

航空新一代齿轮钢 15Cr14Co12Mo5Ni 短棒状磁痕产生机制研究

刘春江^{1,2,3,4} 王更杰⁵ 姜涛^{1,2,3,4} 刘昌奎^{1,2,3,4} 刘明月⁵ 王荣超⁶ 张弘斌⁶

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

(2. 中航工业失效分析中心, 北京 100095)

(3. 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京 100095)

(4. 中国航空发动机集团 航空材料检测与评价重点实验室, 北京 100095)

(5. 中国航发中传机械有限公司, 长沙 410200)

(6. 山东科技大学 机械电子工程学院, 青岛 266590)

摘要:【目的】15Cr14Co12Mo5Ni 合金是新一代高强度、高耐温、高耐磨损的低碳高合金钢, 广泛应用于航空航天、汽车变速箱等高端领域。磁粉检测在该合金构件的质量检验中具有重要作用, 但短棒状磁痕的出现常常干扰检测结果。本文旨在探讨短棒状磁痕的产生机制, 分析其与合金内部微观组织结构、碳化物分布及锻造工艺之间的关系, 从而为优化锻造工艺、控制晶粒尺寸、抑制位错滑移带过度发育以及降低磁痕干扰提供理论依据。【方法】选取该合金齿轮轴孔磁痕显示处与非显示处样品, 结合磁粉检测、扫描电子显微镜观察、金相分析及能谱分析手段, 从宏观和微观层面对比研究磁痕的形态特征、碳化物成分及晶粒结构差异。【结果】通过宏观与微观分析, 研究发现, 短棒状磁痕的形成与 Cr-Mo 系碳化物在合金内的成串聚集密切相关, 这些碳化物通过影响局部磁导率形成磁漏场, 从而导致磁粉聚集。进一步的研究揭示了短棒状磁痕的组织演化链: “粗晶→位错滑移带→Cr/Mo 富集→沿界面定向析出→碳化物成带→磁导率梯度→短棒状磁痕”。

关键词: 短棒状磁痕; 磁导率梯度; Cr-Mo 系碳化物; 位错滑移带; 微观组织演化链; 锻造工艺

中图分类号: TG142.33

DOI: 10.16578/j.issn.1004.2539.XXXX.XX.001

0 引言

近年来, 随着航空航天变速箱齿轮等高功率、高精度传动装置对功率密度的要求持续提升, 9310、M50NiL 等传统航空齿轮钢已难以适配高温、高速等极端工况^{[1-3][4][5][8][9][5]}。15Cr14Co12Mo5Ni 合金作为高性能低碳高合金钢, 兼具耐高温、耐腐蚀、高强度优势, 经表面渗碳处理后耐磨性进一步优化, 成为高端传动构件与精密机械部件的理想选材, 可满足极端工况下的长期服役需求^[6-9]。此外, 该合金还适用于能源装备等对材料疲劳强度与尺寸稳定性有严苛要求的场景, 拓展了其在重载、长寿命传动领域的应用潜力^{[4][5][9][10-11]}。

磁粉检测作为主流非破坏性检测方法, 能有效识别 15Cr14Co12Mo5Ni 合金表面及近表面的裂纹、

气孔等缺陷^[12-13]。但在实际检测中, 短棒状磁痕易被误判为有害裂纹, 尤其在高硬度、复杂形状部件中更为突出。目前, 行业对该类磁痕的产生机制、特征及影响缺乏深入研究, 导致检测存在一定误判风险^[14-16]。

现有研究对合金磁痕的关注主要集中在裂纹、夹杂物等常见缺陷的检测上, 相关文献大多探讨了磁粉检测在识别裂纹以及其他表面缺陷中的应用, 并且有大量的研究验证了该方法在合金中检测微裂纹的准确性。例如: 丁俊杰^[17]对苯罐内角焊缝进行磁粉检测后, 发现 8 处表面裂纹现象, 其中包含 5 处表面弧坑裂纹, 可以采用打磨、补焊的处理工艺进行消除; 张廷玉等^[18]利用磁粉检测技术, 快速识别不锈钢 304、碳钢 Q235 以及铝合金 6061-T6 等材料

收稿日期: 2025-11-07 修回日期: 2026-01-05

作者简介: 刘春江, 男, 1987 年生, 北京人, 硕士, 工程师; 主要研究方向为金属损伤与失效分析; lchj-2008@163.com。

引用格式: 刘春江, 王更杰, 姜涛, 等. 航空新一代齿轮钢 15Cr14Co12Mo5Ni 短棒状磁痕产生机制研究 [J]. 机械传动, XXXX, XX (XX): 1-7.

