

不同稀土掺杂固体渗铬对 Cr-RE 渗层结构及性能的影响

唐相国^{1,2a,2b}, 代明江^{2a,2b}, 韦春贝^{2a,2b},
匡同春¹, 林松盛^{2a,2b}, 侯惠君^{2a,2b}

(1.华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510640; 2.广东省新材料研究所
a.现代材料表面工程技术国家工程实验室 b.广东省现代表面工程技术重点实验室, 广州 510651)

摘要: **目的** 改善 GCr15 轴承钢的表面性能, 以满足其在重载恶劣工况下服役的要求。**方法** 采用固体包埋法对 GCr15 轴承钢进行渗铬处理, 通过添加不同的稀土氧化物 La_2O_3 、 Y_2O_3 和 CeO_2 , 获得三种 Cr-RE 渗层。利用扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD)、能谱仪 (EDS)、显微维氏硬度计、Rockwell-C 硬度计及球-盘式摩擦磨损试验机, 对 Cr-RE 渗层的表面形貌、截面形貌、物相组成、渗层成分、显微硬度、结合强度和摩擦磨损性能分别进行表征。**结果** 不同稀土元素添加都能在 GCr15 轴承钢表面形成一层致密、连续的稀土改性渗铬层, 其厚度为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 其中 Cr-La 渗层韧性和结合强度最好, 其压痕等级为 HF1。Cr-RE 渗层主要由 Cr_7C_3 、 Cr_2C 和 $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ 等相组成。Cr-RE 渗层能显著提高基体表面硬度, 其中 Cr-Y 渗层表面硬度最大可达 1520 HV。三种 Cr-RE 渗层均有提高耐磨性和减摩作用, 其中 Cr-La 渗层具有最好的摩擦学性能, 其平均摩擦系数为 0.4714, 磨损率为 $4.4806 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 其磨损机理为粘着转移和氧化磨损。**结论** 稀土掺杂渗铬能有效改善渗铬层的韧性和耐磨性, 其中 Cr-La 渗层综合性能最好。

关键词: GCr15 轴承钢; Cr-RE 渗层; 稀土氧化物; 摩擦磨损性能; 固体包埋法

中图分类号: TG156.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)10-0157-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.10.021

Influence of Solid Chromizing Doped with Various Rare Earths on Microstructures and Properties of Cr-RE Coatings Fabricated by Pack Cementation

TANG Xiang-guo^{1,2a,2b}, DAI Ming-jiang^{2a,2b}, WEI Chun-bei^{2a,2b},
KUANG Tong-chun¹, LIN Song-sheng^{2a,2b}, HOU Hui-jun^{2a,2b}

(1.School of Material Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2.a. National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, b.Key Lab of Guangdong for Modern Surface Engineering Technology, Guangdong Institute of New Materials, Guangzhou 510651, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the surface properties of GCr15 bearing steel to meet the service requirements under

收稿日期: 2018-06-07; 修订日期: 2018-07-28

Received: 2018-06-07; Revised: 2018-07-28

基金项目: 广东省科技计划项目 (2017A070702016); 广州市科技计划项目 (201807010027)

Fund: Guangdong Science and Technology Program (2017A070702016), Guangzhou Science and Technology Program (201807010027)

作者简介: 唐相国 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为材料表面工程。

Biography: TANG Xiang-guo (1994—), Male, Master, Research focus: material surface engineering.

通讯作者: 代明江 (1964—), 男, 教授级高工, 主要研究方向为表面工程。邮箱: daimingjiang@tsinghua.org.cn

Corresponding author: DAI Ming-jiang (1964—), Male, Professorate senior engineer, Research focus: surface engineering. E-mail: daiming-jiang@tsinghua.org.cn

severe load conditions. The chromizing treatment was conducted on GCr15 bearing steel surface by pack cementation. Three kinds of Cr-RE chromizing coatings were obtained by adding different rare earth oxides (such as La_2O_3 , Y_2O_3 and CeO_2). The surface and cross-section morphologies, phase composition, chromizing coating composition, microhardness, bond strength and friction and wear properties of the Cr-RE coatings were characterized by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Energy Dispersive Spectrometer (EDS), Micro Vickers tester, Rockwell-C hardness tester and ball-on-disc wear tester. From the results, the addition of any rare earth could form a uniform, continuous and compact rare earth modified chromizing coating with thickness of 10 μm on the surface of GCr15 bearing steel. The Cr-La coating had the best toughness and adhesion, and its indentation grade was HF1. The coatings were mainly composed of Cr_7C_3 , Cr_2C and $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$. The Cr-RE coating significantly increased the surface hardness, and the Cr-Y coating had the highest surface hardness of 1520HV. These three Cr-RE coatings could improve friction and wear resistance. The Cr-La coating showed the best tribological properties with average friction coefficient of 0.4714 and wear rate of $4.4806 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ and the wear mechanism was adhesion transfer and oxidation wear. Chromizing doped with rare earth can improve the toughness and wear resistance of the chromizing layer and Cr-La coating has the best comprehensive performance.

