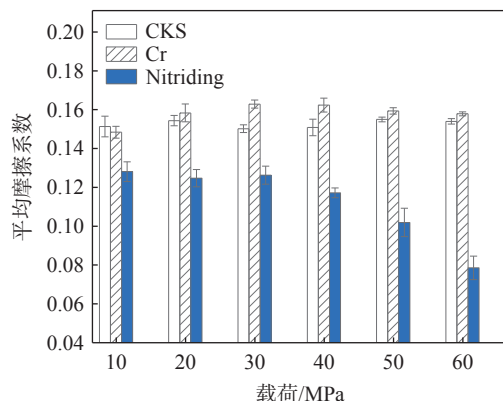


图3 阶梯载荷试验下气缸套-活塞环平均摩擦系数柱状图

渐下降,而CKS和Cr配对副的摩擦力仍保持稳定。

通过图3可以看出,在10 MPa载荷下,各配对副处于磨合阶段,其中Nitriding配对副的平均摩擦系数最低,为0.12807;CKS和Cr配对副的平均摩擦系数相对接近,分别为0.15134和0.14839。随着载荷增加,CKS和Cr配对副的平均摩擦系数变化较小,而Nitriding配对副的平均摩擦系数先稳定后下降。在20~60 MPa载荷范围内,Nitriding配对副的平均摩擦系数始终最低,各配对副的平均摩擦系数排序为Cr>CKS>Nitriding。Nitriding配对副在高载阶段表现出较差的摩擦稳定性,但其摩擦系数却保持最低。为全面评估各配对副在实际高载工况下的匹配性能,需进一步对其高载阶段下的摩擦性能展开研究。

长磨试验下摩擦学性能

通过200℃下的长磨试验,对3种表面改性活塞环与球墨铸铁气缸套配对副的摩擦磨损性能进行进一步评估。为了对比,试验设置基础油与混合油润滑2种润滑状态。不同活塞环-气缸套配对副的摩擦力变化曲线见图4。可以看出,在磨合阶段,基础油润滑条件下各配对副摩擦力均较快达到稳定;混合油润滑条件下,Nitriding配对副的摩擦力先下降后稳定。在高载磨损阶段初期,2种润滑条件下Nitriding配对副的摩擦力均表现出先上升、后下降、再保持稳定的趋势,CKS和Cr配对副的摩擦力则表现为迅速下降后保持稳定,但在混合油润滑状态下,配对副达到稳定摩擦状态的时间明显减少,这可能是由于其中的甲酸、甲醛等物质对材料表面微小磨粒具有腐蚀作用,促进其去除,进而加速磨

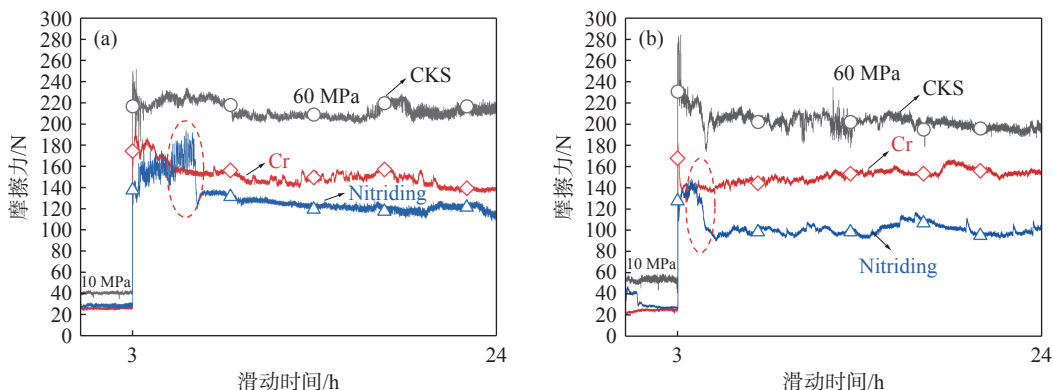


图4 长磨试验下气缸套-活塞环摩擦力曲线图: (a) 基础油润滑; (b) 混合油润滑

合过程^[17]。在高载磨损阶段后期, 2种润滑条件下各配对副摩擦力基本稳定, 但基础油润滑条件下的摩擦力波动幅度明显小于混合油润滑条件下的波动幅度。混合油润滑状态下不同配对副均快速达到摩擦稳定状态, 各配对副的摩擦力变化趋势相似。同时, 混合油润滑会对活塞环-气缸套高载摩擦磨损阶段产生不利影响, 使其摩擦稳定性变差, 这可能源于甲醇、甲醛、甲酸等物质影响润滑油性能, 导致润滑效果下降, 进而影响摩擦磨损过程。

