

轴承套圈背后的硬核秘密： 渗碳层如何重塑组织 与力学性能

Strengthening Mechanisms of Carburized Layers in Bearing Rings: Reshaping of Microstructure and Mechanical Properties

供稿|赵志福¹, 张锡兵², 李正一¹, 周军², 刘小明¹ / ZHAO Zhifu¹, ZHANG Xibing², LI Zhengyi¹,
ZHOU Jun², LIU Xiaoming¹

内 容 导 读

背衬轴承是多辊轧机辊系中的关键部件，其套圈长期承受高频交变重载，容易发生早期滚动接触疲劳失效。为了提高轴承套圈的抗疲劳能力，本文采用深层多段可控气氛渗碳以及双淬火、双回火复合热处理工艺，对套圈表面进行强化处理，同时利用电子背散射衍射（EBSD）和纳米压入实验分析组织与力学性能变化。结果发现，渗碳热处理能够显著改变轴承套圈表层及内部的组织结构和硬度分布。从外径表面至心部，材料的微观组织和硬度呈现出明显的梯度变化：靠近表面的区域经过强化后硬度更高，更有利于抵抗接触疲劳；而心部仍保持一定韧性，有助于承受整体载荷。相比之下，热处理对材料弹性模量的影响并不明显。通过合理的渗碳和热处理工艺，可以在轴承套圈中形成“表面硬、内部韧”的梯度结构，从而为背衬轴承抗失效设计提供参考。

钢铁工业是我国国民经济的重要基础产业，其发展水平的重要标志之一是冷轧带钢的生产能力^[1]。不锈钢、硅钢及其他高强度金属合金的薄带和极薄带作为关键基础材料，广泛应用于高端装备和精密电子等领域。为满足其高精度要求，冷轧生产常采用塔形分布的多辊轧机。背衬轴承是多辊轧机辊系的核心关键部件，可有效提升辊系整体刚度，保障塔形辊系运行精度与轧制稳定性。然而，不锈钢、

硅钢及其他高强度金属合金的薄带和极薄带的轧制会产生较大的变形抗力，背衬轴承内圈由于与轧辊轴相对固定，其承载区域长期承受高频交变重载接触应力，极易诱发早期滚动接触疲劳失效，严重威胁轧机连续稳定安全生产与轧制产品精度^[2]。

为改善背衬轴承的承载特性，提升其抗滚动接触疲劳寿命，行业通常采用渗碳热处理工艺对套圈进行表面强化改性。渗碳热处理后，非金属夹杂

作者单位：1. 中国科学院力学研究所超常环境非线性力学全国重点实验室，北京 100190；2. 常州克劳诺斯特特种轴承制造有限公司，江苏 常州 213149

物、热处理组织状态、表面改性层深度和残余应力对轴承的滚动接触疲劳寿命具有显著影响^[3]。非金属夹杂物主要包括氧化铝、硫化锰以及其他复合型夹杂物，其强度通常与基体存在较大差异，在变形过程中与基体相存在显著的变形不协调现象，从而导致应力集中和微裂纹的萌生与扩展^[4]。基于三维晶体塑性有限元模拟，Fincato 等^[5]研究发现硬度显著高于基体的硬质夹杂物会在基体中诱发剧烈的局部塑性滑移与高应力集中，大幅提升疲劳裂纹萌生风险；硬度低于基体的软质夹杂物则塑性滑移启动门槛更高、应力集中程度更低，对疲劳性能的危害较低。除非金属夹杂物的类型外，其尺寸、形状和取向也会显著影响轴承的滚动接触疲劳性能^[6]。