KEY WORDS: GCr15 bearing steel; Cr-RE coatings; rare earth oxide; friction and wear property; pack cementation

高碳铬轴承钢具有优异的综合性能,其在滚动轴承中被广泛使用。由于轴承在实际工况下受重载冲击以及较大的摩擦力,在使用过程中其工作表面和近表面极易发生损伤,从而影响整个系统的正常运行^[1-2]。针对轴承钢表面易损伤,人们研究出许多延长其使用寿命的方法。刘洪喜等人^[3]采用等离子体浸没离子注入对 GCr15 表面进行强化。李忠文^[4]采用钽氮碳多元离子注入改善表面,有效提高了表面硬度,降低了磨损率。王明娥等^[5]采用不同 PVD 技术在 GCr15 上沉积 TiN 涂层, K. Bobzin 等^[6]在 GCr15 上沉积 CrAlN 涂层,也都有效提高了表面耐磨性。但在实际生产应用中,由于离子注入层较薄, PVD 结合强度偏低,在某些方面的应用受到部分限制。对于一些大型工件和结构复杂件,人们更希望通过一种经济、简便的方法来提高轴承钢的表面性能。

固体包埋法渗铬是一种化学热处理方法,钢件通过渗铬不仅可以提高其抗腐蚀和抗高温氧化能力,又可提高其抗磨损性能^[7-9]。有研究表明,林乃明等人^[10-11]在 P110 钢表面制备稀土改性 Cr 涂层,有效改善了渗层厚度和硬度,从而增强了油管钢耐磨性和抗腐蚀能力。邢学刚等人^[12-13]在 304 不锈钢表面制备双层稀土改性渗层,有效提高了其防腐能力。孟君晟等人^[7]在

Ni 基体上渗 Cr,其抗循环氧化性能显著提高,含有稀土氧化物的渗剂性能最好。梁文萍等人^[14-15]采用等离子渗 Cr 对 TC21 钛合金表面改性,其表面耐磨性、抗热震性能均明显增强。因此,有望在 GCr15 轴承钢上进行固体渗铬处理,改善其表面性能。

根据研究表明,粉末渗剂中掺杂稀土元素及其氧化物能降低渗铬温度、加快渗铬速度,改善渗铬层微观组织结构,细化晶粒,从而改善渗铬层韧性及抗疲劳性能^[16-17]。近年来,稀土掺杂渗金属是热门研究课题,但查阅当前文献,其主要集中在研究单一稀土的影响,不同稀土在渗铬层微观结构和性能方面的对比研究还没有受到足够的重视。因此,本文对 GCr15 轴承钢基体进行不同稀土掺杂渗铬处理,研究比较不同稀土对渗铬层组织结构和力学性能的影响。

1 试验

1.1 样品制备

选用 GCr15 轴承钢作为基体,样品尺寸为 $\phi 20 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,其化学成分列于表 1。试样表面经 SiC 砂纸逐级打磨,用金刚石研磨膏研磨抛光至镜面,随后在丙酮中超声清洗 30 min,烘干备用。

表 1 GCr15 轴承钢化学成分
Tab.1 Chemical composition of GCr15 bearing steel

C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	Ni	Cu	Ni+Cu
0.95~1.05	0.15~0.35	0.25~0.45	1.40~1.65	≤0.10	≤0.025	≤0.025	≤0.30	≤0.25	≤0.50

选用固体包埋法对 GCr15 基体进行渗铬处理,图 1 为装置示意图。渗铬剂由高温焙烧 Al_2O_3 、铬粉、 NH_4Cl 、稀土氧化物组成,作为对比,稀土氧化物分别为 La_2O_3 、 Y_2O_3 和 CeO_2 ,其含量均为 15% (质量分数)。将四种粉末按百分比配制,充分混合后放入

烘箱干燥处理。再将 GCr15 基体和干燥渗剂一起放入渗罐中,加盖后用水玻璃和耐火泥混合物密封处理,放入箱式电阻炉中加热,升温至 800 $^{\circ}\text{C}$,保温 6 h,试样出炉直接油淬,即得 Cr-RE 渗层试样。对试样进行超声清洗,去除表面粘着的粉末,以备检测使用。

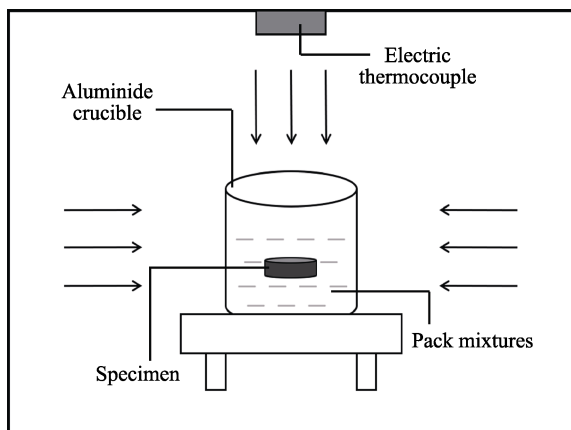


图 1 包埋装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of pack cementation device

1.2 表征及测试

使用 Philips X'Pert Pro MPD 型 X-射线衍射仪 (XRD, Cu 靶) 表征渗层的物相。采用 NOVA NanoSEM430 型场发射扫描电子显微镜 (SEM) 分析渗层的表面形貌和截面形貌, 使用能谱仪 (EDS) 测试分析渗层成分。观察截面形貌前, 将渗层试样沿截面切开, 对截面进行打磨、清洗并抛光, 再用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀。通过 MH-5D 型显微硬度计对渗层的显微硬度进行测试, 加载载荷为 10 g, 保载时间

15 s。使用压痕等级表征渗层的结合强度和韧性。采用 MTS-3000 磨损试验仪测试渗层在常温条件下的摩擦磨损性能, 测试条件为: 对磨球为 Si_3N_4 (直径 4 mm), 摩擦半径为 5 mm, 转速 382 r/min, 载荷 500 g, 加载时间为 120 min。采用 Bruker Dektak XT 三维表面轮廓仪测试磨损面积, 每道磨痕分别测试 5 次, 取平均值, 然后计算磨损率 W :

$$W = \frac{V}{s \cdot L} = \frac{2\pi r S}{2\pi r n \cdot L} = \frac{S}{L \cdot n} \quad (1)$$

式中: V 为磨损体积; s 为滑动距离; r 为旋转半径; S 为磨损面积 (μm^2); L 为法向载荷 (N); n 为旋转摩擦总转数, $n=45\ 840$ 。

