

· 形变与相变 ·



GCr15 轴承钢碳化物带对力学性能的影响

阴湛清¹, 张天宇², 刘明洋³, 张弛¹

(1 清华大学材料科学与工程学院先进材料教育部重点实验室, 北京 100084; 2 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110819; 3 辽宁省产品质量监督检验院, 沈阳 110036)

摘要: GCr15 钢是一种应用于高端装备核心构件的轴承钢, 其显微组织中由于碳化物非均匀分布呈现出带状组织特征, 从而导致其性能的各向异性。通过棒材不同位置取样进行压缩试验系统研究了 GCr15 轴承钢中碳化物带数量和方向(轴向和径向)对力学性能的影响规律, 并分析了具有不同碳化物带特征的 GCr15 轴承钢的压缩断裂失效机理。结果表明, GCr15 轴承钢碳化物带从边部到中心数量逐渐增加, 且试样的平均硬度升高、波动幅度 Δ_{HV} 增大, 从 50 HV 扩大到 130 HV, 这与成分偏析、碳化物尺寸及分布相关; 由于轴向和径向试样的碳化物分布不同, 芯部轴向试样的压缩强度和塑性高于芯部径向试样的压缩强度和塑性; 在压缩断裂失效机理方面, 轴向试样的断裂失效机理主要为韧性断裂和脆性断裂相结合的混合型断裂机理, 碳化物带在一定程度上延缓了裂纹的扩展, 使之呈韧性断裂; 而径向试样以脆性断裂为主, 含有大量的解理断裂特征, 这主要是因为碳化物带与基体组织的界面结合强度较低, 降低了塑性变形能力。

关键词: GCr15 钢; 碳化物带; 压缩性能; 失效机制

DOI:10.20057/j.1003-8620.N250530 中图分类号: TG142.1

Effects of the Carbide Bands on the Mechanical Properties of GCr15 Bearing Steel

Yin Zhanqing¹, Zhang Tianyu², Liu Mingyang³, Zhang Chi¹

(1 Key Laboratory of Advanced Materials of Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2 Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3 Liaoning Product Quality Supervision and Inspection Institute, Shenyang 110036, China)

Abstract: GCr15 steel is a type of bearing steel used for the core-components of high-end equipment. Due to the non-uniform distribution of carbides in its microstructure, it exhibits banded structure characteristics, which leads to the anisotropy of its properties. The influence of the quantity and direction (axial and radial) of the carbide bands on the mechanical properties of GCr15 bearing steel were systematically studied by taking samples from different positions of the bar for compression tests, and the compression fracture failure mechanisms of GCr15 bearing steel with different carbide band characteristics were analyzed. The results show that the carbide bands in GCr15 bearing steel becomes more obvious from the edge to the core, and the average hardness increases and the fluctuation range expands. The fluctuation range has increased from 50 HV to 130 HV, which is related to composition segregation, carbide size and distribution. For compressive performance, due to the different distribution of carbides in the axial and radial directions, there are differences in strength and plasticity, resulting in the axial compressive performance being higher than that of the radial direction. For the failure mechanism of compression fracture, the axial region mainly exhibits a mixed type fracture mechanism combining ductile fracture and brittle fracture. The carbide band delays the crack propagation to some extent, thus presenting the characteristics of ductile fracture. The radial region is mainly characterized by brittle fracture, with numerous cleavage planes at the fracture surface, which is mainly due to the low plastic deformation capacity affected by the low interface bonding strength between carbide band and matrix area.

Key Words: GCr15 Steel; Carbide Bands; Compression Performance; Failure Mechanism

GCr15 轴承钢凭借其优异的硬度、耐磨性和接触疲劳强度, 被广泛应用于滚动轴承元件及精密机械零件的制造^[1]。目前, 轴承钢的冶炼技术较为成

熟, 可以将 $w[O]$ 控制在 5×10^{-6} 左右^[2], 但实际生产中有时因淬火加热控制不当导致加热温度升高, 淬火组织中除了马氏体形态发生变化和残留奥氏体量

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.52404405) 清华-江阴创新专项基金(2024JYTH06)

作者简介: 阴湛清(2000—), 男, 博士研究生; E-mail: yzq23@mails.tsinghua.edu.cn; 收稿日期: 2025-08-29

通信作者: 张弛(1973—), 男, 博士, 研究员; E-mail: chizhang@mail.tsinghua.edu.cn

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

增多外,在金相组织中还会在纵截面上沿原轧制方向呈现一种明暗相间的“带状组织”,从而导致材料的脆性增加^[3-5]。Xu等^[6]针对GCr15轴承钢失效机理进行了系统研究,但目前针对GCr15轴承钢中碳化物带对力学性能影响的系统性研究仍显不足。在实际服役过程中,该材料常因碳化物带引发的疲劳剥落、点蚀和裂纹萌生等问题导致早期失效,碳化物带区域易成为应力集中点和裂纹源,显著降低轴承的疲劳寿命^[7-8]。

多年来GCr15轴承钢的性能一直备受关注,成型过程中带来的元素偏析、带状组织等缺陷^[9-12]对力学性能造成了严重影响,目前,已经进行了大量的研究,例如,屈服强度、极限抗拉强度^[13]、断裂伸长率和韧脆转变温度等。薛仁杰等^[14]研究了带状组织经过10%变形后,试样组织纤维化更明显,增加了变形过程位错移动阻力,使得材料强度提升,带状组织也易造成位错塞积与晶格畸变,恶化材料变形能力;李琳等^[15]研究了带状组织与均匀组织对力学性能与断裂形貌的影响。柳得橹等^[16]分析了低碳含锰钢板冷弯裂纹与带状组织的关联性,并给出带状组织形成原因与预防手段。GCr15轴承钢中的碳化物带最有可能成为裂纹源,碳化物易形成团簇,会产生更加严重的应力集中现象^[17-20],材料的力学性能、应力状态与能量积累速率也发生改变,甚至由于亚微米级碳化物周围位错胞的形成,减弱碳化物与基体界面的结合力,最终影响材料裂纹萌生、扩展的过程^[21]。Narasaiah等^[22]发现微裂纹起始于带状组织与基体组织界面的概率远高于其他界面。Li等^[23]研究表明高带状碳化物等级,主要失效形式为疲劳坑和表面裂纹,而低带状碳化物等级,主要失效形式为剥落,随着带状碳化物等级的增加,塑性变形层厚度增加。疲劳裂纹容易沿滚动方向在塑性变形层中扩展。

因此,系统研究了GCr15轴承钢中碳化物带数量和方向对力学性能的影响。系统表征了从边部到芯部碳化物带的特征包括带状长度、带状宽度、带状间距,以及碳化物带当中碳化物的尺寸与形状,明确了碳化物带数量和方向对压缩性能的影响,阐明了不同碳化物带特征条件下试样的压缩断裂失效机理。