不同配对副在高载磨损阶段的平均摩擦系数见图5。可以看出, 在基础润滑油润滑下, Nitriding 配对副的平均摩擦系数最低 (101.78×10^{-3}), Cr 配对副最高 (155.77×10^{-3}), CKS 配对副介于二者之间 (130.66×10^{-3}); 在混合润滑油润滑下, 各配对副的平均摩擦系数均有所变化: Nitriding 配对副的平均摩擦系数最低 (80.61×10^{-3}), 相较基础油润滑下降 20.8%; Cr 配对副最高 (155.74×10^{-3}), 相较基础油润滑下基本持平; CKS 配对副的平均摩擦系数

介于两者之间 (124.16×10^{-3}), 相较基础油润滑下降 5.0%。

各配对副平均摩擦系数在混合油中的下降, 可能与甲醇燃烧产物对摩擦表面的轻微腐蚀有关, 腐蚀形成的凹坑可起到储油作用。Nitriding 活塞环表面的沟槽状结构有利于在恶劣的润滑条件下储存润滑油, 从而持续提供润滑, 因此具有较低的摩擦系数。在含甲醇燃烧产物润滑油中, 各配对副的减摩性能排序为 Nitriding>CKS>Cr。

各气缸套-活塞环配对副中活塞环和气缸套在基础油和混合油润滑条件下的综合磨损量见图6。可以看出, 与基础油对照组相比, 各配对副在混合油润滑条件下的磨损量均显著增加。这主要是由于甲醇燃烧产物对缸套及活塞环表面存在腐蚀作用, 同时甲醛、甲酸、甲醇等会与润滑油中的碱性添加剂发生物化反应, 所产生的盐类等物质破坏了润滑油的稳定性, 进而加剧了磨损。从图中还可以发现, 各配对副活塞环的磨损量均明显大于气缸套磨损量。

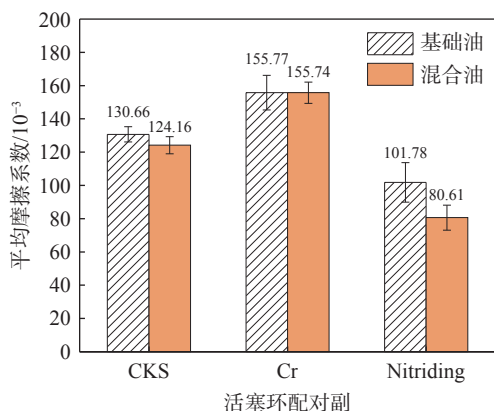


图5 长磨试验下气缸套-活塞环平均摩擦系数柱状图

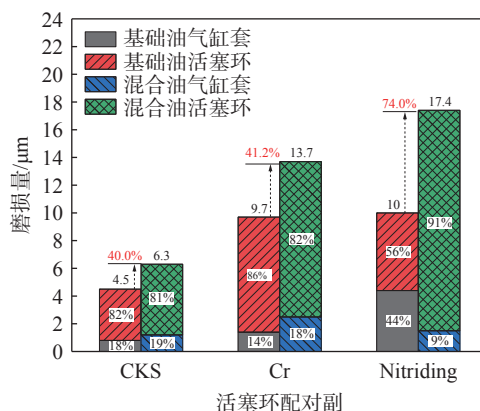


图6 长磨试验下气缸套-活塞环磨损量柱状图

但由于在实际工作中活塞环属于易更换部件,因此本文对配对副耐磨性能的评价仅从气缸套磨损量角度来考虑。在含甲醇燃烧产物润滑油中,CKS、Nitriding、Cr 配对副气缸套的磨损量分别为 1.2、1.6 和 2.5 μm ,3 组配对副的耐磨性能排序为:CKS>Nitriding>Cr。

为进一步分析各活塞环-气缸套配对副的磨损性能,使用扫描电子显微镜和能谱仪分别表征了磨损表面的微观形貌及元素成分。不同润滑条件下磨损后的气缸套表面扫描电子显微镜形貌见图 7 和图 8。可以看出,在基础油润滑下,CKS 和 Nitriding 配对副对应的气缸套表面可见清晰且数量较多的珩磨纹,而 Cr 配对副对应的气缸套表面部分珩磨纹已被平台填充,这与摩擦性能表现基本一致。与基础油润滑相比,混合油润滑下 CKS 和 Cr 配对副对应的气缸套表面珩磨纹基本消失,出现沿滑动方向的划痕和犁沟,疲劳脱落的磨粒使气缸套发生了磨粒磨损,使缸套表面产生不同程度的裂纹与剥落现象,摩擦反应产物覆盖在其表面,说明在磨损过程中气

