

碳氮共渗温度对船用高速重载齿轮钢 摩擦学性能影响研究

霍东阳¹, 李 靚³, 陈营利¹, 张润博^{1,2}, 陈 涛¹

(1. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078; 2. 先进船舶发动机技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150078; 3. 哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了探究碳氮共渗温度对 17CrNiMo6 船用高速重载齿轮钢共渗层组织和摩擦磨损性能的影响, 在 860, 880 和 900 °C 条件下对低碳合金钢 17CrNiMo6 进行碳氮共渗处理。利用扫描电镜和维氏硬度计分析其显微组织与硬度变化, 并通过摩擦磨损试验表征其摩擦磨损性能。结果表明: 相较于在 860 °C 温度条件下共渗处理 6 h 的试样, 当共渗温度提高至 880 和 900 °C 时, 试样表面显微硬度分别提升 28.0% 和 46.0%, 渗层厚度分别增加 33.1% 和 63.6%; 在碳氮共渗温度为 880 °C 条件下, 试样表面渗层组织以马氏体为主, 磨损失重为 0.6 mg, 该温度下材料强度匹配最佳且摩擦系数最低, 磨损机制以粘着磨损为主, 并伴随轻微的磨粒磨损, 试样表现出最优耐磨性能。

关 键 词: 碳氮共渗; 17CrNiMo6; 船用高速重载齿轮; 耐磨性能

中图分类号: TH132.41 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2026.02.019

[引用本文格式] 霍东阳, 李 靚, 陈营利, 张润博, 陈 涛. 碳氮共渗温度对船用高速重载齿轮钢摩擦学性能影响研究 [J]. 热能动力工程, 2026, 41(2): 173–179. HUO Dongyang, LI Liang, CHEN Yingli, ZHANG Runbo, CHEN Tao. Research on the influence of carbonitriding temperature on the tribological properties of marine high-speed and heavy-duty gear steel [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2026, 41(2): 173–179.

Research on the Influence of Carbonitriding Temperature on the Tribological Properties of Marine High-speed and Heavy-duty Gear Steel

HUO Dongyang¹, LI Liang³, CHEN Yingli¹, ZHANG Runbo^{1,2}, CHEN Tao¹

(1. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078;

2. National Key Laboratory of Advanced Marine Engine Technology, Harbin, China, Post Code: 150078;

3. College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001)

Abstract: To explore the influence of carbonitriding temperature on the microstructure and friction and wear properties of the carbonitriding layer of marine high-speed and heavy-duty gear steel 17CrNiMo6, the low-carbon alloy steel 17CrNiMo6 was subjected to carbonitriding treatment at different temperatures of 860 °C, 880 °C and 900 °C. Subsequently, its microstructure and hardness variations were analyzed using a scanning electron microscope and a Vickers hardness tester. And its friction and wear performance was characterized by a friction and wear test. The results show that compared with the sample treated at 860 °C for 6 hours, when the co-infiltration temperature is increased to 880 °C and 900 °C, the microhardness of the sample surface increases by 28.0% and 46.0% respectively, and the thickness of the infiltration layer increases by 33.1% and 63.6% respectively. When the carbonitriding temperature is 880 °C, the infiltration layer structure on the sample surface is mainly martensite, and the wear weight loss is 0.6 mg. At this temperature, the material's strength and toughness match best and the wear coefficient is the lowest. The wear mechanism is mainly adhesive wear, accompanied by slight abrasive wear,

and the sample exhibits the best wear resistance.

Key words: carbonitriding; 17CrNiMo6; marine high-speed and heavy-duty gears; wear resistance performance

引 言

齿轮传动是机械传动的重要组成部分,可以直接承担动力接触与动力传递这一核心功能^[1],并以其可靠、高效的特点被广泛应用于船舶、车辆、轨道交通、矿山、风电等高速重载的工业场景。因此,提升齿轮表面性能是实现其在重载工况下稳定运行的重要保障。

17CrNiMo6 钢具有优良的综合力学性能,是一种常用于船舶动力传动关键部件的低碳合金钢,其在重载、高转速工况下性能表现优异,已成为齿轮制造的成熟材料^[2]。该材料通过低碳高合金的成分设计,在渗碳处理后可实现表面高硬度与芯部高韧性的协同优化,尤其适用于需通过化学热处理强化以应对高应力、高冲击载荷及严苛工况的关键部件。

