DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5083

柱塞泵缸体用 LZQT600–3 球铁型材碳氮共渗组织与性能研究

吴虹燕,徐春杰,武　迈,李润华,王若彤,刘丹凤,付依萍,许　可
(西安理工大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710048)

摘　要:高性能的柱塞泵是液压装备的心脏,是其安全、经济运行的前提。超高压柱塞泵,是鲠在中国装备制造业咽喉的一根刺。而柱塞泵缸体作为关键部件,实现其材料国产化、保障优异制造性能并控制成本,已成为当前的重中之重。以柱塞泵缸体专用水平连铸 LZQT600-3 球铁型材为研究对象,对比分析了不同部位(边缘、1/2*R*、心部)的组织特征,并通过正交实验优化了不同部位试样的碳氮共渗参数。结果表明,从边缘、1/2*R* 处至心部球化级别和石墨球数量依次减小,分别为 554、509 和 492 个/mm^2;石墨球平均直径分别为 29.86、26.78 和 31.03 μm;基体中的珠光体数量分别为 64.4%、65.9%和 70.8%,珠光体片层间距分别为 274、286、316 nm。根据柱塞泵缸体最佳耐磨性能要求得出的最优碳氮共渗参数方案为,580 ℃×4 h,NH_3:CO_2 为 4:3。渗层组织由氧化层、ε-$Fe_{2\text{-}3}$(N, C)相和 γ'-Fe_4N 相组成的化合物层和 α-Fe 相组成的扩散层构成。

关键词:水平连铸;柱塞泵缸体;LZQT600-3 球铁型材;碳氮共渗;耐磨性能

中图分类号:TG143.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)11-1075-06

Research on the Carbo–nitriding Microstructure and Properties of LZQT600–3 Ductile Iron Dens Bars for Plunger Pump Cylinder

WU Hongyan, XU Chunjie, WU Mai, LI Runhua, WANG Ruotong, LIU Danfeng, FU Yiping, XU Ke
(School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A high-performance plunger pump, as the heart of hydraulic equipment, provides a prerequisite for safe and economical operation. Ultrahigh-pressure plunger pumps are thorn in the throat of China's equipment manufacturing industry. As a critical component of the plunger pump, achieving the localization of its material, securing superior manufacturing performance, and enabling cost control has become the paramount priority at present. Taking special horizontal continuous casting LZQT600-3 ductile iron dens bars for the plunger pump cylinder as the research object, the microstructure characteristics of different parts (surface, 1/2*R*, center) were compared and analysed, and the carbonitriding parameters of the samples in different parts were optimized through orthogonal experiments. The results show that the spheroidization level and the number of graphite spheres decrease successively from the surface and 1/2*R* to the center of the dens bars, which are 554, 509 and 492 per mm^2, respectively; the average diameters of the graphite spheres are 29.86, 26.78 and 31.03 μm, respectively; the quantities of pearlite in the matrix are 64.4%, 65.9% and 70.8%; and the lamellar spacings of pearlite are 274, 286 and 316 nm, respectively. The optimal carbonitriding parameter scheme obtained on the basis of the best wear resistance requirements of the plunger pump cylinder is 580 ℃×4 h, and the NH_3:CO_2 ratio is 4:3. The diffusion layer structure is composed of an oxide layer, a compound layer composed of the ε-$Fe_{2\text{-}3}$(N, C) phase and γ'-Fe_4N phase, and a diffusion layer composed of the α-Fe phase.

Key words: horizontal continuous casting; plunger pump cylinder; LZQT600-3 ductile iron dens bars; carbonitriding; wear resistance

收稿日期:2025-05-12

基金项目:陕西省科技成果转移与推广计划(2017CGZH-XNGJ-03);陕西省国际科技合作计划重点项目(2023-GHZD-50);2025 大学生创新创业训练计划

作者简介:吴虹燕,2005 年生,本科生.研究方向为金属材料表面处理工程.Email: 2635891376@qq.com

通信作者:徐春杰,1971 年生,博士、教授.研究方向为铸铁水平连续铸造、轻合金强韧化及增材制造.Email: xuchunjie@gmail.com.

引用格式:吴虹燕,徐春杰,武迈,李润华,王若彤,刘丹凤,付依萍,许可.柱塞泵缸体用 LZQT600-3 球铁型材碳氮共渗组织与性能研究[J].铸造技术,2025,46(11):1075-1081.

WU H Y, XU C J, WU M, LI R H, WANG R T, LIU D F, FU Y P, XU K. Research on the carbo-nitriding microstructure and properties of LZQT600-3 ductile iron dens bars for plunger pump cylinder[J]. Foundry Technology, 2025, 46(11): 1075-1081.

