

氢、水存在下润滑油基础油性能变化研究

金理力¹, 徐瑞峰¹, 黄卿¹, 汪新博², 张昊²

(1. 中国石油兰州润滑油研究开发中心, 甘肃 兰州 730060;
2. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

Study on the Performance Changes of Lubricating Base Oil in the Presence of Hydrogen and Water

Lili Jin¹, Ruifeng Xu¹, Qing Huang¹, Xinbo Wang², Hao Zhang²

(1. PetroChina Lanzhou Lubricant Oil Research and Development Institute, Lanzhou 730060, China; 2. BeiJing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: With the development of hydrogen fuel in the automotive industry, hydrogen internal combustion engine lubricants will also be a new direction that needs to be tackled in the industry. The wear resistance of lubricating oil is affected by the mixing of a large amount of water and residual hydrogen generated after hydrogen combustion. Studying the changes in the anti wear performance of lubricating oil base oils in the presence of hydrogen and water, as well as the reasons for the precipitation changes, is of great significance for the study of hydrogen internal combustion engine oils. This article focuses on the anti wear performance of ester based oils under different hydrogen and water contents. Through various evaluation methods, a preliminary conclusion is drawn that the anti wear performance of ester based oils has been improved under a certain hydrogen content.

摘要: 随着氢燃料在汽车领域的研发进展, 氢内燃机润滑油也将是行业内需要攻克的一个新方向。润滑油在氢燃烧后产生的大量水、余氢的混入下, 抗磨性能受到影响。研究氢、水存在下润滑油基础油抗磨性能变化, 剖析变化产生的原因, 对氢内燃机油研究具有重要意义。本文重点研究了酯类基础油在不同氢、水含量下的抗磨性能, 通过多种评价手段, 得出了酯类基础油在一定氢气含量下抗磨性能有提高的初步结论。

关键词: 氢内燃机; 润滑油基础油; 氢气; 水

Key words: Hydrogen internal combustion engine; Lubricating oil base oil; Hydrogen gas; water

0 概述

氢能具有燃烧热值高、清洁无污染、储运便捷、来源广泛、利用形式多等诸多优点, 对于降低碳排放起到非常重要的支撑作用, 是未来与电动化汽车具有同等重要地位的新型清洁燃料, 为此, 世界各国已广泛开始氢能源研究, 并积极实现氢能源产业化, 尤其是加速应用于汽车产业领域。我国是全球最大的氢生产国, 丰富的资源为发展氢能产业奠定了物质基础, 各级地方政府与企业积极开展产业布局 and 项目建设。目前我国已成功开发出氢燃料内燃机样机, 并成功点火应用, 而氢能燃烧产生的高热

量、高比例水分等影响, 势必会对发动机油提出更高的抗氧化、抗硝化、防锈、抗磨等性能要求。

润滑油由添加剂和基础油构成, 其中基础油不仅是占比最多的润滑油组分, 也是发挥各类添加剂功效的重要载体。研究氢、水存在下不同类基础油抗磨损性能表现, 对氢内燃机油配方开发和性能研究具有重要意义。

1 试验简介

混合实验步骤: 混合实验前, 需要使用酒精和石油醚洗净混合装置和油路管道; 使用漏斗, 向烧

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目:

作者简介: 金理力 (1980-), 女, 学士, 主要研究方向为发动机润滑油配方研究, E-mail: jinlili_rhy@petrochina.com.cn

杯中加入一定体积的实验油样，再通过管路充入混合装置；打开超纯水制备仪器，向烧杯中加入一定体积的纯水，通过管路加入混合装置；连接氢气质量流量控制器，打开氢气发生器，使用电脑控制氢气通入混合装置的体积；打开加热装置，使温度上升并保持 115℃ 左右；打开机油泵，使机油从装置底部抽入油泵并从装置顶部以油雾状态喷出，与氢气、水蒸气在高温环境下混合反应；三小时后，关闭机油泵，通过废气管路排出混合装置中气体，通过管路收集高温混合实验油样进行 RTEC 摩擦磨损试验测试。

摩擦实验步骤：待混合实验结束，通过管路收集高温混合实验油样；使用酒精和石油醚将标准摩擦环和标准摩擦块擦净后，安装至 RTEC 摩擦磨损试验机上；将混合实验油样倒入油盒中，将油盒固定在标准摩擦环所在的主动轴上；设置一定的工况，半小时后取出试验后的标准摩擦块和标准摩擦环，使用酒精和石油醚擦净试验环块后，使用光学电子显微镜分析其微观结构。