2 结果与分析

2.1 渗层表面形貌

图 2 为三种稀土掺杂的 Cr-RE 渗层试样的表面形貌对比。如图 2a 所示, Cr-La 渗层表面形成了不规则的晶体状突起, 突起均匀分散。由图 2b 可知, Cr-Y 渗层表面突起更加光滑且致密。而 Cr-Ce 渗层表面晶粒尺寸较小, 尺寸差异较小, 如图 2c 所示。这与文献研究结果相近^[7]。对于稀土改性渗 Cr 而言, Cr-RE 渗层表面均未发现明显孔洞和裂纹, 渗层结构比较致密。

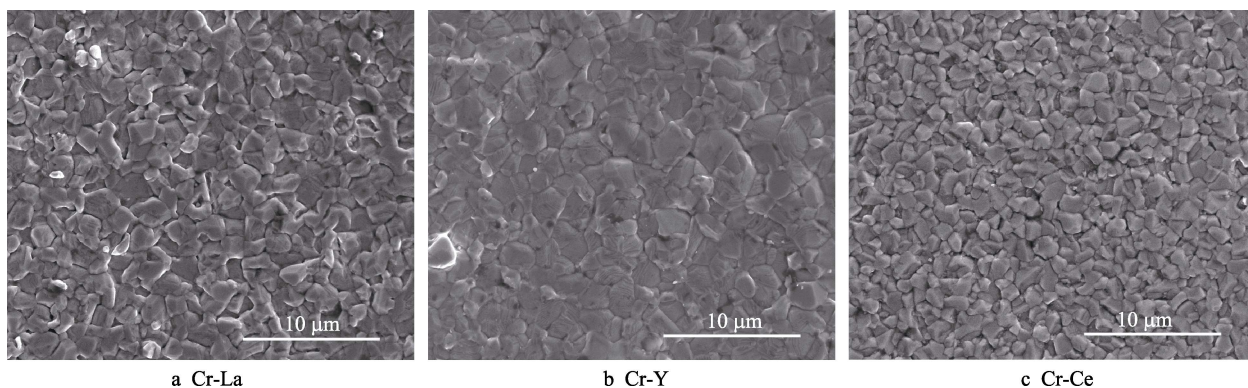


图 2 Cr-RE 渗层的表面形貌

Fig.2 Surface morphologies of Cr-RE coatings

2.2 渗层截面形貌和 EDS 分析

图 3 为三种稀土掺杂的 Cr-RE 渗层的截面形貌和界面线扫描分析结果。如图 3 所示, Cr-RE 渗层均匀、连续、致密, 根据测量结果显示, Cr-La 渗层厚度约为 $9.53\ \mu\text{m}$, Cr-Y 渗层厚度约为 $10.68\ \mu\text{m}$, Cr-Ce 渗层厚度约为 $11.32\ \mu\text{m}$ 。可以看出, 不同稀土对渗铬层厚度有不同影响, 氧化铈的催渗效果最明显, 其次为氧化钇, 氧化镧的催渗速度最慢^[10]。由界面 EDS 分析可知, 三种渗层元素界面分布差别不大, 在表层主要为 Cr 层, 次表层为 Cr 扩散层, 这是因为 Cr 原子含量缓慢降低, 与基体形成了渐变的梯度过渡层, 表

明渗铬过程速率适中, 渗铬层具有均匀致密的组织结构, 各原子不存在聚集或不均匀分布等现象^[18]。图 4 显示了 Cr-La 渗层界面各元素线扫描结果, 根据 La 含量变化图可知, 由表及里, 整个渗铬层稀土元素含量基本稳定, 因此稀土确实渗入了基体中。由于其原子半径较大, 对晶间结构造成了缺陷, 促使各原子渗入且组织结构致密均匀。

2.3 XRD 分析物相结构

图 5 为 Cr-RE 渗层的 X 射线衍射图谱。从图谱可以看出, 添加不同稀土氧化物对 Cr-RE 渗层相结构影响不大, 其物相主要由 Cr_2C 、 Cr_7C_3 和 $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$