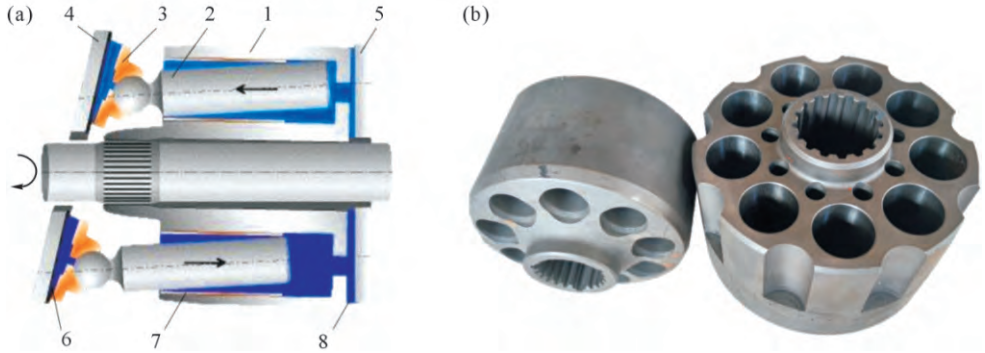
中国知网　https://www.cnki.net

球铁型材是通过水平连续铸造工艺生产的一种新型铸铁材料，由于其独特的工艺特征，组织内部形成了无砂型铸造常见的缩孔、缩松、夹杂和夹渣等缺陷。目前采用先进、稳定而精准的喂丝球化和喂丝孕育处理工艺，确保其微观组织致密、球化率和综合力学性能优良[1]。另外，通过一定的热处理[2]和成分控制，可以获得不同材质和牌号的铸铁型材[3-4]，满足了不同领域加工高品质零部件的需求[1]。根据主要厂家实际销售额不完全统计，2024 年中国实际生产各类铸铁型材的总量已经超过了 30 万吨，其中球铁型材的产量接近 20 万吨。由于铸铁型材的密度低于 7.2 g/cm^3，并具有优异的加工切削性能，成本低，已经在高端装备、液压动力机械、空压机、注塑机及配件、减速机、交通运输及新能源汽车零部件、航空航天，以及军工等制造和加工领域发挥了重要作用。近年来，随着能源危机与环境问题的日益加剧，以铁代钢实现轻量化和国产化已成为研究焦点。因此，越来越多的铸铁型材企业不仅生产各类铸铁型材产品，对铸铁型材进行半成品加工或精密深加工已成趋势，并趋于为用户提供高品质、低成本、低能耗的一站式解决方案。

随着液压装备功率提升，迫使柱塞泵功率不断提高，斜盘式轴向柱塞泵结构紧凑，功率密度和耐冲击性能优异，已成为大功率高端液压装备的关键核心组件，被称为液压系统的“心脏”[5]，广泛应用于航空航天、高端装备、工程机械、远洋船舶及航母等领域。高性能的柱塞泵缸体是高端液压装备安全、经济运行的前提，其结构如图 1 所示。随着柱塞泵效率的提升，对柱塞外壁与缸体孔内壁形成的摩擦副之间的间隙控制要求越来越高，以起到密封、润滑和传递动力作用[6]，如某型号的柱塞孔尺寸精度已经达到了 $\phi20^{+0.003}_{+0.002}$ mm，柱塞副间隙为±0.013 mm，这样油膜的厚度控制很低，仅为几微米到几十微米之间，油液流动属于缝隙流[7]。显而易见，柱塞副的摩擦磨损与润滑失效必然导致柱塞泵的噪音、泄漏增加，并降低功率密度、工作效率，如果直接损坏，必然影响整个液压系统的使用寿命[8]。因此，国内外众多学者对柱塞副摩擦机理与减磨增润设计开展了系统研究[9-12]，甚至提出了柱塞副的最佳半径间隙设计方法[13]。然而，对于柱塞泵缸体基础材料的研究和探讨相对较少。避免 20Cr 柱塞和球铁缸体摩擦副之间出现抱缸、划缸和卡死问题出现，是提高柱塞副耐磨性能的最有效途径。目前，采用的20Cr 柱塞淬火后工作硬度一般为 HRC58~62，无缺陷铸铁型材加工的缸体可以与柱塞形成良好的柱塞摩擦副。因此，球铁型材以其优异的综合性能被认为是制造大功率高压斜盘式轴向柱塞泵缸体的重要材料[3]。

然而，由于球铁型材硬度并不高，以直径为 ϕ140 mm，牌号为 LZQT600-3 的球墨铸铁为例，其硬度一般为 HB180~220，这样形成的摩擦副球铁一侧很容易被磨损。尽管在磨损过程中，球铁型材具有石墨球有可能脱落的特点，可以自润滑和储油，但是仍不能满足实际耐磨需求。而对球铁型材加工的缸体进行完全淬火处理并不现实，主要原因是这样做可能使其在淬火过程中发生开裂和变形，硬度也不稳定。对柱塞副分别采用氮化与镀膜的复合处理，使二者之间的平均摩擦系数降低 0.02，减摩性能提升 14%[14]。