传统的热处理技术如渗碳、渗氮等,能有效提升材料表面的力学性能和使用寿命,通过调节关键工艺参数可以精确控制渗层结构、厚度等,尤其适合需要强韧性结合的零部件^[3-5]。Vilis 等人^[6]通过研究真空渗碳温度(960 ~ 1 000 ℃)对 16MnCr5 和 20NiMoCr6-5 钢的性能的影响,发现渗碳温度显著改变了材料的力学性能,对显微硬度和晶粒结构也具有调控作用。较高的渗碳温度有效增大了显微硬度^[7],但会导致奥氏体晶粒的粗化。然而,随着装备精密化需求提升,传统渗碳工艺因渗层均匀性差、周期长、高温变形等问题,已难以满足先进传动零件的服役要求^[8],传统渗氮工艺渗层较薄、抗疲劳能力偏低的缺点也逐渐暴露出来^[9]。

碳氮共渗是一种在钢件表面同时渗入碳和氮的化学热处理工艺^[10-12],通常在低于传统渗碳的温度(780 ~ 880 ℃)下进行^[13-14]。氮的引入显著提高热处理材料的表面硬度、耐磨性及抗腐蚀性,同时具有热处理变形小、周期短的优势^[15]。与传统渗碳相比,碳氮共渗工艺渗速更快、渗层质量更优且表面光洁度更高^[16]。Kocurova 等人^[17]经过对 S460MC 微合金化热机械处理钢碳氮化样品的分析证实,共渗表层由马氏体、残余奥氏体和合金元素的细小碳化

物组成。

17CrNiMo6 钢传统渗碳工艺温度较高(通常 920 ℃左右),可能导致微观晶粒粗大、表面碳浓度分布不均,进而增大工件畸变。反之,若热处理温度过低,则可能会导致渗层扩散速度变慢,降低生产效率。因此,共渗热处理温度相对较低的碳氮共渗工艺为提升 17CrNiMo6 的性能提供了新思路。目前,关于碳氮共渗对材料表面耐磨性能影响的相关研究较少,特别是针对不同共渗温度下 17CrNiMo6 钢的共渗层的微观组织及其表面磨痕形貌的系统研究尚为不足。本文从碳氮共渗工艺参数优化的角度出发,探究工艺参数对热处理样件渗层厚度、微观形貌及物相组成的影响。通过对 17CrNiMo6 船用齿轮钢进行不同载荷条件下的摩擦学性能测试与分析,探究碳氮共渗温度对材料表面摩擦性能的影响机制,并进一步探索共渗强化机制。

1 试验材料与方法

本研究使用材料为 17CrNiMo6 钢,其具体的化学成分如表 1 所示。

表 1 17CrNiMo6 钢的质量分数
Tab. 1 Mass fraction of 17CrNiMo6 steel

成分	质量分数/%	成分	质量分数/%
C	0.14 ~ 0.19	Cr	1.50 ~ 1.80
Si	0.15 ~ 0.40	Ni	1.40 ~ 1.70
Mn	0.40 ~ 0.60	Mo	0.25 ~ 0.35
P	0.015	Fe	95 ~ 96
S	0.002		

首先对样品进行预加工处理。从原材料钢中切取 15 mm × 15 mm × 15 mm 尺寸试样,用 60# SiC 研磨砂纸磨去样品表面氧化外皮,随后依次使用 500 # ~ 3 000 #SiC 砂纸对试样表面进行研磨并抛光至镜面,最后置于无水酒精中超声清洗 3 min。对清洗后的试样进行碳氮共渗处理,具体工艺路线如图 1 所示。由图 1 可知,为研究共渗温度对表面的物相及力学性能的影响,并且尽量减小小齿轮畸变和保证生产效率,在常规齿轮碳氮共渗温度范围(820 ~

900 ℃)内,对试样分别进行了 860,880 及 900 ℃ 的碳氮共渗处理。将不同温度碳氮共渗处理 6 h 的试样分别定义为 860,880 和 900 ℃。