热处理组织状态通常取决于渗碳后的淬火回火工艺。常规淬火回火工艺处理的轴承套圈组织为马氏体、残余奥氏体和渗碳体。不同淬火回火工艺参数下，马氏体、残余奥氏体和渗碳体的尺寸和含量存在显著差异。Zheng 等^[7]研究发现，随着冷却速率提升，淬火试样的马氏体板条和碳化物颗粒得到细化，位错密度增大，能够有效改善材料的冲击韧性并抑制疲劳裂纹的扩展。相较于马氏体，尽管残余奥氏体含量相对较低，却起着至关重要的作用。相关研究表明，在滚动接触疲劳作用下，奥氏体晶粒内部会生成尺寸仅数十纳米、多种取向形态的超细形变诱导马氏体，从而提高材料的耐磨性与疲劳寿命^[8-11]。然而，残余奥氏体的含量并非越高越有利于提高材料的服役性能。Chen 等^[12]将高碳钢试样在不同奥氏体化温度与保温时长下进行热处理，得到残余奥氏体体积分数分别为 5%、15% 和 23% 的试样。通过滚动接触疲劳实验，研究发现只有体积分数为 15% 的残余奥氏体试样在滚动接触载荷作用下形成了完善的硬化层，该硬化层具备极强的抗裂纹萌生与扩展能力。

材料经渗碳热处理后，碳浓度会从表面至心部逐渐降低，从而形成硬度梯度。表面改性层深度是经表面强化处理后，材料从表面至维氏硬度 $\geq \text{HV}_1 550$ 区域的垂直厚度，它直接决定了滚动接触过程中有效承载区域的厚度与应力分布。在表面改性层深度范围内，微观组织能够显著调控疲劳裂纹萌生与扩展行为^[13]。相关研究表明，最优表面改性层深度

与试样厚度^[14]、承载压应力^[15]紧密相关。Liu 等^[14]通过滚动接触疲劳实验和基于连续损伤力学的二维有限元仿真，发现随着表面改性层深度的增加，材料滚动接触疲劳寿命呈现先升高后降低的变化规律，最优表面改性层约为试样厚度的 1/4。Walvekar 等^[15]基于显微压痕实验获得了表面强化处理后轴承钢的硬度分布特性，通过假定硬度和强度之间的线性关系并基于连续损伤力学有限元仿真方法，发现随着承载压应力的增大，实现滚动接触疲劳强度最大化的最优表面改性层更深。

渗碳热处理导致轴承表层与心部碳浓度存在显著差异，从而在冷却时发生差异化的体积膨胀和马氏体相变，产生残余应力^[16]。相关研究表明，残余压应力能够增强材料抵抗疲劳裂纹扩展的能力^[17]。为提高残余压应力，学者通常在渗碳热处理后辅以喷丸^[18-20]、激光冲击^[21-23]和滚压加工^[24-26]等工艺。例如，Zhang 等^[19]采用传统喷丸与微粒子喷丸复合处理后将渗碳后材料的残余压应力从 405 MPa 提高到 1250 MPa，并有效降低了表面粗糙度，显著提升了材料的滚动接触疲劳性能。Wang 等^[26]对 20CrMoH 钢进行了渗碳和超声表面滚压复合强化，将残余压应力提高到 920 MPa，2.2 GPa 赫兹接触应力下的疲劳测试结果显示复合强化试样的滚动接触疲劳寿命较单一渗碳试样提升 1 倍。

本文针对背衬轴承套圈的早期滚动接触疲劳失效问题，采用渗碳热处理工艺开展了表面改性研究。通过电子背散射衍射（EBSD）表征与纳米压入测试，系统分析了渗碳热处理后套圈的微观组织演变与截面硬度梯度分布特征规律。研究结果为背衬轴承套圈的滚动接触疲劳性能评估提供了关键实验依据，也为实现轴承套圈抗疲劳失效性能的提升奠定了科学基础。