缸套表面发生了严重的塑性变形,流动的金属材料填平了用于储存磨屑和润滑油的凹坑,平台面积增大,磨损相对严重^[18]。相比之下,Nitriding 配对副对应的气缸套表面仍存在较为清晰的珩磨纹,有利于收集磨屑和维持润滑,进而减缓了磨损。

根据上述摩擦实验情况,选取摩擦系数最大和最小的配对副进行对比观察,能谱仪结果表明,与 Nitriding 配对的气缸套表面主要成分为 C、O、Fe、Si、Cr、Ca、P,见图 9。其中,P 通常来自润滑油中的耐磨剂二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP),Ca 元素来自清洁添加剂,C 元素来自润滑油或表面吸附。因此,表面的白亮物质可归因于润滑油在摩擦化学反应后储存在沟槽中的产物,O 元素可能来自表面金属氧化物。这说明磨损后与 Nitriding 配对的气缸套表面仍保留较多的润滑油产物储存于珩磨纹中;在高温工况下,润滑油中的 ZDDP 会发生分解,在气缸套表面形成摩擦化学反应膜,进而减少活塞环-气缸套配对副之间的摩擦损失^[19]。与之相比,与 Cr 配对的气缸套表面仅有 C、O、Fe、Si、Cr 元

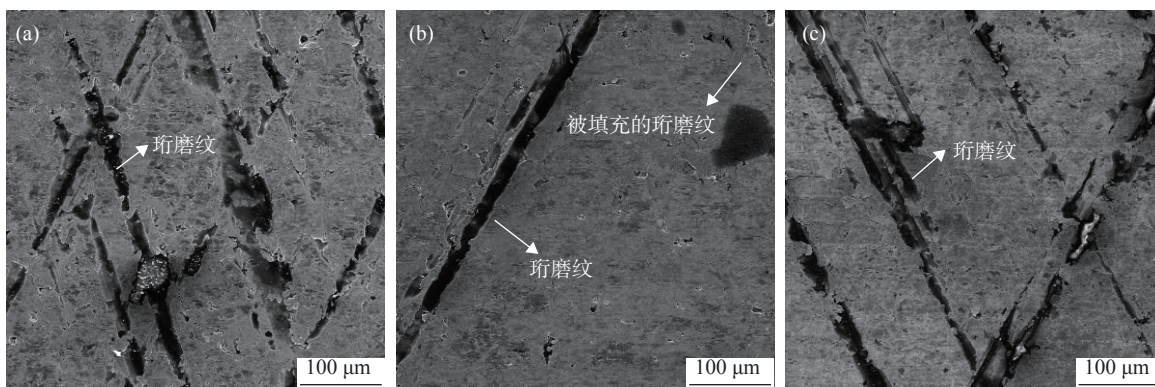