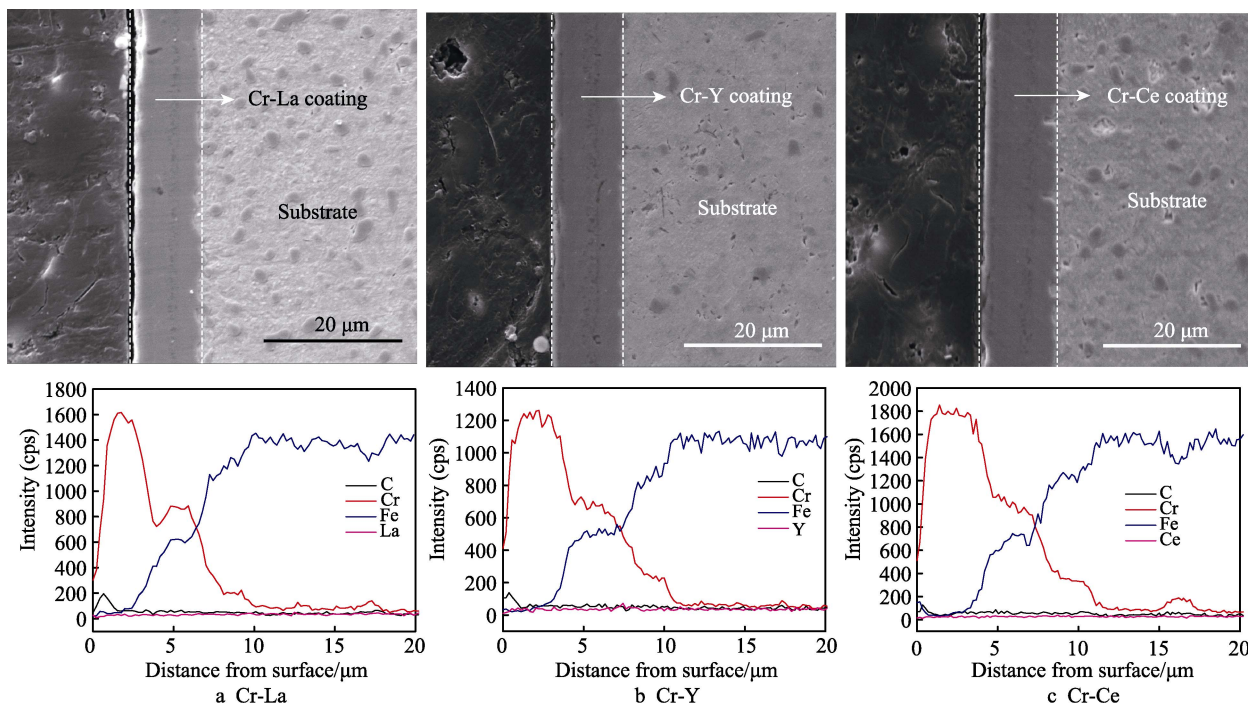


图3 Cr-RE 渗层的截面形貌和界面线扫描分析结果

Fig.3 SEM cross-sectional morphologies and interface line scanning analysis results of the Cr-RE coatings

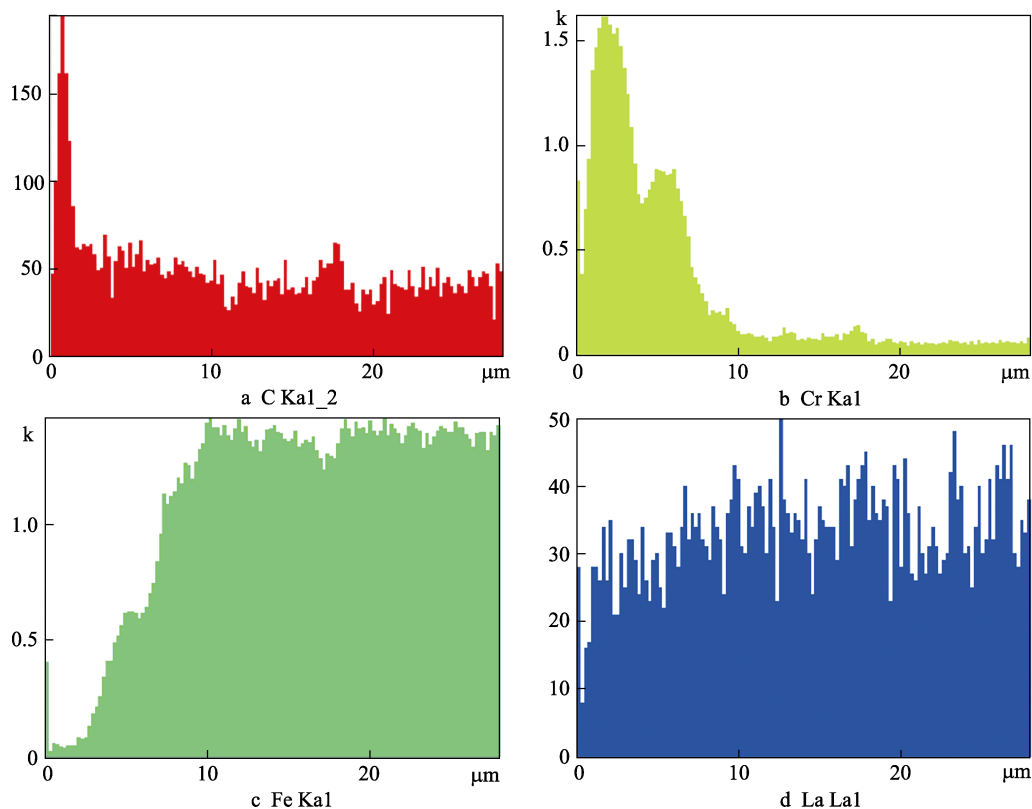


图4 Cr-La 渗层界面各元素线扫描结果

Fig.4 Line scanning analysis results of Cr-La coating interface

等相组成。由于 Cr 与 Fe 的原子半径相近, Cr、Fe 原子相互固溶形成 $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$, 尽管稀土均匀地分布在渗层中, 但由于稀土具有较大的原子半径且含量较低, 难以与 Fe 和 Cr 形成金属间化合物^[12,19]。

2.4 显微硬度及压痕形貌

图6为 Cr-RE 渗层显微梯度硬度。由图6可知, Cr-RE 渗层由于在表面形成了铬碳化物, 其硬度非常高, 极大地提高了表面硬度, 其中 Cr-La 渗层、Cr-Y

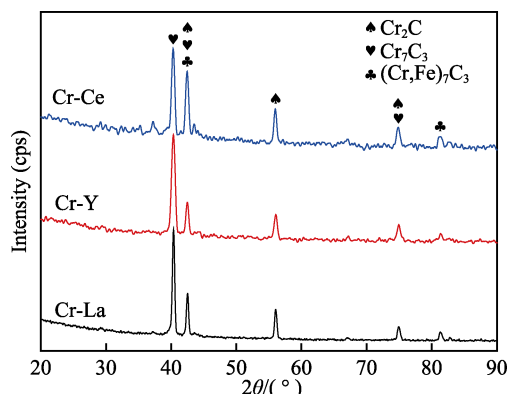


图 5 Cr-RE 渗层 XRD 图谱
Fig.5 XRD patterns of the Cr-RE coatings

渗层、Cr-Ce 渗层表层硬度分别为 1420、1520、1450 HV。从硬度梯度看，其下降趋势较为平缓，均逐渐下降至心部硬度。硬度曲线的变化规律与图 3 线扫描 Cr 含量的变化规律相同。由于表层 Cr 含量最高，铬碳化合物较多，因此表层具有最高硬度。随着 Cr 含量逐渐下降，渗层的硬度以同样的趋势缓慢降低，最后接近淬火基体硬度。