2 摩擦实验及结果

摩擦实验（1）调合方案为：酯类基础油与水混合比例为 10:1，混合装置内氢气浓度为 10%（混合装置内气体体积），即加入酯类基础油 2.5L、纯水 250mL、氢气 700mL。混合温度 115° C，混合时间 3 小时。

摩擦实验（2）条件为：酯类基础油与水的比例为 5:1，混合装置内氢气浓度为 10%（混合装置内气体体积），即加入基础油 2.5L、纯水 500mL、氢气 700mL。混合温度 115° C，混合时间 3 小时。

使用光学电子显微镜分析混合样品 RTEC 摩擦磨损试验后环块微观结构，方案 1 如图 2、图 3 所示，方案 2 如图 5、图 6 所示。



图 1 摩擦实验（方案 1）试验环块图

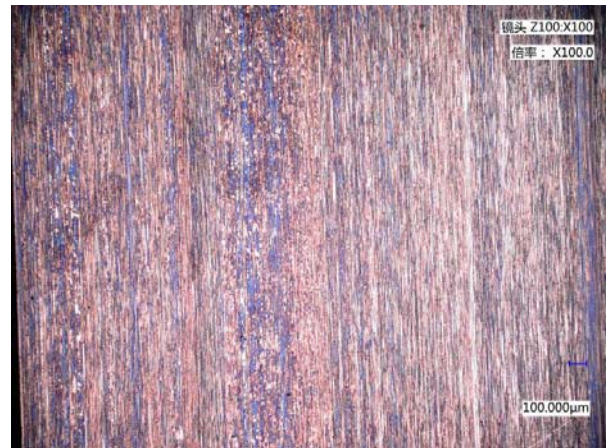


图 2 摩擦实验（方案 1）试验环微观结构图

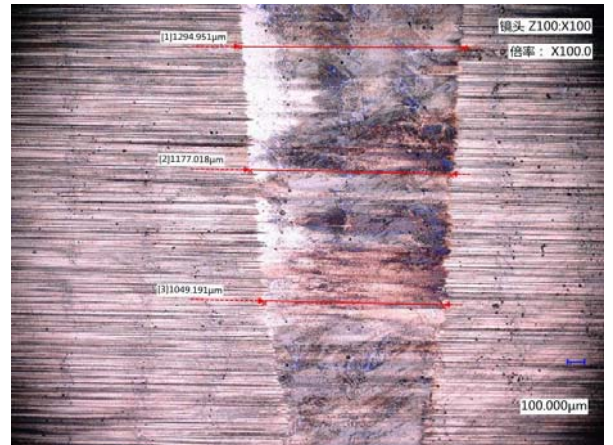


图 3 摩擦实验（方案 1）试验块微观结构图



图 4 摩擦实验（方案 2）试验环块图



图 5 摩擦实验（方案 2）试验环微观结构图

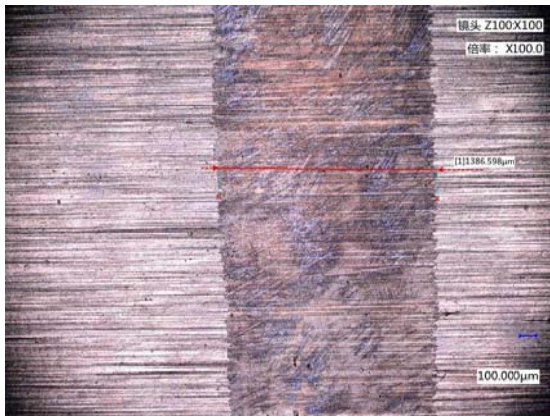


图6 摩擦实验（方案2）试验块微观结构图

摩擦实验（1）和（2）的摩擦系数随时间的曲线如图7所示。

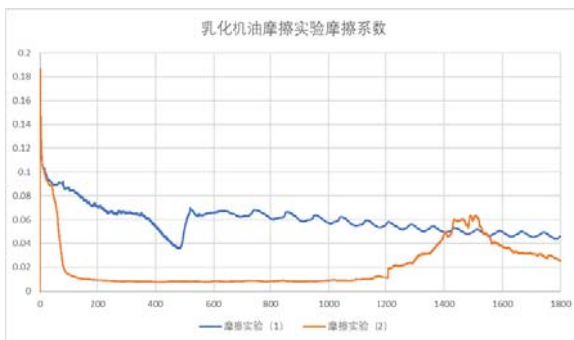


图7 乳化实验摩擦系数随时间的曲线图

由摩擦试验（1）和摩擦试验（2）及相关环块图对比可知：从两组试验的试验环微观结构可以看出，摩擦实验（1）的实验环的表面存在明显磨痕，深度和宽度不一，磨损较为严重，摩擦实验（2）的实验环的表面无明显磨痕；摩擦实验（1）的实验环的平均磨痕宽度为 $1173 \mu\text{m}$ ，摩擦实验（2）的实验环的平均磨痕宽度为 $1386 \mu\text{m}$ ，由此可以得知摩擦实验（2）的实验环相比摩擦实验（1）的实验环磨损严重。

为进一步考察相同水含量不同氢气浓度影响下酯类基础油的抗磨损性能，按表1试验方案准备了四组样品进行混合后摩擦实验。摩擦试验工况：摩擦副静止的情况下先使载荷线性增加至 100N ，两秒时间内使标准环的转速加速增加至 1000rpm ，与标准块稳定摩擦1分钟，再保持标准环旋转的同时，10秒内线性增加载荷至 200N ，再使标准环块稳定摩擦1分钟，再保持标准环旋转的同时，10秒内线性增加载荷至 300N ，以此类推，当载荷达到 500N 时，转速为 1000rpm 的标准环块旋转30分钟。

表1 四组基础油混合实验参数

编号	水体积	水油比例	氢气体积	氢气浓度
----	-----	------	------	------

1	125ml	5%	700ml	10%
2	250ml	10%	0 ml	0%
3	250ml	10%	350ml	5%
4	250ml	10%	1400ml	20%

摩擦实验后标准试验环块如图8、图11、图14、图17、图20所示，使用光学电子显微镜分析其微观结构如图9-10、图12-13、图15-16、图18-19和图21-22所示。



