

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.04.005

## Q390E 钢表面锰系复合磷化膜在中高温环境中的耐磨性能

张思婉<sup>1\*</sup>, 张聪正<sup>2</sup>

(1. 郑州铁路职业技术学院, 河南 郑州 450002; 2. 南阳师范学院, 河南 南阳 473000)

**摘要:** 采用浸渍法在 Q390E 钢表面制备掺杂自润滑聚四氟乙烯颗粒的锰系复合磷化膜, 并借助扫描电镜、摩擦磨损试验机和超景深三维显微系统研究锰系复合磷化膜在中高温环境中的耐磨性能。结果表明: 锰系复合磷化膜完全覆盖 Q390E 钢且具有良好的致密性, 其晶粒表面及晶粒间隙处附着和填充许多 PTFE 颗粒。随着环境温度从 150 °C 升至 300 °C, 锰系复合磷化膜表面磨损程度加重, 平均摩擦系数从 0.50 增至 0.55, 磨痕开口处宽度从 210 μm 增至 390 μm, 磨痕最大深度从 4.2 μm 增至 6.9 μm, 磨痕截面面积相应的从 415 μm<sup>2</sup> 增至 1 340 μm<sup>2</sup>。但处在相同环境中, 锰系复合磷化膜的耐磨性能明显好于 Q390E 钢。锰系复合磷化膜中掺杂许多 PTFE 颗粒呈分散状态, PTFE 颗粒转移到摩擦界面能有效发挥减摩作用, 减轻锰系复合磷化膜表面磨损程度, 因而锰系复合磷化膜在中高温环境中表现出良好的耐磨性能。

**关键词:** 锰系复合磷化膜; 聚四氟乙烯颗粒; Q390E 钢; 耐磨性能; 中高温环境

**中图分类号:** TQ153

**文献标识码:** A

## Wear resistance of manganese composite phosphating film prepared on Q390E steel in medium and high temperature environment

Zhang Siwan<sup>1\*</sup>, Zhang Congzheng<sup>2</sup>

(1. Zhengzhou Railway Vocational Technical College, Zhengzhou 450002, China;

2. Nanyang Normal University, Nanyang 473000, China)

**Abstract:** The manganese composite phosphating film doped with self-lubricating polytetrafluoroethylene particles was prepared on the surface of Q390E steel by dipping method, and the wear resistance of manganese composite phosphating film in medium and high temperature environment was studied by means of scanning electron microscopy, friction and wear testing machine and digital microscopy. The results show that the manganese composite phosphating film covers Q390E steel completely and has good compactness, and many PTFE particles are attached on the grain surface and fill the grain gaps. As the ambient temperature rises from 150 to 300 °C, the surface wear of manganese composite phosphating film is aggravated and the average friction coefficient increases from 0.50 to 0.55. Besides, the opening width of the wear mark increases from 210 to 390 μm; the maximum depth of the wear mark increases from 4.2 to 6.9 μm and the cross-section area of the wear mark increases from 415 to 1 340 μm<sup>2</sup> correspondingly. However, the wear resistance of manganese composite phosphating film is obviously

收稿日期: 2024-08-05

修回日期: 2024-09-03

通信作者: 张思婉(1983—), 硕士, 副教授, email: annable\_990@126.com

基金项目: 河南省科技厅重点研发与推广专项项目(192102210162)

引用信息: 张思婉, 张聪正. Q390E 钢表面锰系复合磷化膜在中高温环境中的耐磨性能[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 26-32.

Zhang Siwan, Zhang Congzheng. Wear resistance of manganese composite phosphating film prepared on Q390E steel in medium and high temperature environment[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 26-32.

better than that of Q390E steel in the same environment. Many PTFE particles are doped in manganese composite phosphating film in dispersed state, and the transfer of PTFE particles to the friction interface can effectively play the anti-friction role and reduce the wear degree of manganese composite phosphating film, so the manganese composite phosphating film shows good wear resistance in middle and high temperature environment.