图 7 为 Cr-RE 渗层压痕形貌图。根据德国工程师协会 VDI-3198 洛氏压痕等级标准判断，Cr-La 渗

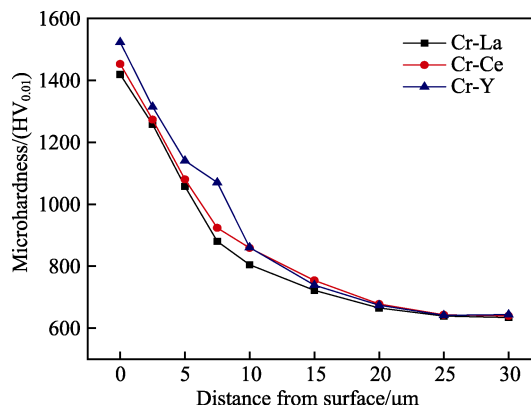


图 6 Cr-RE 渗层显微梯度硬度
Fig.6 Microgradient hardness of Cr-RE coatings

层无剥落，周围仅有细微裂纹，其膜基结合强度为 HF1；Cr-Y 渗层周围有少量剥落，裂纹较为明显，判断其结合力等级为 HF2；Cr-Ce 渗层有轻微剥落，剥落比 Cr-Y 渗层少，裂纹相比氧化钨加深，判断其结合力等级为 HF2。由于渗铬层与基体之间为冶金结合，不存在明显的界面，因而具有良好的结合力。其中，Cr-La 渗层表现出良好的韧性和优良的结合力，这也为渗层良好的抗剥落性能和耐磨损性能提供保证。

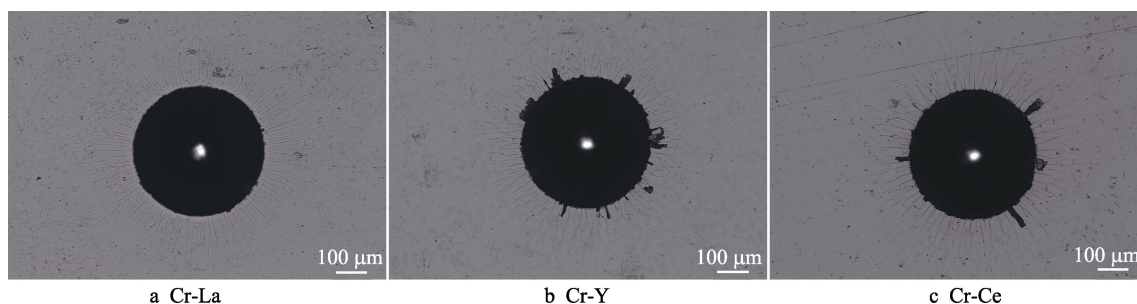


图 7 Cr-RE 渗层压痕形貌
Fig.7 Morphologies of Rockwell indentation of the Cr-RE coatings

2.5 渗铬层的摩擦磨损性能

2.5.1 摩擦系数

图 8 是 GCr15 基体和 Cr-RE 渗层的摩擦系数变化曲线，可以看出，GCr15 基材摩擦系数最高，摩擦系数波动较大，这可能由于磨损较大造成的，其平均摩擦系数为 0.6404。Cr-La 渗层的平均摩擦系数最低，为 0.4714，但其呈现上升趋势及轻微波动情况，这可能是由于摩擦造成的少量微细磨屑粘附在磨痕上面所致。Cr-Y 和 Cr-Ce 渗层的摩擦系数较高，Cr-Y 渗层平均摩擦系数为 0.5829，Cr-Ce 渗层平均摩擦系数为 0.6027。综合来看，Cr-RE 渗层有一定的减摩作用，其中摩擦系数 Cr-La < Cr-Y < Cr-Ce。

2.5.2 磨损率

表 2 为 GCr15 基体与 Cr-RE 渗层磨痕宽度和深度，由此根据式(1)计算出 GCr15 轴承钢基体与 Cr-RE

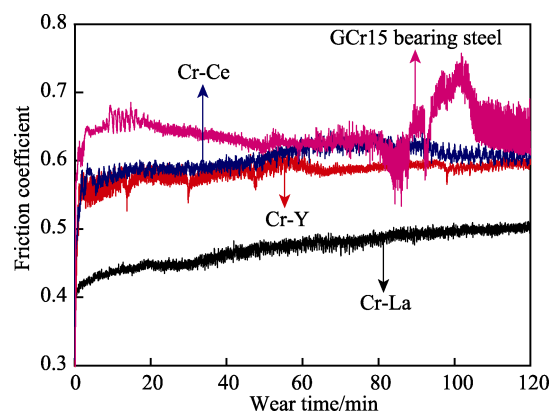


图 8 GCr15 基体与 Cr-RE 渗层摩擦系数
Fig.8 Friction coefficient of GCr15 substrate and Cr-RE coatings

