

离子渗氮对 38CrMoAl 钢组织及摩擦磨损性能影响^①

王紫阳, 刘俊伟, 罗佳杰, 刘振亚, 李嘉成

(南昌航空大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要: 560 °C 下, 以氮气和氩气的混合气体为氮源, 对 38CrMoAl 钢表面进行离子渗氮, 研究了离子渗氮后 38CrMoAl 钢的摩擦磨损性能。结果表明, 随着混合气体中 N₂ 体积分数增大, 渗氮层厚度增加, 渗氮层表面硬度呈现先增大后减小的趋势。通过调节混合气体中 N₂ 的体积分数, 可以改变活性氮原子数量从而改变渗氮层的物相组成, 当 N₂ 和 Ar 体积比 2:3 时, 渗氮层中以 γ' -Fe₄N 相为主相、 ϵ -Fe₂₋₃N 相为次相; 当 N₂ 和 Ar 体积比 3:2 时, 渗氮层中 ϵ -Fe₂₋₃N 相成为主相、 γ' -Fe₄N 相为次相。与基体材料相比, 离子渗氮试样具有更小的摩擦系数, 耐磨性得到提高, 在 N₂ 和 Ar 体积比 3:2 时, 渗氮试样的化合物层厚度为 21.4 μ m, 平均摩擦系数达到 0.26, 表现出良好的耐磨性。摩擦磨损机制为疲劳磨损、磨粒磨损和氧化磨损。

关键词: 表面处理; 38CrMoAl 钢; 离子渗氮; 氮氩比; 化合物层; 耐磨性; 磨粒磨损; 氧化磨损

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.03.030

文章编号: 0253-6099(2024)03-0140-05

Effect of Ion Nitriding on Microstructure and Friction and Wear Property of 38CrMoAl Steel

WANG Ziyang, LIU Junwei, LUO Jiajie, LIU Zhenya, LI Jiacheng

(School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

Abstract: The surface of 38CrMoAl steel was processed by ion nitriding at 560 °C with the mixture of nitrogen and argon as nitrogen source. After that, the friction and wear property of 38CrMoAl steel was studied. The results show that as the N₂ volume fraction in the mixed gas increases, the thickness of nitrided layer increases, and the surface hardness of the nitrided layer increases first and then decreases. By adjusting the volume fraction of N₂ in the mixed gas, the number of active nitrogen atoms can be changed, thus leading to the change in the phase composition of the nitrided layer. With N₂ and Ar in a volume ratio of 2:3, γ' -Fe₄N phase is the major phase and ϵ -Fe₂₋₃N phase is the minor phase in the nitrided sample. With N₂ and Ar in a volume ratio of 3:2, the nitrided layer has ϵ -Fe₂₋₃N phase as the major phase and γ' -Fe₄N as the minor phase. Compared with the substrate material, the ion-nitrided sample has a smaller friction coefficient and higher wear-resistance. With N₂ and Ar in a volume ratio of 3:2, the ion-nitrided sample has its compound layer in a thickness of 21.4 μ m, and its average friction coefficient up to 0.26, presenting good wear resistance. The mechanisms of friction and wear include fatigue, abrasion and oxidation.

Key words: surface treatment; 38CrMoAl steel; ion nitriding; ratio of nitrogen to argon; compound lay; wear resistance; abrasive wear; oxidation wear

液压泵柱塞、轴承、齿轮等部件使用环境越来越复杂, 要求材料的表面性能不断提高^[1]。为了提高材料的表面性能, 常对其进行离子渗氮处理^[2-4]。离子渗氮技术是通过辉光放电将阴极与阳极间的含氮气氛电离成含氮离子的等离子体, 在电场作用下向试样表面加

速轰击, 与试样溅射出的原子形成氮化物沉积在试样表面, 并在持续沉积与反应下生成氮化层。但离子渗氮技术存在渗氮速度慢、渗氮层质量较差等一系列缺陷, 并且对试样进行高温或长时间离子渗氮时会影响渗氮层质量, 从而降低渗氮层性能^[5-6]。

① 收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(51504138, 51674118); 江西省教育厅科技基金(GJJ150726)