LIU Chunjiang, WANG Gengjie, JIANG Tao, et al. Research on the generation mechanism of short rod-shaped magnetic traces in the new generation of aviation gear steel 15Cr14Co12Mo5Ni [J]. Journal of Mechanical Transmission, XXXX, XX (XX): 1-7.



免费获取

中的裂纹,并能够准确完成自适应裂纹定位;祖甲村^[9]开展了磁粉检测技术在煤矿机械设备探伤中的应用研究,发现该技术不仅能够有效检出煤矿机械设备表面及近表面的裂纹、夹杂物等多种缺陷,还能通过磁痕的形状、大小和分布特征,定量评估缺陷对设备性能和寿命的影响。然而,现有研究大多集中于表面缺陷的识别与表征,对材料内部微观结构与磁场分布之间的关系关注较少,特别是对合金的锻造过程与碳化物的形成对磁痕特征的潜在影响缺乏研究。因此,尽管短棒状磁痕作为一种特殊的磁痕形式已被识别,其产生机制却仍未得到充分探索。具体而言,短棒状磁痕的产生与合金材料内部的微观组织结构、碳化物的分布及晶粒排列等因素密切相关,而这些因素对磁场的影响尚缺乏深入研究。因此,本研究将系统探讨碳化物的形成以及锻件组织对磁痕特征的影响机制,以填补该领域的研究空白。

综上所述,磁粉检测在15Cr14Co12Mo5Ni合金的质量检验中常受到短棒状磁痕干扰,易误判为裂纹等缺陷,影响检测结果的准确性,且目前对短棒状磁痕的产生机制、特征及其对检测结果的影响缺乏深入研究。本研究的主要目的是探究短棒状磁痕的显示机制,分析其与合金内部微观组织结构、碳化物分布及锻造工艺之间的关系。通过系统研究这些因素对磁痕产生与表现的影响,旨在揭示影响短棒状磁痕的关键因素,为磁粉检测技术的优化提供理论支持。研究内容包括短棒状磁痕特征的观察与分析、合金组织结构与磁痕的关联性探索、成分检测技术的应用,尤其是碳化物对磁场的潜在影响及不同组织下磁痕特征的对比分析。研究的意义在于通过深入揭示短棒状磁痕的形成机制,为合金质量检测 and 工艺优化提供更精准的理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本研究对象为15Cr14Co12Mo5Ni合金齿轮轴孔样品(磁痕显示处和非磁痕显示处),制备过程为棒材-模锻件-粗加工-预备热处理-精加工-渗碳淬火-磨削加工-磁粉检测;同时,对比分析了模锻件样品。

1.2 试验方法

齿轮轴孔按照GB15822开展磁粉检测^[20]。形貌观察方面,采用肉眼观察,并采用相机拍照,观察齿轮轴孔内表面试样和磁痕显示区表面抛光后的磁痕显示结果,重点分析磁痕的分布与形态。微观观

察使用扫描电子显微镜(SEM,型号TESCAN CLARA),测试参数为加速电压20 kV,放大倍数为500~5 000 x;样品制备包括表面打磨与腐蚀,腐蚀方法为盐酸-氯化铁溶液;重点观察磁痕区域的微观形貌与碳化物形态。金相组织分析采用金相显微镜(型号OLYMPUS GX51),取样位置为齿轮轴孔磁粉显示处、磁痕未显示处及其模锻件对应位置,样品制备包括切割、打磨、抛光及使用盐酸-氯化铁溶液腐蚀。晶粒度评级依据ASTM E112标准,使用对比法进行评级。能谱分析使用EDS(型号Oxford INCA ULTIM Max),测试模式为面扫描、线扫描,主要分析碳化物的元素组成及元素分布特征。将上述分析手段相结合,可以通过多角度的分析和对比,揭示碳化物、锻造组织等因素在磁痕形成中的作用,为工艺优化提供理论支持。