实验材料与方法

本文采用的背衬轴承套圈由一种低碳轴承钢加工而成，其化学成分（质量分数）为 C 0.15%~0.18%，Si 0.15%~0.40%，Mn 0.40%~0.70%，Cr 1.30%~1.60%，Ni 3.25%~3.75%，Mo 0.15%~0.25%，P $\leq$ 0.025%，S $\leq$ 0.005%。为提高背衬轴承套圈的承载能力，对此套圈进行深层多段可控气氛渗碳+双淬

火双回火复合热处理。工艺全流程主要包括渗碳、一次淬火、高温回火、二次淬火和低温回火阶段。渗碳阶段强渗期碳势控制在 1.1%，时间 ≥ 50 h；扩散期碳势控制在 0.95%，时间 ≥ 20 h。一次淬火和二次淬火阶段盐浴温度均控制在 180℃。高温回火和低温回火阶段温度分别控制在 825 和 160℃。低温回火前，需对背衬轴承套圈进行去盐清洗。

采用线切割的方式从渗碳热处理后的背衬轴承套圈上取出测试试样。将试样与轴承纵截面一致的平面作为测试面，依次使用 P240、P600、P1200、P2000 金相砂纸对此面进行研磨，然后使用 3 μm 金刚石抛光剂进行粗抛，最后使用 0.25 μm 金刚石悬浊液进行精抛。精抛完成后使用金相显微镜观察，当测试面无明显划痕后，用无水酒精清洗样品并迅速烘干。

试样制备完成后，在轴承套圈外径至心部的不同深度位置选取观测区域，开展电子背散射衍射表

征分析，以表征不同深度位置的微观组织。电子背散射衍射表征实验所用仪器为配备 X 射线能谱仪（Oxford X-Max N 80T）的高分辨场发射扫描电镜（GeminiSEM 300）。测试完微观组织后，开展纳米压入实验，以获取不同深度位置的硬度和弹性模量。测试过程中，压入位移控制在 2 μm 。纳米压入实验所用仪器为安捷伦 G200 原位纳米力学测试系统。

结果与分析

微观组织

图 1 给出了经渗碳热处理后距离轴承套圈外径表面深度为 0.2、3.0 和 5.5 mm 位置的电子背散射衍射测试结果，其中左侧为相分布图，右侧为反极图。相分布图中，红色为马氏体组织，蓝色为残余奥氏体组织。反极图根据平行于法向的米勒指数 [001]、[101]、[111] 进行着色，以区分各晶粒的晶体取向。从图 1 中可以发现，渗碳热处理后背衬轴承