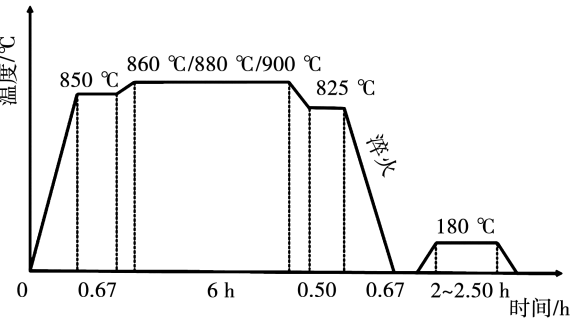


图 1 碳氮共渗工艺路线
Fig. 1 Carbonitriding process route

通过扫描电子显微镜 (SEM, SU5000) 和能谱分析仪 (EDS, UltimMax40) 观察碳氮共渗层的微观形貌。采用入射 X 射线与衍射 X 射线夹角为 2θ ($20^\circ \sim 100^\circ$) 的铜辐射 X 射线衍射 (XRD) 对试样共渗表面物相组成进行分析,使用维氏硬度计 (HV-1000) 在 1 000 g 负载下检测表面与横截面的显微硬度。根据 HB 5493-91《航空钢制件渗碳、碳氮共渗渗层深度测定方法》,以零件表面至维氏硬度值为 550 HV 处的厚度作为强化层深度。渗层厚度即为硬度计加载载荷为 1 000 g (9.8 N) 时,渗层表面到 550 HV1 处的距离。测试过程中,沿垂直于共渗表面向芯部方向,以 20 μm 作为步长进行硬度测定,同一深度进行 3 次及以上测定,以减小测量误差;当渗层深度达到 100 μm 及以上时,将步长调整为 50 μm 进行测定。利用高温摩擦仪 (HT-1000, 兰州公司),在室温条件下对试样在 2 000 g 载荷下的摩擦学行为及特征进行测试与分析,使用摩擦副为 SiN,摩擦环境为空气。摩擦学测试的参数如表 2 所示。

表 2 摩擦测试参数
Tab. 2 Tribological test parameters

参 数	数 值
频率/Hz	10
转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	560
载荷/g	2 000
时间/h	1

2 试验结果及讨论

2.1 碳氮共渗截面微观组织分析

图 3 为经 860,880 和 900 ℃ 处理后试样表面的物相组成。观察图 3 可知,碳氮共渗处理后样品表面主要由 FeNi 相 (基体相)、 Fe_3C 和 Fe_2N 相组成。随着共渗温度的升高,基体峰强有明显减弱,而 Fe_2N 峰强度增强,这是由于在共渗处理较低温度范围内,N 更容易与 Fe 结合形成化合物。当碳氮共渗温度达到 900 ℃ 时, Fe_3C 峰强显著增强, Fe_2N 的峰强降低,表明渗层中 Fe_3C 质量分数增多, Fe_2N 质量分数降低。文献 [18] 研究指出,当温度升高时,C 原子能量增加,可跨越金属表面扩散势垒的原子量增大,C 原子扩散能力增强。在共渗处理的高温阶段,碳氮共渗以 C 原子扩散为主,而 N 原子扩散受到抑制,从而导致其 X 射线衍射 (XRD) 图谱上不再显示明显的铁氮相特征峰^[19-20]。试验结果与上述文献研究结论一致。

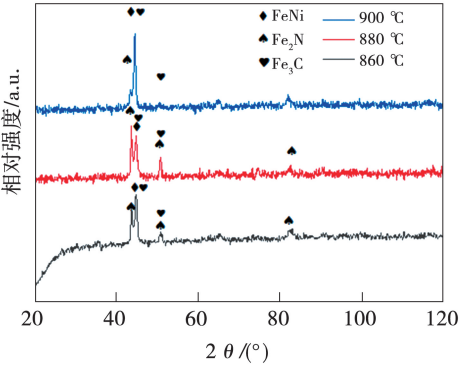


图 2 不同碳氮共渗温度下处理后表面的 XRD 图谱
Fig. 2 Surface XRD patterns after carbonitriding treatment at different temperatures

对经 860,880 和 900 ℃ 3 种不同温度共渗处理的试样截面进行 SEM 扫描电子显微镜观察,其截面形貌及 EDS 能谱分析结果如图 3 所示。由图 3 可知,在 860 ℃ 共渗处理的试样表层区域存在一层明显的深色组织,厚度约为 132 μm 。这是由于共渗的过程中碳氮元素由外向内扩散,在试样表面形成扩散层^[21]。当碳氮元素的质量分数降低至不能满足化合物形成条件时,化合物含量迅速减少,组织形貌随之改变,从而在电子显微镜下出现衬度差。观察 860 ℃ 试样的能谱发现,表层为 C 元素富集区,并含有少量 N 元素,次表层中碳氮元素质量分数区随深