作者简介: 王紫阳(1999—), 男, 河北武安人, 硕士研究生, 主要从事表面改性强化研究。E-mail: 17349867914@163.com

通信作者: 刘俊伟(1981—), 男, 甘肃兰州人, 博士, 副教授, 主要从事镁铝合金、表面工程研究。E-mail: Liujiw1981@126.com

为了进一步提高渗氮速度和渗氮层质量,学者们对离子渗氮工艺参数如渗氮温度^[7-8]、渗氮时间^[9-10]、渗氮气体^[11-12]、炉内气压^[13-14]等进行了研究。在离子渗氮中,大部分研究都是以氮氢混合气体或氨气作为氮源^[15-16],极少以氮氩混合气体作为氮源。本文在较高渗氮温度下以 38CrMoAl 钢为基体,采用氩气和氮气的混合气体进行表面离子渗氮,研究离子渗氮后 38CrMoAl 钢的摩擦磨损行为,结合化合物层厚度、硬度及相组成,分析试样耐磨性提高的原因,揭示离子渗氮试样的磨损机理。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验材料为 38CrMoAl 钢,其化学成分如表 1 所示,对其进行调质处理后,测得其表面硬度为 360HV_{0.1}。利用线切割机将试样加工成 10 mm × 10 mm × 5 mm 的立方体,再依次用 400~2 000 目 SiC 砂纸进行研磨,然后抛光至镜面,放入无水乙醇中进行超声波清洗,吹干待用。

表 1 38CrMoAl 钢基体化学成分(质量分数) %

C	Mn	Cr	Mo	Si	Al	Fe
0.38	0.45	1.64	0.18	0.35	0.90	余量

1.2 实验方法与检测

采用 JSD500 型多功能离子渗氮炉,所用工作气体为氮气与氩气。将样品置于炉中,抽炉内气压至真空度 6×10^{-4} Pa。首先,通入氩气,在真空度 10 Pa 左右溅射清洗 30 min,去除样品表面的天然钝化膜。清洗结束后,将氮气与氩气体积比分别控制在 2:3、3:2 和 4:1,其中氮氩混合气体总流量为 500 mL/min、渗氮气压 120 Pa、渗氮温度 560 °C、保温时间 10 h,进行离子渗氮处理。离子渗氮处理结束后,将样品在氮气气氛中缓慢冷却至室温后取出。

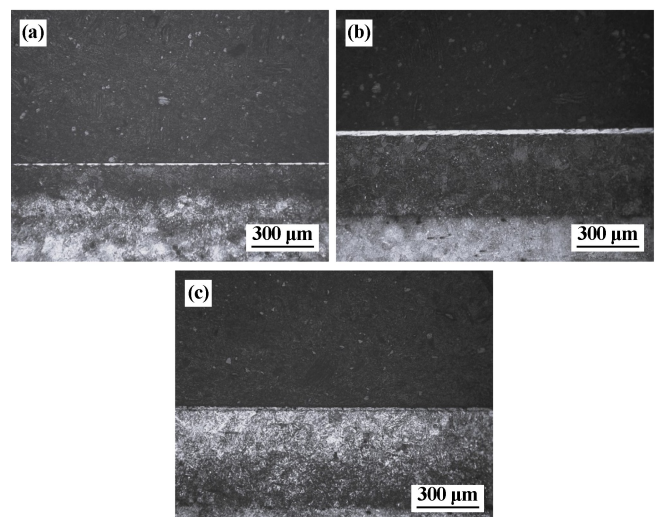
采用显微硬度仪测量试样表面硬度与截面硬度,载荷为 100g,保载时间 15 s;将渗氮后的试样打磨抛光后,用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀,并通过金相显微镜观察试样截面组织;使用 D8ADVANCE-A25 型 X 射线衍射仪对试样表面进行物相分析,扫描角度设置范围为 20°~80°,靶材选为 Cu 靶。使用 HT-1000 型号磨损试验机测试试样耐磨性,选用半径 2 mm 的 GCr15 钢球作为对磨材料,在 200g 载荷下以转速 200 r/min、旋转半径 2 mm 与渗氮试样旋转对磨 30 min;使用 FEI Nova