**Keywords:** manganese composite phosphating film; polytetrafluoroethylene particles; Q390E steel; wear resistance; medium and high temperature environment

锰系磷化膜具有高附着强度、良好的热稳定性和耐磨性能, 可以用作功能性膜层起到减小摩擦作用, 从而有效保护基体<sup>[1-4]</sup>。然而, 随着现代工业发展, 复杂工况条件对功能性膜层的性能(包括耐磨性能)要求不断提高。为了适应复杂工况条件, 国内外从事相关研究的学者尝试将硬质颗粒或具有自润滑特性的颗粒引入锰系磷化膜中以进一步提高其耐磨性能。Noh等<sup>[5]</sup>将 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒引入锰系磷化膜中获得锰系复合磷化膜, 研究发现, 锰系复合磷化膜的硬度较常规锰系磷化膜提高约200 HV, 并且表现出更好的耐磨性能。赵利民等<sup>[6]</sup>将PTFE颗粒引入锰系磷化膜中, 获得硬度达到310.4 HV并且摩擦系数低于0.4的锰系复合磷化膜, 能提供更好的抗磨损作用从而有效保护基体。袁强等<sup>[7]</sup>也将PTFE颗粒引入锰系磷化膜中获得锰系复合磷化膜, 研究发现, 在相同工况条件下锰系复合磷化膜表面磨损程度较轻, 其耐磨性能好于常规锰系磷化膜。

综上所述, 引入硬质颗粒或具有自润滑特性的颗粒是进一步提高锰系磷化膜耐磨性能的有效途径。但现有的结论都是在室温环境中进行研究得到, 考虑到锰系复合磷化膜会应用于中高温环境中, 因此有必要继续开展研究以验证和补充相关结论。本文采用浸渍法在Q390E钢表面制备掺杂自润滑聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, 简称为PTFE)颗粒的锰系复合磷化膜, 并研究锰系复合磷化膜在中高温环境中的耐磨性能, 同时探讨锰系复合磷化膜在不同环境中的磨损机理。

## 1 实 验

### 1.1 Q390E 钢预处理

裁切样件, 样件长×宽×厚为30 mm×13 mm×2 mm, 材质为Q390E钢。先使用1500#砂纸打磨直至表面平滑, 随后将试样放入盛有无水乙醇的容器中, 超声波振荡5 min。取出试样再放入5 vol.%的稀盐酸中, 静置1 min后使用清水反复冲洗, 吹干后装

进封口袋。

### 1.2 制备锰系复合磷化膜

采用浸渍法在Q390E钢表面制备锰系复合磷化膜, 过程如下:

第一步: 配制磷化液。依次称取5 g硝酸锰、18 g磷酸二氢锰、4 g磷酸、0.5 g柠檬酸, 均为分析纯等级的试剂。其中, 硝酸锰和磷酸二氢锰作为主盐, 磷酸主要用于调节磷化液的酸度, 柠檬酸则作为促进剂。选用去离子水作溶剂, 通过持续搅拌使所有试剂完全溶于去离子水中。然后添加15 mL PTFE颗粒的水性分散液, 并继续搅拌使PTFE颗粒分散。最后补加适量去离子水定容, 配制500 mL磷化液。

第二步: 制备锰系复合磷化膜。将盛有磷化液的容器放入配备磁力搅拌功能的水浴锅中, 通过热传导使磷化液温度维持在 $(86\pm0.5)^\circ\text{C}$ 。将试样固定在挂架上, 然后浸入磷化液中静置20 min, 实现在Q390E钢表面制备锰系复合磷化膜。期间持续搅拌(速度为150 r/min)磷化液, 以保证PTFE颗粒处于良好分散状态。

### 1.3 表征与测试

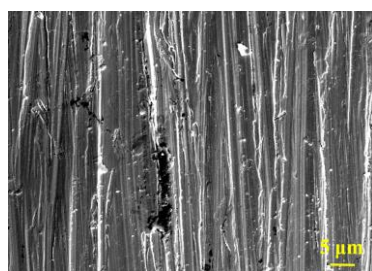
采用日立SU8010型扫描电镜观察锰系复合磷化膜的原始形貌及磨痕微观形貌, 与此同时, 采用牛津X-max50型能谱仪通过面扫描获得锰系复合磷化膜的能谱图及表面元素分布。