1 实验材料与方案

本研究选取热轧态GCr15轴承钢 $\phi 230$ mm大规格棒材作为研究对象,系统考察了不同取样位置对

材料力学性能的影响规律。试验用钢采用高炉炼铁→顶底复吹转炉→精炼炉脱硫脱氧(LF,精炼技术)→真空炉脱气(RH,钢液真空处理)→连铸-连轧工艺获得,具体成分见表1。取样示意图如图1所示,实验材料分别从轴向和径向(包括边部、1/4处和芯部)三个特征区域取样,以确保全面表征材料的各向异性特征。试样制备过程严格遵循标准规范:首先采用精密电火花线切割技术将原材料加工成5 mm×9 mm的初始试样,随后采用优化后的工艺进行热处理,即840 °C球化退火30 min后油淬、170 °C低温回火180 min后空冷至室温,如图2所示。热处理后的试样经精密磨削加工至4 mm×7 mm的标准尺寸,并去除表面氧化层,最后通过超声波清洗彻底清除加工过程中残留的油污和磨削碎屑。

力学性能测试采用配备视频引伸计的高精度室温压缩试验机(岛津AGS-X 100 kN),在0.001 s⁻¹的准静态压缩速率下沿平行于碳化物带和垂直于碳化物带方向进行压缩至断裂的全程测试。为深入分析断裂机制,对压缩断裂后的试样沿加载方向进行截面剖切,对其截面进行系统的显微组织表征。

表1 特级优质GCr15轴承钢主要化学成分(质量分数)
Table 1 Main Chemical Composition of Superior Grade GCr15 Bearing Steel

						%	
C	Cr	Mn	Si	S	P	T.O	
0.95~1.05	1.40~1.65	0.25~0.45	0.15~0.35	≤0.015	≤0.015	≤0.0006	

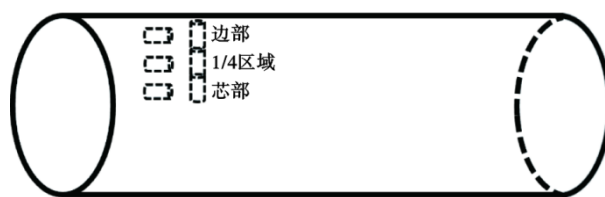


图1 GCr15轴承钢热轧棒材取样示意图

Fig. 1 Sampling diagram of GCr15 bearing steel hot rolled bar

2 实验结果

2.1 碳化物带宏观表征

为更好地研究碳化物带对GCr15轴承钢力学性能地影响,对GCr15轴承钢从边部到中心的轴向和径向试样进行了组织表征,并对轴向试样进行了EPMA元素面扫描及归一化处理。图3展示了GCr15轴承钢热轧棒材在轴向和径向不同位置的微观组织特征,图4展示了GCr15轴承钢热轧棒材在

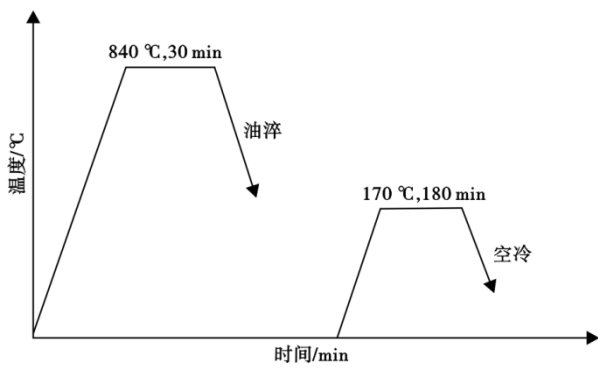


图 2 GCr15 轴承钢的热处理工艺
Fig. 2 Heat treatment process of GCr15 bearing steel

轴向不同位置的元素偏析情况。从轴向表征结果来看,边部区域呈现出均匀的组织分布,如图 3(a)所示,未发现明显的方向性组织或碳化物带。碳、铬元素分布相对均匀,如图 4(a)和图 4(d)所示,无明显浓度梯度或偏析现象,这是由于边部空冷冷却速率快,碳原子扩散受限而在表面富集,高碳浓度促进细小等轴晶形成,使碳化物沿晶界稀疏分布,形成均匀组织;1/4 处由于冷却速率降低和应力分布变化,C、Cr 等溶质元素开始沿轴向产生偏析,如图 4(b)和图 4(e)所示,导致碳化物局部富集并形成初步的碳化物带,如图 3(b)所示,此时碳化物带带宽约为 15 μm,且带间距较大,约 100~150 μm,表现出一定的方向性特征;在芯部区域图 3(c),受缓慢冷却条件影响,溶质扩散更为充分,形成了典型的中心带状结构,元素偏析更为剧烈。其特征表现为

连续分布的碳化物带,带宽约 30 μm,带间距显著减小至 50 μm 左右,这种组织不均匀性主要源于芯部区域独特的热力学条件。

在径向观察结果中,边部区域图 3(d)组织为马氏体基体中均匀分布球状碳化物,平均尺寸约 2 μm,1/4 处图 3(e)作为碳化物带的主要聚集区,碳化物呈现出放射状分布特征,构成了三维网状骨架结构,而芯部区域图 3(f)虽然轴向表现出明显的带状特征,但在径向观察中却呈现出相对弥散的碳化物分布,反映了碳化物带的三维空间分布特性,同时,也印证了芯部区域带状现象最为严重的事实。

对轴向试样显微组织中的碳化物颗粒进行了定量统计,结果如图 5 所示。GCr15 轴承钢的碳化物带各特征参数从边部到芯部均呈现明显梯度变化。其中,碳化物带长度由边部的 1 100 μm 增至芯部的 2 200 μm,宽度由 50 μm 增至 200 μm,而间距则由 600 μm 递减至接近 50 μm。

这种空间分布特征主要源于连铸过程中芯部冷却速率较慢导致的 C、Cr 元素偏析加剧,以及轧制过程中芯部变形抗力较高造成的动态再结晶不完全,导致芯部的带状现象最严重。综上所述,从边部到芯部,碳化物带的长度和宽度逐渐增加。同时,间距呈现递减趋势,带状现象越来越严重,这主要源于芯部较低的冷却速度使固液两相区停留时间延长,促进 C、Cr 等元素的枝晶偏析。