Nano SEM450 型扫描电子显微镜观察样品磨痕的微观形貌并进行 EDS 测试。

2 实验结果与分析

2.1 合金渗氮后的组织和 XRD 图谱

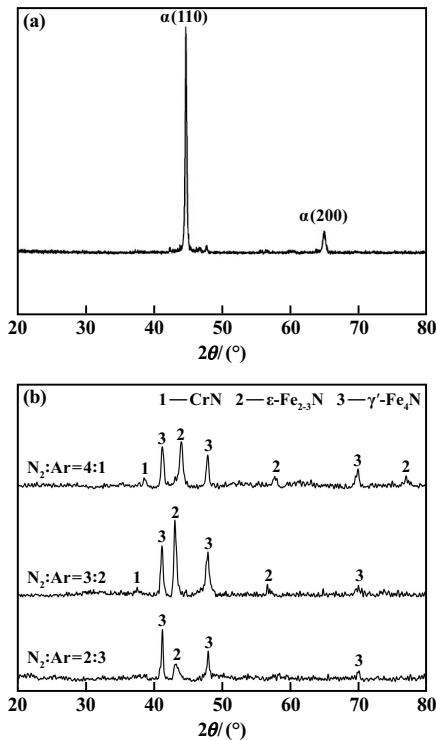
38CrMoAl 钢在不同 N₂ 和 Ar 体积比下离子渗氮处理后的截面金相显微组织如图 1 所示。不同气体比例下离子渗氮后试样表层都生成了白亮层。在 N₂ 和 Ar 体积比分别为 2:3、3:2、4:1 时,渗氮层厚度分别为 248.3 μm、388.3 μm、455.2 μm,化合物层厚度分别为 9.8 μm、21.4 μm、13.7 μm。可见,随着渗氮气氛中氮气比例增加,渗氮层厚度也逐渐增加。由此可见,温度一定时,通过增加渗氮气氛中氮气比例可以提高渗氮层厚度,加快渗氮速度。由于氮的化学键强度(9.67 eV)高于其他分子,在电离时会受到其他分子的限制影响^[17]。本实验加入氩气使得 38CrMoAl 钢可以在更短的时间内生成厚度更大的渗氮层,大幅度提高了渗氮速度,说明氩气可以使氮气电离时所需的能量降低,提高氮气的电离效率,使得参与反应的活性氮原子数量上升;另一方面,氩气电离出的氩离子会加速轰击试样表面,使试样表面产生缺陷并成为氮离子向试样内部扩散的通道;在两种效应的共同作用下,离子渗氮的速度得到了大幅度提高。



(a) N₂:Ar=2:3; (b) N₂:Ar=3:2; (c) N₂:Ar=4:1

图 1 38CrMoAl 钢在不同氮气氩气比例下离子渗氮后的显微组织

图 2 为 38CrMoAl 钢试样调质处理及渗氮处理后的 X 射线衍射图谱。由图 2 可以看出,调质钢全由 α-Fe 相组成,没有残余的奥氏体相;不同 N₂ 和 Ar 体积比下离子渗氮处理后,试样表面的主要物相由 α-Fe 相转变为 ε-Fe₂₋₃N 相和 γ'-Fe₄N 相^[18]。



(a) 调质钢; (b) 不同氮氩气体比例下离子渗氮
图2 38CrMoAl 钢的 X 射线衍射图谱

N_2 和 Ar 体积比为 2:3 时, 渗氮层中以 γ' - Fe_4N 相为主相, ϵ - $Fe_{2-3}N$ 相为次相。随着渗氮气氛中 N_2 比例提高, ϵ - $Fe_{2-3}N$ 相开始成为主相, 次相为 γ' - Fe_4N 相。这是由于氮与铁的反应属于反应扩散, 铁氮化合物的生成与氮含量有关^[19]。由 Fe-N 相图可知, ϵ - $Fe_{2-3}N$ 化合物中的氮含量高于 γ' - Fe_4N 化合物。随着混合气体中氮气比例上升, 炉中会有更多氮原子与基体中溅射出的铁原子发生反应, 提高了铁氮化合物中氮元素含量, 生成更多的 ϵ - $Fe_{2-3}N$ 富氮化合物。由此说明, 通过控制渗氮气氛中氮气比例, 可以控制 38CrMoAl 钢渗氮层物相组成。

