

# 强化研磨对轴承套圈表面耐蚀性的影响

萧金瑞, 梁忠伟, 黄建枫, 高伟林, 刘晓初, 陈宥丞

(广州大学 a.机械与电气工程学院 b.广州市金属材料强化研磨高性能加工重点实验室  
c.广东省强化研磨高性能微纳加工工程技术研究中心, 广州 510006)

**摘要:** **目的** 探明强化研磨加工对轴承套圈表面耐蚀性的影响规律。**方法** 采用单一变量法改变强化研磨加工中的喷射压力, 制备不同加工工艺的试样。通过电化学腐蚀实验, 测试各试样在常温 NaCl 溶液环境下的耐蚀性, 并记录相关数据。采用光学金相显微镜、维氏硬度计、X 射线衍射仪分别检测试样的显微组织、显微硬度、晶粒尺寸及位错密度, 并进一步分析金相组织、显微硬度与轴承套圈耐蚀性的关系。**结果** 在其他加工参数保持不变的前提下, 强化研磨试样腐蚀速率分别为 13.40、10.83、7.50 mm/a, 明显低于未加工试样 (18.24 mm/a)。同时, 试样表层组织均匀性、强化层厚度、位错密度及显微硬度均随喷射压力的增加而增加, 晶粒尺寸则随之减小。喷射压力由 0.50 MPa 增加至 0.70 MPa 时, 腐蚀速率下降 50%, 强化层厚度则由 42  $\mu\text{m}$  增加至 78  $\mu\text{m}$ , 晶粒尺寸由 6.72  $\mu\text{m}$  近似线性减小至 3.04  $\mu\text{m}$ , 位错密度由  $14.49 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$  近似线性增加至  $71.09 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ 。而截面显微硬度随深度的变化曲线则呈交错状态。在距加工表面 30  $\mu\text{m}$  和 90~110  $\mu\text{m}$  处, 0.60 MPa 加工所得试样显微硬度最高, 且最大硬化层厚度达 110  $\mu\text{m}$ 。**结论** 强化研磨加工技术可使轴承套圈获得组织均匀、硬度高、位错密度大、晶粒尺寸小的致密强化表层, 进而增强其表面耐蚀性。

**关键词:** 轴承套圈; 强化研磨; 喷射压力; 耐蚀性; 电化学腐蚀

**中图分类号:** TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)05-0238-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.05.026

## Effect of Strengthen Grinding on the Surface Corrosion Resistance of Bearing Ring

XIAO Jin-rui, LIANG Zhong-wei, HUANG Jian-feng, GAO Wei-lin, LIU Xiao-chu, CHEN You-cheng

(a. School of Mechanical & Electric Engineering, b. Guangzhou Key Laboratory for Strengthened Grinding and High Performance Machining of Metal Material, c. Guangdong Engineering and Technology Research Centre for Strengthen Grinding and High Performance Micro-nanomachining, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

收稿日期: 2020-06-01; 修订日期: 2020-07-31

**Received:** 2020-06-01; **Revised:** 2020-07-31

**基金项目:** 国家自然科学基金 (52075109, 51975136); 国家重点研发计划 (2018YFB2000501); 广东省科技计划 (2017B090910010, 2017A010102014); 广东省高等学校重点领域专项 (2019KZDZX1009); 广州市科技计划 (202102080225)

**Fund:** The National Natural Science Foundation of China (52075109, 51975136); National Key Research and Development Project (2018YFB2000501); Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (2017B090910010, 2017A010102014); Special Projects in Key Areas of Guangdong's Colleges (2019KZDZX1009); Science and Technology Planning Project of Guangzhou (202102080225)

**作者简介:** 萧金瑞 (1988—), 男, 硕士研究生, 实验师, 主要研究方向为轴承表面强化及微纳制造技术。

**Biography:** XIAO Jin-rui (1988—), Male, Master, Experimentalist, Research focus: surface strengthening and micro-nano manufacturing of bearing.

**通讯作者:** 刘晓初 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能制造及装备技术。邮箱: gdliuxiaochu@163.com

**Corresponding author:** LIU Xiao-chu (1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: intelligent manufacturing and equipment technology. E-mail: gdliuxiaochu@163.com

**引文格式:** 萧金瑞, 梁忠伟, 黄建枫, 等. 强化研磨对轴承套圈表面耐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 238-244.

XIAO Jin-rui, LIANG Zhong-wei, HUANG Jian-feng, et al. Effect of strengthen grinding on the surface corrosion resistance of bearing ring[J]. Surface technology, 2021, 50(5): 238-244.