图8 0%水、0%氢气乳化机油摩擦试验环块图



图9 0%水、0%氢气基础油摩擦磨损试验后标准实验块的微观结构图

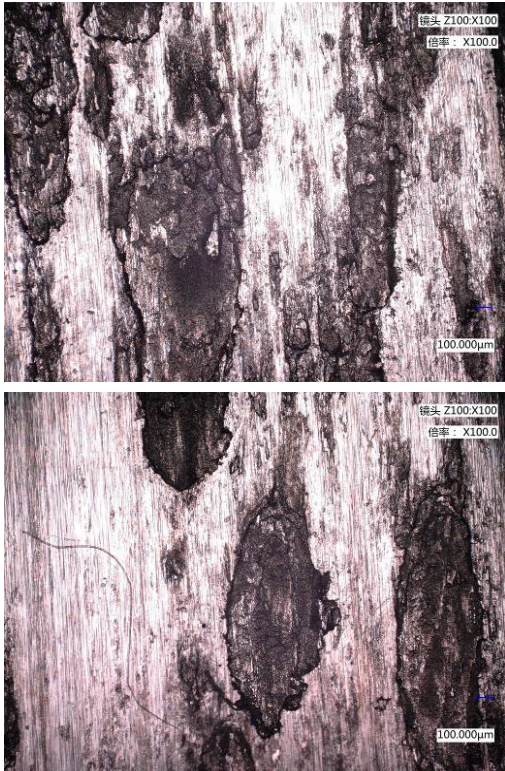


图 10 0%水、0%氢气基础油摩擦磨损试验后标准实验块的微观结构图



图 13 5%水、10%氢气基础油摩擦磨损试验后标准试验环的微观结构图



图 14 10%水、0%氢气乳化机油摩擦试验环块图



图 11 5%水、10%氢气乳化机油摩擦试验环块图

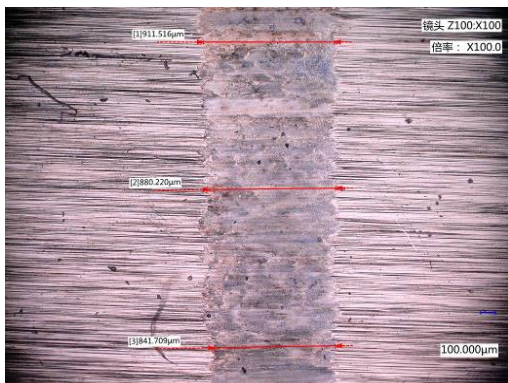


图 12 5%水、10%氢气基础油摩擦磨损试验后标准试验块的微观结构图

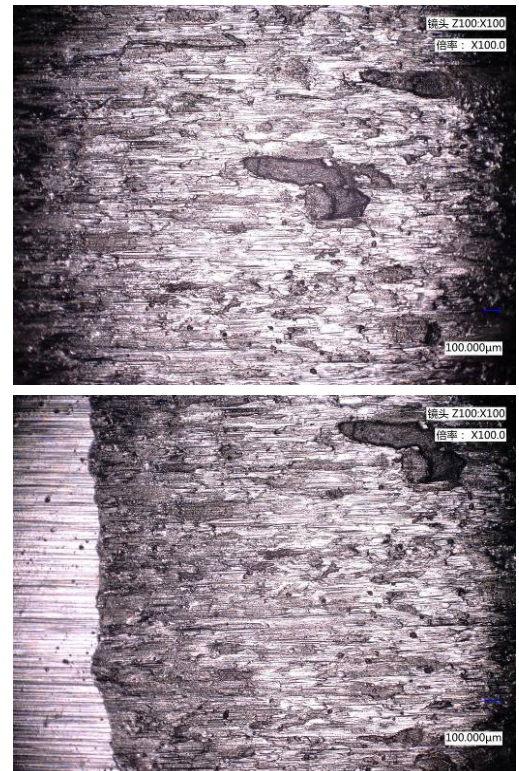


图 15 10%水、0%氢气基础油摩擦磨损试验后标准试验块的微观结构图

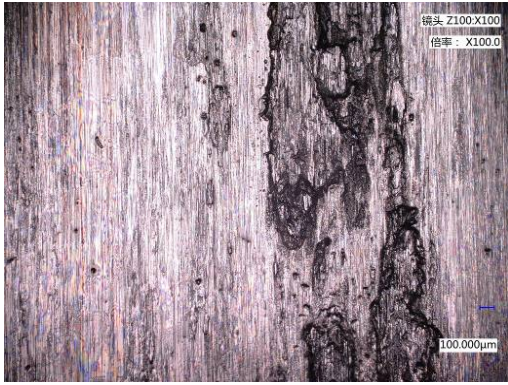


图 16 10%水、0%氢气基础油摩擦磨损试验后标准试验环的微观结构图



图 17 10%水、5%氢气乳化机油摩擦试验环块图

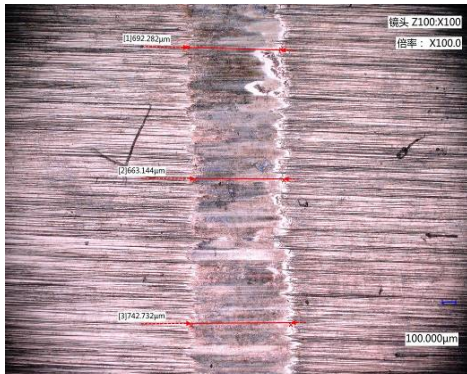


图 18 10%水、5%氢气基础油摩擦磨损试验后标准试验块的微观结构图