图 7 基础油润滑条件下气缸套磨损表面的扫描电子显微镜图像: (a) CKS; (b) Cr; (c) Nitriding

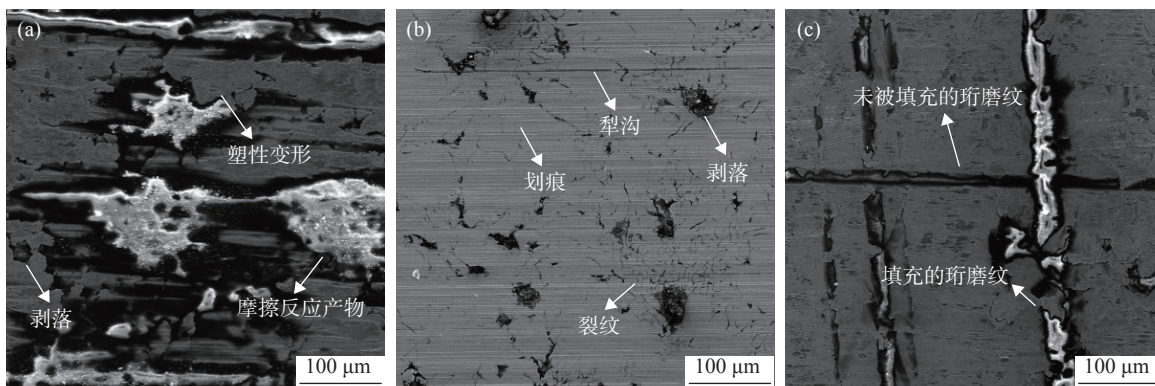


图 8 混合油润滑条件下气缸套磨损表面的扫描电子显微镜图像: (a) CKS; (b) Cr; (c) Nitriding

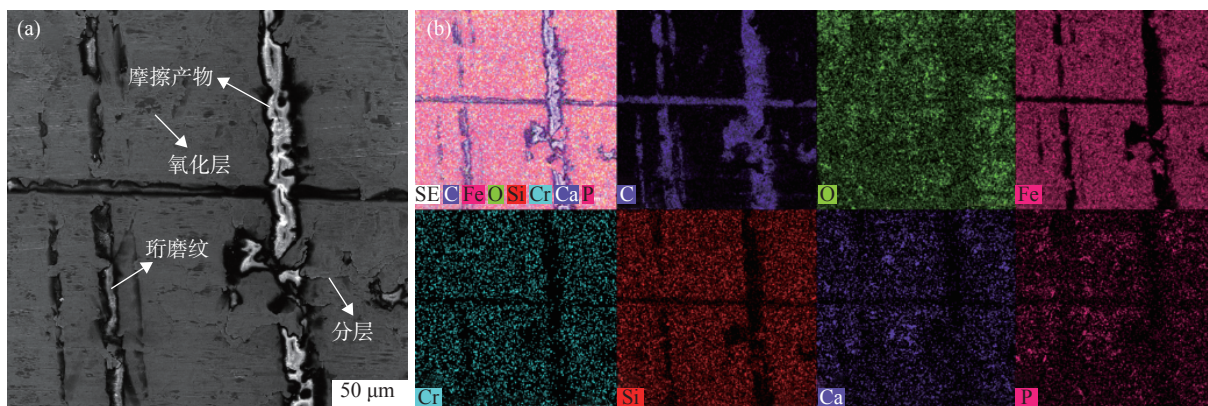


图9 混合油润滑下与 Nitriding 活塞环配对的气缸套磨痕: (a) 表面形貌; (b) 元素分布

素, 见图 10, 并未发现润滑油产物的存在。因此, Cr 配对副表现出较高的摩擦系数。

不同润滑条件下磨损后的活塞环表面扫描电子显微镜形貌见图 11 和图 12。可以看出, 在基础油润滑下各活塞环表面均出现不同程度的磨损。CKS 和 Cr 活塞环表面存在较多的凹坑和摩擦氧化层;

Nitriding 活塞环表面则分布大量白色斑点, 分析为抗磨添加剂产物, 这与气缸套表面的白亮斑点形成规律一致。与基础油相比, 混合油润滑下 CKS 和 Cr 活塞环的摩擦损失更为严重, 表面呈现明显的塑性变形、脱落、沿滑动方向的划痕与犁沟, 这与前文磨损量表现相一致; 而 Nitriding 活塞环表面的白