度增大呈现下降趋势。观察截面形貌局部放大图可以发现,共渗层主要以针状马氏体和少量细小颗粒组成,表层暗色的针片状马氏体与白色铁素体形成一定晶体学结构;880 ℃ 共渗样品相较于 860 ℃ 处理组织更均匀且细致,最表层区域析出相颗粒增多,渗层厚度也有所增加,约为 171 μm;900 ℃ 共渗处理后的渗层厚度进一步增加,约为 236 μm;渗层主要由 C 元素组成,未观察到明显 N 元素富集,说明共渗温度为 900 ℃ 时,主要以渗 C 为主,这与 XRD 分析结果一致。

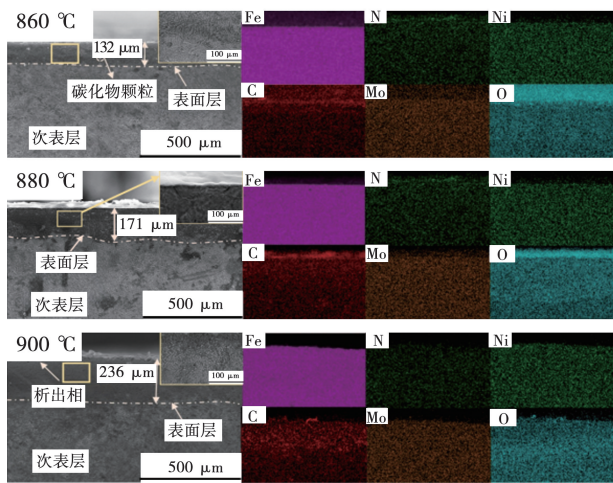


图 3 不同共渗温度下截面组织形貌及 EDS 能谱
Fig. 3 Cross-sectional structure morphology and EDS energy spectrum of carbonitriding treated samples at different temperatures

2.2 碳氮共渗温度对渗层硬度影响

本文对试样沿截面方向的维氏硬度分布进行测量,17CrNiMo6 基体材料的表面硬度平均值为 234 HV1,基材截面硬度梯度变化不大,维持在 220 HV1 左右。图 4 为不同共渗温度下碳氮共渗处理后的试样表面硬度和截面硬度梯度。由图 4(a)可知,经碳氮共渗处理的试样表面硬度显著提升,860 ℃ 样件表面硬度为 838.5 HV1,约为基体硬度的 3.8 倍。随着温度的升高,表面硬度逐渐提升,880 和 900 ℃ 试样表面硬度分别为 1 073.4 和 1 224 HV1,相对于 860 ℃ 试样分别提高 28.0% 和 46.0%,说明提高共渗温度可有效提升试样表面硬度。由图 4(b)可知,不同温度处理的试样,其整体截面硬度随试样截面深度的增加而逐渐降低,其中距试样顶部 0 ~ 50 μm 范围内,硬度值降低最显著。随着共渗温度的升高,

相同厚度处渗层硬度逐渐升高。根据硬度法测定的渗层厚度标准可知,860,880 和 900 ℃ 试样渗层厚度分别为 478,636 和 782 μm,后两者相对于 860 ℃ 试样分别提高了 33.1% 和 63.6%。这是由于高温条件下 C 原子活性增强,渗透速率加快,导致渗层厚度增大,并且相同厚度处 C 质量分数较高、硬度大。

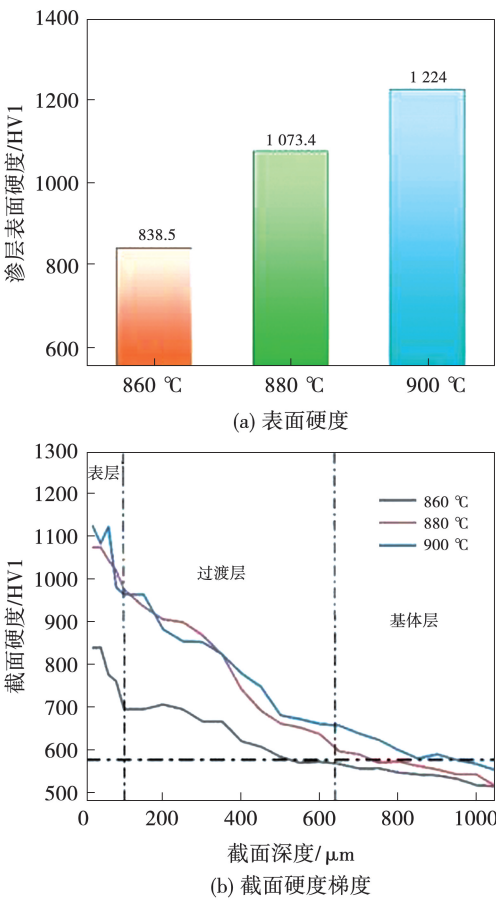


图 4 不同共渗温度下碳氮共渗处理后的截面硬度梯度和表面硬度

Fig. 4 Cross-sectional hardness gradient and surface hardness after carbonitriding treatment at different temperatures