采用MMW-5G型摩擦磨损试验机测试锰系复合磷化膜在150 °C和300 °C环境中的耐磨性能, 施加在试样上的载荷为2 N, 载荷方向与试样表面垂直。选用直径5 mm的陶瓷球作为对磨件, 转速为100 r/min, 测试过程中自动记录并显示摩擦系数。测试结束后, 采用基恩士VHX-7000N型超景深三维显微系统观察锰系复合磷化膜的磨痕三维形貌, 并测量磨痕宽度和深度, 进一步计算得到磨痕截面积。结合平均摩擦系数、磨痕三维形貌、磨痕特征参数以及微观形貌, 分析锰系复合磷化膜在中高温环境中的耐磨性能。

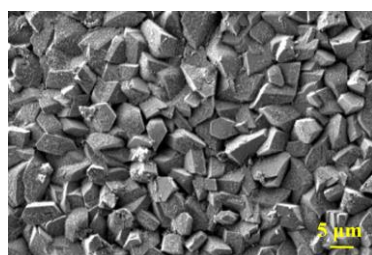
## 2 结果与讨论

### 2.1 锰系复合磷化膜的原始形貌及元素组成

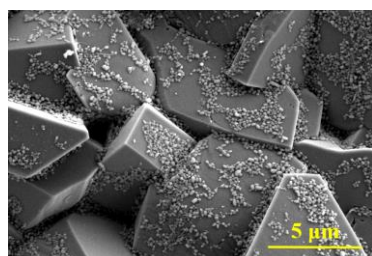
图1(a)为Q390E钢的原始形貌,图1(b)为锰系复合磷化膜的原始形貌。从图1(a)看出,Q390E钢表面存在平行于打磨方向的沟槽和剥落坑,并且附着少量磨屑。从图1(b)看出,锰系复合磷化膜完全覆盖Q390E钢,其形貌特征明显不同。晶粒呈多面体状紧密堆积,锰系复合磷化膜呈现良好的致密性。从局部放大图(图1(c))可见,在锰系复合磷化膜晶粒表面及晶粒间隙处附着和填充许多颗粒。根据图2得知锰系复合磷化膜主要由Mn、P、O、C和F元素组成,由于F元素只可能来源于添加到磷化液中的PTFE颗粒,由此推断附着在锰系复合磷化膜晶粒表面并填充晶粒间隙的是PTFE颗粒。



(a) Q390E 钢



(b) 锰系复合磷化膜



(c) 锰系复合磷化膜局部放大图

图1 Q390E 钢和锰系复合磷化膜的原始形貌

Fig.1 Original morphology of Q390E steel and manganese composite phosphating film

图3为锰系复合磷化膜表面元素分布。结合图3(a)和3(c)看出,Mn和O元素分布密集,表明锰系复合磷化膜中这两种元素的含量较高。结合图3(d)和

3(e)看出,C和F元素呈稀疏分布,表明锰系复合磷化膜中这两种元素的含量较低。但C和F元素均未出现明显聚集现象,可以证实PTFE颗粒呈分散状态附着在锰系复合磷化膜晶粒表面并填充晶粒间隙。

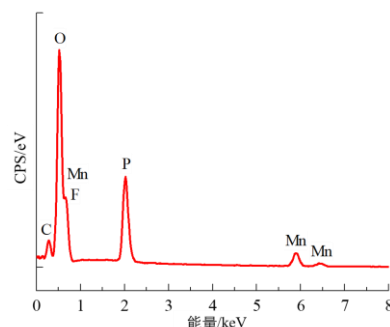
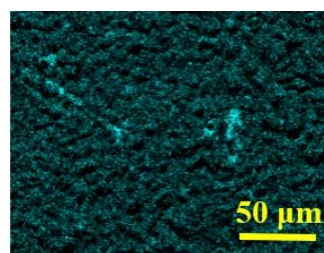
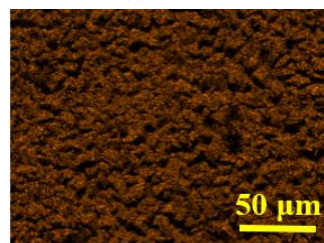


图2 锰系复合磷化膜的能谱图

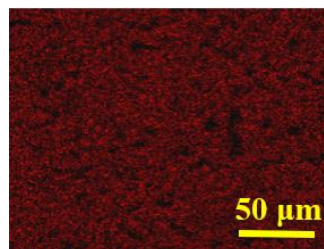
Fig.2 Energy spectrum of manganese composite phosphating film