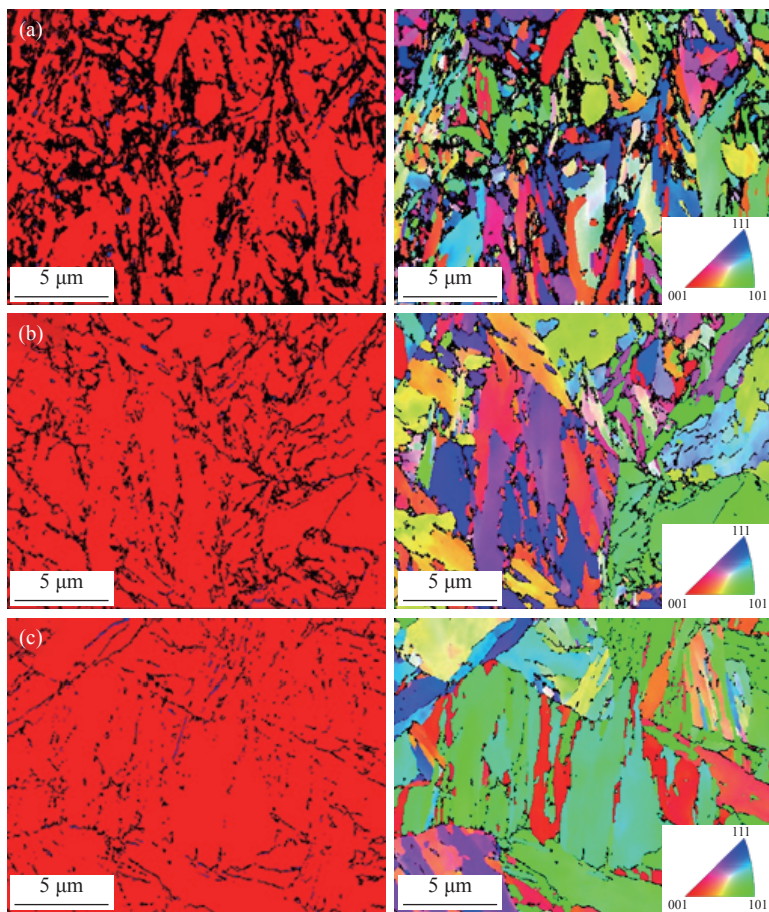


图 1 距离轴承套圈外径表面不同深度位置的电子背散射衍射测试结果: (a) 0.2 mm; (b) 3.0 mm; (c) 5.5 mm

套圈的微观组织主要由马氏体构成,残余奥氏体均匀弥散分布于马氏体基体之间。距离轴承套圈外径表面 0.2 mm 深度处,存在较多的块状残余奥氏体;马氏体晶粒较为细小,最大晶粒的等效圆直径为 2.92 μm 。距离轴承套圈外径表面 3.0 mm 深度处,存在少许块状残余奥氏体;马氏体晶粒明显增大,最大晶粒的等效圆直径为 4.81 μm 。距离轴承套圈外径表面 5.5 mm 深度处,只有少许线条状残余奥氏体,不存在块状残余奥氏体;马氏体晶粒更为粗大,最大晶粒的等效圆直径为 7.13 μm 。因此,从轴承套圈外径表面到心部,残余奥氏体含量逐渐下降,并从块状逐渐转变为线条状;马氏体含量逐渐升高,其晶粒尺度逐渐增大。

硬度与弹性模量

图 2 给出了渗碳热处理后距离轴承套圈外径表面深度为 0.1、1.0、2.0、3.0、4.0 和 5.0 mm 位置的力-位移曲线。所有曲线均呈现标准的纳米压入特

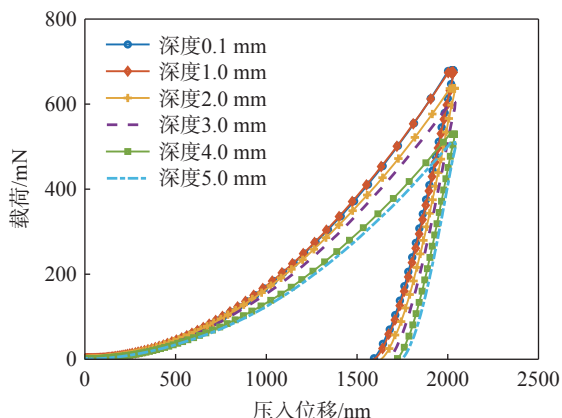
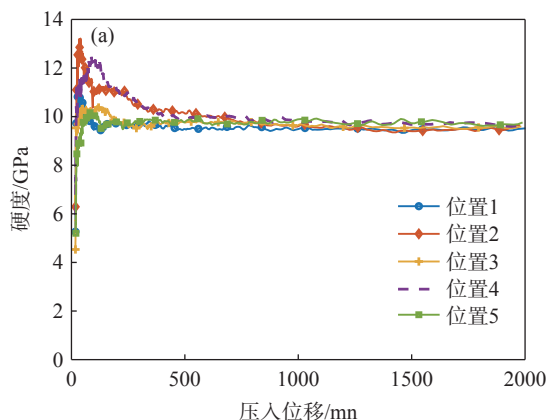