**ABSTRACT:** This work aims to explore the effect of strengthen grinding process on the surface corrosion resistance of bearing ring. A single variable method was used to change the jet pressure in the strengthen grinding process to prepare samples with different processing processes. The surface corrosion resistance of each sample in NaCl at room temperature was tested by electrochemical corrosion experiment, and the relevant data was recorded. The micro-structure, micro-hardness, grain size and lattice dislocation of samples that obtained by different processing methods were detected respectively by optical metallographic microscope, Vickers hardness tester and X-ray diffractometer. And the relationships between the micro-structure, the micro-hardness and the corrosion resistance of bearing ring samples were further analyzed. On the premise of keeping other processing parameters unchanged, the corrosion rates of the samples that obtained by strengthen grinding were respectively 13.40, 10.83 and 7.50 mm/a. And they were significantly lower than that of the sample without strengthen grinding treatment (18.24 mm/a). Moreover, with the increase of jet pressure, the uniformity of surface layer tissue, thickness of strengthened layer, dislocation density and microhardness increased, while the grain size decreased. Furthermore, with the jet pressure increased from 0.50 MPa to 0.70 MPa, the corrosion rate decreased by 50%, the thickness of the strengthened layer increased from 42 μm to 78 μm, the grain size decreased approximately linearly from 6.72 μm to 3.04 μm, while the dislocation density increased approximately linearly from  $14.49\times10^{14}\text{ m}^{-2}$  to  $71.09\times10^{14}\text{ m}^{-2}$ . The curves of cross section's micro-hardness with depth were in a staggered state, the micro-hardness of samples processed by 0.60 MPa was the highest, and the maximum hardened layer thickness was 110 μm at the distance of 30 μm and 90 to 110 μm from the machined surface. The strengthen grinding process is a technique that can enhance the surface corrosion resistance of bearing ring by obtaining dense reinforced surface with well-closed formation, high hardness, high dislocation density and small grain size.

**KEY WORDS:** bearing ring; strengthen grinding; jet pressure; corrosion resistance; electrochemistry corrosion

轴承是机械装备不可或缺的关键基础件之一，其运行可靠性直接影响装备的传动性能<sup>[1-2]</sup>。应用于复杂环境的机械装备（如海洋装备、近海设备、化工机械等）轴承不可避免地会发生腐蚀失效，使其寿命难以达到设计标准<sup>[3]</sup>。因而，开展耐蚀性理论及制造研究，提高轴承等关键基础件的耐腐蚀性能及寿命，显得尤为必要。

近年来，学者们对金属材料开展了大量耐蚀性相关的研究<sup>[4-6]</sup>，并开发了许多对改善材料耐蚀性行之有效的办法，如表面涂层、离子注入及机械强化等。已有研究表明<sup>[7]</sup>，通过机械强化处理金属工件，获得结构致密的强化表层，即可提高其耐蚀性。强化研磨作为近年发展起来的一种新型机械强化处理技术，可使金属材料获得高硬度、高残余压应力及高致密强化表层，可应用于轴承等关键基础件的表面强化处理<sup>[8-9]</sup>。从原理上看，该技术也可增强金属工件的耐

蚀性，但该加工方法对材料耐蚀性的影响规律仍有待进一步探索。现有研究多聚焦于离子注入、喷丸、涂层及热处理等加工技术的防腐探索，鲜有关于强化研磨加工工件耐蚀性研究的报道<sup>[10-12]</sup>，强化研磨加工对材料耐蚀性的影响仍需进一步研究。基于此，本文采用单一变量法，分别从显微组织、晶粒尺寸、位错密度、显微硬度及元素含量等方面分析强化研磨加工中的喷射压力对轴承套圈试样耐蚀性的影响。

1 试样制备及性能测试

采用强化研磨加工技术对轴承套圈试样滚道进行加工试验，所选用的加工对象为苏州轴承厂生产的经精磨处理的 NU308 圆柱滚子轴承内圈，其内径为 40 mm，外径为 52 mm，宽度为 23 mm，材料成分见表 1。

表 1 NU308 轴承内圈化学成分  
Tab.1 Composition of GCr15 materials

wt%								
C	Si	Mn	Mo	P	S	Ni	Cu	Ni+Cu
0.95~1.05	0.15~0.35	0.25~0.45	1.40~1.65	≤0.03	≤0.30	≤0.25	≤0.25	≤0.50

参照文献[13-14]，配制固液态强化研磨料（表 2），选定加工试验参数（表 3），开展轴承套圈滚道的强化研磨加工，加工时间为 2 min。

从各轴承套圈中切割尺寸为 10 mm×10 mm 的小试样，分别采用 120#、500#、2000#的金相砂纸进行

研磨抛光，其后分别采用丙酮和 75%乙醇进行清洗，并烘干备用。

在样品非强化表面焊接导线，并以环氧树脂封装，制作加工面裸露面积为 1 cm<sup>2</sup>的工作电极。采用 3.50% NaCl 溶液作为导电介质，将饱和甘汞电极作

为参比电极,并以薄型铂片作为辅助电极,借助 Solartron1260+1287 电化学工作站测定不同试样的耐腐蚀性能(如图 1 所示)。在标准动电位极化测试之前,将试验工作电极浸泡于 3.50%的 NaCl 溶液中 30 min,测得稳定的开路电位。其后,在 $-1.10\sim 0.10$  V