图 19 10%水、5%氢气基础油摩擦磨损试验后标准试验环的微观结构图



图 20 10%水、20%氢气乳化机油摩擦试验环块图

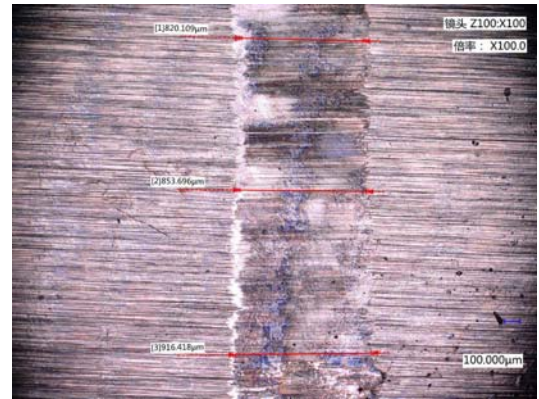


图 21 10%水、20%氢气基础油摩擦磨损试验后标准试验块的微观结构图

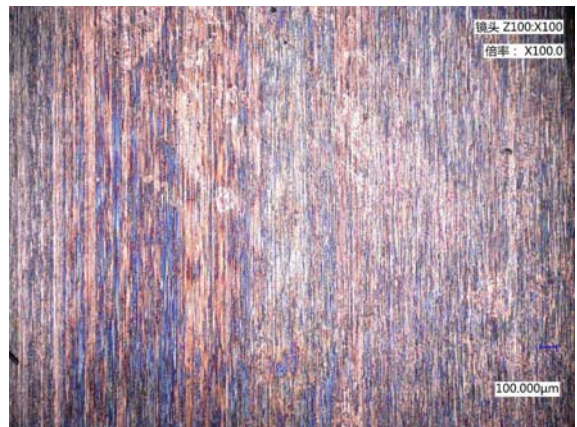


图 22 10%水、20%氢气基础油摩擦磨损试验后标准试验块的微观结构图

摩擦磨损试验后标准试验块的平均磨痕宽度如表 2 所示。

表 2 摩擦磨损实验的标准实验块平均磨痕宽度

乳化机油中水与氢气含量	平均磨痕宽度/ μm
5%水、10%氢气	877.815
10%水、5%氢气	699.386
10%水、20%氢气	863.407

实验参数的水油比例同为 10%，氢气体积不同时，试验的摩擦系数可由图 23 所示。

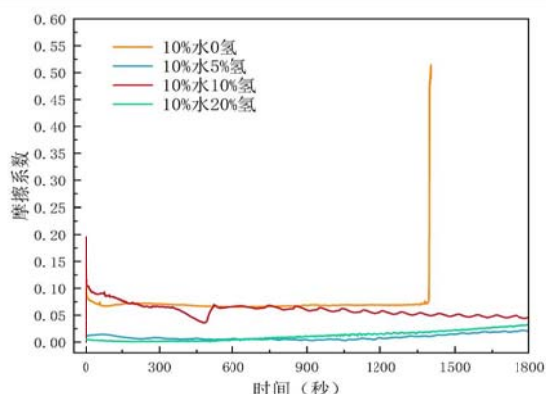


图 23 水油比例相同、氢气体积不同时摩擦系数图

实验参数的氢气体积相同，水油比例不同时，试验的摩擦系数可由图 24 所示。

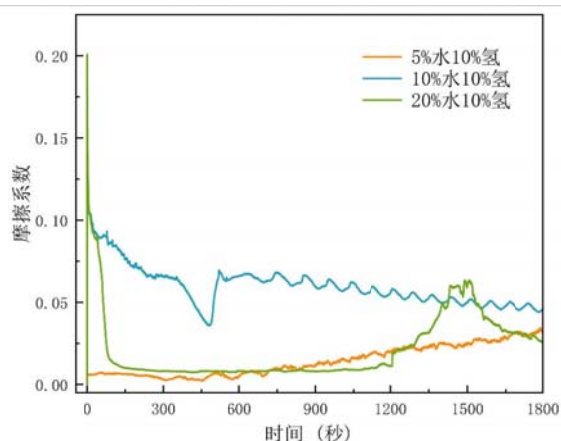