常用的氮化工艺主要有气体渗氮、液体渗氮和离子渗氮，由于常规碳氮共渗工艺温度较高，会造成球铁基体组织变化，在 500~600 ℃之间进行较低温度碳氮共渗对球铁型材表面强化处理可能是最佳工艺。因此，本文探讨较低温度和较短时间条件下，在球铁型材不同部位试样表面获得具有一定厚度的耐磨、耐蚀、抗疲劳、抗咬合、抗擦伤碳氮共渗层，研究其组织与相关性能，以间接提高缸体柱塞副的



1-cylinder; 2-plunger; 3-sliding boots; 4-inclined plate; 5-distribution plate; 6-boot pair; 7-plunger pair; 8-distribution pair

图 1 斜盘式轴向柱塞泵摩擦副结构：(a) 结构示意图；(b) 不同结构尺寸的缸体形貌

Fig.1 Friction pair structure of the swash plate-type axial piston pump: (a) structural schematic; (b) cylinder morphology with different structural dimensions

中国知网 https://www.cnki.net

耐磨性能和使用寿命，并为柱塞泵缸体的加工和应用提供理论依据。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

实验材料为加工某型号柱塞泵缸体的、名义尺寸为 ϕ140mm 的水平连铸球铁型材(horizontal continuous casting ductile iron bars, HCCDIBs)LZQT600-3，其实测化学成分见表 1。由于水平连铸凝固特点，球铁型材不同部位的组织和成分存在一定差异，因此分别取不同部位的试样进行组织分析和碳氮共渗，取样部位如图 2 所示，并由外层到心部分别定义为边缘、1/2R 和心部试样。

表 1 ϕ140 mm 水平连铸球墨铸铁型材 LZQT600–3 化学成分
Tab.1 Chemical composition of the LZQT600–3 HCCDIBs

(mass fraction/%)

Designation	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Fe	CE
LZQT600-3	3.02	2.41	0.27	0.04	0.01	0.3	0.035	Bal.	3.82

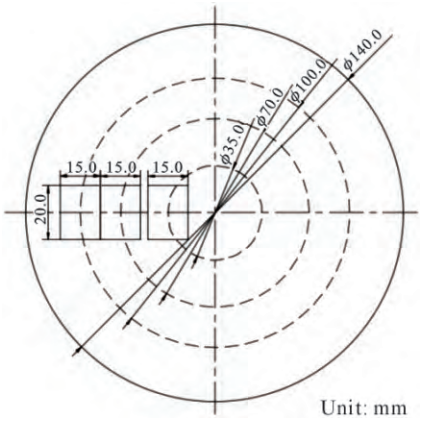


图 2　碳氮共渗取样部位
Fig.2　Sampling sites for carbonitriding samples

表 2 氮碳共渗试验因素水平
Tab.2 Factor level table of the nitrocarburizing test

Level	Temperature, T/℃	Holding time, t/h	Gas ratio(NH_3:CO_2)
1	540	2	4:4
2	560	4	4:3
3	580	6	4:1

1.2　试样制备与表征方法

选用 L9(3^4)正交表进行碳氮共渗试验[15]，因素水平选择见表 2，正交计划见表 3。其中，碳氮共渗气体介质选用高纯 NH_3(99.999%)和 CO_2(99.99%)。渗层厚度测定 5 次取平均值，物相分析采用 XRD-7000 型 X 射线衍射分析仪，扫描范围为 30°~90°，扫描速度为 10 (°)/min。采用 TH701 型显微维氏硬度计测试，测试载荷为 25 g，保载时间 15 s。每个试样分别选取 3 个不同区域测试，取平均值。摩擦磨损实验在 HT-1000 型摩擦磨损试验机上进行。销试样尺寸为 4 mm×4 mm×10 mm，摩擦副为 ϕ50 mm×5 mm 的 45# 淬火钢，硬度为 60 HRC。实验载荷为 20 N，摩擦半径为 15 mm，摩擦时间为 110 min，转速为 397 r/min，频率为 7.1 Hz，行程为 4.1 km，通过体积磨损率对比确定最佳碳氮共渗工艺参数。

表 3　碳氮气体共渗正交试验
Tab.3 Nitrogen and carbon gas permeation orthogonal test

Test No.	Sample No.	Temperature, A/℃	Holding time, B/h	Gas ratio, C(NH_3:CO_2)
1	QS111	540	2	4:4
2	QS122	540	4	4:3
3	QS133	540	6	4:1
4	QS212	560	2	4:3
5	QS223	560	4	4:1
6	QS231	560	6	4:4
7	QS313	580	2	4:1
8	QS321	580	4	4:4
9	QS332	580	6	4:3