2.2 硬度梯度

不同 N_2 和 Ar 体积比下制备的渗氮层显微硬度分布如图 3 所示。 N_2 和 Ar 体积比 2:3、3:2、4:1 时, 离子渗氮试样表面硬度分别为 950.3HV_{0.1}、1 040.3HV_{0.1}、998.2HV_{0.1}。离子渗氮处理后试样表面硬度相对于基体都得到极大提高。但渗氮试样显微硬度从表面到基体不断下降, 并逐渐接近基体调质钢的硬度。从图 3 可以看出, 随着混合气体中氩气比例提高, 渗氮层截面硬度得到提高, 说明氩气的加入可以改善渗氮层中扩散层的性能, 这是由于氩气含量较高时可以获得小间隙的均匀辉光放电, 并能够更加稳定地电离氮气, 提供数量稳定的活性氮原子, 使氮元素向试样内部扩散更

均匀, 从而改善了扩散层性能。但 N_2 和 Ar 体积比 2:3 时, 在距表面一定深度后试样截面硬度会低于 N_2 和 Ar 体积比 3:2 与 4:1 的试样, 这说明混合气体中氮气比例较低时, 渗氮层厚度会下降, 这与图 1 结果一致。

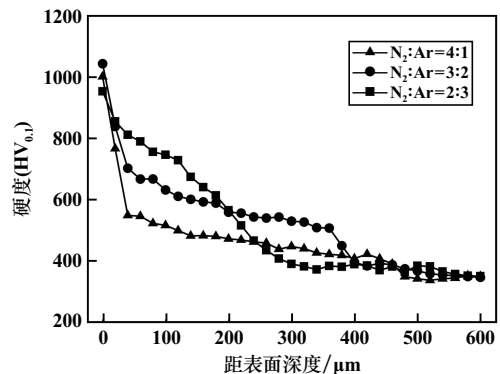
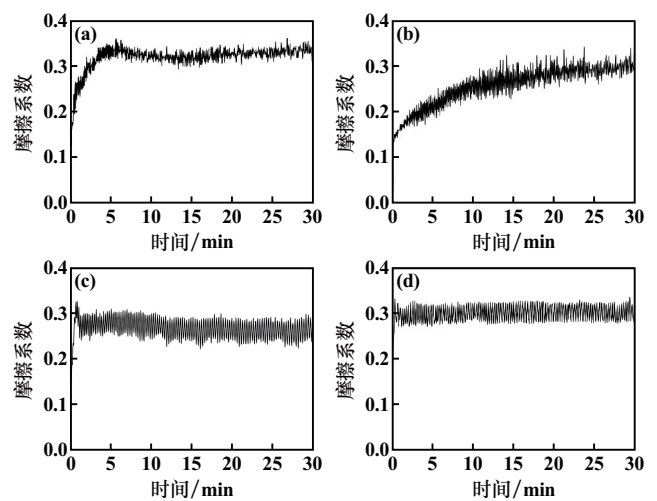


图3 不同气体比例下 38CrMoAl 钢渗氮层截面硬度分布

混合气体中氮气比例上升, 渗氮层表面硬度呈现先增大后减小的趋势, 这与 γ' - Fe_4N 相转变为硬度较高的 ϵ - $Fe_{2-3}N$ 相有关(见图 2(b))。

2.3 摩擦系数与磨痕形貌

图 4 为离子渗氮处理前后试样摩擦系数随时间的变化曲线。



(a) 调质钢; (b) N_2 :Ar=2:3 离子渗氮;