2.3 碳氮共渗温度对试样摩擦性能影响

图 5 为不同共渗温度下试样在正压力 20 N、转速 560 r/min、常温 2 000 g 载荷条件下经 1 h 干摩擦的摩擦系数曲线。由图 5 可知,随着共渗温度升高,摩擦系数逐渐变小。在摩擦磨损最初 10 min,860 和 900 ℃ 共渗样品摩擦系数曲线同时出现不规则且起伏较大的波动,随后进入稳态磨损阶段。其中 860 ℃ 共渗样品进入稳态磨损阶段后摩擦系数保持

在 0.50 左右,并呈现缓慢下降的趋势,磨损失重为 1.1 mg。880 ℃ 共渗样品的摩擦系数在 0.17~0.21 之间,磨损失重仅为 0.6 mg,显著低于其他 2 种温度参数样品。900 ℃ 共渗样品稳态磨损时的摩擦系数维持在 0.40~0.45 之间,磨损失重为 0.9 mg。整体上看,在该较高载荷下 3 种试样均能保持较为稳定的磨损性能,其中 880 ℃ 处理的样品磨损失重最小,综合摩擦学性能最优。

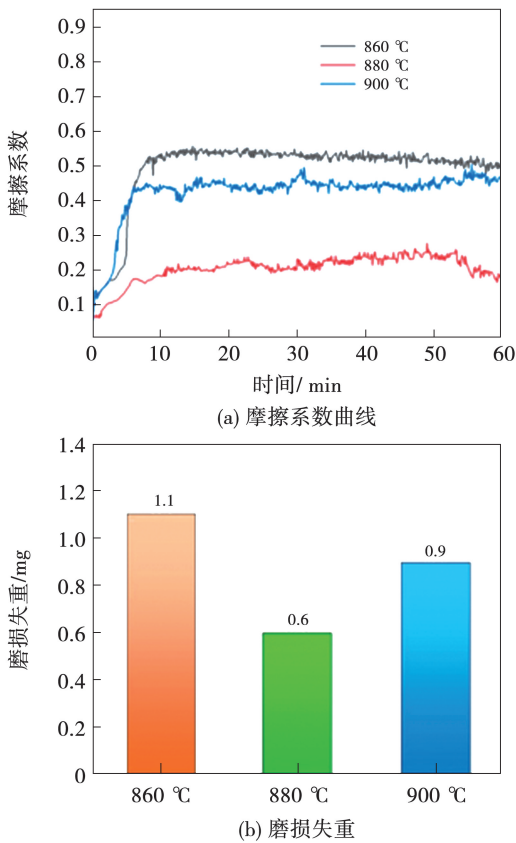


图 5 不同共渗温度下碳氮共渗处理后的 2 000 g 载荷干摩擦 1 h 的摩擦系数曲线和磨损失重

Fig. 5 Friction coefficient curves and wear weight loss of dry friction of 2 000 g load for one hour after carbonitriding treatment at different co-infiltration temperatures

图 6 为不同温度共渗处理样品的干摩擦磨痕形貌。由图 6 可知,共渗温度为 860 ℃ 时,碳氮共渗试样磨痕宽度较大,磨痕宽度约为 893 μm,表面大面积剥落。这表明在循环摩擦剪切力作用下,860 ℃ 碳氮共渗所形成的梯度渗层表层产生剥落痕迹条带,磨损过程中发生疲劳磨损,进而引发剥落或开裂。当共渗温度为 880 ℃ 时,碳氮共渗试样的磨痕宽度变窄,为 725 μm,可局部观察到粘着物和少量

犁沟。这表明 880 ℃ 碳氮共渗试样以磨粒磨损与粘着磨损为主要磨损形式,因为试样硬度较高,磨损过程伴随着硬质相的脱离,并逐渐转化为粘着物,使试样的摩擦系数提升。当共渗温度升至 900 ℃ 时,试样磨痕宽度进一步减小至 685 μm,磨痕区域散落的碎屑量减少,但在磨痕表面观察到微裂纹的产生。这表明表面材料经历微观疲劳磨损,不利于渗层的长期稳定服役。