图 2 距离轴承套圈外径表面不同深度位置的纳米压入力-位移曲线



征,加载阶段载荷随压入位移的增大非线性增长,卸载阶段载荷随压入位移的快速下降并保留显著的残余压痕,反映了轴承套圈经渗碳热处理后距离外径表面不同深度位置的弹塑性变形行为。从图中可以发现,距离轴承套圈外径表面深度越浅,相同压入位移下所需的压入载荷越大,卸载后残余压痕越浅。因此,越靠近轴承套圈外径表面,轴承的硬度越高。

根据电子背散射衍射测试结果可知,渗碳热处理后轴承内部存在马氏体和残余奥氏体。为了避免局部微观组织对纳米压入测试的影响,对距离轴承套圈外径表面相同深度位置选取 5 个平行测试点,每个测试点间距 ≥ 0.5 mm。从图 3(a) 中可以看出,当压入位移较小时,硬度急剧升高,相同深度下不同测试点的硬度曲线差异很大;当压入位移达到 500 nm 后,硬度曲线逐渐趋向平稳,波动较小,相同深度下不同测试点的硬度曲线相差不大。因此,压入深度较小时,马氏体和残余奥氏体局部分布特征对纳米压入测试的影响较大;当压入位移达到 500 nm 后,马氏体和残余奥氏体局部分布特征对纳米压入测试的影响可以忽略。图 3(b) 给出了距离轴承套圈外径表面不同深度位置的硬度-位移曲线。从图中可以发现,与轴承套圈外径表面距离越深,硬度曲线趋向平稳的临界压入位移越大。特别地,当压入位移超过 1600 nm 后,所有硬度曲线在水平范围内仅存在微小波动。

为表征渗碳后轴承套圈的截面硬度分布特性,本文选取压入位移为 1600~2000 nm 范围内的测试数据计算平均纳米压痕硬度,然后对相同深度下 5 个

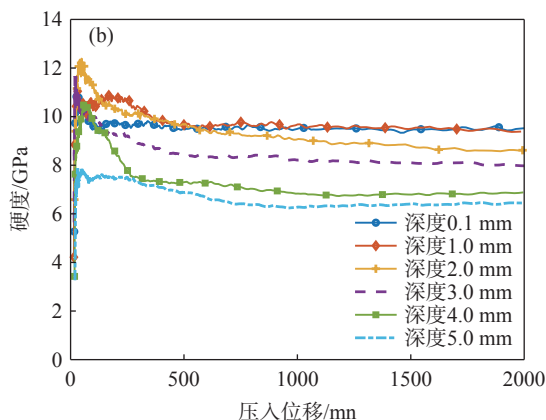


图 3 纳米压入硬度-位移曲线: (a) 距离轴承套圈外径表面 0.1 mm 的 5 个平行测试点; (b) 距离轴承套圈外径表面不同深度

不同位置的硬度取算术平均值和标准差,结果如图4所示。从图中可以发现,渗碳热处理后背衬轴承套圈的硬度从表面向心部逐渐降低,其中最表层硬度高达9.6 GPa,距表层5.5 mm深度处硬度为6.2 GPa。根据文献[27]可知,轴承钢渗碳后纳米压痕硬度 H_n 和维氏硬度 HV_1 的关系为 $HV_1 \approx 1000H_n/15$ 。经换算,距表层2.5 mm深度处的维氏硬度 $> HV_1$ 550。根据GB/T 9450—2025可知此背衬轴承套圈经渗碳热处理后,有效渗碳层深度 > 2.5 mm。

图5(a)给出了距离轴承套圈外径表面0.1 mm位置5个不同测点的弹性模量-位移曲线。从图中可以发现,当压入位移较小时,弹性模量急剧升高;当弹性模量达到最大值后,开始随着压入位移的增大逐渐降低并最终趋于稳定;当压入位移达到500 nm后,相同深度下不同测试点的弹性模量曲线相差不大。图5(b)给出了距离轴承套圈外径表面深度为