图 6 为 GCr15 轴承钢轴向三个位置的硬度云图。从边部到中心硬度平均硬度从 710HV 升至

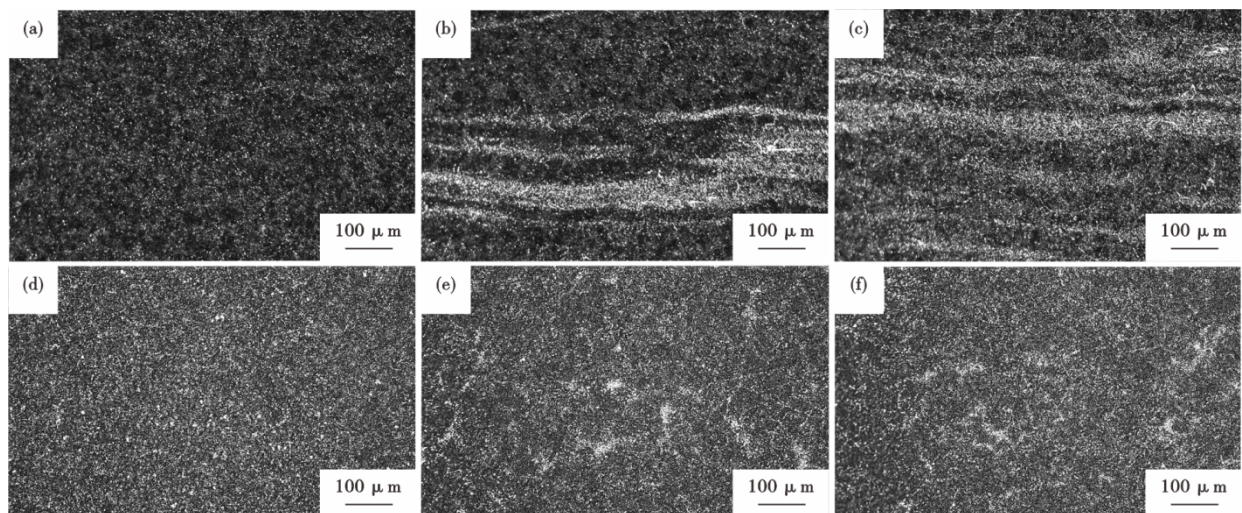


图 3 GCr15 轴承钢热轧棒材轴向和径向的微观组织:(a) 轴向边缘,(b) 轴向 1/4 处,(c) 轴向芯部,(d) 径向边缘,(e) 径向 1/4 处,(f) 径向芯部
Fig. 3 Microstructure of GCr15 bearing steel hot-rolled bars in the axial and radial directions: (a) axial edge, (b) axial at one quarter, (c) axial core, (d) radial edge, (e) radial at one quarter, (f) radial core

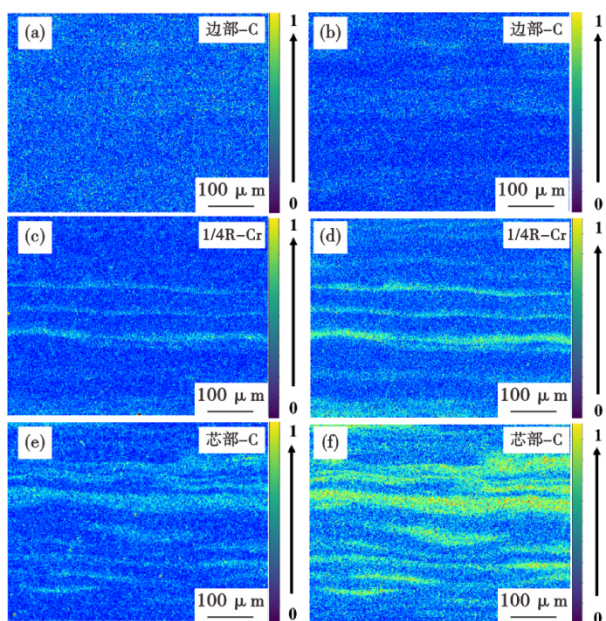


图4 GCr15轴承钢轴向的碳和铬元素归一化EPMA图:碳(a)边缘,(b)1/4处,(c)芯部;铬(d)边缘,(e)1/4处,(f)芯部

Fig. 4 Normalized EPMA diagram of carbon and chromium elements in GCr15 bearing steel: carbon (a) edge, (b) at one quarter, (c) core; chromium (d) edge, (e) at one quarter, (f) core

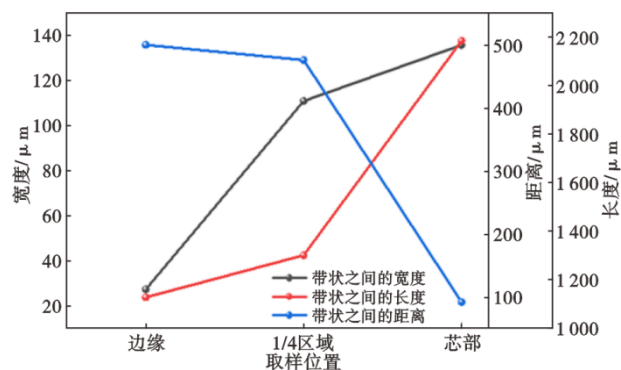


图5 GCr15轴承钢轴向的碳化物带的长度、宽度以及间距变化图

Fig. 5 Variation diagram of length, width and spacing of axial carbide band of GCr15 bearing steel

760HV, 硬度波动幅度 Δ_{Hv} 从 50 HV 扩大到 130HV, 中心区域硬度分布更集中, 组织不均匀性增强。其中, 边部局部 780HV 红点对应 1~2 μm 细小碳化物团簇, 基体区 680~710HV 硬度均匀; 芯部 820HV 高硬度带与 Cr 富集带吻合, 为碳化物密集区, 相邻非带状区域硬度为 690 HV。

2.2 碳化物带微观形貌

为深入理解碳化物带对力学性能的影响, 通过对其轴向和径向芯部区域进行扫描电子显微镜

(SEM)分析, 精确表征碳化物带内部碳化物的尺寸、数量及形貌, 结果如图7所示。可以看到轴向芯部区域和径向芯部区域的碳化物带图7(c)和7(g)与非带状区域图7(d)和7(h)在析出物分布和微观形貌上存在显著差异, 产生原因与碳化物带之间的距离和长宽有关。碳化物带的间距变化会影响局部区域的冷却速率, 进而改变碳化物的析出行为; 而碳化物带的长宽比差异则会导致热处理过程中微观应力分布的不均匀性, 最终在微观尺度上形成不同的碳化物形貌及分布情况。

在轴向芯部区域的碳化物带中图7(c), 碳化物呈短棒状与粒状混合分布。图8定量统计了碳化物带和基体组织区域的碳化物尺寸及数密度, 碳化物带区域短棒状碳化物的平均长度达到 2.2 μm , 长径比约为 5:1, 粒状碳化物的平均直径约为 0.375 μm , 二者紧密聚集形成明显的碳化物带结构。而基体组织区域图7(d)的碳化物分布更为均匀, 平均尺寸减小至 0.287 μm , 且形态以近等轴状为主, 表现出典型的弥散分布特征。

径向芯部区域的碳化物分布则呈现出不同的特点。碳化物带区域图7(g)以粒状碳化物为主导, 平均尺寸为 0.355 μm , 仅局部区域存在少量短棒状碳化物, 其平均长度为 1.895 μm , 较轴向碳化物带区域同类碳化物尺寸减小约 14%。值得注意的是, 径向区域的碳化物形貌差异可能与材料在轧制过程中受到的各向异性变形有关。另外, 径向基体组织区域图7(h)表现出显著的组织均匀性, 碳化物析出密度明显降低, 与相邻碳化物带区域形成鲜明对比。