图 24 氢气体积相同、水油比例不同时摩擦系数图

验证基础油摩擦磨损实验、基础油加水的乳化液摩擦磨损试验、基础油加水与氢气的乳化液摩擦磨损实验的摩擦系数随时间的关系如图 25 所示。

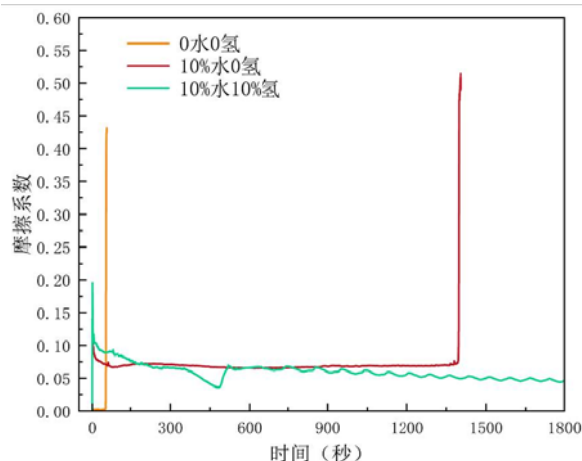


图 25 基础油中是否加水与氢气的摩擦系数图

由以上实验可以初步证明溶氢乳化机油相对于未加氢气的乳化机油有较为明显的减磨减损的作用。设想将乳化机油敞口放置三天以使其中氢气逸出机油时，再对乳化机油进行摩擦磨损试验，测量摩擦副的磨损量，若氢气能逸出机油时，磨损量增大，则能验证溶氢乳化机油中的氢气在摩擦磨损实验中发挥减磨减损的作用。将 10%水、5%氢气的乳化机油敞口放置三天后，其实物图如图 26 所示，氢气泡较丰富，因为未对乳化机油抽真空，氢气泡难以逸出乳化机油中。相对于乳化机油实验后立即对机油油样进行摩擦磨损实验，其摩擦磨损试验后标准环块如图 27 所示，微观结构如图 28-29，摩擦系数随时间的变化如图 30。放置三天后的乳化机油的摩擦系数相较于立刻摩擦磨损实验的乳化机油的摩擦系数略大，平均磨痕宽度为 $761.823\ \mu\text{m}$ 但均无发生粘着磨损，可以得知静置三天的乳化机油和立刻进行摩擦磨损试验的乳化机油均进行摩擦磨损试验时无较大差异。