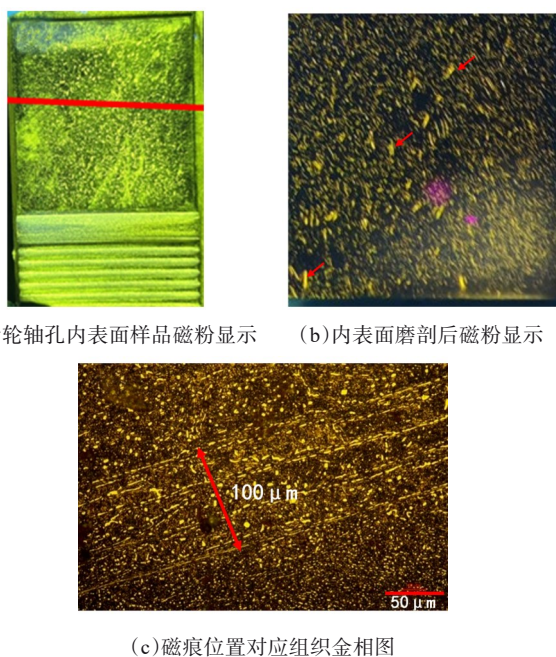
2 试验结果与分析

2.1 短棒状磁痕的宏观与微观特征

从图1(a)所示磁粉检测试样中可以看到,磁痕的分布较为密集,主要呈现短棒状的形态,且磁痕的长度均匀,显示出较高的磁痕密度,未观察到裂纹扩展或开口类缺陷,排除了裂纹等宏观缺陷的可能性,表明试样表面未发生明显的裂纹扩展或开口缺陷。通过沿红线位置切割试样,对内表面进行轻微磨平和腐蚀处理,进一步清晰地出现了磁粉显示呈短棒状的分布特征,部分位置磁粉显示密集且平行分布,如图1(b)所示。金相分析观察显示,磁粉吸附在了析出物附近,且磁痕的显示位置与条带状析出物聚集区高度重合,如图1(c)所示。该析出物聚集区呈条带状排列,且条带之间的分布较为密集,条带宽度约为100 μm ,这一尺寸与磁痕显示的区域高度吻合。这表明,磁痕的形成与该析出物聚集密切相关,该析出物可能在金属表面形成了较强的局部磁场响应,导致磁粉在该区域聚集,进而显现出明显的磁痕。

为了更加清晰地观察短棒状磁痕的微观特征,选择了齿轮锻件中的短棒状磁痕区域与非磁痕区域进行扫描电镜(SEM)表征,如图2所示。在短棒状磁痕区域,析出物呈现出条带状聚集,并且这些析出物的排列显示出明显的线性结构。具体而言,这些析出物条带的分布较为密集,条带的长度一般可以达到几百 μm 。在这些析出物条带之间,夹杂着一些较小的析出物颗粒,这些颗粒的直径通常小于5 μm [图2(a)]。与此不同的是,非磁痕区域的微观结构[图2(b)]呈现出较为松散的析出物分布,缺乏明显的

条带状聚集现象, 以条状分布的析出物长度相对较短, 一般在 $100\ \mu\text{m}$ 之内, 整体表现为较为均匀的分布特征。从对比分析中可以看出, 短棒状磁痕区域的析出物条带聚集特征与非磁痕区域的碳化物分布特征存在显著差异。这表明, 析出物条带的聚集特征(如长度、聚集程度等)是磁痕显示的主要因素和组织特征, 即磁痕的形成与析出物条带的聚集模式之间存在紧密的关系。



(a) 齿轮轴孔内表面样品磁粉显示 (b) 内表面磨削后磁粉显示

(c) 磁痕位置对应组织金相图

图1 齿轮锻件样品磁粉检测与磁痕位置对应组织金相图

Fig. 1 Metallographic diagram of microstructure corresponding to magnetic particle detection and magnetic mark position of gear forging samples

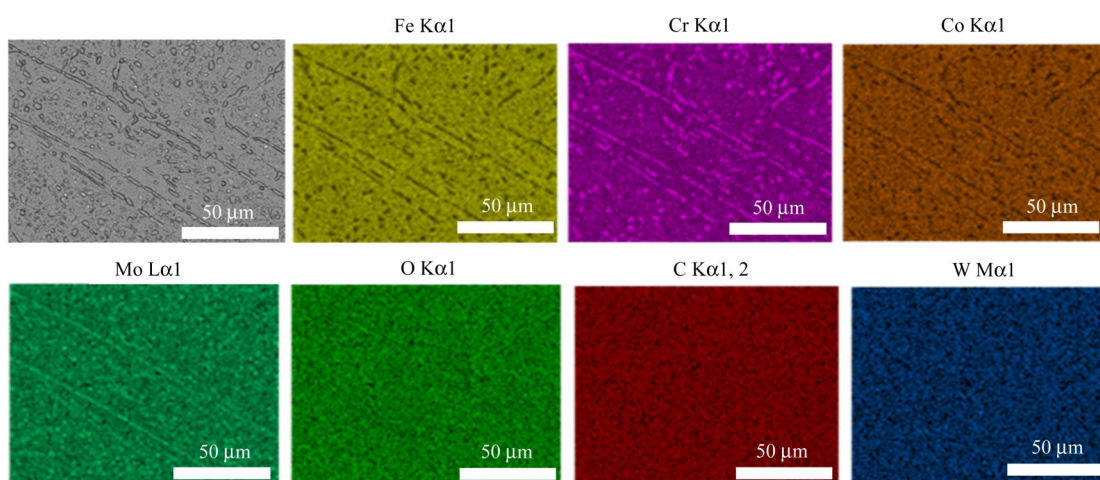
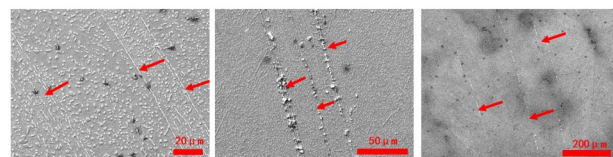