2.3 压缩性能

为揭示碳化物带对GCr15轴承钢压缩性能的影响, 对轴向和径向的边部、1/4处及芯部试样进行了室温压缩试验, 图9为典型压缩曲线。统计了多组室温压缩试验轴向和径向的边部、1/4处及芯部试样的抗压强度、屈服强度、均匀伸长率和断后伸长率数据, 如图10所示。在强度方面, GCr15轴承钢轴向抗压强度从边缘到中心变化趋势较为平缓, 表明轴向加载时材料的抗压性能分布均匀; 径向抗压强度从边缘至中心先上升后下降, 且波动剧烈, 这种非线性变化与碳化物带的不均匀性密切相关。屈服强度上, GCr15轴承钢轴向屈服强度从边缘到中心递增 12.2%, 轴向塑性变形抗力更强; 径向屈服强度在边缘到中心仅微增 3.0%, 且芯部区域轴向的抗

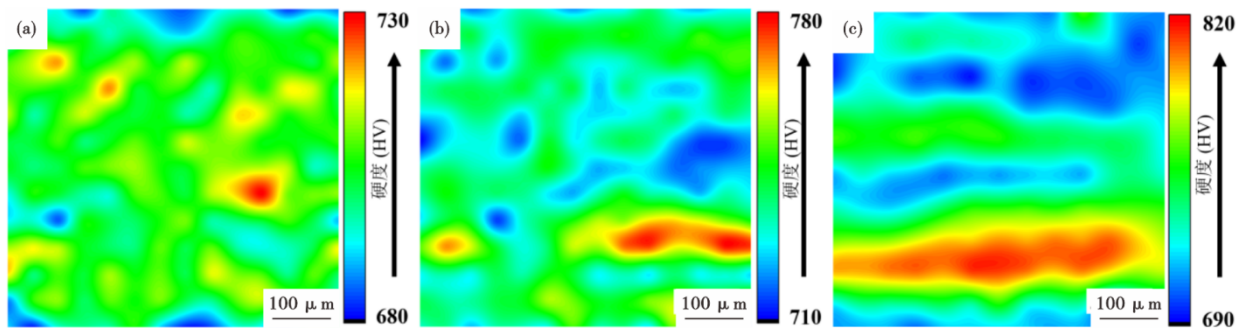


图 6 GCr15 轴承钢轴向从边缘到中心的硬度图: (a) 边缘区域, (b) 1/4 处, (c) 芯部区域
 Fig. 6 Hardness diagram of GCr15 bearing steel from edge to core : (a) edge, (b) at one quarter, (c) core

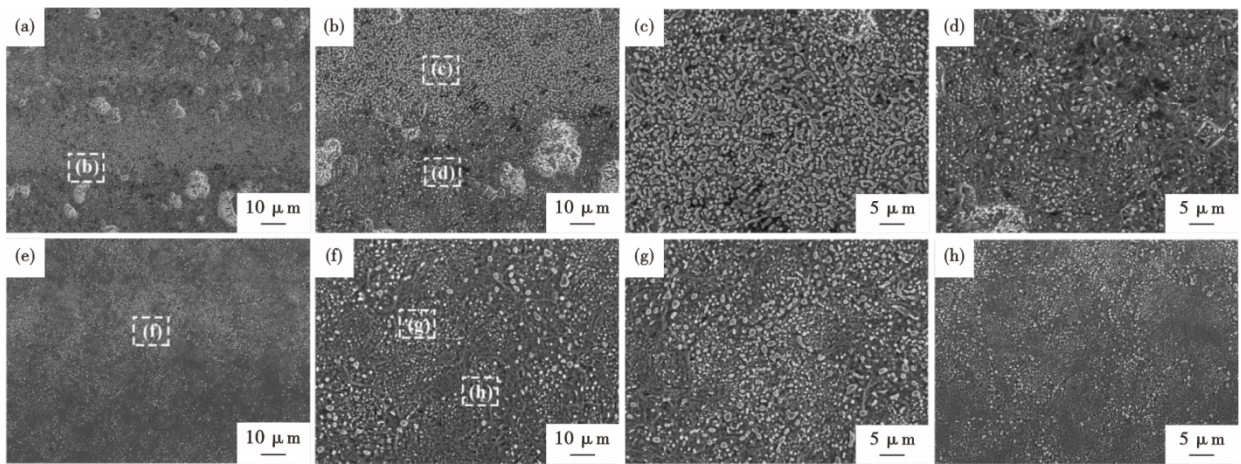


图 7 GCr15 轴承钢轴向和径向的芯部区域的 SEM 微观组织: (a)~(d) 轴向; (e)~(h) 径向
 Fig. 7 SEM microstructure of core zone in axial and radial direction of GCr15 bearing steel: (a)~(d) axial; (e)~(h) radial

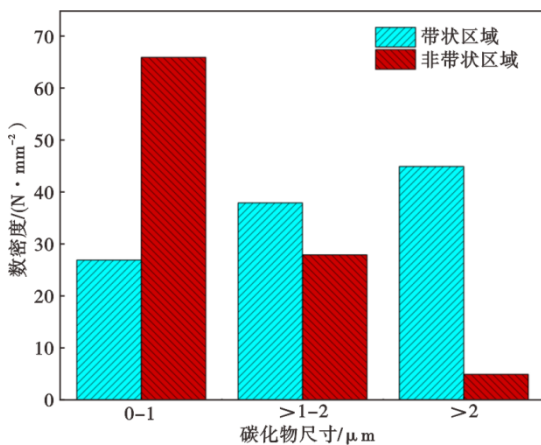


图 8 GCr15 轴承钢芯部区域的带状和非带状区域碳化物尺寸统计
 Fig. 8 Statistics of carbide size in banded and non-banded areas of GCr15 bearing steel core area

压和屈服强度高于径向,这主要源于轴向加载时,晶粒取向与应力方向更一致,而径向受碳化物带各向异性影响,屈服性能提升受限。均匀伸长率上,轴向总是高于径向,这是因为轴向加载时应力分布

更均匀,径向因碳化物带导致变形不均匀,伸长率降低,即 GCr15 轴承钢轴向的均匀塑性变形能力较强。断后伸长率上,GCr15 轴承钢轴向总体高于径向,但在碳化物带不明显的边缘区域,径向变形受自由表面影响较小,故伸长率较高;芯部区域碳化物带显著,轴向断后伸长率高于径向,因此,轴向能更有效抑制裂纹扩展,即芯部区域 GCr15 轴承钢轴向的断后伸长率高于径向。综上所述,GCr15 轴承钢轴向压缩性能,抗压强度、屈服强度、断后伸长率、均匀伸长率在芯部区域均高于径向。

3 分析与讨论

3.1 碳化物带对显微硬度的影响

综合碳化物带宏观特征、元素分布、微观形貌和硬度云图,可以看出碳化物的不均匀性决定了显微硬度的不均匀性。连铸过程中,碳和铬元素沿枝晶间富集,形成从边部到中心的初始成分梯度,后续的热轧工序及热处理进一步将成分偏析演变为连续的碳化物带,使得硬度分布呈现出明