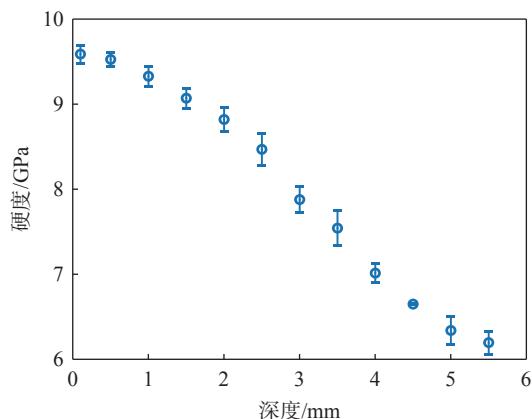


图4 渗碳热处理后背衬轴承套圈硬度分布特性

0.1、1.0、2.0、3.0、4.0和5.0 mm位置的弹性模量-位移曲线。从图中可以发现,距离轴承套圈外径表面的深度越大,弹性模量曲线趋向平稳的临界压入位移越小;距离轴承套圈外径表面不同深度处的弹性模量有差异,但不显著。

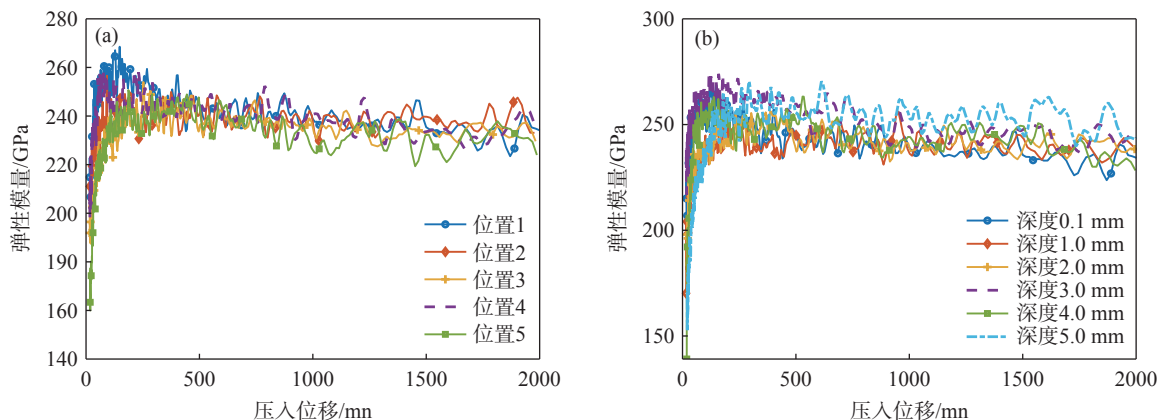


图5 纳米压入弹性模量-位移曲线:(a)距离轴承套圈外径表面0.1 mm的5个平行测试点;(b)距离轴承套圈外径表面不同深度

为了进一步定量分析弹性模量随距离轴承套圈外径表面深度的变化规律,选取压入位移范围为1600~2000 nm的数值计算每个压入位置的弹性模量,然后对相同深度位置的5个不同测试点的弹性模量取算术平均值和标准差,结果如图6所示。从图中可以发现,随着距离轴承套圈外径表面深度的增大,弹性模量仅略微增大,其中最表层弹性模量为233.9 GPa,距表层5.5 mm深度处弹性模量为246.3 GPa。弹性模量的变化可能是由纳米压痕测量技术引入的误差。因为越软的材料,纳米压痕测得的弹性模量往往越略高于实际值。因此,渗碳热处