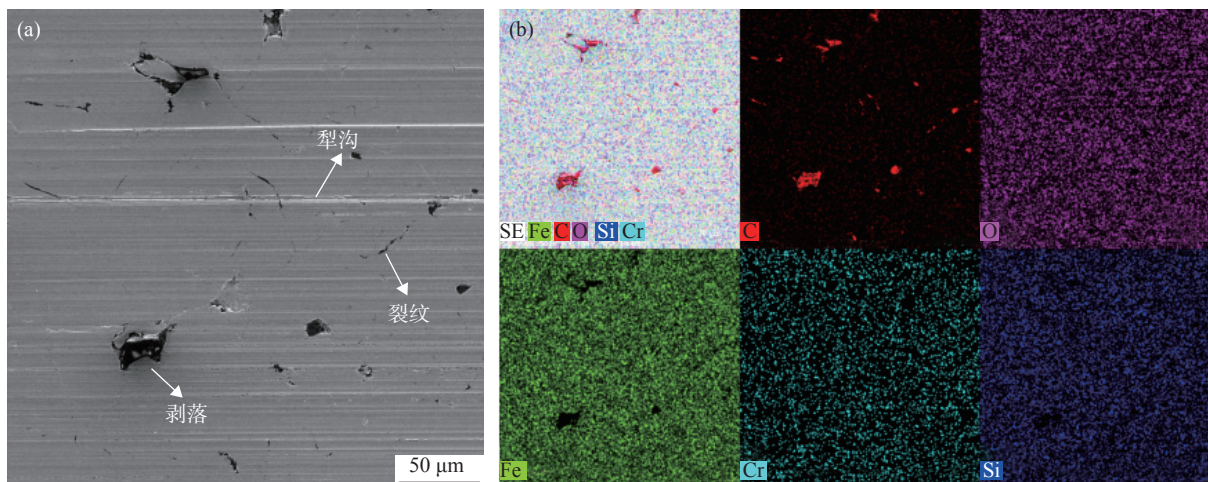


图 10 混合油润滑下与 Cr 活塞环配对的气缸套磨痕: (a) 表面形貌; (b) 元素分布

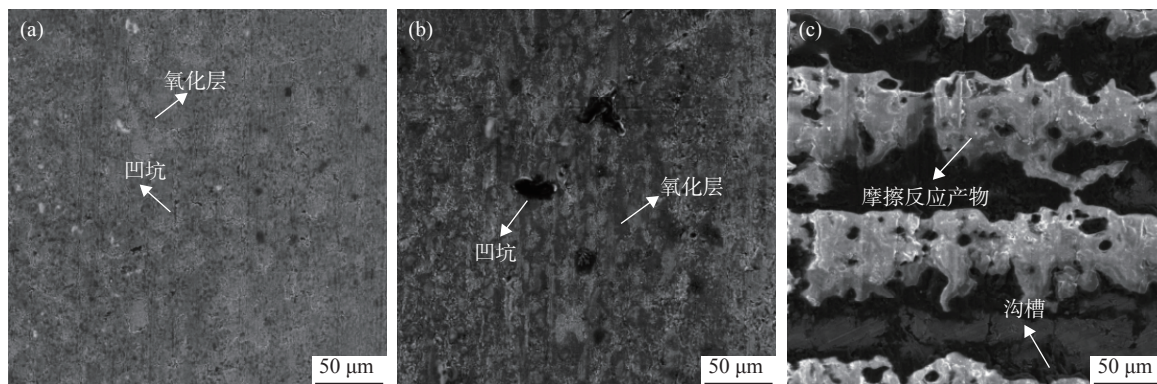


图 11 基础油润滑条件下活塞环磨损表面的扫描电子显微镜图像: (a) CKS; (b) Cr; (c) Nitriding

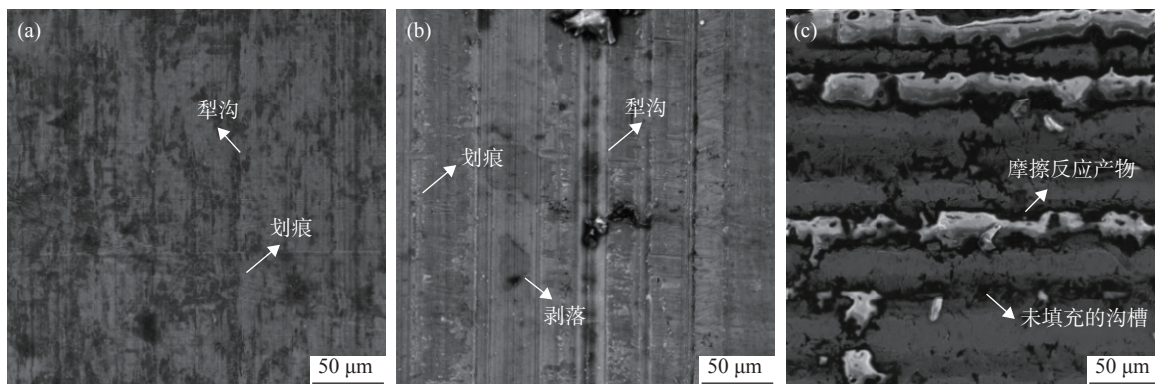


图 12 混合油润滑条件下活塞环磨损表面的扫描电子显微镜图像: (a) CKS; (b) Cr; (c) Nitriding

色斑点面积减小, 且表面沟槽并未被润滑油产物完全填充, 仍保留较多储油空间。

能谱仪结果表明, 在混合油润滑条件下磨损后的 Nitriding 活塞环表面主要成分为 C、O、Fe、Si、Zn、P、Na 元素, 见图 13。Nitriding 活塞环具有特殊的表面结构, 可以在摩擦过程中储存润滑油和磨损产物; 同时, 随着试验的不断进行, 润滑油中的