2　实验结果与讨论

2.1　显微组织

图 3 为 LZQT600-3 球铁型材不同部位基体和石墨形态，可见本球铁型材从边缘至心部球化良

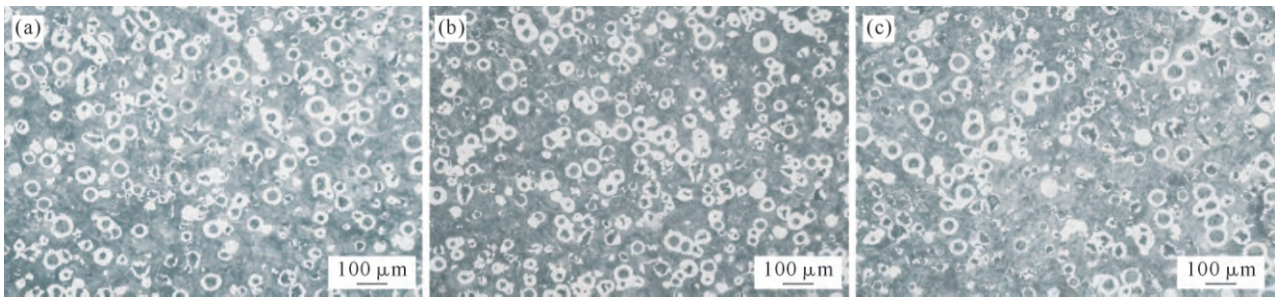


图 3　LZQT600-3 球铁型材不同部位铸态组织：(a) 表面；(b) 1/2R；(c) 心部
Fig.3　As-cast microstructures of different parts of LZQT600-3 HCCDIBs: (a) surface; (b) 1/2R; (c) center

中国知网　https://www.cnki.net

好。根据 GB/T 9441-2009 和 Image J 定量统计分析对比，球化级别均为 I-II 级，边缘、1/2R 和心部石墨球球径小、圆整度好且个数多，分别为 554、509 和 492 个/mm^2，珠光体数量分别为 64.4%、65.9%和 70.8%，珠光体片间距分别为 274、286、316 nm。由此可见，试样的铁液球化良好，水平连续铸造工艺使铁液冷却速度较快，同时孕育处理工艺稳定，形核率高，因此石墨球数量高，珠光体片层间距小，这也是该铸铁型材能够达到 LZQT600-3 牌号性能指标的组织保障。组织特征表明该 ϕ140 mm 的LZQT600-3 球铁型材从表层到组织均匀性优异。

按照 L9(3^4)正交表进行了不同参数碳氮共渗处理，包括共渗温度、保温时间以及 NH_3:CO_2 比，在 LZQT600-3 球铁型材试样表面形成了由氧化层(oxide layers, OLs)与化合物层(compound layers, CLs)和扩散层(diffusion layers, DLs)形成的不同厚度的渗层组织，如图 4 所示。随着混合气氛温度升高，必然发生如下反应：

$$2NH_3=3H_2+2[N] \quad (1)$$

$$CO_2+2H_2=2H_2O+[C] \quad (2)$$

当氮碳共渗温度较低时，分解的活性[N]和[C]原子数量有限，很难进入珠光体基体，因此渗层均较薄，且渗层扩散不明显，如图 4a~c 所示。随着温度升高至 560 ℃时，渗层形貌清晰，厚度均匀，如图 4c~e 所示；然而，温度继续升高至 580 ℃时，渗层表面厚度增加，但是此时出现疏松、孔洞和裂纹，与扩渗速度太快有关，这是由活性的氮原子重新结合，形成氮分子脱离基体表面造成的[16]。由此可见，温度是影响活性原子固态扩散的主要原因，温度过低显然不利于渗层的形成，而温度过高，则有可能形成孔洞或疏松组织，必然直接影响渗层的性能。另外，结合组织分析，很容易看出共渗时间也是渗层厚度的重要影响因素，随着氮碳共渗时间的延长，渗层厚度必然不断增加。然而，时间过长，OLs 和 CLs 之间有可能出现疏松或孔洞的风险，且疏松层的厚度随保温时间的延长呈增加趋势。这是由于铁氮化合物分解释放出活性[N]原子，[N]原子的富集增加了重新形成 N_2 的几率，从而在表层渗层组织内逸出形成微孔洞。另外扩散的活性[C]原子也有可能占据铁素体晶格的间隙，并排斥[N]原子，从而更有利于 N_2 分子的