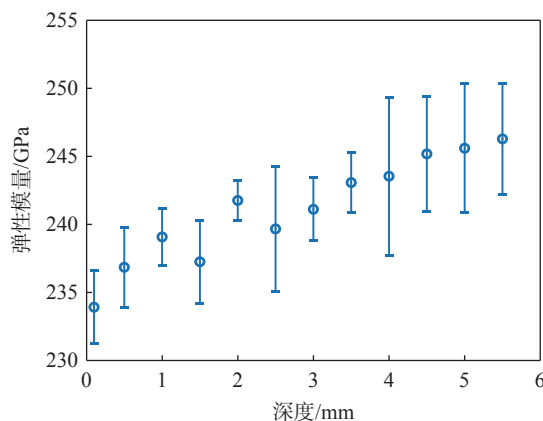


图6 渗碳热处理后背衬轴承套圈弹性模量分布特性

理工艺对背衬轴承弹性模量的影响有限。

结束语

经复合渗碳热处理后,背衬轴承套圈微观组织以马氏体为主,残余奥氏体均匀弥散分布于马氏体基体之间。从外径表面到心部,残余奥氏体含量逐渐减少、形态由块状变为线条状,马氏体晶粒逐渐粗大。硬度沿纵向截面从表层向心部呈梯度分布,表层硬度高达 9.6 GPa,心部硬度为 6.2 GPa,有效渗碳层深度 > 2.5 mm。弹性模量从表层向心部仅略微增大,渗碳热处理对弹性模量的影响不明显。本文所采用的深层多段可控气氛渗碳+双淬火双回火复合热处理工艺,可实现套圈表层高硬度、心部强韧性的梯度性能匹配,为改善背衬轴承滚动接触疲劳寿命、抑制早期失效提供可行技术路径。