内,以 1.50 mV/s 的扫描速度,分别测试各样品基于开路电位的极化电位。采用 HV-1000 显微维氏硬度计和 MJ42 金相显微镜分别测定加工前后试样截面的显微硬度及金相组织,并利用 PW3040/60 型 X 射线衍射仪分析各试样的晶粒尺寸和位错密度。

表 2 强化研磨料成分配比

Tab.2 Composition ratio of abrasive for strengthen grinding processing

Element	Mass/g	Element	Mass/g
Steel bead (1 mm)	1500.00	polyoxyethylene alkyl ether	72.50
Corundum (120#)	150.00	Naoh	5.00
Natrium benzoicum	12.50	Triethanolamine	7.50
Borax	10.00	Benzotrizaole	2.50
Sodium dodecylbenzene sulfonate	2.50	Triethanolamine borate	85.00
Edta disodium	1.50	Water	281.00

表 3 强化研磨加工实验参数

Tab.3 Technological parameter for strengthen grinding processing

Procedure	Jet pressure/MPa	Jet angle/(°)	Jet distance/mm	Rotation rate/( $r\cdot min^{-1}$ )	Partiality distance/mm	Nitrogen jet pressure/MPa
Set-point	0.50~0.70	45	50	100	0.35	0.40

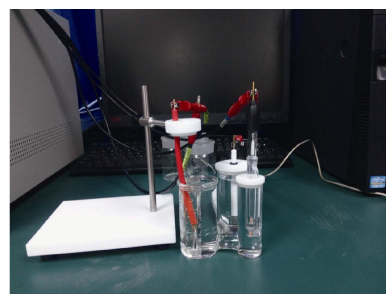
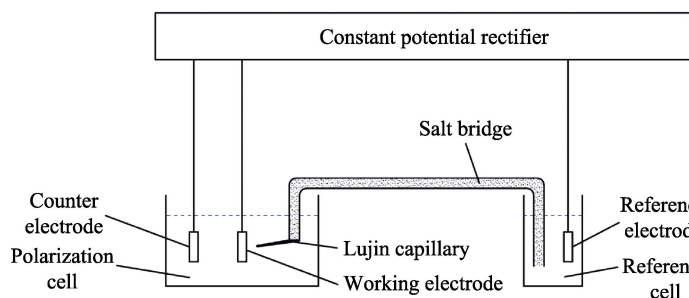


图 1 电化学测量原理及过程

Fig.1 The principle and process of electrochemical measurement

## 2 结果及分析

### 2.1 耐腐蚀性能分析

不同工艺加工所得试样的电化学腐蚀塔菲尔曲线如图 2 所示。通过 Tafel 外推法及法拉第定律换算即可求得试样腐蚀电位、腐蚀电流密度、阴/阳极塔菲尔斜率以及腐蚀速率,见表 4。整体来看,经 0.50 MPa 喷射压力加工所得试样的腐蚀电位最高,0.70 MPa 加工试样的腐蚀速率最低。强化研磨加工试样的腐蚀电流密度和腐蚀速率均远低于未加工试样,且试样的腐蚀速率随喷射压力的增加而下降,说明试样的电化学腐蚀与其处理工艺密切相关。0.70 MPa 加工后,试样的腐蚀电流密度( $1.63\times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>)和腐蚀速率(18.24 mm/a)均为未加工试样的 41%,这说明强化研磨加工显著提高了轴承套圈试样表面的耐腐蚀性能。此外,0.50 MPa 加工试样的腐蚀电流密度低于

0.60 MPa 加工试样,但其腐蚀速率反而更高。这是因为,腐蚀过程是一个动态变化过程,且与材料组织结构的致密性密切相关,喷射压力越大,加工表层致密度越高<sup>[15-16]</sup>,进而使得其耐腐蚀性能越好。

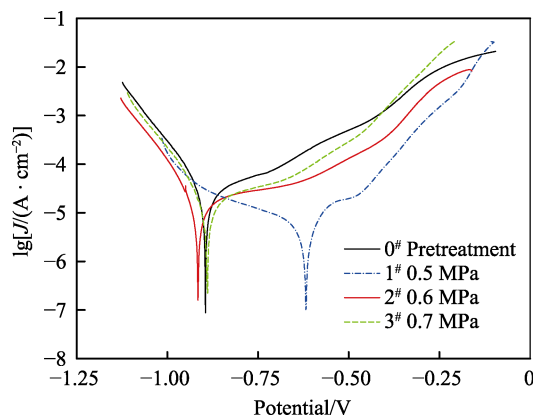


图 2 试样电化学腐蚀塔菲尔曲线

Fig.2 Tafel curve of electrochemical corrosion of samples

表 4 电化学腐蚀结果  
Tab.4 Results of electrochemical corrosion

Sample	Jet pressure/MPa	$J_{\text{corr}}/(\times 10^{-5} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$E_{\text{corr}}/\text{V}$	Taffel slope of anode/mV	Taffel slope of negative/mV	Corrosion rate/(mm·a <sup>-1</sup> )
0 <sup>#</sup>	/	3.96	-0.89	817.99	113.90	18.24
1 <sup>#</sup>	0.50	2.36	-0.62	471.02	86 886.20	13.40
2 <sup>#</sup>	0.60	2.91	-0.92	1803.20	107.74	10.83
3 <sup>#</sup>	0.70	1.63	-0.88	168.63	2650.80	7.50