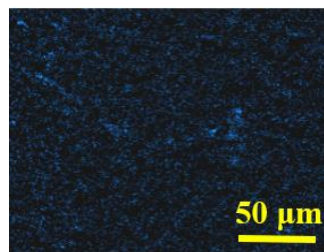
(a) Mn 元素



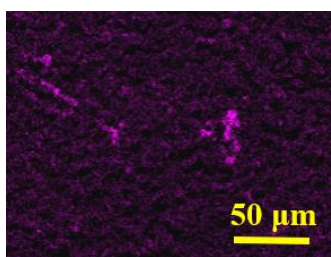
(b) O 元素



(c) P 元素



(d) C 元素



(e) F 元素

图 3 锰系复合磷化膜表面元素分布

Fig.3 Distribution of elements on the surface of manganese composite phosphating film

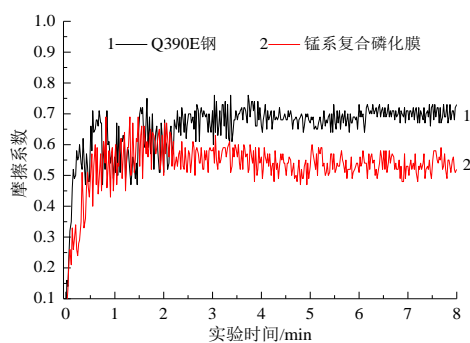
## 2.2 锰系复合磷化膜在中高温环境中的耐磨性能

### 2.2.1 摩擦系数

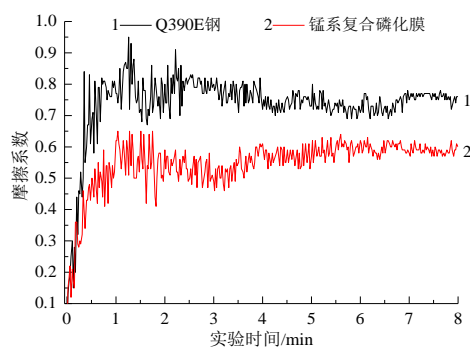
在 150 °C 中温环境中进行摩擦实验, 获得 Q390E 钢和锰系复合磷化膜的摩擦系数曲线如图 4(a) 所示。实验初期, Q390E 钢和锰系复合磷化膜的摩擦系数都呈现波动性变化。这是由于 Q390E 钢和锰系复合磷化膜表面存在不同程度的微凸起, 实验初期对磨件与 Q390E 钢或锰系复合磷化膜的接触面积较小, 导致内应力大<sup>[8-9]</sup>, 产生形态不规则的磨粒转移到摩擦界面, 可能对 Q390E 钢或锰系复合磷化膜表面造成不均匀磨损, 因而它们的摩擦系数都呈现波动性变化。随着实验时间延长, Q390E 钢和锰系复合磷化膜的摩擦系数都趋于稳定, 分别稳定在 0.70、0.50 左右。这是由于 Q390E 钢或锰系复合磷化膜表面的微凸起被磨平, 与对磨件接触面积增大, 逐渐发生较均匀磨损, 因而摩擦系数趋于稳定。

在 300 °C 高温环境中进行摩擦实验, 获得 Q390E 钢和锰系复合磷化膜的摩擦系数曲线如图 4(b) 所示。实验初期, Q390E 钢和锰系复合磷化膜的摩擦系数同样呈现波动性变化。随着实验时间延长, Q390E 钢和锰系复合磷化膜的摩擦系数同样趋于稳定。然而, 随着环境温度从 150 °C 升至 300 °C, Q390E 钢和锰系复合磷化膜的平均摩擦系数都增大。出现该现象可能是高温软化效应造成 Q390E 钢和锰系复合磷化膜表面磨损程度加重, 耐磨性能下降<sup>[10]</sup>。但与 Q390E 钢相比, 锰系复合磷化膜的平均摩擦系数较低。例如, 当环境温度为 300 °C, 锰系复合磷化膜的平均摩擦系数约为 0.55, 明显低于 Q390E 钢的平均摩擦系数 0.74。研究证实, PTFE 具有优异的自润滑性能, 凭借非粘性、极低的摩擦系数和表面能有效发挥减摩作用, 并且能在高温环境中保持良好的稳定性<sup>[11-13]</sup>。摩擦实验过程中伴随着剥落现象形成磨屑, 附着在锰系复合磷化膜晶粒表