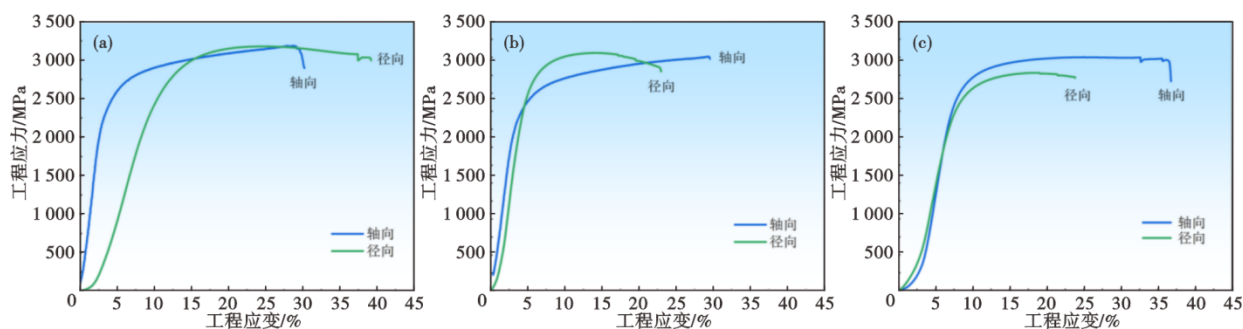


图 9 GCr15 轴承钢轴向和径向的压缩曲线:(a) 边缘,(b) 1/4 处,(c) 芯部

Fig. 9 Axial and radial compression curves of GCr15 bearing steel: (a) edge, (b) at one quarter, (c) core

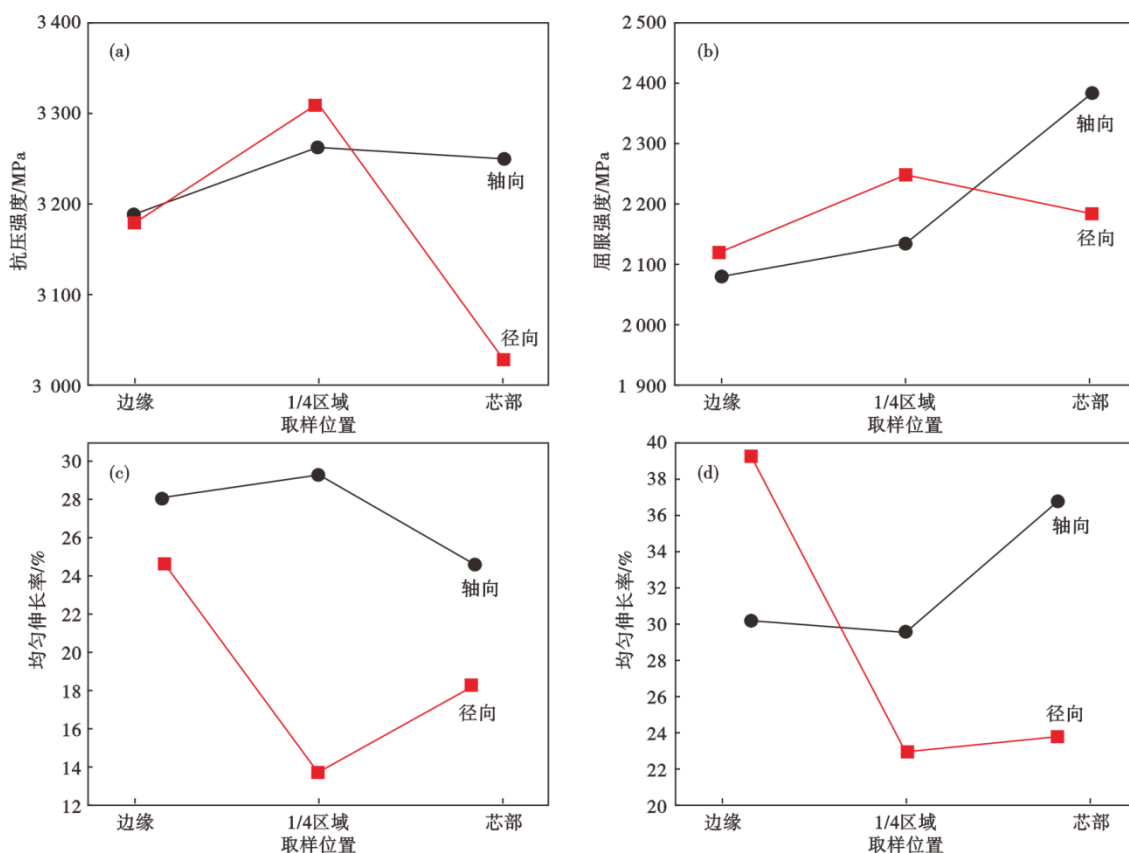


图 10 GCr15 轴承钢轴向和径向的压缩性能:(a) 抗压强度,(b) 屈服强度,(c) 均匀伸长率,(d) 断后伸长率

Fig. 10 Axial and radial compressive properties of GCr15 bearing steel : (a) compressive strength, (b) yield strength, (c) uniform elongation, (d) elongation after fracture

显的方向性。GCr15 轴承钢轴向从边缘到中心随带状程度不同,平均硬度呈升高趋势,从 690HV 升至 760HV,且中心区域硬度分布更集中。同时,轴向芯部区域组织的尺寸、形貌更不均匀,使得显微硬度波动幅度 Δ_{mv} 随深度增加而扩大,从 $\Delta_{mv}=50\text{HV}$ 增至 130HV。

进一步研究碳化物带中的碳化物,边部的高硬度点对应着细小的碳化物团簇,其尺寸约为 1~2 μm ,这是由于边部冷却速度较快使碳化物弥散析

出所致,且边部由于碳偏析程度低,组织相对均匀,硬度也较为均匀。芯部碳化物带区域中短棒状碳化物和粒状碳化物的密集分布会显著提升局部硬度,短棒状碳化物通过绕过机制阻碍位错运动,其长径比越大,强化效果越显著;小尺寸碳化物通过增加位错钉扎点提升强度。综上所述,碳化物带的高硬度主要源于高密度、大长径比碳化物的位错阻碍效应。

3.2 碳化物带对压缩性能的影响

碳化物带使 GCr15 轴承钢具有明显的各向异性,其在不同方向上的压缩性能差异较大,是因为碳化物带与基体组织之间的硬度存在差异,且两者界面结合力弱。在碳化物带最明显的 GCr15 轴承钢芯部区域,轴向和径向在受到压缩载荷时碳化物带显现出不同影响,GCr15 轴承钢在轴向加载时,位错运动频繁受阻于碳化物带与基体组织之间的界面,导致局部应力集中,从而表现出高断后伸长率、抗压强度稳定以及均匀塑性变形的特点。在变形初期,基体和碳化物带都产生塑性变形,基体优先使位错开动,但由于与碳化物带之间存在硬度差,碳化物带对位错运动起到阻碍作用,使得塑性变形持续进行。当轴向芯部区域存在 Cr 富集带时,碳化物阻碍位错运动并分散载荷,提高了 GCr15 轴承钢的抗压强度。这种现象使裂纹在扩展时受到约束,不能随意伸长,从而增强了 GCr15 轴承钢的韧性,使得 GCr15 轴承钢轴向的断后伸长率较长。而当径向加载时,由于径向的碳化物带与基体组织的界面结合强度低,两者间的显著硬度差异导致应力会沿弱界面处集中,进而引发微裂纹的萌生和扩展,由于碳化物带的连续性,微裂纹一旦形成,裂纹沿着碳化物带的方向快速扩展,从而降低 GCr15 轴承钢的韧性。