耐磨添加剂 ZDDP 会在摩擦副表面分解并参与反应, 在形成油膜, 从而有助于减小活塞环-气缸套配对副的摩擦损失。

抗拉缸性能表现

抗拉缸试验采用停止对气缸套-活塞环供油的方式, 评估其抗拉缸性能。球墨铸铁气缸套与 3 种活塞环配对时的抗拉缸曲线见图 14。可以看出, 在基

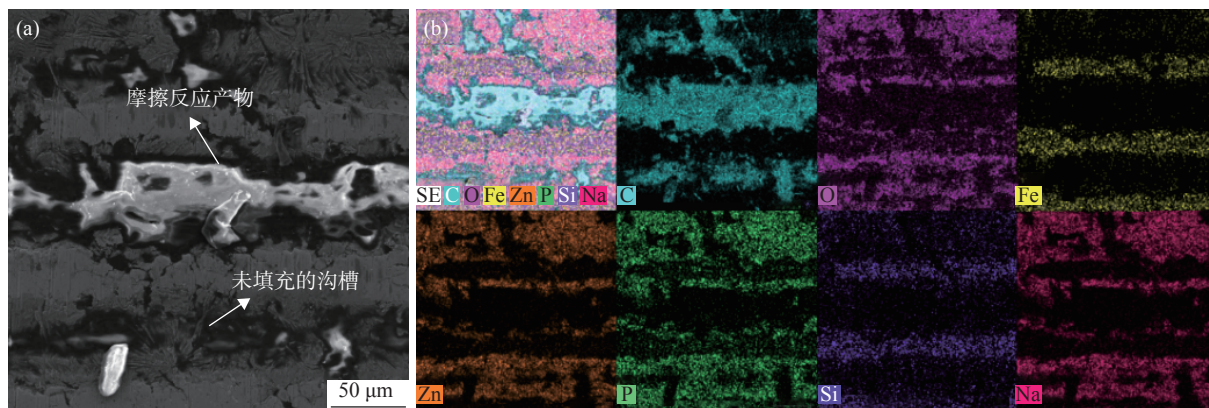


图 13 混合油润滑下 Nitriding 活塞环磨损: (a) 表面形貌; (b) 元素分布

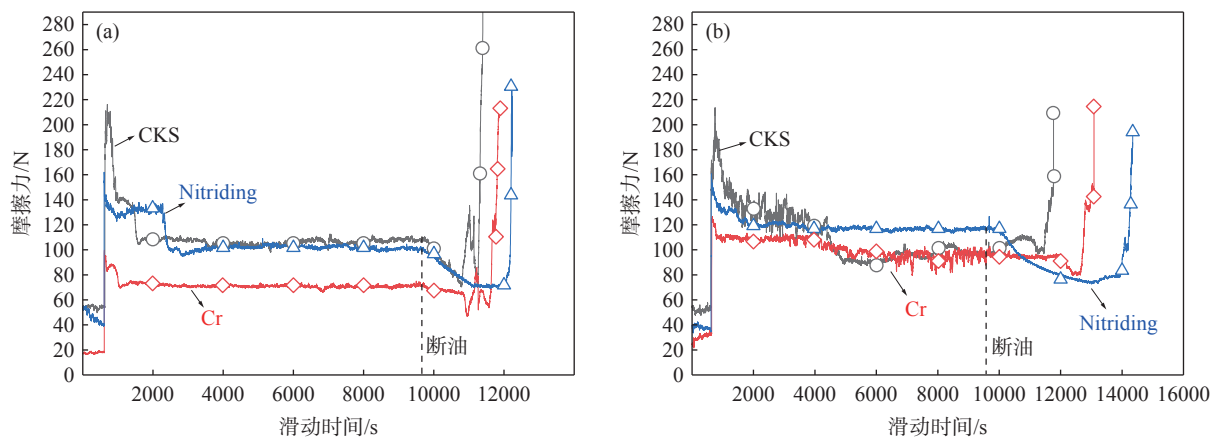


图 14 抗拉缸试验下气缸套-活塞环摩擦力曲线图: (a) 基础油润滑; (b) 混合油润滑

础油润滑条件下, 3 组配对副在断油前摩擦力保持平稳, 处于稳定磨损阶段; 断油后, Nitriding 配对副的摩擦力先下降后上升直至拉缸, CKS 和 Cr 配对副的摩擦力先下降后发生多次波动, 最后上升至拉缸。在混合油润滑条件下, 3 组配对副在断油前摩擦力均发生多次波动, 说明在含甲醇燃烧产物的润滑油中, 各配对副未完全磨合; Nitriding 和 Cr 配对副的摩擦力呈现出先下降后上升的趋势, 而 CKS 配对副的摩擦力则呈现出先增加再下降, 最后上升至拉缸。