面并填充晶粒间隙处的 PTFE 颗粒逐渐显露, 受挤压和剪切共同作用使越来越多 PTFE 颗粒转移到摩擦界面, 通过形成固体润滑膜阻止对磨件与锰系复合磷化膜直接接触, 从而减轻锰系复合磷化膜表面磨损程度。因此, 锰系复合磷化膜在中高温环境中表现出良好的耐磨性能。



(a) 150 °C



(b) 300 °C

图 4 Q390E 钢和锰系复合磷化膜在不同温度环境中的摩擦系数曲线

Fig.4 Friction coefficient curves of Q390E steel and manganese composite phosphating film in different temperature environment

### 2.2.2 磨痕三维形貌及磨痕特征参数

在 150 °C 中温环境中进行摩擦实验后, Q390E 钢和锰系复合磷化膜的磨痕三维形貌如图 5 所示, Q390E 钢和锰系复合磷化膜的磨痕截面轮廓如图 6 所示。结合图 5 和图 6 看出, Q390E 钢和锰系复合磷化膜的磨痕边界清晰并且都呈现近似 “U 型” 轮廓, 表明两者的磨损特征相同 (均为磨粒磨损), 与从事相关研究的学者得到的实验结果吻合<sup>[14-15]</sup>。然而, Q390E 钢和锰系复合磷化膜的磨痕开口处宽度及磨痕最大深度存在明显差异。由表 1 得知, Q390E 钢的磨痕开口处宽度约为 600 μm, 而锰系复合磷化膜的磨痕开口处宽度不到 250 μm。Q390E 钢的磨痕最大深度超过 7 μm, 而锰系复合磷化膜的磨痕最大



深度仅为4  $\mu\text{m}$ 。在相同实验条件下, Q390E钢的磨痕截面面积超过2 600  $\mu\text{m}^2$ , 而锰系复合磷化膜的磨痕截面面积不到420  $\mu\text{m}^2$ 。通过比较磨痕开口处宽度、磨痕最大深度以及磨损体积得知, 锰系复合磷化膜在中温环境中的耐磨性能明显好于Q390E钢。

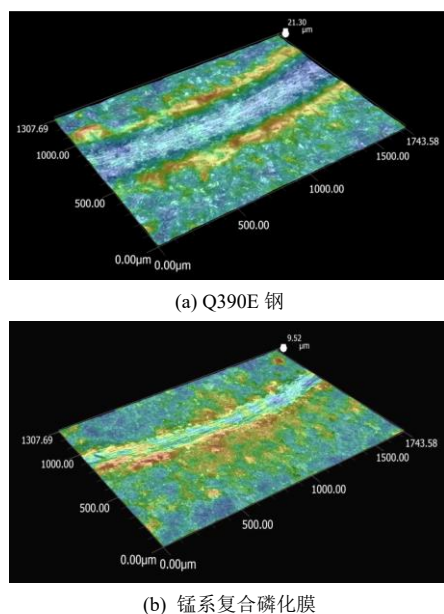


图 5 Q390E 钢和锰系复合磷化膜的磨痕三维形貌 (150 °C)

Fig.5 Three-dimensional morphology of wear mark on Q390E steel and manganese composite phosphating film (150 °C)

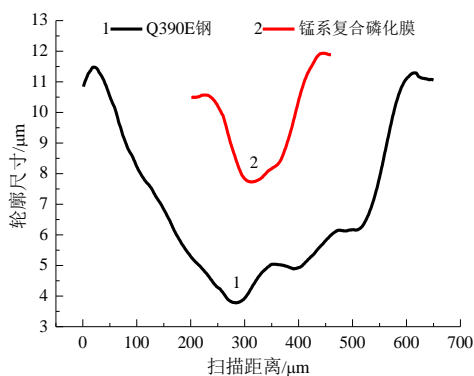


图 6 Q390E 钢和锰系复合磷化膜的磨痕截面轮廓(150 °C)

Fig.6 Cross-section profile of wear mark on Q390E steel and manganese composite phosphating film (150 °C)