此外,GCr15 轴承钢的塑性会因碳化物带的不均匀而降低。轴向加载时,由于碳化物带等硬相在压缩过程中产生应力集中,非带状区域等软相在压缩过程中会率先发生塑性变形,弱界面在变形中通过脱粘或滑移吸收能量,延缓裂纹扩展,导致 GCr15 轴承钢轴向的均匀伸长率以及断后伸长率较高;径向加载时,当径向载荷扩展到碳化物带与基体组织

的弱界面会迅速扩展,导致提前失效,降低均匀伸长率以及断后伸长率。

3.3 碳化物带对压缩断裂失效机制的影响

GCr15 轴承钢在实际服役过程中主要承受交变载荷作用,其失效行为与静态载荷条件下的表现存在显著差异。研究表明,仅基于静态载荷设计可能导致轴承部件过早失效,这不仅造成经济损失,更对设备安全运行构成严重威胁,为准确评估其断裂失效机理,采用平行和垂直于轧向的两类试样进行压缩试验,以消除碳化物带各向异性的干扰。通过光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)和能谱分析(EDS)(如图 11 和图 12 所示)对轴向和径向芯部断口截面表征,结果显示,在轴向试样断裂时,由于塑性变形,碳化物带承受应力发生弯曲,断口附近带状结构呈现断续分布特征,这是因为塑性变形导致组织失稳,随着塑性变形的进行,材料内部的应力状态不断变化,从而出现裂纹断续分布的现象。径向试样断裂时,断口附近带状结构呈现连续分布特征,使界面结合力弱,界面处产生应力集中,应力超过界面强度,裂纹便扩展,从图 11(b)中白色箭头处碳化物带区域看,一旦裂纹扩展至附近,界面处应力集中可能促使裂纹继续沿界面前行。

通过对断口形貌分析,轴向断口相对平坦,EDS 面扫描证实碳、铬元素在裂纹扩展路径上呈带状富集,与 SEM 观察到的颗粒状结构相对应,界面处碳和铬元素浓度梯度差异显著促进了裂纹沿缺陷优先扩展。径向试样的断裂行为表现出明显不同的特征。断口截面分析显示碳、铬元素在裂纹路径周围形成环状富集区(图中白色箭头标识区域),当径向应力垂直作用时,界面结合强度被显著弱化,裂纹倾向于沿碳化物带/基体组织的界面扩展,呈现典

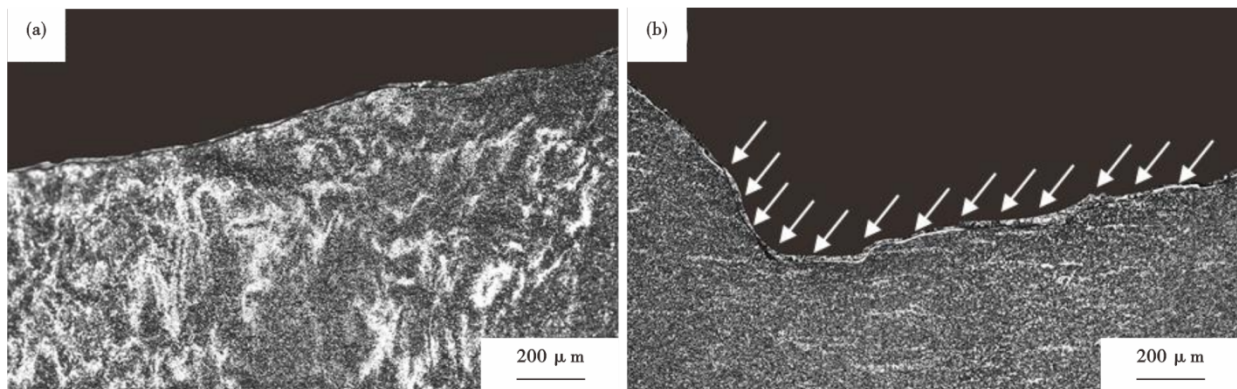


图 11 GCr15 轴承钢轴向和径向芯部区域的断口截面金相组织:(a) 轴向,(b) 径向

Fig. 11 Metallographic structure of fracture section in axial and radial core area of GCr15 bearing steel: (a) axial, (b) radial

型的脆性解理断裂特征,并且在径向试样中观察到明显的二次裂纹现象,塑性变形初期,马氏体基体首先发生塑性流动,当变形传递至碳化物硬质相时,在相界面处形成位错塞积群,塞积群前端产生局部应力集中,最终导致界面开裂并伴随裂纹偏转。这种二次裂纹现象在交变载荷作用下可能成为疲劳裂纹的优先萌生位置,显著降低GCr15轴承钢的疲劳寿命。

综上所述,轴向和径向试样的断裂机制差异主要源于碳化物带的取向效应,轴向应力作用下,碳化物带平行于主应力方向,裂纹扩展需要克服更强的组织约束;而径向应力垂直作用于碳化物带界面时,弱化的相界面成为裂纹扩展的优先路径。

为了揭示压缩断裂失效的潜在机制,采用SEM研究了GCr15轴承钢的断口形貌特征。图13分别为GCr15轴承钢轴向边缘区域、芯部区域、径向边缘区域和1/4处试样的SEM断口形貌图。结果显示,在轴向试样的SEM图像中,轴向边缘区域断口处韧窝与解理面并存,韧窝直径约2~5 μm,韧窝呈拉长形态,方向与轴向应力一致,解理面上河流花样清晰可辨,碳化物沿加载方向被拉伸为椭圆形,显示出明显的局部剪切应力作用,其断裂机制属于韧性断裂和脆性断裂相结合的混合型断裂机制。轴向芯部区域则表现出更明显的脆性断裂特征,芯部碳

化物带现象最严重,当受到轴向加载的力时,碳化物带在一定程度上延缓了裂纹的扩展,也会对裂纹扩展路径进行导向产生撕裂棱,同时,碳化物带在该方向上产生大量应力集中,受硬质相钉扎效应导致解理台阶的形成,裂纹随即迅速扩展,形成大量的解理面,即GCr15轴承钢轴向加载时是由韧性断裂和脆性断裂相结合的混合断裂机制。

径向加载条件下,边部试样断口缺乏纤维区和剪切唇结构,呈现出典型的脆性断裂特征,裂纹优先沿碳化物带与基体组织的弱界面扩展,形成明显的裂纹,如图13(c)所示;径向1/4处试样表现出脆性断裂特征,解理面占比超过90%,表面分布着连贯的河流花样,表明GCr15轴承钢在断裂末期的塑性变形能力严重不足。总的来说,GCr15轴承钢径向加载时断口呈现以解理断裂为主,断口平整且呈现典型“河流花样”,表明径向加载下GCr15轴承钢以低能量脆性断裂为主导,裂纹沿碳化物团簇边界直线扩展,无明显韧窝裂纹,说明碳化物带显著降低了塑性变形能力。