(c) N_2 :Ar=3:2 离子渗氮; (d) N_2 :Ar=4:1 离子渗氮

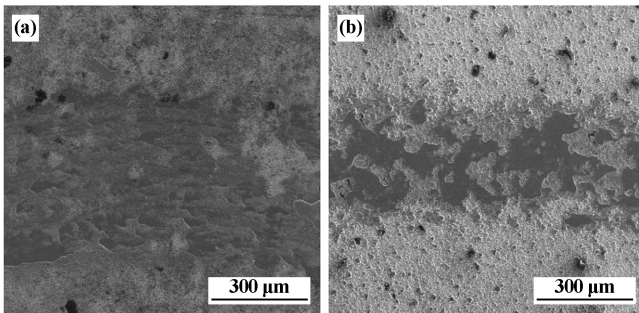
图4 离子渗氮处理前后试样摩擦系数随时间的变化曲线

摩擦磨损试验开始后, 试样均会进入磨合阶段, 经过一段时间后可获得稳定磨损的摩擦系数^[20]。将稳定磨损的摩擦系数取平均值得到平均摩擦系数。调质钢基体的平均摩擦系数为 0.33; N_2 和 Ar 体积比 4:1 和 2:3 时, 试样表面平均摩擦系数约为 0.30; N_2 和 Ar 体积比 3:2 时, 试样平均摩擦系数为 0.26。离子渗氮后试样的表面平均摩擦系数均小于基体试样, 说明离子

渗氮后试样耐磨性均得到提高。

以氮气和氢气体积比 1:4 混合气体作为氮源在 38CrMoAl 表面进行离子渗氮, 相同条件下, 试样表面摩擦系数为 0.32^[15], 说明氩气的加入可以提高渗氮层表面耐磨性并提高渗氮层厚度。

图 5 为 N_2 和 Ar 体积比 2:3、3:2 时离子渗氮试样的磨痕形貌。磨痕宽度与载荷的大小有关, 相同载荷下, 试样表面的磨痕宽度可以反映试样的摩擦磨损性能。 N_2 和 Ar 体积比 2:3 的渗氮试样磨痕宽度约为 476 μm , N_2 和 Ar 体积比 3:2 的渗氮试样磨痕宽度约为 354 μm , 且表面磨损和破碎痕迹减少, 表明后者具有更好的耐磨性能。试样耐磨性会随着化合物层厚度与 $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ 相含量的提高而得到改善, 这归功于 $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ 相具有良好的摩擦磨损性能与较高的硬度^[21]。此外在渗氮层表面存在孔洞, 这是氮分子的析出造成的^[22]。



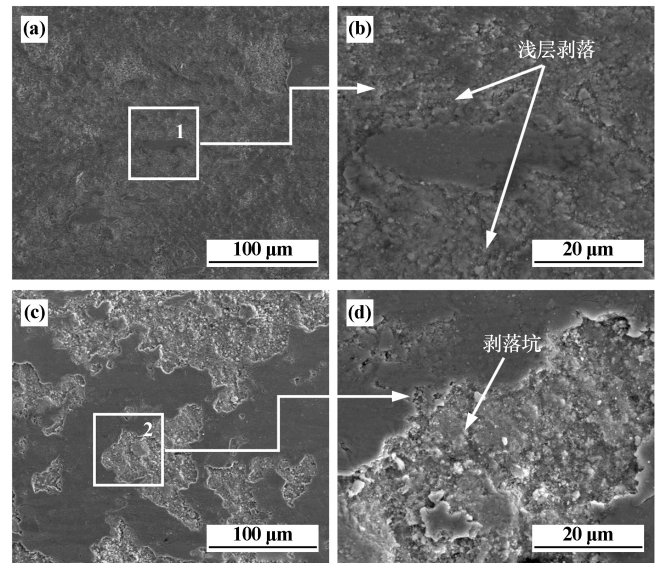
(a) N_2 :Ar=2:3; (b) N_2 :Ar=3:2

图 5 不同氮气氩气比例等离子氮化后试样的磨损形貌

图 6 为不同 N_2 和 Ar 体积比下制备的渗氮层磨损表面微观形貌图, 其中图 6(b) 和图 6(d) 分别为图 6(a) 和图 6(c) 的局部放大图。从图 6 可以看出, N_2 和 Ar 体积比 2:3 和 3:2 的渗氮样品摩擦磨损时, 在沿着摩擦副滑动方向上均发生了浅层剥落。随着摩擦磨损进行, 试样表面会因颗粒脱落形成小坑洞, 造成试样表面局部应力集中^[23], 坑洞周围不断产生扩展裂纹, 最终发生疲劳破坏造成浅层剥落。而因疲劳破坏掉落的碎屑在摩擦副的运作下被研磨成了小颗粒 (图 6(b), 图 6(d)), 说明试样表面在磨损过程中也发生了磨粒磨损。