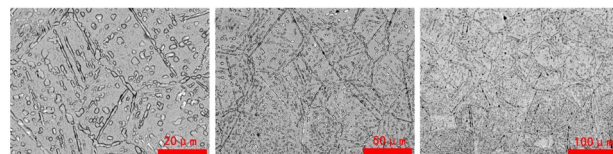
图3 短棒状磁痕区面扫描结果

Fig. 3 Scanning results of short rod-shaped magnetic mark area

图4所示为条状析出相的线扫描分析结果。通过线扫描图像可以看到, 条带状析出相的C、Cr、Mo峰值在扫描路径上出现了明显的峰值, 这些峰值说



(a₁) ~ (a₃) 短棒状磁痕区 SEM 图



(b₁) ~ (b₃) 非磁痕区 SEM 图

图2 齿轮锻件不同位置 SEM 图

Fig. 2 SEM images of different positions of gear forgings

2.2 析出物成分分析

短棒状磁痕区的能谱分析面扫描结果如图3所示。从扫描图像中可以看到, 条带状析出相与点状析出相的元素分布呈现出明显的相似性。具体来说, 条带状析出相和点状析出相均表现出富含铬(Cr)和钼(Mo)元素的特征, 而铁(Fe)和钴(Co)元素的含量相对较低, 尤其是在条带状析出相中, Cr和Mo的相对含量显著高于Fe和Co。这一现象表明, 条带状析出相和点状析出相的化学成分非常接近, 未表现出明显的成分差异, 说明它们可能源自同一物质或相同的析出相。

明这些元素在条状析出相中的含量远高于周围基体。该扫描结果进一步确认了条带状析出相的化学成分特征。通过对比分析可以得知, 条带状析出相呈现

出明显的富Cr和Mo特征，同时也显示出较高的碳含量，这些特征表明条带状析出相主要是富含Cr和Mo的碳化物，即Cr-Mo系碳化物(如M₂₃C₆、M₆C)。

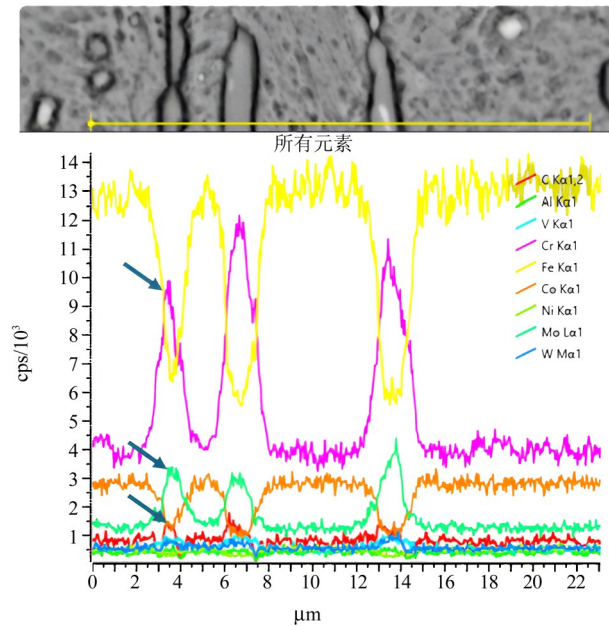


图4 短棒状磁痕区能谱分析线扫描结果

Fig. 4 Line scanning results of energy spectrum analysis in short rod-shaped magnetic trace area