2.2 显微组织变化

随着喷射压力的增加，试样加工表层金相组织逐渐细化，强化层厚度依次增加（如图 3 所示）。未经强化研磨处理的 0<sup>#</sup>试样，表层与基体的金相组织几乎一致，且存在大量长度为 20~30 μm 的大晶粒板条马氏体。与 0<sup>#</sup>试样相比，1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>试样的大晶粒马氏体数量、长度（10~20 μm）及宽度均显著下降。喷射压力增大，使强化表层的细小再结晶晶粒增加，板条马氏体组织交叉位错及分布均匀度增加，且强化层厚

度由 42 μm 增加至 78 μm。这是因为相同时间内，喷射压力越大，研磨料对金属材料的作用力及应变速率也越大，进而使晶粒发生充分的再结晶，形成均匀分布的细小等轴晶晶粒组织<sup>[17-18]</sup>。强化表层晶粒细化使得其结构致密，腐蚀液难以渗入组织内部，进而提高材料的耐腐蚀性能<sup>[19-20]</sup>。因此，从金相组织变化看，在本文设定的强化研磨工艺下，试样的耐腐蚀性能随喷射压力的增加而增加，与试样电化学腐蚀试验结果一致。

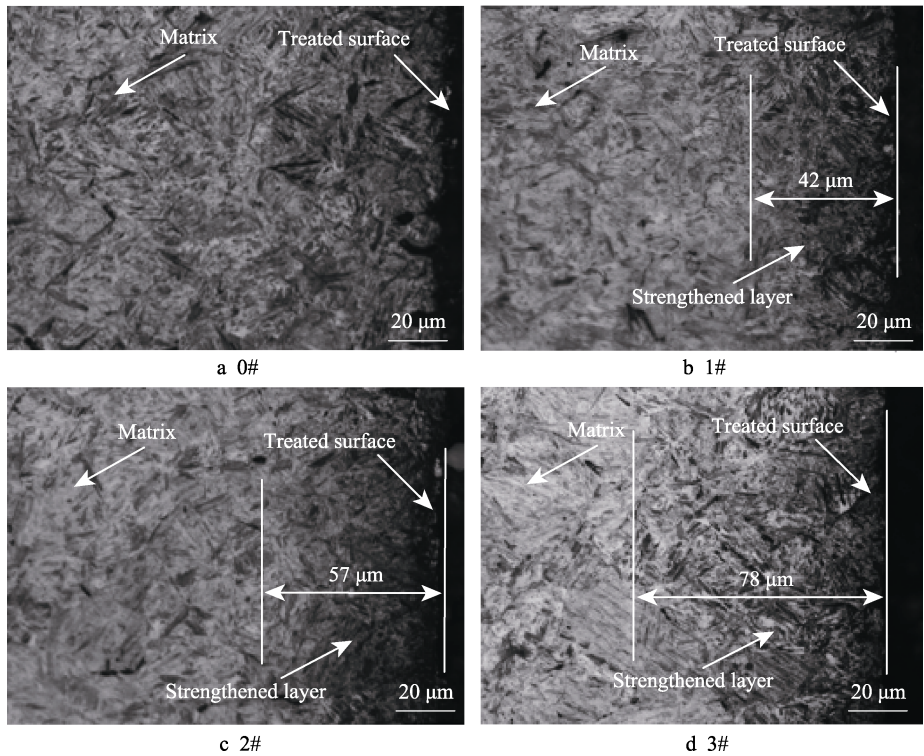


图 3 试样显微组织  
Fig.3 Microstructure of different samples

2.3 位错密度及晶粒尺寸变化

将 X 射线衍射图谱与标准图谱进行对比，并标定特征峰，结果如图 4 所示。马氏体衍射峰较为明显，各工艺下所得试样的衍射峰强度几乎一致。

由 Williamson-Hall 理论可知，半高宽宽化量（ $\delta_{hkl}$ ）与应变（ $\varepsilon$ ）存在如下关系<sup>[21-22]</sup>：

$$\delta_{hkl} \frac{\cos \theta_{hkl}}{\lambda} = \frac{0.9}{D} + 2\varepsilon \frac{\sin \theta_{hkl}}{\lambda} \tag{1}$$

式中： $D$  为平均晶粒尺寸，nm； $\theta_{hkl}$  为衍射角度及对应的晶面指数； $\lambda$  为 X 射线的波长，此处为 1.54 nm。