N_2 和 Ar 体积比 2:3 的渗氮试样表面剥落情况比 N_2 和 Ar 体积比 3:2 的渗氮试样更加严重, 这是化合物层厚度与表面硬度的区别引起的。前者化合物层厚度薄和表面硬度低, 在相同载荷下进行摩擦磨损时, 化合物层会在较短时间内严重破碎, 产生更多的碎屑, 并在摩擦副接触面之间被磨成小颗粒, 从而发生了更严重的磨粒磨损。这说明化合物层较厚且较硬时可以有效

减少浅层剥落, 减缓疲劳磨损和磨粒磨损的发生, 从而提高试样的摩擦磨损性能。



(a) N_2 :Ar=2:3; (b) N_2 :Ar=3:2

图 6 38CrMoAl 钢试样渗氮层磨损表面 SEM 图

表 2 为图 6 中相关区域的 EDS 测试结果。区域 1 与区域 2 均存在较高含量的 O 元素, 这意味着渗氮试样在磨损过程中都发生了氧化磨损。

表 2 图 6 中相关区域的 EDS 测试结果 (质量分数) %

区域	C	N	O	Al	Cr	Fe
1	8.93	4.98	26.36	0.63	2.30	56.80
2	7.76	5.22	21.21	0.40	6.63	58.79

另外, 区域 2 中 Cr 元素含量高于区域 1, 说明 N_2 和 Ar 体积比 3:2 的渗氮试样表面有更多 Cr 的氮化物生成。而 Cr 的氮化物具有很高的抵抗磨损能力, 这也是该试样有更好耐磨性的原因^[24]。

3 结 论

1) 560 $^{\circ}\text{C}$ 下, 以氮气和氩气的混合气体为氮源, 对 38CrMoAl 钢表面进行离子渗氮, 渗氮层厚度随 N_2 体积分数增大而增加, N_2 和 Ar 体积比 4:1 时, 渗氮层厚度为 455.2 μm ; 渗氮层表面硬度随着 N_2 体积分数增大呈现先增大后减小的趋势, N_2 和 Ar 体积比 3:2 时, 渗氮层表面硬度达到 1 040.3HV_{0.1}。

2) 通过调节混合气体中 N_2 的比例, 可以改变活性氮原子数量从而改变渗氮层的物相组成。 N_2 和 Ar 体积比 2:3 时, 渗氮层中以 $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$ 相为主相, $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ 相为次相; N_2 和 Ar 体积比 3:2 和 4:1 时, $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ 相

成为主相, γ' -Fe₄N 相为次相。

3) 与基体材料相比, 离子渗氮试样具有更小的摩擦系数, 耐磨性得到提高, 摩擦磨损机制为疲劳磨损、磨粒磨损和氧化磨损。N₂ 和 Ar 体积比 3:2 时, 渗氮试样化合物层厚度为 21.4 μm , 平均摩擦系数达到 0.26, 表现出良好的耐磨性。

参考文献:

- [1] LU S J, MIAO B, SONG L, et al. Enhancement of wear resistance of AISI 1045 steel by a two-step plasma treatment[J]. *Vacuum*, 2017, 145:153-157.
- [2] Naeem M, Iqbal J, Zakaullah M, et al. Enhanced wear and corrosion resistance of AISI-304 steel by duplex cathodic cage plasma treatment[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 375:34-35.
- [3] WU J Q, YE X M, LI H, et al. A study of the influence of plasma post-oxidizing on the corrosion resistance[J]. *Vacuum*, 2015, 111: 110-113.
- [4] TANG L, JIA W J, HU J. An enhanced rapid plasma nitriding by laser shock peening[J]. *Materials Letters*, 2018, 231:91-93.
- [5] Bhadraiah D, Nouveau C, Veeraswami B, et al. Plasma based nitriding of tool steel for the enhancement of hardness[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46:940-943.
- [6] 刘东静, 由园, 闫牧夫, 等. 38CrMoAl 钢 520 $^{\circ}\text{C}$ 不同气氛离子渗氮层表征[J]. *中国表面工程*, 2022, 35(4):196-203.
- [7] Matjaž G, Francisco R, Bojan P, et al. The influence of the plasma-nitriding temperature on the microstructure evolution and surface properties of additive-manufactured 18Ni300 maraging steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 433:128089.
- [8] Tima R, Mahboubi F. Effect of plasma nitriding temperature on microstructure and wear properties of electroless nickel-boron coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 415:127084.
- [9] Junji M, Petros A. The effect of plasma nitriding treatment time on the tribological properties of the AISI H13 tool steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 375:15-21.
- [10] Hosseini S R, Ahmadi A. Evaluation of the effects of plasma nitriding temperature and time on the characterisation of Ti6Al4V alloy[J]. *Vacuum*, 2013, 87:30-39.
- [11] YANG Y, ZHOU X, DAI X Z, et al. Comparative study of plasma nitriding and plasma oxynitriding for optimal wear and corrosion resistance: Influences of gas composition[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15:448-459.
- [12] Ohtsu N, Miura K, Hirano M, et al. Investigation of admixed gas effect on plasma nitriding of AISI316L austenitic stainless steel[J]. *Vacuum*, 2021, 193:110545.
- [13] Ramos H E L, Franco A R, Vieira E A. Influence of plasma nitriding pressure on microabrasive wear resistance of a microalloyed steel[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(2):1694-1700.
- [14] LU S J, ZHAO X B, WANG S K, et al. Performance enhancement by plasma nitriding at low gas pressure for 304 austenitic stainless steel[J]. *Vacuum*, 2017, 145:334-339.
- [15] 彭甜甜, 林超林, 陈尧, 等. 离子渗氮化合物层相调控对耐磨性的影响[J]. *表面技术*, 2020, 49(8):172-177.
- [16] 李延超. 38CrMoAl 钢混合水射流喷丸和离子渗氮复合处理的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [17] Saloum S, Naddaf M, Alkhaled B. Diagnostics of N₂-Ar plasma mixture excited in a 13.56 MHz hollow cathode discharge system: application to remote plasma treatment of polyamide surface[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 45:152-163.
- [18] Lamim T D S, Salvaro D, Giacomelli R O, et al. Plasma nitrided compound layers in sintered parts: Microstructures and wear mechanisms[J]. *Wear*, 2021, 447:203810.
- [19] YAN M F, YAN J H, Bell T. Numerical simulation of nitrided layer growth and nitrogen distribution in ϵ -Fe₂₋₃N, γ' -Fe₄N and α -Fe during pulse plasma nitriding of pure iron[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2000(8):491-496.
- [20] Luo Q S, Oluwafemi O, Kitchen M, et al. Tribological properties and wear mechanisms of DC pulse plasma nitrided austenitic stainless steel in dry reciprocating sliding tests[J]. *Wear*, 2017, 376:1640-1651.
- [21] Mashreghi A R, Soleimani S M Y, Saberifar S, et al. The investigation of wear and corrosion behavior of plasma nitrided DIN 1.2210 cold work tool steel[J]. *Materials and Design*, 2013, 46:532-538.
- [22] Ramesh R, Gnanamoorthy R. Fretting wear behavior of liquid nitrided structural steel, EN₂₄ and bearing steel, En31[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 171(1):61-67.
- [23] LIU X, HUANG L, WANG Y H, et al. Effect of forged substrate geometry on temperature and stress field in additive manufacturing[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 52:79-95.
- [24] TENG Y, GUO Y Y, ZHANG M, et al. Effect of Cr/CrN_x transition layer on mechanical properties of CrN coatings deposited on plasma nitrided austenitic stainless steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 367:100-107.

引用本文: 王紫阳, 刘俊伟, 罗佳杰, 等. 离子渗氮对 38CrMoAl 钢组织及摩擦磨损性能影响[J]. *矿冶工程*, 2024, 44(3):140-144.