在300 °C高温环境中进行摩擦实验后, Q390E钢和锰系复合磷化膜的磨痕三维形貌如图7所示, Q390E钢和锰系复合磷化膜的磨痕截面轮廓如图8所示。结合图7和图8看出, Q390E钢和锰系复合磷化膜的磨痕边界同样清晰并且仍然呈现近似“U

型”轮廓, 但锰系复合磷化膜的磨痕开口处宽度及磨痕最大深度明显小于Q390E钢, 磨痕截面面积仅为Q390E钢的1/5左右, 如表2所示, 这表明锰系复合磷化膜在高温环境中同样表现出良好的耐磨性能。由于锰系复合磷化膜的晶粒表面及晶粒间隙处附着和填充许多PTFE颗粒并且呈分散状态, 在摩擦实验过程中, 伴随着剥落过程转移到摩擦界面的PTFE颗粒逐渐形成固体润滑膜<sup>[16-17]</sup>, 有效减轻对磨件对锰系复合磷化膜造成的磨损程度, 因而锰系复合磷化膜表面形成的磨痕较窄且较浅。在高温环境中, Q390E钢和锰系复合磷化膜都会发生软化现象, 导致表面磨损程度加重。但对锰系复合磷化膜而言, 伴随着剥落过程转移到摩擦界面的PTFE颗粒仍然能起到减摩作用, 因而锰系复合磷化膜在高温环境中同样表现出良好的耐磨性能, 明显好于Q390E钢。

表 1 Q390E 钢和锰系复合磷化膜的磨痕特征参数 (150 °C)

Tab.1 Characteristic parameters of wear mark on Q390E steel and manganese composite phosphating film (150 °C)

试样	磨痕开口处宽度/ $\mu\text{m}$	磨痕最大深度/ $\mu\text{m}$	磨痕截面面积/ $\mu\text{m}^2$
Q390E 钢	590	7.7	2 670
锰系复合磷化膜	210	4.2	415

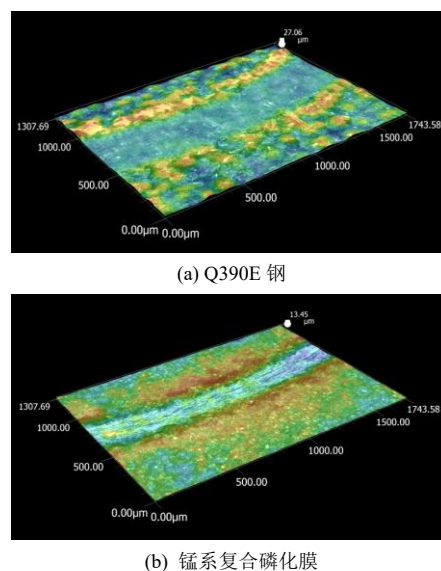


图 7 Q390E 钢和锰系复合磷化膜的磨痕三维形貌 (300 °C)

Fig.7 Three-dimensional morphology of wear mark on Q390E steel and manganese composite phosphating film (300 °C)

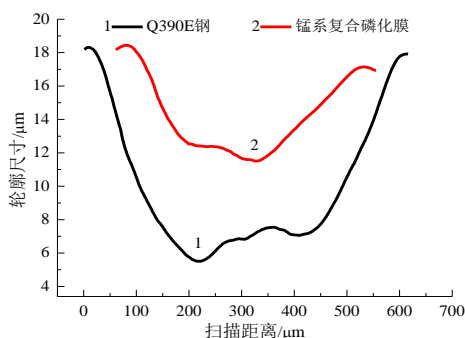


图 8 Q390E 钢和锰系复合磷化膜的磨痕截面轮廓(300 °C)

Fig.8 Cross-section profile of wear mark on Q390E steel and manganese composite phosphating film (300 °C)

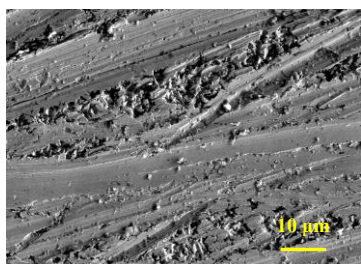
表 2 Q390E 钢和锰系复合磷化膜的磨痕特征参数  
(300 °C)

Tab.2 Characteristic parameters of wear mark  
on Q390E steel and manganese composite  
phosphating film (300 °C)