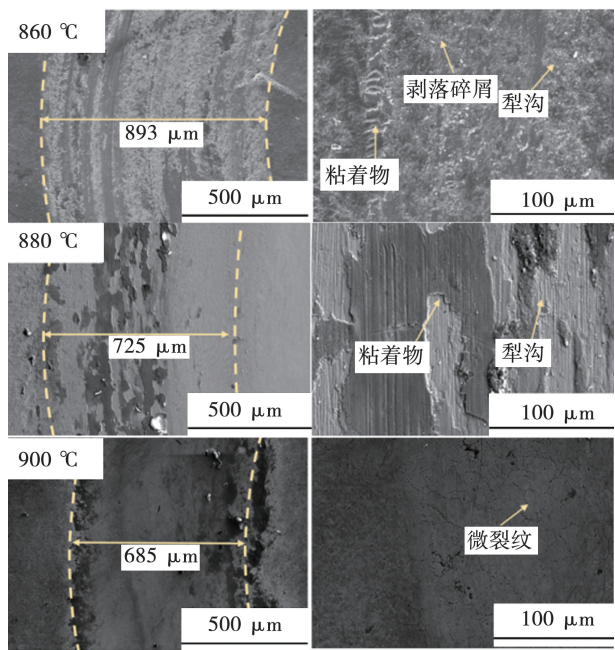


图 6 不同共渗温度下碳氮共渗处理后的 2 000 g 载荷干摩擦磨痕形貌

Fig. 6 Morphology of dry friction scars of 2 000 g load after carbonitriding treatment at different co-infiltration temperatures

图 7 为不同共渗温度下经碳氮共渗处理后 2 000 g 载荷下的干摩擦磨损形貌及 EDS 能谱。由图 7 可知,860 ℃ 碳氮共渗试样磨痕处 O 元素富集,说明在磨损过程中发生氧化反应,部分氧化物碎屑进入摩擦界面,并产生少量轻微犁沟。结合图 6 可知,880 ℃ 共渗样品基本无磨屑产生,产生的磨屑多转变为粘着物。然而,EDS 图谱显示右侧无粘着物区域的 C 元素质量分数显著降低,表明该区域磨损严重,磨损机制已从粘着磨损转变为磨粒磨损,并伴随少量犁沟与摩擦碎屑。900 ℃ 共渗试样磨痕处 Si 元素、O 元素质量分数很高,说明在机械力的作用

下,对磨球中含有的 Si 元素逐渐转移至样品表面,并在对磨球的持续剪切、挤压作用下堆积于磨痕边缘。

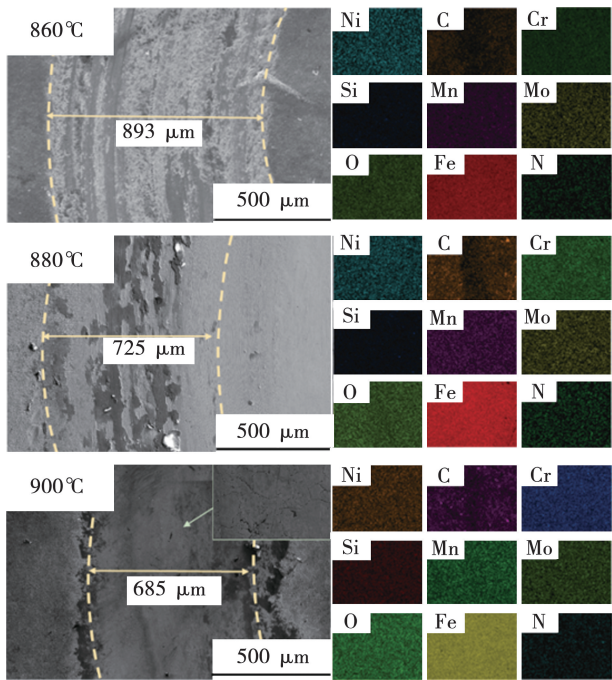


图 7 不同共渗温度下经碳氮共渗处理后 2 000 g 载荷的干摩擦磨痕形貌及 EDS 能谱

Fig. 7 Morphology of dry friction scars and EDS energy spectrum of 2 000 g load after carbonitriding treatment at different co-infiltration temperatures