从显微组织看，试样晶粒尺度均在微米范围内，故  $\frac{0.9}{D}$  的数值很小，可忽略，则式(1)可表示为：

$$\delta_{hkl} \cos \theta_{hkl} = \varepsilon \times 2 \sin \theta_{hkl} \tag{2}$$

因此，应变  $\varepsilon$  为式(2)对应直线的斜率。借助 MDI



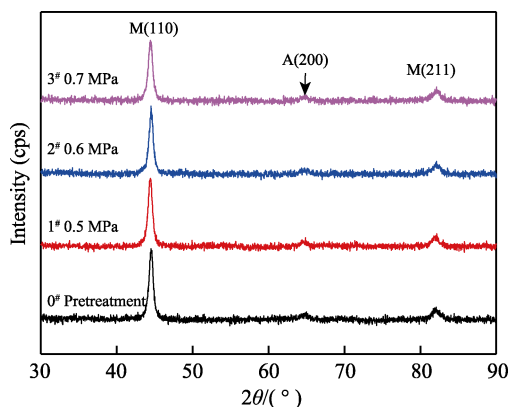


图4 试样X射线衍射图谱

Fig.4 X-ray diffraction patterns of different samples

Jade 软件求得各衍射峰半高宽, 见表 5。

将表 5 中的数值分别代入式(2), 并采用最小二乘法拟合直线 (如图 5 所示), 即可求得各试样的应变值 (即拟合直线的斜率)。由图 5 可见, 随着强化研磨喷射压力的增加, 试样的应变也随之增加。

根据经验公式求解各试样位错密度和晶粒尺寸<sup>[23]</sup>:

$$\rho = 14.4\varepsilon^2 b^{-2} \quad (3)$$

$$d = t\rho^{-0.5} \quad (4)$$

式中:  $b$  为材料伯氏矢量, 此处取 0.25 nm;  $d$  为晶粒尺寸;  $t$  为 X 射线衍射时的温度,  $t=25.60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

结合图 5 和式(3)、(4)分别求解各试样的位错密度和对应的晶粒尺寸, 结果如图 6 所示。可见, 未经强化研磨试样的位错密度 ( $7.29\times 10^{14}\text{ m}^{-2}$ ) 和晶粒尺寸 ( $9.48\text{ }\mu\text{m}$ ) 约为 0.50 MPa 喷射压力加工试样的 0.50 倍和 1.40 倍。随着喷射压力由 0.50 MPa 增加至 0.70 MPa, 试样位错密度由  $14.50\times 10^{14}\text{ m}^{-2}$  近似线性增加至  $71.09\times 10^{14}\text{ m}^{-2}$ , 而晶粒尺寸则由  $6.72\text{ }\mu\text{m}$  线性减小至  $3.04\text{ }\mu\text{m}$ , 与图 3 中显微组织变化规律一致。已有研究表明<sup>[24]</sup>, 高位错密度、小尺寸晶粒的致密组织有助于提升材料的耐腐蚀性能。强化研磨加工中喷射压力的上升, 加快了材料的应变速率, 导致位错密度增加和晶粒尺寸减小, 进而提高了材料组织的致密度, 增强了试样的耐腐蚀能力, 进一步解释了各试样电化学腐蚀速率的变化规律。

表 5 试样各衍射峰角度及对应的半高宽

Tab.5 The diffraction peak angle of each sample and the value of FWHM

Peak position	0 <sup>#</sup>		1 <sup>#</sup>		2 <sup>#</sup>		3 <sup>#</sup>	
	2θ/(°)	FWHM	2θ/(°)	FWHM	2θ/(°)	FWHM	2θ/(°)	FWHM
M(110)	44.40	0.67	44.39	0.61	44.50	0.29	44.47	0.76
A(200)	64.20	0.92	64.61	0.78	64.65	0.54	64.70	0.59
M(211)	82.03	0.78	82.05	0.81	82.12	0.42	82.26	0.63