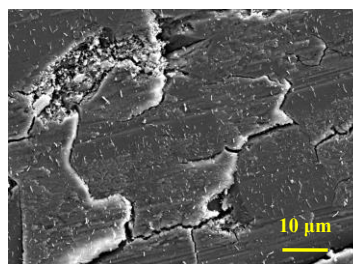
试样	磨痕开口处 宽度/μm	磨痕最大 深度/μm	磨痕截面 面积/μm <sup>2</sup>
Q390E 钢	595	12.8	6 270
锰系复合磷化膜	390	6.9	1 340

### 2.2.3 磨痕微观形貌

在 150 °C 中温环境中进行摩擦实验后, Q390E 钢的磨痕微观形貌如图 9(a) 所示, 锰系复合磷化膜的磨痕微观形貌如图 9(b) 所示。从图 9(a) 看出, Q390E 钢表面存在沿着对磨件滑动方向的沟槽, 多道微裂纹以及较多形态不规则的坑洞。同时还存在黏连状的磨屑, 主要分布在沟槽区域及坑洞周围。从图 9(b) 看出, 锰系复合磷化膜表面也存在沿着对磨件滑动方向的沟槽, 微裂纹以及形态不规则的坑洞。但与 Q390E 钢相比, 锰系复合磷化膜的磨痕较浅且平整, 未附着黏连状磨屑。结合图 9(a) 和图 9(b) 推断, Q390E 钢和锰系复合磷化膜在中温环境中的磨损机制均为磨粒磨损<sup>[18-20]</sup>, 但锰系复合磷化膜表面磨损程度较轻, 表现出良好的耐磨性能。



(a) Q390E 钢

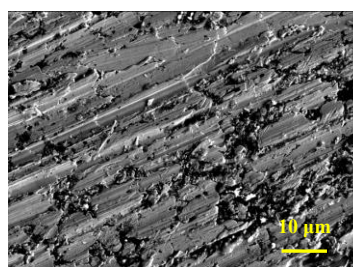


(b) 锰系复合磷化膜

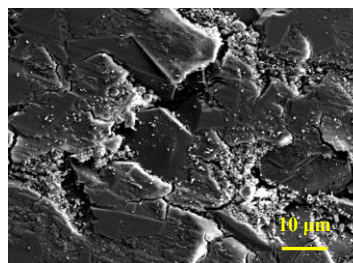
图 9 Q390E 钢和锰系复合磷化膜的磨痕微观形貌  
(150 °C)

Fig.9 Micro-morphology of wear mark on Q390E steel and manganese composite phosphating film (150 °C)

在 300 °C 高温环境中进行摩擦实验后, Q390E 钢的磨痕微观形貌如图 10(a) 所示, 锰系复合磷化膜的磨痕微观形貌如图 10(b) 所示。从图 10(a) 看出, Q390E 钢表面存在更深的沟槽、更多坑洞和大块黏连状磨屑, 微裂纹也增多。从图 10(b) 看出, 锰系复合磷化膜表面微裂纹增多且延伸扩展, 局部磨损程度较严重, 形成大量颗粒状的磨屑, 主要分布在坑洞区域。但与 Q390E 钢相比, 锰系复合磷化膜经过摩擦实验后表面仍较为平整, 磨损机制仍为磨粒磨损。虽然高温软化效应会造成 Q390E 钢和锰系复合磷化膜表面磨损程度加重, 但锰系复合磷化膜在高



(a) Q390E 钢



(b) 锰系复合磷化膜

图 10 Q390E 钢和锰系复合磷化膜的磨痕微观形貌  
(300 °C)

Fig.10 Micro-morphology of wear mark on Q390E steel and manganese composite phosphating film (300 °C)

温环境中仍然表现出良好的耐磨性能,主要归因于附着在锰系复合磷化膜晶粒表面并填充晶粒间隙的PTFE颗粒转移到摩擦界面形成固体润滑膜,起到有效减摩作用,阻止对磨件与锰系复合磷化膜表面直接接触。

### 3 结论

(1) 在Q390E钢表面制备出覆盖完整、致密性良好的锰系复合磷化膜,其中掺杂许多PTFE颗粒呈分散状态。在摩擦实验过程中,PTFE颗粒伴随着剥落现象转移到摩擦界面能有效发挥减摩作用,减轻锰系复合磷化膜表面磨损程度,因而锰系复合磷化膜在中高温环境中表现出良好的耐磨性能。