综合分析,860 °C 试样的表面在经历磨损试验后表层磨痕处发生剥落,脱离的材料进入摩擦区域形成三体磨损,导致摩擦学性能显著恶化。880 °C 试样磨痕始终较浅,对磨球与材料表面相对运动过程中发生粘着结合,并在随后的运动中撕裂分离,粘着物覆盖磨痕外侧 2/3 的区域。圆周摩擦运动导致载荷应力不均匀,使粘着磨损由外侧不断向内侧扩展。880 °C 试样在试验结束时仍处于粘着磨损扩展阶段,较相较于 860 °C 试样,其磨痕宽度减少 18.8%,耐磨损性显著提升。这主要是由于表层硬度较高,抑制了犁沟磨损,并且芯部韧性良好,可以在一定程度上减少剥落。900 °C 试样在磨痕区域可观察到大量细小裂纹,原因为共渗温度升高使试样表层的韧性降低,在重载磨损过程中发生疲劳磨损。随着摩擦持续进行,细小裂纹逐渐扩展并相互连接,最终引发材料表面剥落甚至断裂。相较于 880 °C 共

渗试样,其耐磨性明显下降。

3 结 论

(1) 经碳氮共渗处理,渗层主要由 Fe_3C 和 Fe_2N 相构成。随着碳氮共渗温度升高,渗层中 Fe_3C 相质量分数升高, Fe_2N 相质量分数下降,扩散机制由 N 向内扩散转变为 C 向内扩散为主导。

(2) 共渗处理后的渗层硬度随共渗温度的升高而提升。碳氮共渗处理后硬度值最低的为 860 °C 共渗处理试样,硬度值为 838.5 HV1;880 °C 和 900 °C 碳氮共渗处理下试样的硬度分别为 1 073.4 HV1 和 1 224 HV1,相较于 860 °C 条件下分别提升了 28.0% 和 46.0%。碳氮共渗层随共渗温度的升高逐渐增厚,渗层厚度分别为 478 μm (860 °C)、636 μm (880 °C) 以及 782 μm (900 °C),后两者渗层厚度相较于 860 °C 分别提升了 33.1% 和 63.6%。随着温度逐渐升高,共渗原子扩散速度更快、距离更远。

(3) 在 860,880 和 900 °C 3 种碳氮共渗热处理条件下,试样表面形貌产生显著差异。其中,880 °C 碳氮共渗试样的表面组织更为细致均匀,且渗层厚度显著大于 860 °C 组。干摩擦磨损测试中,在 2 000 g 载荷、60 min 的干摩擦条件下,3 种温度条件的试样中 880 °C 共渗的摩擦系数最低,同时磨损失重也最低,仅为 0.6 mg。在干摩擦磨痕形貌分析中,880 °C 试样磨痕始终较浅,磨痕宽度小于 860 °C 试样,也没有发生 900 °C 试样的疲劳磨损。综合分析表明,880 °C 碳氮共渗试样的摩擦学性能最佳,其主要磨损机制为粘着磨损以及轻微的磨粒磨损。

参考文献:

[1] ABDENOUR S,LINDA A,OUALID C,et al. Influence of the carburization time on the structural and mechanical properties of XC20 steel [J]. Materials Research Express, 2021, 8 (8): 2897 - 2910.

[2] 胡玉婷. 17CrNiMo6 钢表面复合强化工艺与性能研究 [D]. 哈尔滨工程大学,2022.

HU Yuting. Research on surface composite Strengthening process and properties of 17CrNiMo6 steel [D]. Harbin Engineering University, 2022.

[3] 冯泽轩,张瑞亮,范政武. 18CrNiMo7-6 渗碳钢磁场深冷处理工艺研究 [J]. 热加工工艺,2024,53(6):48 - 52,61.

FENG Zexuan,ZHANG Ruiliang,FAN Zhengwu. Study on magnet-

ic deep cryogenic treatment process of 18CrNiMo7-6 carburized steel[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(6): 48–52, 61.

[4] 李克凡,陈正周,于爱兵,等. 回火温度对 20CrMnTi 渗碳淬火钢组织和摩擦磨损性能的影响[J]. 热加工工艺, 2024, 53(18): 33–37.

LI Kefan, CHEN Zhengzhou, YU Aibing, et al. Effects of tempering temperature on microstructure and friction and wear properties of 20CrMnTi carburized quenching steel[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(18): 33–37.

[5] ADEDIPE O, MEDUPIN R O, YORO K O, et al. Sustainable carburization of low carbon steel using organic additives: A review [J]. Sustainable Materials and Technologies, 2023, 38(4): e00723.

[6] VILIS J, DOBROCKY D, JOSKA Z, et al. The effect of changing the temperature of the vacuum carburizing process on the layer properties of steels used in the automotive industry[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 137(5): 1–11.

[7] BOUMEDIRI H, TOUATI S, DEBBAH Y, et al. Effect of carburizing time treatment on microstructure and mechanical properties of low alloy gear steels [J]. Materials Research Express, 2024, 11(7): 130489.