综上所述,系统研究了GCr15轴承钢经淬火和回火处理后碳化物带与力学性能之间的关系,其压缩性能的各向异性归因于成分偏析以及由此产生的碳化物带区域与基体组织区域的应力差异。因此,建议控制偏析是降低各向异性的主要途径,例

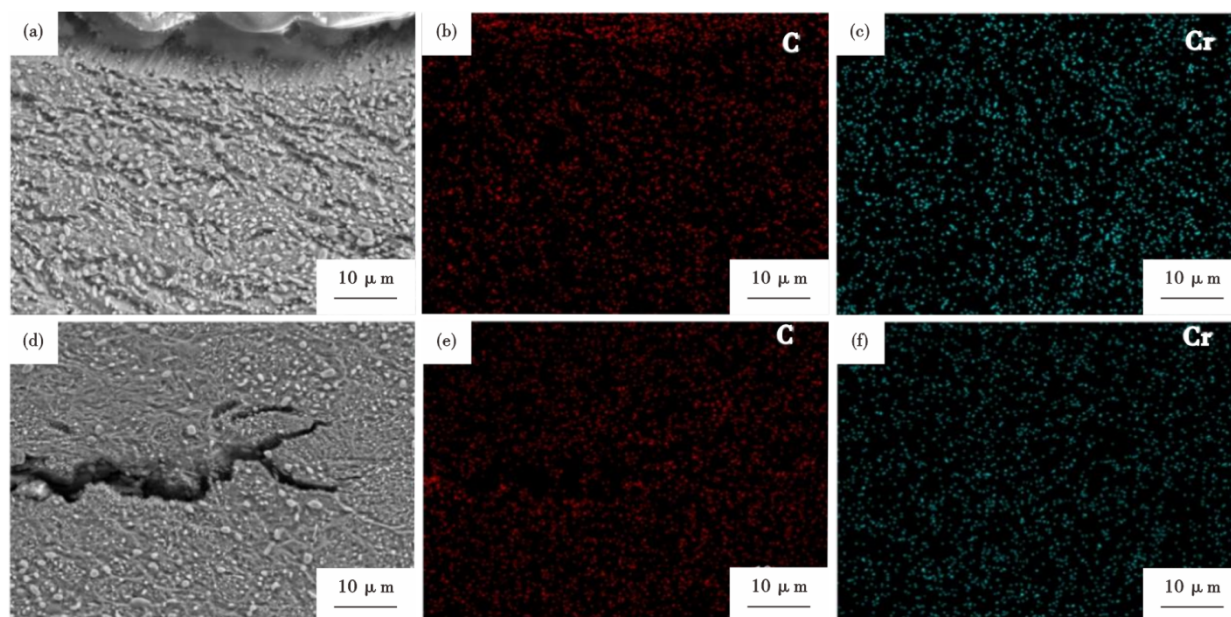


图12 GCr15轴承钢轴向和径向芯部区域的断口截面SEM微观组织以及EDS面扫描:轴向(a)微观组织图,(b)碳,(c)铬;径向(d)微观组织图,(e)碳,(f)铬

Fig. 12 SEM microstructure and EDS surface scanning of fracture section in axial and radial core region of GCr15 bearing steel : axial (a) microstructure diagram, (b) carbon, (c) chromium; radial (d) microstructure diagram, (e) carbon, (f) chromium

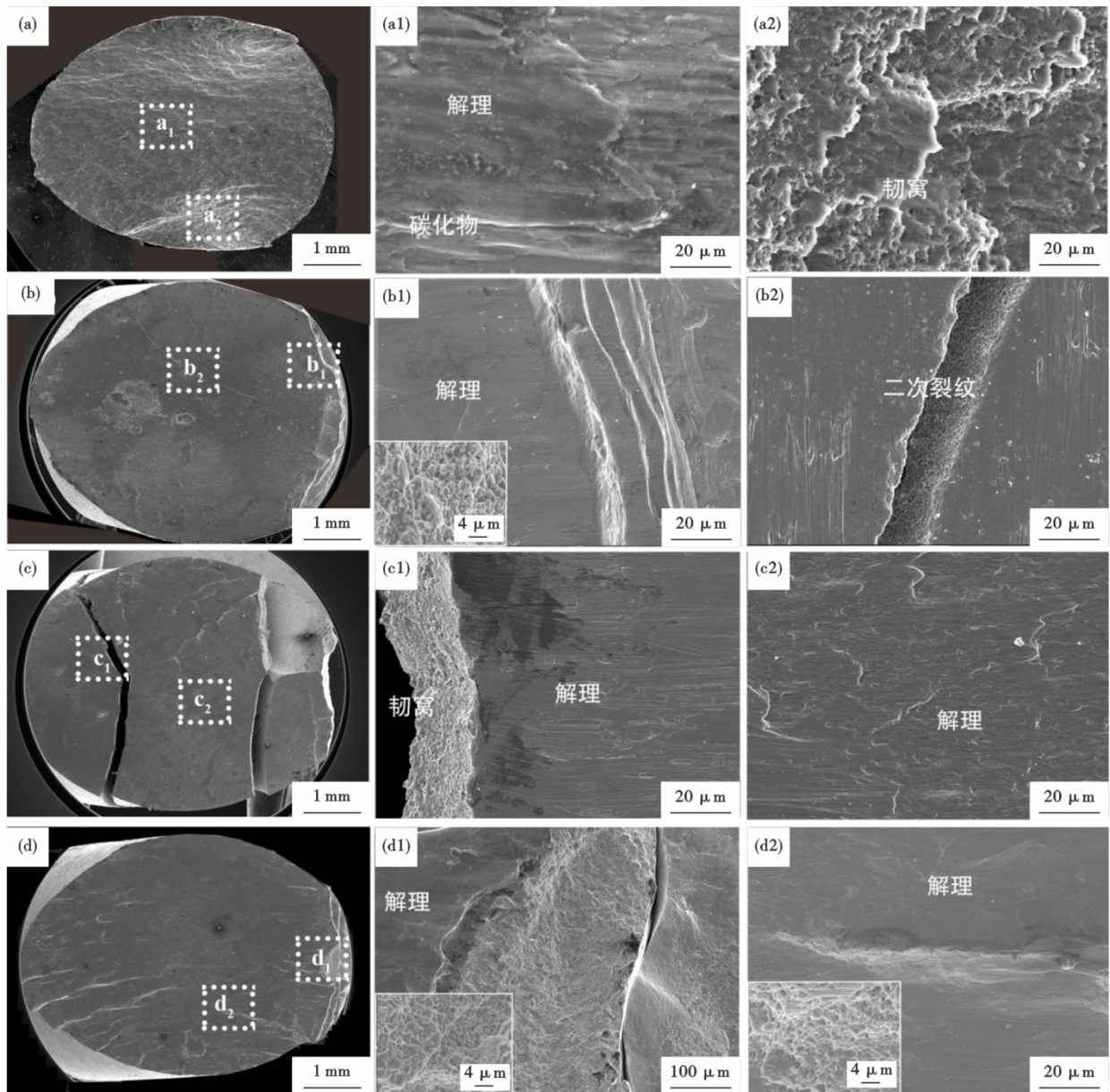


图 13 GCr15 轴承钢轴向和径向的断口 SEM 形貌: (a) 轴向边缘, (b) 轴向芯部, (c) 径向边缘, (d) 径向 1/4 处

Fig. 13 SEM morphology of axial and radial fracture of GCr15 bearing steel : (a) axial edge, (b) axial core, (c) radial edge, (d) at the radial 1/4 point