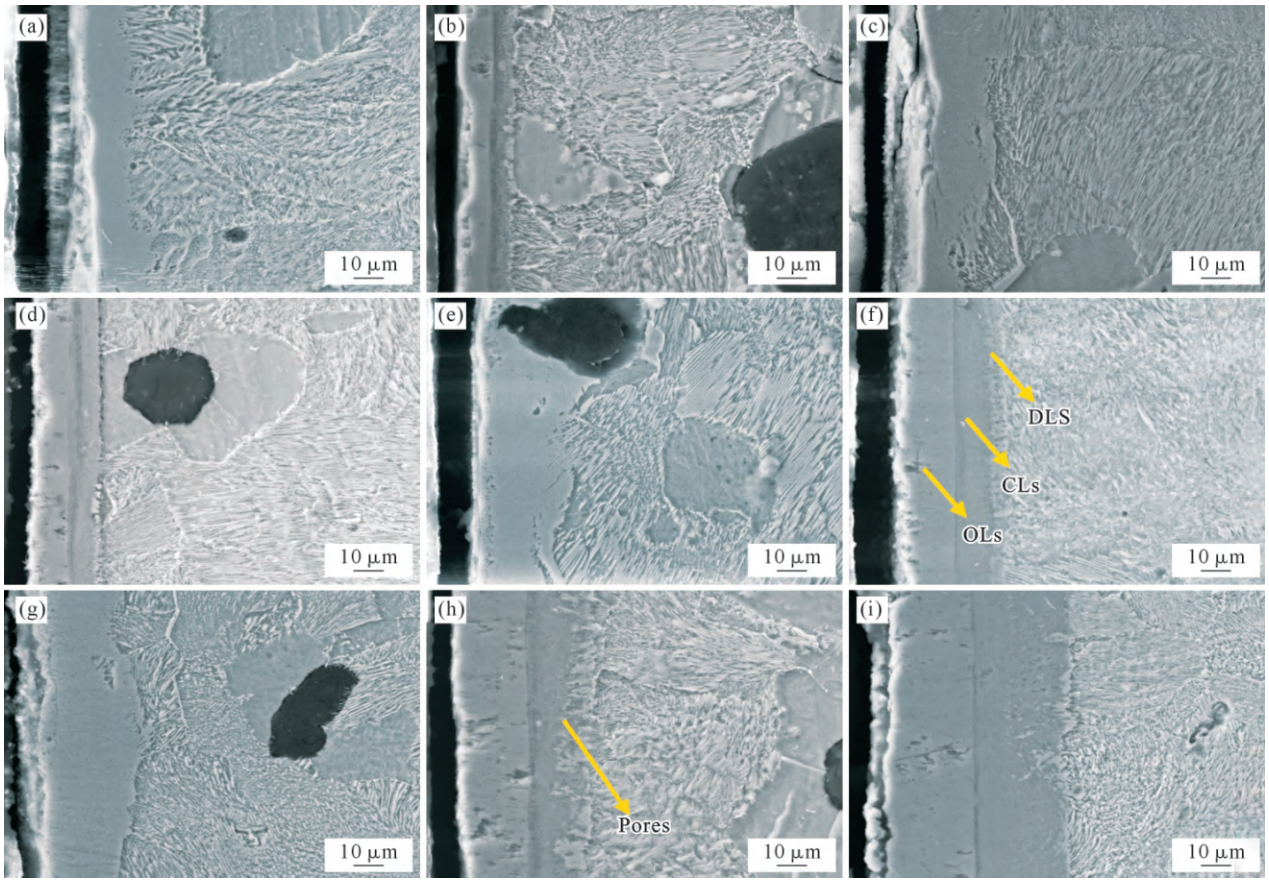


图 4 LZQT600-3 球铁型材边缘试样氮碳共渗试样截面的 SEM 形貌：(a) 540 ℃×2 h, 4:4(NH_3:CO_2); (b) 540 ℃×4 h, 4:3(NH_3:CO_2); (c) 540 ℃×6 h, 4:1(NH_3:CO_2); (d) 560 ℃×6 h, 4:4(NH_3:CO_2); (e) 560 ℃×2 h, 4:3(NH_3:CO_2); (f) 560 ℃×4 h, 4:1(NH_3:CO_2); (g) 580 ℃×2 h, 4:1(NH_3:CO_2); (h) 580 ℃×4 h, 4:4(NH_3:CO_2); (i) 580 ℃×6 h, 4:3(NH_3:CO_2)

Fig.4 SEM images of cross sections of nitrocarburizing samples from the surface of LZQT600-3 HCCDIBs: (a) 540 ℃×2 h, 4:4(NH_3:CO_2); (b) 540 ℃×4 h, 4:3(NH_3:CO_2); (c) 540 ℃×6 h, 4:1(NH_3:CO_2); (d) 560 ℃×6 h, 4:4(NH_3:CO_2); (e) 560 ℃×2 h, 4:3(NH_3:CO_2); (f) 560 ℃×4 h, 4:1(NH_3:CO_2); (g) 580 ℃×2 h, 4:1(NH_3:CO_2); (h) 580 ℃×4 h, 4:4(NH_3:CO_2); (i) 580 ℃×6 h, 4:3(NH_3:CO_2)

中国知网 https://www.cnki.net

形成。因此,聚集的孔洞大多出现在晶界处,而疏松层多出现在 CLs 层的边缘位置。对应的渗层厚度检测值如表 4 所示,渗层表面硬度如表 5 所示。随着温度提高,CLs 和 DLs 层厚度均呈增加趋势,说明活性[N]原子和[C]原子的扩散速率与温度密切相关。而渗层厚度也随时间的延长而增厚,但随后呈稳定状态,这主要是与其固溶饱和度有关。对表 4 数据进行极差分析和实际生产考虑可知,对于LZQT600-3 球铁型材试样而言,碳氮共渗参数对渗层厚度的影响主次顺序为:共渗温度 T>共渗时间 t>气体比例 s。综合极差分析和方差分析,优选后的工艺方案为:共渗温度 580 ℃、共渗时间 6 h、气体比例 NH_3:CO_2 为 4:4。