球墨铸铁气缸套与 3 种表面改性活塞环配对的抗拉缸时间见图 15。可以看出, 在混合油润滑条件下, 各配对副的抗拉缸时间均有所延长。这可能是由于在含甲醇燃烧产物的润滑油中, 各配对副未完全磨合, 活塞环及缸套表面仍存在较多凹凸结构。在摩擦磨损过程中, 这些结构起到了储存润滑油的作用, 在断油后可以使润滑油停留在气缸套表面的时间更长, 从而推迟拉缸的发生。在含甲醇燃烧产物润滑油中, CKS、Cr、Nitriding 配对副的抗拉缸时间分别为 36、58、79 min, 3 组配对副的抗拉缸性能排序为: Nitriding>Cr>CKS。

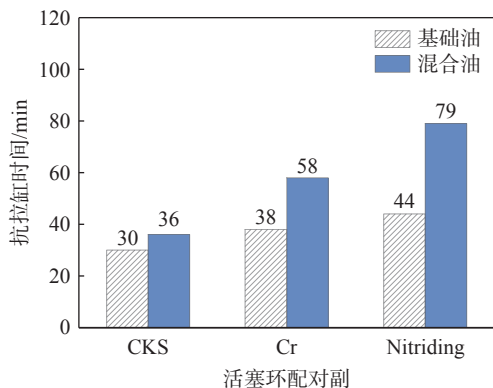


图 15 抗拉缸试验下气缸套-活塞环抗拉缸时间柱状图

匹配性能评价

通过对球墨铸铁气缸套与 3 种表面改性活塞环的摩擦性能、磨损性能以及抗拉缸性能的综合分析, 得出了各配对副在含甲醇燃烧产物润滑油中的匹配特性。3 组配对副的匹配性能雷达图见图 16。可以看出, CKS 和 Cr 配对副的耐磨性能较强, 但其减摩性能和抗拉缸性能较差; Nitriding 配对副的减

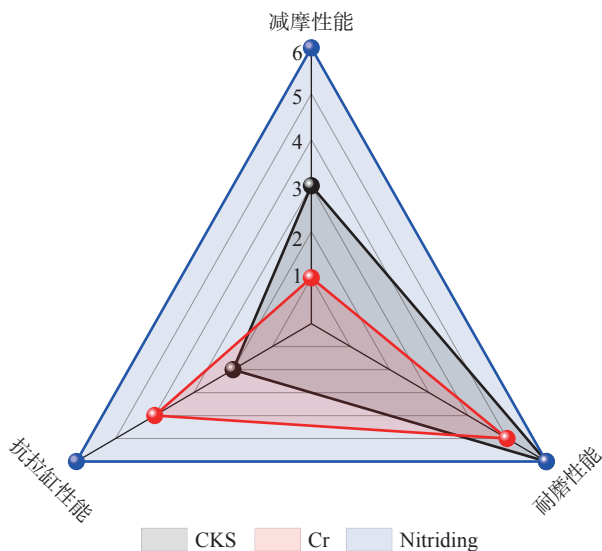


图 16 匹配性能雷达图

摩、耐磨及抗拉缸性能均表现最佳。综合分析结果表明, 在含甲醇燃烧产物润滑油中, Nitriding 活塞环与球墨铸铁气缸套具有最佳的匹配性能。

结束语

(1) 通过阶梯载荷试验和长磨试验对 3 组配对副的减摩性能进行了分析, 得出 Nitriding 配对副具有最低的平均摩擦系数, 其在应对载荷突变时始终保持最低的摩擦系数, 但高载稳定性相对较差, 在长磨试验中混合油润滑条件下 Nitriding 配对副的平均摩擦系数值为 80.61×10^{-3} , 相较基础油润滑下平均摩擦系数下降了 20.8%, 表现出较优的减摩性能。在含甲醇燃烧产物润滑油中, 3 组配对副的减摩性能排序为 Nitriding>CKS>Cr。

(2) 在混合油润滑条件下, 通过长磨试验及对 3 组配对副的耐磨性能进行了分析, 得出试验后活塞环磨损量远大于气缸套磨损量。由于活塞环在实际应用中较易更换, 因此对配对副的耐磨性能评价主要依据气缸套磨损量。其中 CKS 和 Nitriding 配对副缸套磨损量最低, 分别为 1.2 和 $1.6 \mu\text{m}$ 。在含甲醇燃烧产物润滑油中, 3 组配对副的耐磨性能排序为: CKS>Nitriding>Cr。