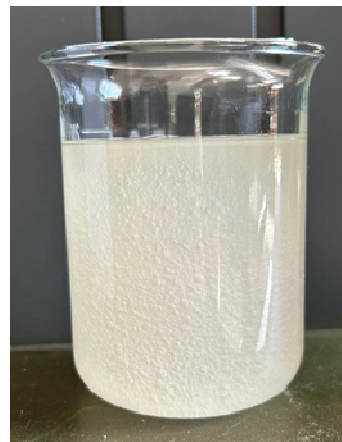


图 26 放置三天后的乳化机油

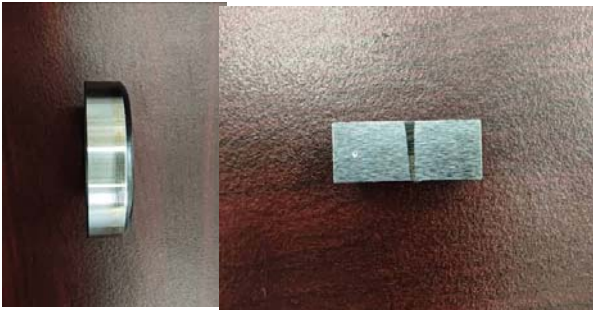


图 27 10%水、5%氢气乳化机油放置三天后摩擦试验环块图

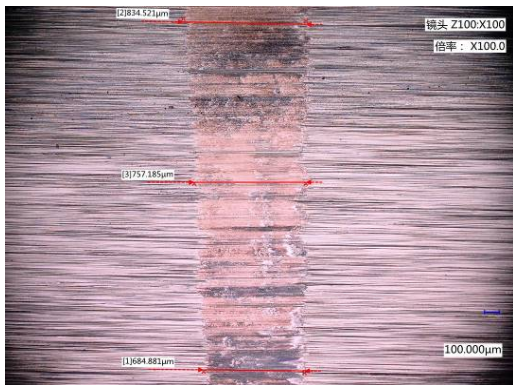


图 28 10%水、5%氢气基础油放置三天后摩擦磨损试验标准试验块微观结构图



图 29 10%水、5%氢气基础油放置三天后摩擦磨损试验标准试验环微观结构图

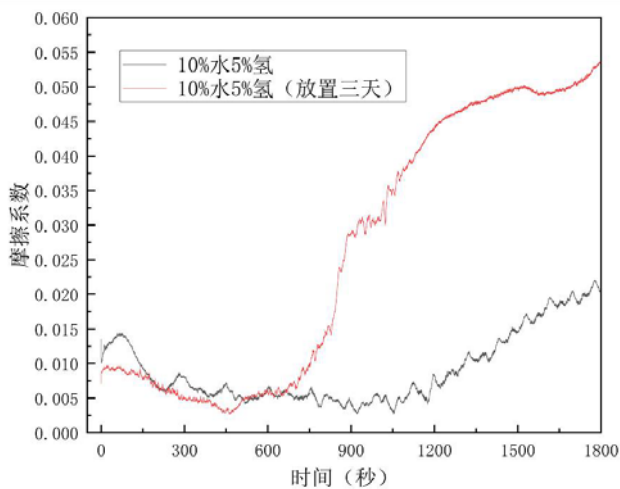


图 30 乳化机油是否敞口放置三天摩擦系数对比图

由摩擦试验及相关实验结果可知：10%水、5%氢气乳化机油进行摩擦磨损试验后平均磨痕宽度最小，为 $699.386 \mu\text{m}$ ，而对基础油和 10%水、0%氢气的乳化机油进行摩擦磨损试验后均发生严重粘着磨损；水油比例为 10%时，未加氢气的乳化机油摩擦磨损试验在 23 分钟时发生严重粘着磨损，10%氢气浓度的乳化机油摩擦磨损试验中摩擦系数整体较高，约为 0.06；5%氢气浓度的乳化机油摩擦磨损试验中摩擦系数整体最小，约为 0.03；氢气浓度为 10%时，水油比例为 10%的乳化机油摩擦磨损试验中摩擦系数整体较高，为 0.06；水油比例为 5%的乳化机油摩擦磨损试验中摩擦系数整体较小，为 0.04；通过各乳化机油的摩擦磨损实验后摩擦副的磨损情况和摩擦曲线对比，仅 5%的氢气浓度混合机油后，该溶氢乳化机油相对于基础油和未加氢气的乳化机油都具有较为明显的减磨减损的作用；将乳化机油敞口放置三天后，对该乳化机油进行摩擦磨损试验，测量摩擦副的磨损量未明显增加。氢气未能逸出机油，因此未能直接验证溶氢乳化机油中的氢气在摩擦磨损实验中发挥减磨减损的作用。

3 磨痕三维形貌测定

磨痕三维形貌测定步骤：首先将被测工件从摩擦磨损机上取下，用酒精擦拭其表面，祛除其表面污垢后放进显微镜镜下，将焦距对准磨痕处，对焦后拍照，并形成三维形貌图，记录下数据，取其平均值。

表 3 各组乳化机油摩擦磨损实验中的平均磨痕深度

水、氢气与机油反应比例	平均磨痕深度/ μm
5%水 10%氢气	23.96
10%水 0%氢气	56.19
10%水 5%氢气	8.71
10%水 20%氢气	21.38
10%水 5%氢气三天后摩擦磨损实验	15.93