渗层磨损率，如图 9 所示。由图 9 可知，Cr-RE 渗层有效提高了基体的耐磨性，这主要得益于渗铬层表面形成的高硬度碳铬化合物，在摩擦磨损过程中，这些

化合物可以有效地抵御外来磨粒的磨损,磨损时产生微裂纹的裂纹源以及裂纹扩展的路径都受到了极大的限制,从而大大减轻了对渗层的磨损。

表 2 GCr15 基体与 Cr-RE 渗层磨痕宽度和深度

Tab.2 Wear scar width and depth of Cr-RE coatings and GCr15 substrate

	GCr15	Cr-La	Cr-Y	Cr-Ce
Width/ μm	1216	546	655	789
Depth/nm	844	413	525	570

根据 Archard 磨损理论^[20],在摩擦滑动距离和外加载荷相同的情况下,磨损体积与材料表面硬度成反比,与摩擦系数成正比,结合 Cr-RE 渗层显微维氏硬度和摩擦系数分析,磨损率结果与公式(2)吻合。

$$V = Ks \frac{P}{H} \quad (2)$$

式中: V 为磨损体积; P 为外加载荷; s 为滑动距离; H 为材料的表面硬度; K 为摩擦系数。

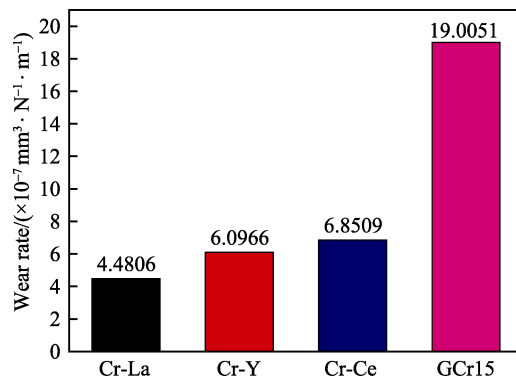


图 9 GCr15 基体与 Cr-RE 渗层磨损率
Fig.9 Wear rate of GCr15 substrate and Cr-RE coatings

2.5.3 磨痕形貌和磨损机理

图 10 为 GCr15 基体与 Cr-RE 渗层磨痕形貌及磨痕局部放大图。由图 10a 可知, GCr15 基体磨痕宽度和深度较大,有点坑、犁沟等磨损特征,这表明 GCr15 基体被破坏严重,这主要是由于 Si_3N_4 球的高硬度造

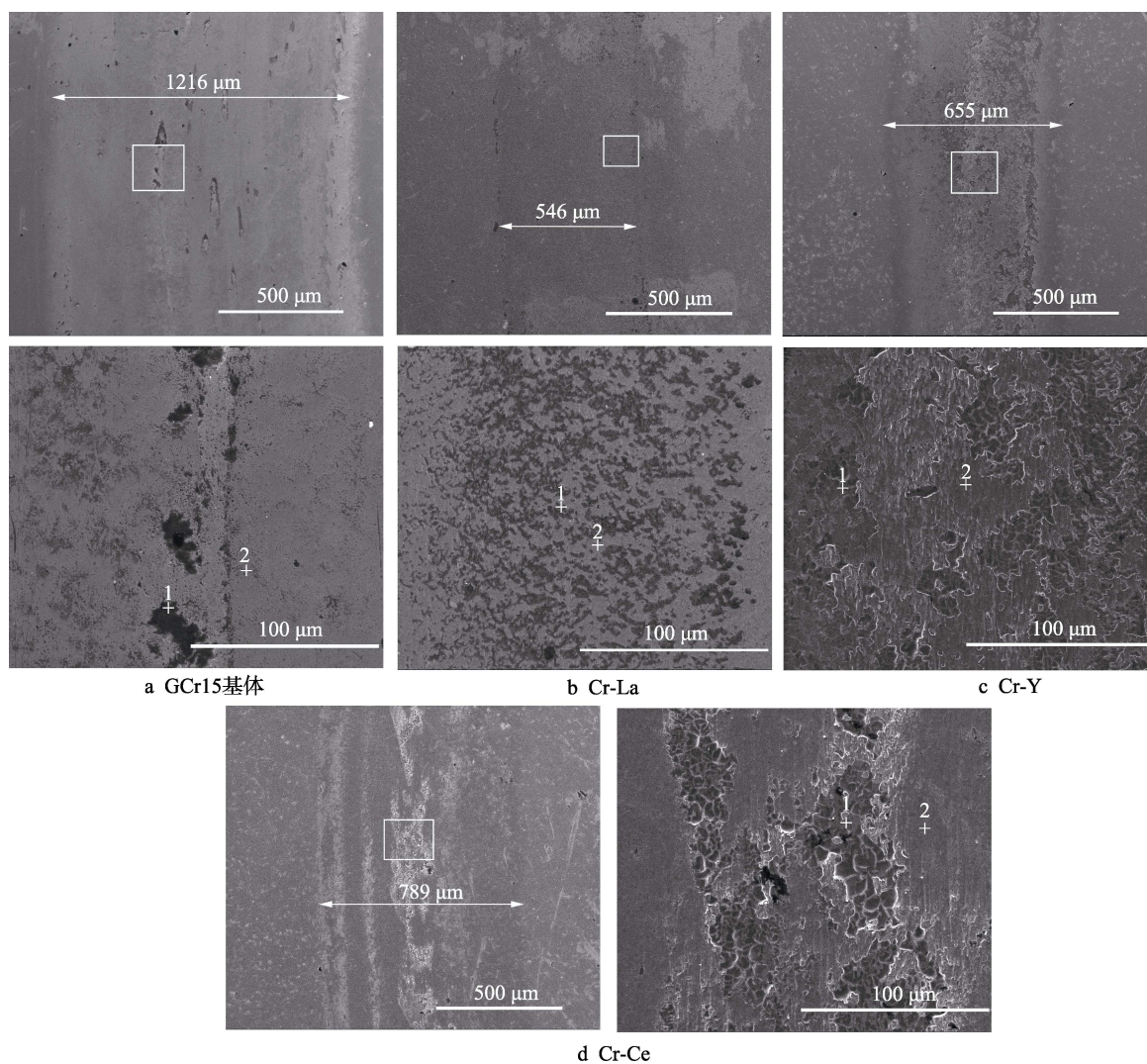


图 10 GCr15 基体与 Cr-RE 渗层磨痕形貌

Fig.10 Wear morphologies of GCr15 substrate and Cr-RE coatings: a) GCr15 substrate; b) Cr-La; c) Cr-Y; d) Cr-Ce