切取锻件试样上对应的短棒状磁痕区与非磁痕区，观察金相组织，如图5所示。短棒状磁痕区的晶粒粗大，呈现出明显的粗晶结构。根据ASTM E112标准^[21]，锻件中该区域的晶粒度为1~2级，其中部分位置的晶粒度达到0级。此外，观察到发生变形的晶粒内部存在位错滑移带，部分晶粒以及其内部的位错滑移带长度已经达到1 mm，表明这些区域的晶粒经历了较为严重的变形，位错滑移带的形成反映出材料在高温或大应变条件下承受了巨大应力，导致了晶体结构的显著变化。这种孪晶现象通常是材料在强烈变形过程中常见的特征，尤其是在锻造过程中，晶粒受到较大应力的作用，促使晶格发生塑性变形，从而形成位错滑移带^[22]。另一方面，在非磁痕区，细晶组织占据主导地位，整体组织较为致密，表现出良好的组织稳定性和均匀性。这一区域的晶粒评级依据ASTM E112标准为6.5~8级，表明晶粒细小且级别较高，体现出材料在该区域的再结晶充分，晶粒细化效果显著。

在扫描电镜下对非磁痕区的金相组织进行进一步表征，结果如图6所示。扫描图像揭示了该区域中存在位错滑移带，这些位错滑移带在晶粒内呈现出明显的界面特征。通过元素线扫描分布分析，发现位错滑移带处Cr、Mo等合金元素的信号强度显著高于

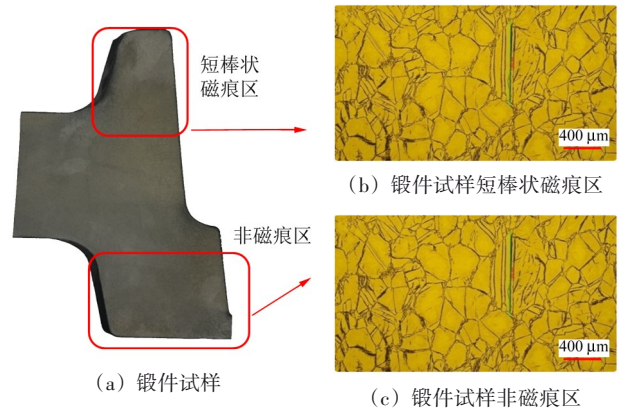


图5 短棒状磁痕区与非磁痕区对应锻件组织区域金相图

Fig. 5 Metallographic diagram of microstructure area of forgings corresponding to magnetic mark area and non-magnetic mark area in short bar shape

晶内区域，显示出明显的富集现象。这种富集特征表明，位错滑移带处的合金元素分布不均匀，可能导致局部区域的化学成分差异，从而影响该区域的力学性能。此外，C元素在位错滑移带处的信号强度也表现出明显的升高趋势，表明在位错滑移带附近存在细小而弥散分布的碳化物析出。

3 短棒状磁痕显示机制讨论

在磁粉检测中，工件在外磁场下被磁化，局部磁感应强度满足 $B = \mu_0 \mu_r H$ (μ_0 为真空磁导率； μ_r 为相对磁导率； H 为磁场强度)。众所周知，淬回火后的马氏体/铁素体基体为铁磁性，相对磁导率远大于1，而合金内析出的Cr-Mo系碳化物(如M₂₃C₆、M₆C)为顺磁/弱磁性，相对磁导率接近1，等效于“磁绝缘”夹杂^[23]。由此在碳化物-基体界面产生显著的 $\nabla\mu$ 梯度与边界条件不连续(磁通密度法向量连续、磁场强度切向量连续)，磁通线被迫绕流，局部等效磁阻升高，形成可达表面的磁漏场。结合本研究实验结果来看，第2.1节中SEM观察显示短棒状磁痕区存在密集的条带状碳化物聚集，条带宽度约为100 μm，与磁痕显示区域尺寸高度吻合，而非磁痕区碳化物分布松散且无条带聚集特征；第2.2节的能谱分析进一步证实，这些条带状析出相为富Cr、Mo的Cr-Mo系碳化物，其元素分布与点状析出相一致，明确了磁痕关联析出物的成分属性。短棒状碳化物因其两端存在较大的场强梯度与“端点效应”，最易产生磁荷等效集聚，进而在表面形成成串、定向的磁粉吸附，显示为短棒状磁痕。换言之，实验中观察到的Cr-Mo系碳化物成带/成串聚集现象(图2、图3)，直接导致合金内磁导率在短尺度上剧烈起伏，这是诱