(3) 通过抗拉缸试验对 3 组配对副的抗拉缸性能进行了分析, 得出各配对副在混合油润滑下, 抗拉缸时间均有所延长。在含甲醇燃烧产物润滑油

中, CKS、Cr、Nitriding 配对副的抗拉缸时间分别为 36、58、79 min, 抗拉缸性能排序为: Nitriding>Cr>CKS。

(4) 综合分析 3 组配对副的摩擦、磨损及抗拉缸性能, 得出在甲醇燃料发动机中, Nitriding 活塞环与球墨铸铁气缸套具有最佳的匹配性能。

参考文献

- [1] Chen L Y, Yip T L, Mou J M, et al. Provision of emission control area and the impact on shipping route choice and ship emissions. *Transp Res Part D Transp Environ*, 2018, 58: 280
- [2] 甘少炜. 新能源和替代燃料船舶发展现状与展望. 交通运输部管理干部学院学报, 2023, 33(4): 32
- [3] 周书言, 高翔, 李亚军, 等. “碳达峰、碳中和”背景下我国船用甲醇燃料加注研究. 水上安全, 2024(16): 13
- [4] 梁玮. 甲醇汽油的研究开发及应用现状. 中外能源, 2006(2): 95
- [5] Zelenka P, Kapus P, Mikulic L A. Development and optimization of methanol fueled compression ignition engines for passenger cars and light duty trucks. *SAE Int J Fuels Lubr*, 1991, 100: 425
- [6] 赵立玉, 孙瑞. 船厂可替代燃料技术研发分析. 船舶物资与市场, 2024, 32(2): 80
- [7] Kusaka J, Daisho Y, Kihara R, et al. Simulating exhaust emissions characteristics and their improvements in a glow-assisted di methanol engine using combustion models combined with detailed kinetics// *The Conference of International Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exposition*. Dearborn, 1997
- [8] 唐琼英, 柯友胜, 吐尔孙那依. 甲醇燃料的研发现状及发展前景. 当代石油石化, 2008, 16(10): 23
- [9] 娜仁, 胡军强, 殷筱, 等. 活塞环铬陶瓷复合镀层参数匹配优化研究. 柴油机, 2018, 40(2): 20
- [10] 尹超, 高俊华, 尧命发. 甲醇发动机与汽油发动机瞬态排放特性的对比研究. 汽车工程, 2011, 33(9): 753
- [11] Yin B F, Jiang Y H, Xu B, et al. Study on tribological properties of laser-textured plunger in methanol engine. *Int J Automot Technol*, 2021, 22(4): 1045
- [12] Lai Z, Bai C, Sun L, et al. Tribology dependence of annealed a-C:H films in dry air and methanol environments. *ACS omega*, 2022, 7(9): 7472
- [13] Su Y Y, Gong X H, Huang W J, et al. Enhancing the tribological property of Mo-doped DLC films in methanol using appropriate bias voltage. *Diamond Relat Mater*, 2023, 135: Art No. 109795
- [14] 朱琼花, 袁爽, 沈源, 等. 甲醇发动机润滑油特性研究. 润滑与密封, 2014, 39(2): 111
- [15] 赵同财. 高强度柴油机活塞环-气缸套配对副优化及磨损规律研究 [学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2023
- [16] 马泽宇. 高强度条件下表面改性活塞环摩擦学性能研究 [学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2021
- [17] Zhang B F, Ma X, Liu L N, et al. Reciprocating sliding friction behavior and wear state transition mechanism of cylinder liner and piston ring. *Wear*, 2024, 546/547: Art No. 205293
- [18] Ferreira R, Almeida R, Carvalho Ó, et al. Influence of a DLC coating topography in the piston ring/cylinder liner tribological performance. *J Manuf Process*, 2021, 66: 483
- [19] Tian Z H, Lu P, Wang S C, et al. Influence of ZDDP tribofilm on micropitting formation and progression. *Tribol Int*, 2024, 199: Art No. 109938

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52101344)。

作者简介: 何宇航 (2000—), 男, 吉林省四平人, 硕士研究生, 主要研究方向: 船机零件摩擦磨损。通信地址: 辽宁省大连市甘井子区凌水路 1 号大连海事大学; E-mail: heyuhang0711@163.com。

通信作者: 付景国 (1986—), 男, 山东省菏泽人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 船机零件摩擦磨损、节能减排。通信地址: 辽宁省大连市甘井子区凌水路 1 号大连海事大学; E-mail: fjingguo@dlmu.edu.cn。