成的。在摩擦过程中，摩擦产生的热量和温度足够导致摩擦化学反应，并且对基体造成进一步的损伤。表 3（点 1）中的 O 含量清楚表明，在 GCr15 基体表面产生摩擦氧化物，形成的氧化物可以有效保护基体和降低其磨损量^[21]。但是，氧化物层并不足以完全抵挡 Si₃N₄ 球的研磨，导致基体不断被暴露出来（表 3 中点 2 的 Fe 含量高）。在局部放大图中，可以看到许多明显的划痕分布在磨痕上，且磨痕上有许多基体破坏形成的点坑，这是由于氧化层在摩擦过程中被损坏形成小颗粒磨粒，然后在摩擦过程中导致磨粒磨损^[22]。因此可以判断 GCr15 基体的磨损机制是氧化磨损和磨粒磨损。

表 3 GCr15 基体磨痕 EDS 分析
Tab.3 EDS analysis of wear scar on GCr15 substrate
wt. %

Element	C	O	Si	Fe
Point-1 in Fig.10a	4.44	28.61	11.69	55.25
Point-2 in Fig.10a	4.55	2.73	0.84	91.87

由图 10b 可以看出，Cr-La 渗层磨痕表面平整，磨痕宽度和深度较浅，无点坑、犁沟等其他磨损特征，反映出良好的摩擦学性能。根据表 4 EDS 分析，点 2（灰色区域）Cr 含量较高，与渗铬层表面 Cr 浓度相当，这说明渗 Cr 层具有优良的耐磨性能，表面未磨损破坏，仅有轻微擦伤，表面碳铬化合物提供了有效支撑并提高其耐磨性能；点 1（不连续的黑色粒状）含有 3%Si 和 19%O，这证明 Cr-La 渗层在与 Si₃N₄ 球摩擦过程中，由于摩擦生热和摩擦过程载荷压力作用，发生摩擦化学反应，形成 Si 和 Cr 的氧化物，这些氧化物有利于降低摩擦系数，但在不断摩擦过程中，氧化物层被不断破坏形成磨屑粘附在磨痕上面^[21-22]。考虑到 Si₃N₄ 的摩擦化学反应，Cr-La 渗层的主要磨损机制为粘着转移和氧化磨损。

表 4 Cr-La 渗层磨痕 EDS 分析
Tab.4 EDS analysis of wear scar on Cr-La coating
wt. %

Element	C	N	O	Si	Cr
Point-1 in Fig.10b	6.84	4.57	19.11	3.00	66.48
Point-2 in Fig.10b	5.62	9.74	—	—	84.64

由图 10c 可以看出，相比于 Cr-La 渗层，Cr-Y 渗层磨损加剧，磨痕变宽，表面粘着许多片状磨屑，磨痕表面粘着转移比 Cr-La 渗层更严重。由于磨屑粘附导致其摩擦系数增大，且对表面造成轻微磨粒磨损，形成细微点坑。Cr-Y 渗层主要磨损机制为粘着磨损伴随氧化磨损和轻微磨粒磨损。Cr-Ce 渗层与 Cr-Y 渗层粘着转移类似，具有相同的磨损机制。根据表 6（点 1）EDS 分析，O 和 Si 原子含量进一步增加，说明 CeO₂-Cr 渗层氧化磨损加剧。

表 5 Cr-Y 渗层磨痕 EDS 分析
Tab.5 EDS analysis of wear scar on Cr-Y coating
wt. %

Element	C	N	O	Si	Cr
Point-1 in Fig.10c	4.91	5.22	24.49	4.58	60.80
Point-2 in Fig.10c	6.16	9.78	—	—	84.06

表 6 Cr-Ce 渗层磨痕 EDS 分析
Tab.6 EDS analysis of wear scar on Cr-Ce coating
wt. %

Element	C	N	O	Si	Cr
Point-1 in Fig.10d	5.65	2.17	39.46	8.04	44.68
Point-2 in Fig.10d	6.69	7.98	—	—	85.33

3 结论

- 1) 通过固体包埋法在 GCr15 基体表面制得 Cr-RE 渗层。渗层连续、均匀、致密，厚度约为 10 μm。不同稀土掺杂对 Cr-RE 涂层相结构影响不大，其主要由 Cr₂C、Cr₇C₃ 和 (Cr,Fe)₇C₃ 等相组成。
- 2) Cr-RE 渗层中，表面硬度最大的为 Cr-Y 渗层，达到 1520HV，渗层硬度梯度平缓下降。Cr-RE 渗层都表现出与基体间牢固的机械+冶金结合，其中 Cr-La 具有最佳的结合强度和韧性，其压痕等级为 HF1。
- 3) Cr-RE 渗层均有提高耐磨性和减摩作用，其中 Cr-La 摩擦系数最小，耐磨性最好，磨损率仅为 GCr15 基体的 1/5，其主要磨损机理为粘着转移和氧化磨损。

参考文献：

[1] 程立本. 轴承钢 TD 渗金属及其最终热处理的工艺优化问题研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
CHENG Li-ben. Process optimization research between metallic cementation of TD method and final heat treatment of bearing steel[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.

[2] 熊晓晨. 表面处理对 GCr15 轴承钢服役性能的影响研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2015.
XIONG Xiao-chen. Influence of surface treatment on service properties of GCr15 bearing steel[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2015.

[3] LIU Hong-xi, TANG Bao-yin, WANG Lan-ping, et al. Fatigue life and mechanical behaviors of bearing steel by nitrogen plasma immersion ion implantation[J]. Surface & coatings technology, 2007, 201(9): 5273-5277.