如,电磁搅拌、低过热度浇铸和轻压下技术已被用于减少铸坯的偏析,同时,高温扩散退火处理也可以减少偏析现象。前期工作中^[24]通过热加工图理论研究了热变形过程动态再结晶行为及其规律,发现能量耗散效率在变形温度为 1 000 °C 应变速率为 0.1~1 s⁻¹ 之间的条件下存在明显的峰值,因此该条件为 GCr15 轴承钢热加工过程发生动态再结晶的最优条件,可以改善连铸坯当中的元素带状偏析。

4 结论

系统分析了 GCr15 轴承钢中的成分偏析现象以

及碳化物带的显微组织特征,并通过明确了碳化物带特征对室温压缩性能的影响,揭示了碳化物带对断裂失效机理的影响,以探究碳化物带与力学性能的关系,主要结论如下:

1) GCr15 轴承钢轴向和径向的碳化物带分布存在差异,轴向碳化物带主要位于 1/4 处和芯部,平行于轧制方向分布,从边部到中心碳化物带长宽逐渐升高、间距逐渐缩短,偏析现象逐渐严重。同时,从边部到中心碳化物带区域硬度升高,硬度波动幅度增大,Δ_{HV}=50HV 增至 130HV,反映芯部区域组织不均匀性增强。

2)GCr15轴承钢轴向和径向的压缩性能呈现各向异性,轴向抗压强度变化平缓,径向强度先上升后下降且波动大;轴向屈服强度递增明显,径向微增;轴向断后伸长率、均匀伸长率在芯部高于径向。

3)GCr15轴承钢在不同加载方向下断裂机制不同,在轴向加载时断口为韧性断裂和脆性断裂相结合的混合型断裂机制,碳化物带与基体组织之间界

面结合强度较低,在轴向加载时应力分布较均匀,对塑性变形能力的负面影响较小,裂纹扩展需跨越不同硬度的区域,延缓裂纹扩展。而在径向加载时断口以脆性断裂为主,呈现典型解理断裂特征,碳化物带降低了界面结合强度,易在碳化物带与基体组织界面处产生应力集中,引发早期裂纹并沿界面快速扩展,降低了塑性变形能力。

参考文献

- [1] 邵杰. 轴承机械设备的“关节”[J]. 现代制造, 2015(12): 5.
- [2] Wang Z L, Bao Y P. Development and prospects of molten steel de-oxidation in steelmaking process[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(1): 18-32.
- [3] 俞峰, 陈兴品, 徐海峰, 等. 滚动轴承钢冶金质量与疲劳性能现状及高端轴承钢发展方向[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 513-522.
- [4] Shi L, Yan Z S, Liu Y C, et al. Development of ferrite/bainite bands and study of bainite transformation retardation in HSLA steel during continuous cooling[J]. Metals and Materials International, 2014, 20(1): 19-25.
- [5] Yu H Y, Lee S M, Nam J H, et al. Post-uniform elongation and tensile fracture mechanisms of Fe-18Mn-0.6C-xAl twinning-induced plasticity steels[J]. Acta Materialia, 2017, 131: 435-444.
- [6] Xu F N, Ding N, Li N, et al. A review of bearing failure Modes, mechanisms and causes[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 152: 107518.
- [7] 骆晓炜. 带状组织对42CrMoA调质态微观组织和力学性能影响研究[J]. 金属材料与冶金工程, 2025, 53(1): 3-7+25.
- [8] 薄鑫涛. 有关GCr15轴承钢的液析、带状和网状碳化物问题[J]. 热处理, 2023, 38(4): 60.
- [9] 郭发军, 李祥才, 崔建海, 等. 连铸过热度对轴承钢GCr15碳化物带状组织的影响[J]. 山东冶金, 2024, 46(6): 30-32.
- [10] 兰鹏, 铁占鹏, 张伟, 等. 连铸坯点状偏析缺陷研究进展[J]. 钢铁, 2020, 55(2): 11-22+30.
- [11] 张壮. 高碳铬轴承钢铸轧过程带状碳化物的形成及控制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2024.
- [12] 许志刚, 王新华, 黄福祥, 等. 管线钢连铸板坯的半宏观偏析和凝固组织[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(6): 751-756.
- [13] 胡正兴, 崔春丽, 王琰, 等. 带状组织形貌对管线钢拉伸性能的影响[J]. 实验力学, 2020, 35(3): 417-424.
- [14] 薛仁杰, 董伊康, 马子洋, 等. 带状组织对冷轧双相钢DP780力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(12): 191-197.
- [15] 李琳, 徐锐良, 李忠利, 等. 带状组织对铁素体-马氏体钢拉伸断裂行为的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(14): 46-50.
- [16] 柳得膺, 邵伟然, 孙贤文, 等. 钢的表面带状组织及其引起的冷弯裂纹[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(1): 40-44.
- [17] 夏博. 车用板簧钢50CrMnMoVNb和50CrMnSiVNb强韧化和疲劳性能及其微观机制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2023.
- [18] 王楠. 化学成分均匀性对含氮高锰钢拉伸、疲劳与腐蚀性能的影响[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2024.
- [19] 付悍巍, 张绍田. 航空发动机轴承钢滚动接触疲劳模拟及寿命预测[J]. 航空材料学报, 2024, 44(5): 129-138.
- [20] 景财良, 王新华, 许志刚, 等. 高碳钢大圆坯R/2偏析现象形成机理与控制策略的研究[J]. 铸造技术, 2011, 32(7): 989-993.
- [21] Zhang J G, Chen H H, Fu H W, et al. Retarding effect of sub-micron carbides on short fatigue crack propagation: Mechanistic modeling and Experimental validation [J]. Acta Materialia, 2023, 250: 118875.
- [22] Narasaiah N, Ray K K. Small crack formation in a low carbon steel with banded ferrite-pearlite structure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 392(1-2): 269-277.
- [23] Li M, Zhang H H. Effect of banded carbide structure on the rolling contact fatigue of GCr15 bearing steel[C]. Proceedings of the 2017 5 th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering. , 2017: 528-535.
- [24] 刘明洋. GCr15轴承钢连铸坯中偏析对热变形行为及组织性能的影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2025.