(2) 随着环境温度从150℃升至300℃,锰系复合磷化膜表面磨损程度加重,平均摩擦系数从0.50增至0.55,磨痕开口处宽度、磨痕最大深度及磨痕截面面积相应的从210 μm增至390 μm、从4.2 μm增至6.9 μm、从415 μm<sup>2</sup>增至1 340 μm<sup>2</sup>。但处在相同环境中,锰系复合磷化膜的耐磨性能明显好于Q390E钢,能起到减磨保护Q390E钢的作用。

### 参考文献

- [1] 关锰, 孟园月, 张春华, 等. 紧固件表面锰系磷化膜的制备及摩擦磨损性能[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(2): 147-152.
- [2] 里新, 郝建军, 李淑梅. 锰系黑色磷化膜的制备及性能研究[J]. 电镀与环保, 2015, 35(2): 24-26.
- [3] Chen X. Effect of manganese phosphating on properties of 45 steel used for gear production[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2022, 17(3): 220326.
- [4] Zhang J, Li H W. Influence of manganese phosphating on wear resistance of steel piston material under boundary lubrication condition[J]. Surface and Coatings Technology, 2016(304): 530-536.
- [5] Noh Y T, Byoun Y M, Kim H Y, et al. Effects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additive on manganese phosphate conversion coating of carbon steel[J]. Materials Science Forum, 2018(932): 81-90.
- [6] 赵利民, 王树凤. 硝酸镧浓度对齿轮钢表面锰系复合磷化膜性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(10): 1-8.
- [7] 袁强, 李志章. 聚四氟乙烯对锰系磷化膜抗磨损性能的影响[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1998(1): 39-44.
- [8] 田昌龄, 蔡海潮, 薛玉君, 等. 沉积功率对 Ce-Ti/MoS<sub>2</sub> 复合涂层摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(8): 197-207.
- [9] 李宝程, 崔洪芝, 宋晓杰, 等. 超高速激光熔覆 Ni625/WC 复合涂层的耐磨性能[J]. 表面技术, 2023, 52(11): 237-247.
- [10] 刘彬, 李晟, 毛玉刚, 等. TA15 钛合金高温摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2023, 52(10): 151-159.
- [11] Xu M K, Li S, Wang T M, et al. Construction of a PTFE-based lubricant film on the surface of Nomex/PTFE fabric to enhance the tribological performance at cryogenic temperatures[J]. Tribology International, 2023 (185): 108552.
- [12] Chen J, Bai Z D, Xu J X, et al. Preparation and tribological properties of MAO-PVA/PTFE self-lubricating composite coating on aluminum alloy surface[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2024(21): 293-305.
- [13] 吴昊, 朱丽娜, 岳文, 等. PTFE 复合涂层的摩擦学性能及疏水性研究现状[J]. 材料导报, 2018, 32(1): 284-288.
- [14] Yu Y Q, Chen X D, Yang L Y, et al. Investigation on fretting wear behavior of 2.25Cr-1Mo tube in water at various temperatures[J]. Wear, 2021(476): 203727.
- [15] Chen X D, Wang L W, Yang L Y, et al. Effects of temperature on the fretting wear behavior of 2.25Cr-1Mo tubes against Gr5C12 rods[J]. Materials, 2020, 13(15): 3388.
- [16] 田雪梅, 乔红斌. PTFE 固体润滑膜研究进展[J]. 机械工程师, 2009(4): 21-23.
- [17] 曹媛. 苛刻环境下 PTFE 基复合材料滑动副摩擦磨损性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [18] 郭伟, 李桐. 紫铜电沉积 Zn-Ni-W 合金镀层的耐腐蚀与机械性能[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(11): 18-26.
- [19] Rajendhran N, Pondicherry K, Huang S, et al. Influence of grit particles characteristics on the abrasive wear micro-mechanisms of NbC-Ni and WC-Co hard materials[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2024(118): 106422.
- [20] 袁伟, 于洁, 郭前建, 等. 初始径向微沟槽对摩擦副磨损性能影响研究[J]. 机械设计与制造, 2021, 364(6): 36-44.