[4] 李忠文. 轴承钢等离子体基钽氮碳多元离子注入层组织及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
LI Zhong-wen. Microstructure and properties of surface layers of bearing steel implanted with tantalum, nitrogen

- and carbon by PBII[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [5] WANG Ming-e, MA Guo-jia, LIU Xing, et al. Morphology and mechanical properties of TiN coatings prepared with different PVD methods[J]. Rare metal materials & engineering, 2016, 45(12): 3080-3084.
- [6] BOBZIN K, LUGSCHEIDER E, MAES M, et al. High-performance chromium aluminium nitride PVD coatings on roller bearings[J]. Surface & coatings technology, 2004, 188(1): 649-654.
- [7] MENG Jun-sheng, JI Ze-sheng. Effect of different fillers on oxidation behavior of low-temperature chromizing coating[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2014, 24(6): 1785-1790.
- [8] BIESUZ M, SGLAVO V M. Chromium and vanadium carbide and nitride coatings obtained by TRD techniques on UNI 42CrMoS4 (AISI 4140) steel[J]. Surface & coatings technology, 2016, 286: 319-326.
- [9] ZHOU Y B, CHEN H, ZHANG H, et al. Tion and oxidation of an Y_2O_3 -dispersed chromizing coating by pack cementation at 800 °C[J]. Vacuum, 2008, 82(8): 748-753.
- [10] LIN Nai-ming, XIE Fa-qin, ZHONG Tao, et al. Influence of adding various rare earths on microstructures and corrosion resistance of chromizing coatings prepared via pack cementation on P110 steel[J]. Journal of rare earths, 2010, 28(2): 301-304.
- [11] LIN Nai-ming, XIE Fa-qin, YANG Hui-jun, et al. Assessments on friction and wear behaviors of P110 steel and chromizing coating sliding against two counterparts under dry and wet conditions[J]. Applied surface science, 2012, 258(11): 4960-4970.
- [12] XING Xue-gang, WANG He-feng, LU Pan-na, et al. Influence of rare earths on electrochemical corrosion and wear resistance of RE-Cr/Ti pack coatings on cemented 304 stainless steel[J]. Surface & coatings technology, 2016, 291: 151-160.
- [13] 邢学刚, 杨耀军, 卢盼娜, 等. 添加不同稀土元素对固体包埋法在 304 不锈钢表面制备 Ti/Cr-RE 双层涂层电化学性能的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 7-13.
- XING Xue-gang, YANG Yao-jun, LU Pan-na, et al. Influence of adding various rare earth elements on electrochemical corrosion resistance of Ti/Cr-RE coatings fabricated on 304 stainless steel by pack cementation[J]. Surface technology, 2015, 44(11): 7-13.
- [14] 胡荣耀, 梁文萍, 缪强, 等. TC21 钛合金表面等离子渗 Cr 层的抗热震性能[J]. 热处理, 2016, 31(1): 15-19.
- HU Rong-yao, LIANG Wen-ping, MIAO Qiang, et al. Thermal shock resistance of chromized layer on TC21 alloy prepared by a double glow plasma surface alloying technology[J]. Heat treatment, 2016, 31(1): 15-19.
- [15] 潘晓扬, 梁文萍, 缪强, 等. TC21 钛合金表面双辉等离子渗 Cr 层摩擦磨损性能研究[J]. 热处理, 2015(5): 1-5.
- PAN Xiao-yang, LIANG Wen-ping, MIU Qiang, et al. Friction and wear property of double glow plasma chromized layer of TC21 titanium alloy[J]. Heat treatment, 2015(5): 1-5.
- [16] 张金柱, 杨宗伦, 魏可媛. 稀土元素在化学热处理中的催渗和扩散机理研究[J]. 材料导报, 2006, 20(5): 223-225.
- ZHANG Jin-zhu, YANG Zong-lun, WEI Ke-yuan. Study of the catalysis and diffusion mechanism by rare earth(RE) elements during the thermo-chemical treatment[J]. Materials review, 2006, 20(5): 223-225.
- [17] CHENG Liang, LI Qiang, DONG Xian-feng, et al. Effect of yttrium on microstructure of V-5Cr-5Ti alloys prepared by powder metallurgy[J]. Materials science & engineering of powder metallurgy, 2015, 20(1): 14-18.
- [18] 张垒, 孔德军. Cr12MoV 冷作模具钢渗铬层界面能谱分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016(2): 430-435.
- ZHANG Lei, KONG De-jun. Energy spectrum analysis of chromized coating interface for Cr12MoV cold working die steel[J]. Journal of central south university, 2016(2): 430-435.
- [19] WANG Z B, LU J, LU K. Wear and corrosion properties of a low carbon steel processed by means of SMAT followed by lower temperature chromizing treatment[J]. Surface & coatings technology, 2006, 201(6): 2796-2801.
- [20] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of applied physics, 2004, 24(8): 981-988.
- [21] 潘晓扬, 梁文萍, 缪强, 等. 不同温度下 TC21 钛合金等离子表面渗 Cr 层的摩擦磨损性能[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(1): 35-41.
- PAN Xiao-yang, LIANG Wen-ping, MIAO Qiang, et al. Tribological behavior of plasma chromized layer on TC21 alloy at different temperatures[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(1): 35-41.
- [22] SHARMA S P, DWIVEDI D K, JAIN P K. Effect of La_2O_3 addition on the microstructure, hardness and abrasive wear behavior of flame sprayed Ni based coatings[J]. Wear, 2009, 267(5): 853-859.
- [23] BASU B, VLEUGELS J, BIEST O V D. Fretting wear behavior of TiB_2 -based materials against bearing steel under water and oil lubrication[J]. Wear, 2001, 250(1-12): 631-641.
- [24] KESHRI A K, AGARWAL A. Wear behavior of plasma-sprayed carbon nanotube-reinforced aluminum oxide coating in marine and high-temperature environments[J]. Journal of thermal spray technology, 2011, 20(6): 1217-1230.