在碳氮共渗初期,活性原子开始渗入基体,试样表层的 α-Fe(N)固溶体尚未达到饱和状态。随着共渗时间的延长,渗层厚度增加,随着气氛内活性[N]原子的增多,α-Fe(N)固溶体中的 N 含量逐渐达到过饱和状态,发生 α-Fe(N)→γ-Fe(N)→γ′-Fe_4N 相变,共渗时间继续延长,活性[N]原子与[C]原子不断渗入,在表层形成 γ′-Fe_4N 相,并逐渐达到过饱和状态,然后发生 γ′-Fe_4N→ε-$Fe_{2\text{-}3}$(N, C)相变,形成了含 N 量更高的 ε 相[17-22]。由此可见,渗层由 ε 相和 γ′相组成的化合物层和 α-Fe 相组成的扩散层共同构成,如图 5 所示。

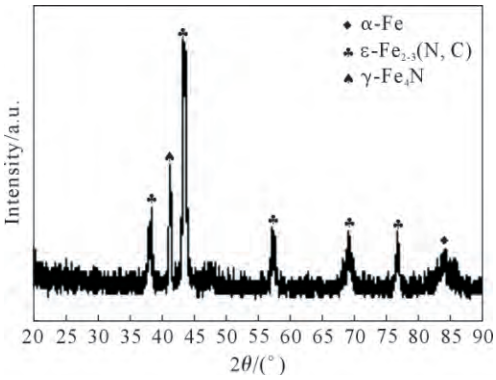


图 5 试样表面 XRD 谱

Fig.5 XRD pattern of the permeation layer of the sample [QSA133:540 ℃×6 h, 4:1(NH_3:CO_2)]

2.2 摩擦磨损性能

LZQT600-3 球铁型材不同部位和不同条件下的摩擦磨损性能测试结果如表 6 所示。其中,综合考虑摩擦系数和磨损率对材料的影响,对摩擦系数和磨损率以 0.5:0.5 进行综合评分,由于磨损率极低,将磨损率提高 4 个数量级,以消除综合评分误差[15]。

结合极差分析和置信水平为 α=0.05 的方差分析,其中 as-cast-surface、QSA313、QSA321 和QSA332

表4 LZQT600–3球铁型材不同部位氮碳共渗试样渗层厚度检测值

Tab.4 Detection thickness of the diffusion layer in nitrocarburizing from different parts of LZQT600–3 HCCDIBs

Thickness/μm	111	122	133	212	223	231	313	321	332
Surface A	12.79	7.87	13.96	9.18	13.02	14.77	14.49	17.73	26.47
1/2*R* B	9.24	9.37	22.01	9.76	14.33	15.47	17.81	13.22	23.12
Center C	10.59	7.73	12.58	8.76	11.88	16.48	16.50	14.31	24.48

表 5 LZQT600–3 球铁型材不同部位氮碳共渗试样表面硬度值

Tab.5 Surface hardness of the nitrocarburized samples

Surface hardness($HV_{0.25}$)	111	122	133	212	223	231	313	321	332
Surface A	612.3	803.9	624.8	708.3	885.5	1 003.7	773.9	1 097.6	919.0
1/2*R* B	744.5	986.7	892.1	905.0	991.6	1 027.4	917.0	982.0	834.5
Center C	638.6	790.5	841.3	916.0	912.4	1 017.4	990.1	1 062.0	1 035.0

表6 LZQT600–3球铁型材不同部位试样摩擦磨损性能测试结果

Tab.6 Friction performance results for different parts of LZQT600–3 HCCDIBs

QSA	Coefficient of friction			Wear rate×10^{-5} $mm^3 \cdot N^{-1} \cdot m^{-1}$			Comprehensive score		
Sample	Surface A	1/2*R* B	Center C	Surface A	1/2*R* B	Center C	Surface A	1/2*R* B	Center C
111	0.665	0.581	0.615	2.109	1.171	2.720	0.437 9	0.349 1	0.443 5
122	0.581	0.658	0.635	1.257	1.321	3.929	0.353 4	0.395 1	0.514 0
133	0.472	0.627	0.531	1.139	1.963	1.237	0.292 9	0.411 7	0.327 4
212	0.482	0.621	0.407	1.211	1.534	0.925	0.301 6	0.387 2	0.249 8
223	0.682	0.527	0.312	2.318	1.163	0.309	0.456 9	0.321 7	0.171 5
231	0.614	0.596	0.591	1.584	1.248	1.550	0.386 2	0.360 4	0.373 0
313	0.451	0.631	0.428	1.242	2.026	0.992	0.287 6	0.416 8	0.263 6
321	0.583	0.583	0.356	1.345	0.653	0.771	0.358 7	0.324 2	0.216 6
332	0.576	0.606	0.424	1.416	1.167	1.313	0.358 8	0.361 4	0.277 7
As-cast	0.565	0.612	0.611	3.373	1.337	1.679	0.451 2	0.372 9	0.389 5