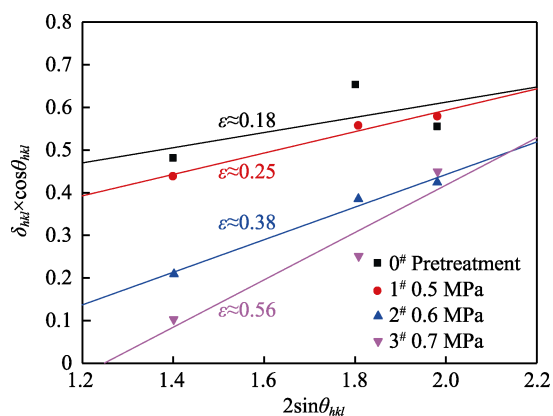
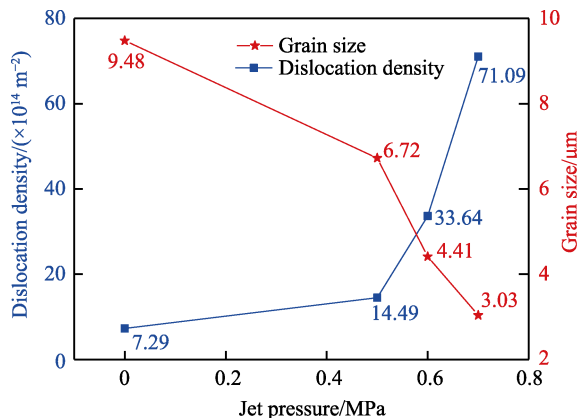
图5  $\delta_{hkl}\cos\theta_{hkl}$  随  $2\sin\theta_{hkl}$  变化的拟合直线Fig.5 Fitting line of  $\delta_{hkl}\cos\theta_{hkl}$  with respect to  $2\sin\theta_{hkl}$ 

图6 位错密度及晶粒尺寸随喷射压力的变化曲线

Fig.6 Variation curves of dislocation density and grain size with jet pressure

## 2.4 加工表层硬度及元素分析

强化研磨加工中, 三相混流斜向高速冲击试样表面, 使其受高度集中应力挤压而发生塑性变形, 形成高硬梯度分布强化层。距表面  $30\text{ }\mu\text{m}$  处, 最大平均硬度达 885HV, 且硬度随深度增加而下降。未加工试样硬度保持在 790HV 左右, 且不随深度变化, 如图 7

所示。整体来看, 随喷射压力的增加, 截面显微硬度曲线呈交错状态, 最大硬化层厚度达  $110\text{ }\mu\text{m}$ 。距表面深度小于  $100\text{ }\mu\text{m}$  时, 强化研磨加工试样硬度均高于未加工试样, 且在深度为  $30\text{ }\mu\text{m}$  处, 硬度差距最大 (约 90HV), 在深度  $110\text{ }\mu\text{m}$  后, 各试样硬度几乎相等。在硬度高 (莫氏硬度  $\geq 9$ )、粒度小 (120 目) 的研磨粉和钢珠耦合冲击作用下, 试样接触区形成高度

集中的应力,使材料发生快速应变,进而诱导应变能梯度传播,形成梯度变化塑性变形区,导致其硬度随深度增加而逐渐下降<sup>[25]</sup>。喷射压力与强化研磨加工过程中三相混流的冲击动能直接相关,相同条件下,压力越高,动能越大,受冲击材料的塑性应变变量及应变速率也越高,进而使得试样塑变层硬度也越高。换言之,试样强化层显微硬度随喷射压力的增加而增加。由于金属材料的硬度与其微观组织结构的致密度密切相关<sup>[26]</sup>,同一材料的晶粒尺寸越小,则硬度越高,而晶粒尺寸越小,其耐腐蚀性能也越高。因此,从表层硬度看,强化研磨加工试样的耐腐蚀性能要显著高于未加工试样,这与电化学腐蚀测试结果相吻合。

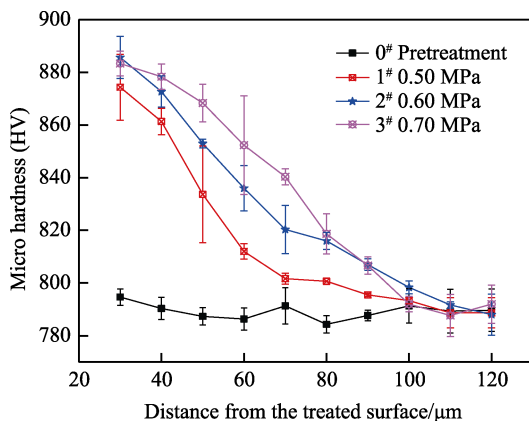


图 7 显微硬度沿深度方向的变化

Fig.7 Variation of microhardness along the direction of depth

经强化研磨加工后,试样表面 O、Si、Cr 元素的含量均有所增加(如图 8 所示)。氧在轴承钢中以化合物的形式存在,形成氧化膜,可阻碍活跃离子的扩散。硅在合金中则常以硅化亚铁的形式存在,其含量的增加可提高轴承钢的耐酸性<sup>[27]</sup>。铬元素则可在金属与介质之间形成钝化膜,可阻挡  $\text{Cl}^-$  和  $\text{O}^{2-}$  进入试样基体,增强其耐蚀性<sup>[28]</sup>。在电化学腐蚀测试时,试样浸泡于 NaCl 溶液中,易发生氧化反应,生成氧化膜,可阻碍  $\text{Cl}^-$  和  $\text{O}^{2-}$  的扩散。与未加工试样相比,强化研磨加工试样表面元素更丰富,且 Cr 和 Si 含量更高,