参考文献

- [1] 陶瑞,张秋月,杜立辉.中国钢铁企业战略制定现状及对策研究.科技管理研究,2012,32(2):112
- [2] Liu X L, Wang N, Liu X M, et al. Failure mechanism of the inner ring raceway in the backing bearing for multi-roll rolling mills. *J Mater Res Technol*, 2025, 39: 1732
- [3] 杨红兵,邵子恒,颜莹,等.表面渗碳高强轴承钢滚动接触疲劳行为研究.材料导报,2025,39(12):174
- [4] Zhang R J, Zheng C L, Lü B, et al. Effect of non-uniform microstructure on rolling contact fatigue performance of bainitic rail steel. *Int J Fatigue*, 2022, 159: Art No. 106795
- [5] Fincato R, Tsutsumi S, Sakai T, et al. 3D crystal plasticity analyses on the role of hard/soft inclusions in the local slip formation. *Int J Fatigue*, 2020, 134: Art No. 105518
- [6] Ravi G, de Waele W, Nikolic K, et al. Numerical modelling of rolling contact fatigue damage initiation from non-metallic inclusions in bearing steel. *Tribol Int*, 2023, 180: Art No. 108290
- [7] Zheng Y X, Wang F M, Li C R, et al. Effect of martensite structure and carbide precipitates on mechanical properties of Cr-Mo alloy steel with different cooling rate. *High Temp Mater Proc*, 2019, 38(2019): 113
- [8] Moghaddam P V, Hardell J, Vuorinen E, et al. The role of retained austenite in dry rolling/sliding wear of nanostructured carbide-free bainitic steels. *Wear*, 2019(428/429): 193
- [9] Hu F, Wu K M, Hodgson P D. Effect of retained austenite on wear resistance of nanostructured dual phase steels. *Mater Sci Technol*, 2016, 32(1): 40
- [10] Kanetani K, Moronaga T, Hara T, et al. Deformation-induced martensitic transformation behavior of retained austenite during rolling contact in carburized SAE4320 steel. *ISIJ Int*, 2021, 61(10): 2629
- [11] Moghaddam P V, Hardell J, Vuorinen E, et al. Effect of retained austenite on adhesion-dominated wear of nanostructured carbide-free bainitic steel. *Tribol Int*, 2020, 150: Art No. 106348
- [12] Chen J, Wang Y, Li S, et al. The effect of retained austenite on rolling/sliding contact fatigue of high carbon steel. *Wear*, 2024(548/549): Art No. 205399
- [13] Xie L C, Palmer D, Otto F, et al. Effect of surface hardening technique and case depth on rolling contact fatigue behavior of alloy steels. *Tribol Trans*, 2015, 58(2): 215
- [14] Liu S, Yang Z Y, Liu T, et al. Effect of case depth and hardness distribution on the rolling contact fatigue performance of G20CrNi2MoA carburized steel. *Steel Res Int*, 2024, 95: Art No. 2300875
- [15] Walvekar A A, Sadeghi F. Rolling contact fatigue of case carburized steels. *Int J Fatigue*, 2017, 95: 264
- [16] Yang Z N, Ji Y L, Zhang F C, et al. Microstructural evolution and performance change of a carburized nanostructured bainitic bearing steel during rolling contact fatigue process. *Mater Sci Eng A*, 2018, 725: 98
- [17] Minamizawa K, Arakawa J, Akebono H, et al. Fatigue limit estimation for carburized steels with surface compressive residual stress considering residual stress relaxation. *Int J Fatigue*, 2022, 160: Art No. 106846
- [18] Benedetti M, Fontanari V, Höhn B, et al. Influence of shot peening on bending tooth fatigue limit of case hardened gears. *Int J Fatigue*, 2002, 24(10): 1127
- [19] Zhang J, Li W, Wang H Q, et al. A comparison of the effects of traditional shot peening and micro-shot peening on the scuffing resistance of carburized and quenched gear steel. *Wear*, 2016(368/369): 253
- [20] Wang G, Li C, Guo S, et al. Improved wear resistance and surface integrity of 18CrNiMo7-6 carburized steel induced by mixed waterjet shot peening. *Surf Coat Technol*, 2026, 528: Art No. 133369
- [21] 何莉萍,张珺婷,李宛桐,等.渗碳-激光冲击复合强化 G20Cr2Ni4A 磨损性能实验.实验技术与管理,2026,43(1):77
- [22] Liu Y, Yu X F, Zuo X Y, et al. Effect of laser shock peening on surface integrity, oxide layer stability, and wear mechanism of carburized M50NiL steel. *Opt Laser Technol*, 2026, 201: Art No. 115163
- [23] Ma J, Chen C. Progress in research on laser shock peening applications. *Int J Adv Manuf Technol*, 2026, 137: 2697
- [24] Hu X F, Qu S G, Chen Z T, et al. Rolling contact fatigue behaviors of 25CrNi2MoV steel combined treated by discrete laser surface hardening and ultrasonic surface rolling. *Opt Laser Technol*, 2022,

155: Art No. 108370

- [25] Tsuji N, Tanaka S, Takasugi T. Effect of combined plasma-carburizing and deep-rolling on notch fatigue property of Ti-6Al-4V alloy. *Mater Sci Eng A*, 2009, 499(1/2): 482
- [26] Wang J T, Qu S G, Lai F Q, et al. Synergistic effects of a combined surface modification technology on rolling contact fatigue behaviors of 20CrMoH steel under different contact stresses. *Int J Fatigue*, 2021, 153: Art No. 106487
- [27] Chen W, He X F, Yu W C, et al. Characterization of the microstructure and hardness of case-carburized gear steel. *Micron*, 2021, 144: Art No. 103028

基金项目：国家重点研发计划资助项目

(2022YFE0124700)。

作者简介：赵志福，男，河北省唐山人，副研究员，2019年毕业于清华大学机械工程专业，主要研究方向是先进材料的跨尺度力学行为，入选国家博士后创新人才支持计划。通信地址：北京市海淀区北四环西路15号，E-mail: zhaozhifu@imech.ac.cn。

刘小明（1982—），男，江苏省丹阳人，研究员。2009年毕业于清华大学力学专业，主要研究方向：接触力学。通信地址：北京市海淀区北四环西路15号；E-mail: xiaomingliu@imech.ac.cn。