中国知网　https://www.cnki.net

的磨损率分别为 3.373、1.242、1.345 和 1.416，摩擦系数越小，体积磨损率越低，说明其耐磨性越好。对于 LZQT600-3 球铁型材而言，从边缘到心部的耐磨性变化，是由水平连铸生产工艺特点决定的。水平连铸过程中，球铁型材的边缘组织直接与水冷石墨套接触，冷速最快，奥氏体在共析转变时停留的时间最短，部分奥氏体来不及转变成为珠光体，因此这部分的珠光体含量最低。同时，由于这部分冷却速度相对于 1/2*R* 和心部较快，因此珠光体片层最细。一般而言，由于 1/2*R* 处和心部的铁液采用结晶器外的空气对流或二次喷水雾的方式冷却，铁液冷速显然低于水冷石墨套内，奥氏体有足够的时间在共析转变线处转变为珠光体，这两个部位基体较边缘处珠光体数量增多。由于珠光体具有较高的硬度和耐磨性，因此稳定和促进珠光体形成的措施可以提高球墨铸铁的耐磨性。

由此可见，对于 LZQT600-3 球铁型材氮碳共渗试样而言，共渗参数对试样摩擦磨损性能综合评分影响主次为气体比例 *s*>共渗时间 *t*>共渗温度 *T*，综合考察各指标，从趋势、经济性分析和因素主次确定最优条件为 580 ℃×4 h，NH_3:CO_2 为 4:3。

3 结论

(1)LZQT600-3 球铁型材从边缘、1/2*R* 处至心部球化级别和石墨球数量依次减小，分别为 554、509 和 492 个/mm^2；石墨球平均直径分别为 29.86、26.78 和 31.03 μm；基体中的珠光体数量分别为 64.4%、65.9%和 70.8%；珠光体片层间距分别为 274、286 和 316 nm。

(2)LZQT600-3 球铁型材氮碳共渗态部分试样渗层化合物层由氧化层(OLs)、化合物层(CLs)和扩散层(DLs)组成。气氛内活性氮原子随着共渗时间的延长而增多，发生 α-Fe(N)→γ-Fe(N)→γ′-Fe_4N 的相变。当 γ′-Fe_4N 达到过饱和状态时，发生 γ′-Fe_4N→ε-Fe_{2-3}(N, C)的相变。由此可知渗层是由 ε 相和 γ′相组成的化合物层和 α-Fe 相组成的扩散层共同构成。

(3)通过对各指标的最优条件进行综合比较和分析，对于适用于柱塞泵缸体加工的 LZQT600-3 球铁型材而言，根据最佳的耐磨性能得出的最优碳氮共渗参数方案为：580 ℃×4 h，NH_3:CO_2 为 4:3，渗层厚度≥10 μm，渗层硬度≥HV 600。

参考文献：

[1] 徐春杰，徐信锋，赵振，马萌，张忠明，刘永辉. 铸铁水平连续铸造技术及铸铁型材的应用[J]. 铸造技术，2017, 38(11): 8-13.
XU C J, XU X F, ZHAO Z, MA M, ZHANG Z M, LIU Y H. Horizontal continuous casting technology of cast iron and the application of dense bars[J]. Foundry Technology, 2017, 38(11): 8-13.

[2] 徐春杰，郭权芬，张婷，刘永辉，黄志强，张忠明. 正火处理对灰铁型材组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报，2017, 38(4): 146-151.
XU C J, GUO Q F, ZHANG T, LIU Y H, HUANG Z Q, ZHANG Z M. The influence of normalizing treatment on the microstructure and properties of gray iron bars[J]. Journal of Heat Treatment of Materials, 2017, 38(4): 146-151.

[3] XU C J, JIN Y Y, MA D, ZHAO Z, QI J W, SUI S, WU X Q, GUO C, ZHANG Z M, LIU Y H, SHECHTMAN D. Microstructure and properties of LZQT600-3 HCCDIBs for plunger pump cylinder[J]. China Foundry, 2024, 21(2): 197-204.

[4] 徐春杰，张正扬，孟令楠. Cu、Mo 对水平连铸球铁型材组织与力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2011, 31(5): 407-409.
XU C J, ZHANG Z Y, MENG L N. The influence of Cu and Mo on the microstructure and mechanical properties of horizontal continuous cast ductile iron bars[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2011, 31(5): 407-409.

[5] 张军辉，刘施镐，徐兵，黄伟迪，吕飞，黄晓琛. 轴向柱塞泵智能化关键技术研究进展及发展趋势[J]. 机械工程学报，2024, 60(4): 32-49.
ZHANG J H, LIU S G, XU B, HUANG W D, LYU F, HUANG X C. Research progress and development trend of key intelligent technologies for axial piston pumps[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(4): 32-49.