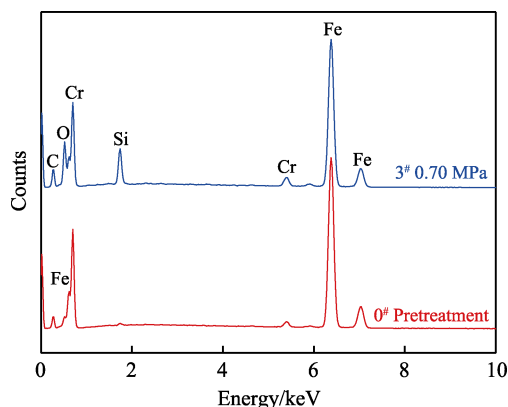


图 8 试样表面 EDS 分析

Fig.8 EDS analysis of sample surface

在 NaCl 溶液中可形成更为致密的钝化膜。因而,从表面元素分布看,强化研磨加工可增强试样的耐腐蚀性,与电化学腐蚀结果一致。

### 3 结论

本文通过强化层金相组织、位错密度、晶粒尺寸以及显微硬度的变化,解释试样的耐腐蚀性随强化研磨喷射压力增加而增加的现象,得到以下结论:

1) 电化学腐蚀试验表明,强化研磨加工对改善材料的耐腐蚀性能效果明显,且腐蚀速率随喷射压力的增加而下降。

2) 强化研磨加工使试样表层发生高速率应变,诱导板条马氏体发生再结晶细化,且晶粒细化程度和组织分布均匀度都随喷射压力的增加而增加。

3) 强化表层发生高密度位错,且位错密度随喷射压力的增大而呈线性增加,晶粒尺寸则呈线性减小。

4) 由于金相组织、位错及再结晶的发生,形成致密的强化表层,使得试样表层硬度也随喷射压力的增加而增加。

5) 金相组织、位错密度、晶粒尺寸、显微硬度及元素含量分析结果均与其电化学腐蚀结果相吻合,揭示了试样的耐蚀性随强化研磨加工中喷射压力的增加而增强的规律。

### 参考文献:

- [1] 王煜, 闫柯, 张进华. 我国高性能滚动轴承基础研究进展[J]. 中国基础科学, 2015, 17(6): 10-19.  
WANG Yu, YAN Ke, ZHANG Jin-hua. Progress of the 973 project-basic research on high performance rolling bearing[J]. China basic science, 2015, 17(6): 10-19.
- [2] 李昭昆, 雷建中, 徐海峰, 等. 国内外轴承钢的现状与发展趋势[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(3): 1-12.  
LI Zhao-kun, LEI Jian-zhong, XU Hai-feng, et al. Current status and development trend of bearing steel in China and abroad[J]. Journal of iron and steel research, 2016, 28(3): 1-12.
- [3] 王姗姗, 郭浩, 雷建中, 等. 我国滚动轴承磨损失效分析现状及展望[J]. 轴承, 2017(10): 58-63.  
WANG Shan-shan, GUO Hao, LEI Jian-zhong, et al. Status and prospect for failure analysis on wear of rolling bearings in China[J]. Bearing, 2017(10): 58-63.
- [4] ZHANG Jian-jun, LIU Jia-chen, LIAO Hui-min, et al. A review on relationship between morphology of boride of Fe-B alloys and the wear/corrosion resistant properties and mechanisms[J]. Journal of materials research and technology, 2019, 8(6): 6308-6320.
- [5] ALI M, HUSSEIN M A, AL-AQEELI N. Magnesium-based composites and alloys for medical applications: A review of mechanical and corrosion properties[J]. Journal