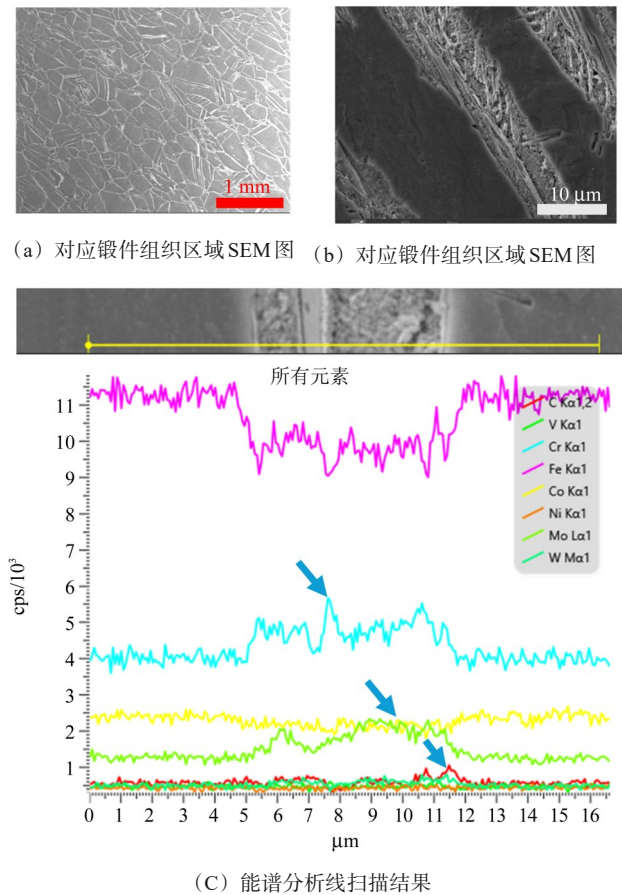


图6 短棒状磁痕区对应锻件组织区域SEM图与能谱分析线扫描结果

Fig. 6 SEM image and energy spectrum analysis line scanning results of forging microstructure area corresponding to short bar-shaped magnetic mark area

发可见磁漏场与短棒状磁痕的核心物质基础, 与非磁痕区的组织及磁响应特征形成鲜明对比。

大晶粒因取向选择和应变集中更易生成位错滑移带, 而位错滑移带兼具较高界面能与快速“短路扩散”能力, 成为合金元素的优先富集通道。本研究线扫描结果显示, Cr、Mo在位错滑移带处明显富集。第2.3节的金相分析表明, 短棒状磁痕区晶粒粗大, 晶粒度仅为1~2级(部分位置达0级), 且晶粒内位错滑移带长度可达1 mm, 而非磁痕区晶粒度为6.5~8级, 无明显位错滑移带过度发育现象; 图6中的线扫描结果进一步验证, 位错滑移带处Cr、Mo元素信号强度显著高于晶内, 且C元素信号同步升高, 证实位错滑移带是碳化物优先生核的关键区域。渗碳—回火过程中, 这种局部富集促使碳化物在位错滑移带优先生核并沿界面定向长大, 形成多条近似平行的长条/短棒状碳化物链。实验中, 磁痕区碳化物的条带状聚集正是这一演化过程的直接体现, 而细晶区因未形成“粗晶—形成位错滑移带—元素偏

聚”的条件, 碳化物无法定向成带, 故无此类磁痕。

对比既有研究多从“晶界碳化物/夹杂导致磁漏”进行宏观解释, 本工作进一步厘清了“粗晶→位错滑移带→Cr/Mo富集→沿界面定向析出→碳化物成带→磁导率梯度→短棒状磁痕”的连续组织继承链。追根溯源, 结合实验中锻件组织的对比分析, 粗大晶粒的形成与锻造工艺直接相关: 当锻造温度窗口偏高、有效变形量与变形速率不足或变形—保温路径不合理时, 动态再结晶受抑或难以持续, 晶粒在高温停留中发生异常长大(如磁痕区0级粗晶), 这为位错滑移带过度发育与Cr、Mo元素偏聚提供了“形核场”和“扩散通道”, 最终促成碳化物的成带聚集, 这正是短棒状磁痕产生的工艺根本原因, 也为后续锻造工艺优化指明了方向。

4 结论

以15Cr14Co12Mo5Ni合金齿轮锻件为研究对象, 通过磁粉检测、SEM、EDS、金相分析等多种手段, 系统探究了短棒状磁痕的宏观微观特征与合金微观组织及碳化物的关联性, 揭示了其形成机制与组织演化规律, 为工艺优化和检测准确性提升提供理论依据。得到的主要研究结论为:

1) 15Cr14Co12Mo5Ni合金齿轮锻件中出现的短棒状磁痕属于非开口类磁痕, 无有害性。其直接成因是Cr—Mo系碳化物在合金内成串聚集, 与铁磁性基体形成显著的局部磁导率梯度, 导致磁漏场并吸附磁粉。

(2) 揭示了短棒状磁痕的组织继承关系: “粗晶→位错滑移带→Cr/Mo富集→沿界面定向析出→碳化物成带→磁导率梯度→短棒状磁痕”。位错滑移带在其中起到关键作用, 既是元素富集的扩散通道, 又是碳化物成带的形核场;

(3) 研究结果为优化锻造工艺(控制晶粒尺寸、抑制位错滑移带过度发育)和降低磁痕干扰提供了明确方向。但本研究尚未系统考察不同渗碳工艺参数(如温度、时间)对碳化物成带与磁痕强度的定量影响, 未来需结合热处理参数优化与磁学模拟开展进一步研究, 以构建可推广应用的组织—磁痕调控策略。

参 考 文 献

- [1] 施文鹏, 黎恒逸, 张元东, 等. 基于 DEFORM 数值模拟的 15Cr₁₄Co₁₂Mo₅Ni 钢齿轮锻造方案优化[J]. 精密成形工程, 2025, 17(4): 78-86.