[8] 吴旋,颜志斌,刘静,等. 碳氮共渗对 20CrMnTi 钢组织及耐磨性的影响[J]. 铸造技术, 2018, 39(10): 2360–2364.

WU Xuan, YAN Zhibin, LIU Jing, et al. Effect of carbonitriding on microstructure and wear resistance of 20CrMnTi steel[J]. Foundry Technology, 2018, 39(10): 2360–2364.

[9] 陈治,李宝奎,卢金生,等. 渗氮处理在重载齿轮上的应用进展[J]. 金属热处理, 2023, 48(3): 104–111.

CHEN Zhi, LI Baokui, LU Jinsheng, et al. Application and progress of nitriding treatment in heavy duty gears[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(3): 104–111.

[10] 向庆,姜雪婷,伍良银,等. TA2 钛合金真空感应碳氮共渗组织及耐磨损和耐腐蚀性能[J]. 金属热处理, 2022, 47(2): 99–104.

XIANG Qing, JIANG Xueting, WU Liangyin, et al. Microstructure, wear and corrosion resistant properties of TA2 titanium alloy after vacuum induction carbonitriding[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(2): 99–104.

[11] 赵程,陈云帅. 碳氮共渗对 60Si2Mn 旋耕刀组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(12): 201–203.

ZHAO Cheng, CHEN Yunshuai. Effects of carbonitriding on microstructure and performance of 60Si2Mn rotary blade [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(12): 201–203.

[12] 徐昊,王晓溪,陈方旭,等. 碳氮共渗热处理工艺对 42CrMo 钢组织性能的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(4): 202–204, 208.

XU Hao, WANG Xiaoxi, CHEN Fangxu, et al. Effect of carbonitriding heat treatment process on microstructure and mechanical properties of 42CrMo steel [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(4): 202–204, 208.

[13] 程安生,李淑欣,鲁思渊,等. 碳氮共渗对马氏体钢轴承内圈接触疲劳寿命和失效机理的影响[J]. 机械工程材料, 2023, 47(12): 31–38.

CHENG Ansheng, LI Shuxin, LU Siyuan, et al. Effect of carbonitriding on contact fatigue life and failure mechanism of martensite steel bearing inner ring [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2023, 47(12): 31–38.

[14] 居毅,郭绍义. 碳氮共渗钢干摩擦状态下磨损行为的研究[J]. 浙江工程学院学报, 2001, 18(3): 24–27.

JU Yi, GUO Shaoyi. Study on dry sliding wear behaviors of carbon-nitriding layer on 20# steel [J]. Journal of Zhejiang Institute of Science and Technology, 2001, 18(3): 24–27.

[15] 赵国强,刘兴江,冯立强. 电脉冲频率和时间对高锰钢碳氮共渗的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(20): 146–148.

ZHAO Guoqiang, LIU Xingjiang, FENG Liqiang. Effects of frequency and time of electric pulse treatment on nitrocarburizing of high manganese steel [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(20): 146–148.

[16] YAN M F, LIU Z R. Study on microstructure and microhardness in surface layer of 20CrMnTi steel carburised at 880°C with and without RE[J]. Materials Chemistry and Physics, 2001, 72(1): 97–100.

[17] KOCUROVA K, DOMANKOVA M, HAZLINGER M, et al. The influence of carbonitriding process on microstructure and mechanical properties of micro-alloyed steel [J]. Metalurgija, 2013, 52(1): 19–22.

[18] KOSTIN N A. Raising the operating properties of die steel 5Kh2GF by creating carbonitride layers by thermochemical treatment[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2016, 58(7/8): 466–469.

[19] KIM M, UMEZAWA O. Influence of carbonitriding and sub-zero treatment on the microstructure and fatigue strength of JIS-SCM420 low-alloy steel [J]. Materials Science and Engineering: A - Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2025, 923: 147751.

[20] 扈林庄,王姗姗,王浩,等. 碳氮共渗 GCr15 钢的组织及性能[J]. 轴承, 2023(7): 51–55.

HU Linzhuang, WANG Shanshan, WANG Hao, et al. Microstructure and properties of GCr15 steel carbonitrided [J]. Bearing, 2023(7): 51–55.

[21] GHANEM A, TERRES M A. The influence of carbonitriding conditions on microstructure and mechanical properties of 25CrMo4 low-alloy steel [J]. Metallurgical Research & Technology, 2021, 118(1): 115.

(刘颖 编辑)