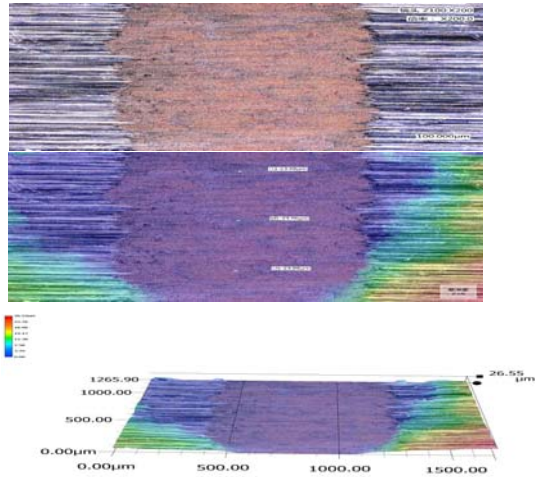


图 31 5%水、10%氢气混合三维形貌

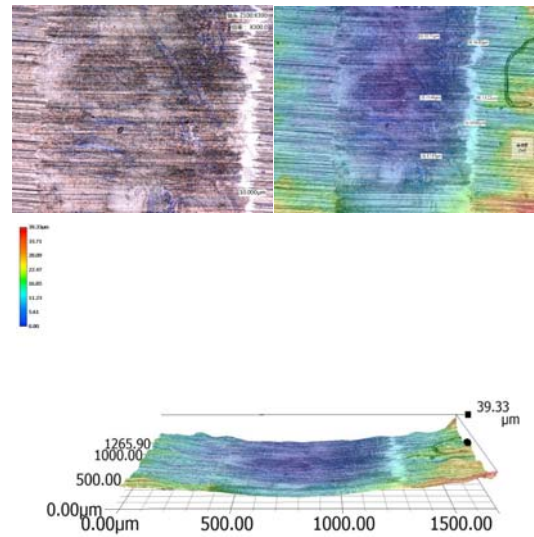


图 34 10%水、20%氢气混合三维形貌

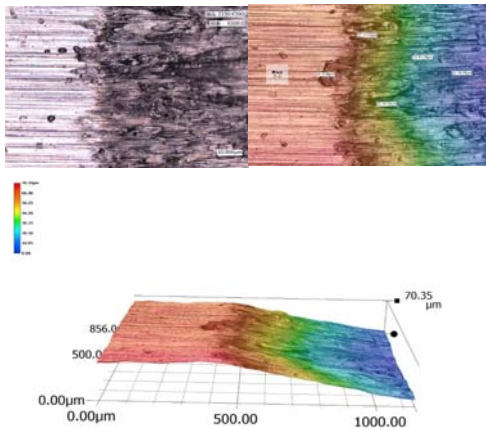


图 32 10%水、0 氢气混合三维形貌

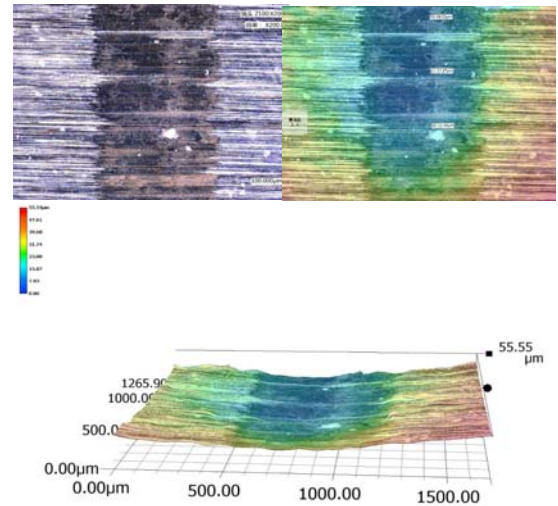


图 35 5%氢气、10%水混合三日三维形貌

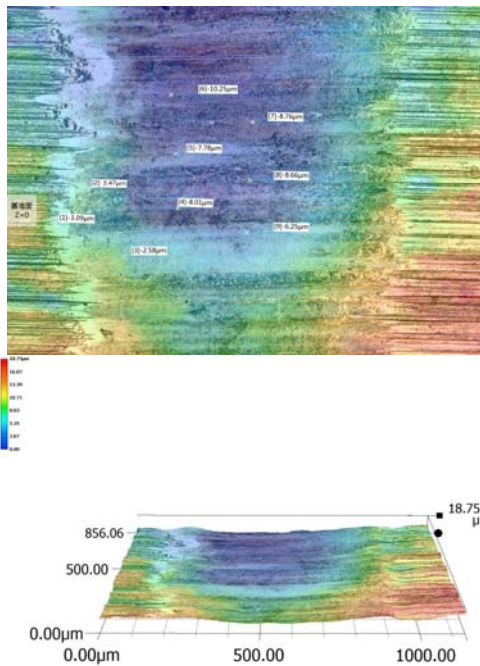


图 33 10%水、5%氢气混合三维形貌

由各组摩擦磨损后三维形貌的特征图可知：10%水、0%氢气乳化机油进行摩擦磨损试验后平均磨痕深度跨越最大，测量最深处为 $-56.19\ \mu\text{m}$ ，并且磨痕并不均匀，这是由于其对基础油和10%水、0%氢气的乳化机油进行摩擦磨损试验后均发生严重粘着磨损；10%水、20%氢气乳化机油进行摩擦磨损实验后的磨痕相对来说宽度更加均匀，但并不集中，深度跨越相对较小，测量最深处为 $-23.71\ \mu\text{m}$ ；5%水、10%氢气乳化机油进行摩擦磨损实验后的磨痕相对来说宽度更加均匀，同时较为集中，深度跨越相对较小，测量最深处为 $-23.96\ \mu\text{m}$ ；10%水、5%氢气乳化机油进行摩擦磨损实验后的磨痕相对来说深度跨越最小，测量最深处为 $-10.25\ \mu\text{m}$ ；将10%水、5%氢气乳化机油放置3天后进行摩擦磨损实验后的磨痕相对来说效果变差，磨痕出现断裂效果，深

度跨域也变大，测量最深处为-18.23 微米。

5 结论

(1)酯类基础油溶氢乳化后相对于未加氢气的乳化基础油有较为明显的减磨减损作用。

(2)溶氢乳化机油敞口放置后，摩擦副磨损量未明显增加。