- of alloys and compounds, 2019, 792(5): 1162-1190.
- [6] QIU Zhi-fei, WANG Fang-fang, LI Qiu-shi, et al. Corrosion and mechanical properties for Cr-coated CSS-42L bearing steel after Ti and C ions co-implantation[J]. Applied surface science, 2020, 509(15): 145293.
- [7] 赵蓉, 吴忠, 刘磊, 等. 喷丸对金属材料耐蚀性能影响的研究进展[J]. 金属热处理, 2018, 43(12): 88-94.  
ZHAO Rong, WU Zhong, LIU Lei, et al. Research progress in effect of shot peening on corrosion resistance of metallic materials[J]. Heat treatment of metals, 2018, 43(12): 88-94.
- [8] LIANG Zhong-wei, LIAO Shao-peng, WEN Yi-heng, et al. Working parameter optimization of strengthen waterjet grinding with the orthogonal-experiment-design-based ANFIS[J]. Journal of intelligent manufacturing, 2019, 30(2): 833-854.
- [9] 刘晓初, 温溢恒, 梁忠伟, 等. 轴承钢丸直径配比对强化研磨内圈沟道面硬度及形貌的影响[J]. 机床与液压, 2017, 45(3): 123-126.  
LIU Xiao-chu, WEN Yi-heng, LIANG Zhong-wei, et al. Effect of bearing steel balls diameter ratio for surface hardness and morphology of bearing ring in reinforced grinding processing[J]. Machine tool and hydraulics, 2017, 45(3): 123-126.
- [10] 宋晓萍, 王优强, 张平, 等. 7055 铝合金在 3.5%NaCl 溶液中腐蚀磨损性能的研究[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(1): 73-81.  
SONG Xiao-ping, WANG You-qiang, ZHANG Ping, et al. Corrosion wear properties of 7055 aluminum alloy in 3.5% NaCl solution[J]. Tribology, 2020, 40(1): 73-81.
- [11] 张新, 张奎. 镁合金腐蚀行为及机理研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(1): 78-84.  
ZHANG Xin, ZHANG Kui. Research progress in corrosion behavior and mechanism of magnesium alloy[J]. Corrosion science and protection technology, 2015, 27(1): 78-84.
- [12] 刘轩, 刘慧丛, 李卫平, 等. 7075 铝合金在不同温度盐水环境中的腐蚀疲劳行为[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2850-2856.  
LIU Xuan, LIU Hui-cong, LI Wei-ping, et al. Corrosion fatigue behavior of 7075 aluminum alloy in saline water environment at different temperatures[J]. Acta aeronautica ET astronautica sinica, 2014, 35(10): 2850-2856.
- [13] 萧金瑞, 刘晓初, 梁忠伟, 等. 钢珠损伤对轴承套圈强化研磨加工表面粗糙度和硬度的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(12): 290-295.  
XIAO Jin-rui, LIU Xiao-chu, LIANG Zhong-wei, et al. Effect of steel bead's damage on the surface roughness and hardness of bearing rings under strengthen grinding processing[J]. Surface technology, 2018, 47(12): 290-295.
- [14] 刘晓初, 萧金瑞, 陶建华, 等. 一种耐磨合金钢工件表面的强化研磨方法: 中国, CN103878703A[P]. 2014-06-25.  
LIU Xiao-chu, XIAO Jin-rui, TAO Jian-hua, et al. A wear-resistant alloy steel strengthening method for polishing the surface of the workpiece: China, CN103878703A[P]. 2014-06-25.
- [15] LIANG Zhong-wei, LIU Xiao-chu, XIAO Jin-rui, et al. Adaptive prediction of abrasive impacting pressure effectiveness in strengthen jet grinding using NSAE-ANFIS[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2020, 106(7-8): 2805-2828.
- [16] 张聪惠, 王婧, 宋薇, 等. 高能喷丸处理工业纯钛焊接接头在 10%HCl 溶液中的腐蚀行为[J]. 材料导报, 2018, 32(9): 1564-1570.  
ZHANG Cong-hui, WANG Jing, SONG Wei, et al. An analyses of high energy shot-peening (HESP) industrial pure titanium welded joints' corrosion behavior in 10% HCl solution[J]. Materials review, 2018, 32(9): 1564-1570.
- [17] 刘汉源, 于振涛, 余森, 等. Ni-Ti 形状记忆合金热压缩变形行为的研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(24): 59-63.  
LIU Han-yuan, YU Zhen-tao, YU Sen, et al. Research on hot compressive deformation behavior of Ni-Ti shape memory alloy[J]. Hot working technology, 2018, 47(24): 59-63.
- [18] 陈洋, 许晓静, 陆文俊, 等. 固溶—大变形—时效下 7085 铝合金的晶间腐蚀和剥落腐蚀[J]. 稀有金属, 2016, 40(8): 745-750.  
CHEN Yang, XU Xiao-jing, LU Wen-jun, et al. Intergranular corrosion and exfoliation corrosion of 7085 aluminum alloy under solution-large deformation-aging[J]. Chinese journal of rare metals, 2016, 40(8): 745-750.
- [19] 杨丽, 黄根哲, 张弛, 等. 喷丸对 6082 铝合金耐腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(5): 161-166.  
YANG Li, HUANG Gen-zhe, ZHANG Chi, et al. Effect of shot peening on corrosion resistance of 6082 aluminum alloy[J]. Heat treatment of metals, 2019, 44(5): 161-166.
- [20] MOSTAFANEGAD A, IRANMANESH M, ZAREBI-DAKI A. An experimental study on stress corrosion behavior of A131/A and A131/AH32 low carbon steels in simulated seawater[J]. Ocean engineering, 2019, 188(15): 106204.
- [21] 余启航, 蒋显全, 余欣未, 等. 5182 铸锭高温压缩流变行为与微观组织演变[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(1): 172-180.  
YU Qi-hang, JIANG Xian-quan, SHE Xin-wei, et al. High temperature rheologic behavior and microstructure evolution of 5182 alloy flat ingot[J]. Journal of Southwest University(natural science edition), 2018, 40(1): 172-180.
- [22] 郭宁. 桥梁缆索用冷拔珠光体钢丝微观组织表征及力学性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.  
GUO Ning. A Study on microstructural characterization and mechanical properties of cold drawing pearlitic steel wires for bridge cable[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.