[6] 林乃明，王杰，王强，王焕焕，袁烁，刘志奇，曾群锋，吴玉程. 轴向柱塞泵柱塞副的摩擦学特性及其表面织构化研究进展[J]. 太原理工大学学报，2023, 54(4): 585-598.
LIN N M, WANG J, WANG Q, WANG H H, YUAN S, LIU Z Q, ZENG Q F, WU Y C. Research progress on tribological characteristics and surface texturing of plunger pairs in axial plunger pumps [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2023, 54 (4): 585-598.

[7] NIE S L, GUO M, YIN F L, JI H, MA Z H, HU Z, ZHOU X. Research on fluid-structure interaction for piston/cylinder tribopair of seawater hydraulic axial piston pump in deep-sea environment[J]. Ocean Engineering, 2021, 219: 108222.

[8] 廖名辉，葛磊，孙斌，肖刚，欧阳光明，张宏博. 鼓形柱塞结构对轴向柱塞泵柱塞副润滑性能影响[J]. 液压与气动，2025, 49(4): 22-30.
LIAO M H, GE L, SUN B, XIAO G, OUYANG G M, ZHANG H B. The influence of drum-shaped plunger structure on the lubrication performance of the plunger pair in axial plunger pumps[J]. Hydraulics and Pneumatics, 2025, 49(4): 22-30.

[9] PELOSI M, IVANTYSYNOVA M. A geometric multigrid solver for the piston-cylinder interface of axial piston machines[J]. Tribology Transactions, 2012, 55(2): 163-174.

[10] MA X, WANG Q J, LU X Q, MEHTA V S. A Transient hydrodynamic lubrication model for piston/cylinder interface of variable length[J]. Tribology Transactions, 2018, 118: 227-239.

[11] 仉志强，马少杰，吕平洙，李林，赵立全. 轴向柱塞泵摩擦副理论

中国知网 https://www.cnki.net

与技术研究现状[J]. 太原科技大学学报，2024, 45(5): 433-439.
ZHANG Z Q, MA S J, LYU P Z, LI L, ZHAO L Q. Research status of theory and technology of friction pair for axial piston pumps[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2024, 45(5): 433-439.

[12] 郑亮，李国祥，白书战，孙光明. 大排量轴向柱塞泵柱塞副润滑特性分析[J]. 液压与气动，2023, 47(3): 17-27.
ZHENG L, LI G X, BAI S Z, SUN G M. Analysis of lubrication characteristics of plunger pairs in large-displacement axial plunger pumps[J]. Hydraulics & Pneumatics, 2023, 47(3): 17-27.

[13] CHEN X F, YAN L, GAO X S. Analysis and design of the optimal radius gap of the piston pair[J]. Physics of Fluids, 2023, 35(11): 113602.

[14] 王政伟. 柱塞泵摩擦副氮碳共渗/镀膜复合强化的组织结构与摩擦学研究[D]. 烟台：烟台大学，2023.
WANG Z W. Study on the microstructure and tribology of the friction pair of plunger pump by nitrocarburizing/coating composite reinforcement[D]. Yantai: Yantai University, 2023.

[15] 张忠明. 材料科学中的试验设计与分析[M]. 北京：机械工业出版社，2012.
ZHANG Z M. Experimental design and analysis in materials science[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2012.

[16] 许文花，肖桂勇，贾永敏，吕宇鹏. 氮势对 0.25C-2.5Cr-Mo 钢气体渗氮后磨损性能的影响[J]. 材料热处理学报，2013, 34(S2): 194-196.
XU W H, XIAO G Y, JIA Y M, LYU Y P. The influence of nitrogen potential on the wear properties of 0.25C-2.5Cr-Mo steel after gas nitriding[J]. Journal of Heat Treatment of Materials, 2013, 34 (S2): 194-196.

[17] 潘邻. 化学热处理应用技术[M]. 北京：机械工业出版社，2004.
PAN L. Application Technology of Chemical Heat Treatment[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004.

[18] CHEN W L, WU C L, LIU Z R, NI S, HONG Y, ZHANG Y, CHEN J H. Phase transformations in the nitrocarburizing surface of carbon steels revisited by microstructure and property characterizations[J]. Acta Materialia, 2013, 61(11): 3963-3972.

[19] JIAO D L, LUO C P, LIU J W. Grain boundary transformation character in Fe-N austenite[J]. Materials Letters, 2012, 66(1):147-149.

[20] JIANG Z, LI X, GU J, HU M J, ZHU Z C. Isothermal decomposition behavior of the high nitrogen concentration γ-Fe[N] prepared from pure iron[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(22): 7361-7364.

[21] HU M J, PAN J S, ZHU Z C, CHENG Q C. A special phase transformation phenomenon in high-nitrogen austenite[J]. Materials Letters, 2001, 50(4): 225-229.

[22] JIAO D, LUO C P, LIU J. Isothermal transformation of high-nitrogen austenite[J]. Scripta Materialia, 2007, 56(7): 613-616.

（责任编辑：李亚敏）

中国知网　https://www.cnki.net