- SHI Wenpeng, LI Hengyi, ZHANG Yuandong, et al. Optimization of 15Cr₁₄Co₁₂Mo₃Ni steel gear forging scheme based on DEFORM numerical simulation[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(4): 78-86.
- [2] LU S F, DING H, RONG K B, et al. Composite mechanical deformation based semi-analytical prediction model for dynamic loaded contact pressure of thin-walled aerospace spiral bevel gears [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 171: 108794.
- [3] LISLE T J, LITTLE C P, AYLOTT C J, et al. Bending fatigue strength of aerospace quality gear steels at ambient and elevated temperatures [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 164: 107125.
- [4] 唐鑫, 朱如鹏, 杨卯生, 等. 新型高温渗碳不锈钢航空齿轮钢齿轮的弯曲疲劳失效机理[J]. 航空动力学报, 2022, 37(3): 589-599. TANG Xin, ZHU Rupeng, YANG Maosheng, et al. Bending fatigue failure mechanism of the new high temperature carburizing stainless aviation steel gear[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 589-599.
- [5] 葛铠, 张磊, 赵焱明, 等. 大功率分动器疲劳试验齿轮断齿问题研究[J]. 机械传动, 2017, 41(8): 133-136. GE Kai, ZHANG Lei, ZHAO Yanming, et al. Study on gear broken tooth in fatigue test of high power transfer case[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 41(8): 133-136.
- [6] SONG C, HU S, HAN Q Y, et al. Ultrastrong gradient nanostructured CSS-42L bearing steel and its enhanced wear resistance at elevated temperature [J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 470: 129881.
- [7] 迟岑, 邵晓寒, 张栓. 航空发动机弯管接头止动销改进设计与应用[J]. 失效分析与预防, 2025, 20(2): 133-140. CHI Cen, SHAO Xiaohan, ZHANG Shuan. Design improvement and application of stop pin for aeroengine elbow joint[J]. Failure Analysis and Prevention, 2025, 20(2): 133-140.
- [8] 孙勇, 刘静. 航空发动机柱塞泵滑靴异常磨损分析及铜合金磨损性能研究[J]. 失效分析与预防, 2025, 20(3): 247-256. SUN Yong, LIU Jing. Abnormal wear analysis and wear properties of copper alloy study of plunger pump slipper for aero-engine[J]. Failure Analysis and Prevention, 2025, 20(3): 247-256.
- [9] 李伟超, 滕旭东, 黄凯, 等. 发动机旋流板裂纹故障分析[J]. 失效分析与预防, 2024, 19(3): 199-202, 224. LI Weichao, TENG Xudong, HUANG Kai, et al. Fault analysis of cyclone plate crack in a certain engine[J]. Failure Analysis and Prevention, 2024, 19(3): 199-202, 224.
- [10] 夏尔冬, 周福平, 王春荣. 采用 Copula 的齿轮多失效模式可靠性分析[J]. 三明学院学报, 2024, 41(3): 36-43. XIA Erdong, ZHOU Fuping, WANG Chunrong. Reliability study on multiple failure modes of gear based on copula[J]. Journal of Sanming University, 2024, 41(3): 36-43.
- [11] 刘海涛, 薛世海, 李涛, 等. 高速列车齿轮箱失效问题研究[J]. 大连交通大学学报, 2025, 46(2): 59-65, 87. LIU Haitao, XUE Shihai, LI Tao, et al. Research on failure of high-speed train gearbox [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2025, 46(2): 59-65, 87.
- [12] WU Q, DONG K, QIN X P, et al. Magnetic particle inspection: status, advances, and challenges—Demands for automatic non-destructive testing[J]. NDT & E International, 2024, 143: 103030.
- [13] SHI A X, WU Q, QIN X P, et al. Lightweight detector based on knowledge distillation for magnetic particle inspection of forgings [J]. NDT & E International, 2024, 143: 103052.
- [14] 付正刚, 田钱仁, 徐翔宇, 等. 高合金时效钢的线状磁痕缺陷形成机制分析[J]. 特钢技术, 2021, 27(4): 1-4. FU Zhenggang, TIAN Qianren, XU Xiangyu, et al. Formation mechanism of linear magnetic trace defects in high alloy aging steel[J]. Special Steel Technology, 2021, 27(4): 1-4.
- [15] 周兵, 江志铭, 任传鹤, 等. 基于复合特征算法的磁痕识别方法[J]. 无损探伤, 2025, 49(2): 38-41. ZHOU Bing, JIANG Zhiming, REN Chuanhe, et al. Magnetic trace recognition method based on composite feature algorithm[J]. Nondestructive Testing Technologizing Technology, 2025, 49(2): 38-41.
- [16] 王攀峰, 李明, 康学勤. Q355B 钢板截面磁粉探伤显示磁痕的原因[J]. 上海金属, 2022, 44(6): 101-107. WANG Panfeng, LI Ming, KANG Xueqin. Cause for magnetic particle trace appearing on Q355B steel plate section during magnetic particle inspection[J]. Shanghai Metals, 2022, 44(6): 101-107.
- [17] 丁俊杰. 苯罐大角焊缝及热影响区磁粉检测工艺[J]. 石化技术, 2025, 32(9): 203-205. DING Junjie. Magnetic particle detection technology for large fillet weld and heat affected zone of benzene tank[J]. Petrochemical Industry Technology, 2025, 32(9): 203-205.
- [18] 张廷玉, 刘恒, 秦鹏. 基于磁粉检测的特种设备表面裂纹快速识别方法研究[J]. 化工管理, 2025(23): 115-117, 133. ZHANG Tingyu, LIU Heng, QIN Peng. Research on rapid identification method of surface cracks in special equipment based on magnetic particle testing [J]. Chemical Management, 2025(23): 115-117, 133.
- [19] 祖甲村. 磁粉检测技术在煤矿机械设备探伤中的应用研究[J]. 机械管理开发, 2025, 40(3): 265-267. ZU Jiacun. Application of magnetic particle inspection technology in coal mine machinery and equipment flaw detection[J]. Mechanical Management and Development, 2025, 40(3): 265-267.
- [20] 全国无损检测标准化技术委员会. 无损检测 磁粉检测 第 1 部分: 总则: GB/T 15822.1-2024 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024: 1-15. National Committee for Non-Destructive Testing Standardization. Non-destructive testing - magnetic particle testing - part 1: general provisions: GB/T 15822.1-2024 [S]. Beijing: China Standards Press, 2024: 1-15.
- [21] ASTM International. Standard test methods for determining average grain size: ASTM E112-13 (2021) [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2021: 1-28.
- [22] LIU H Y, HU R, XIA X P, et al. Texture evolution and plastic deformation mechanism of cold-drawn co-Cr-Ni-Mo alloy [J]. Met-

als, 2024, 14(6):642-652.

[23] 游志强, 侯廷平, 林恒福, 等. 合金碳化物 $M_{23}C_6$ 的磁性及磁致磁性[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(4):322-329.

YOU Zhiqiang, HOU Tingping, LIN Hengfu, et al. Magnetism and magneto-magnetic properties of alloy carbide $M_{23}C_6$ [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(4):322-329.

Research on the generation mechanism of short rod-shaped magnetic traces in the new generation of aviation gear steel 15Cr14Co12Mo5Ni

LIU Chunjiang^{1,2,3,4} WANG Gengjie⁵ JIANG Tao^{1,2,3,4} LIU Changkui^{1,2,3,4} LIU Mingyue⁵ WANG Rongchao⁶ ZHANG Hongbin⁶

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(2. AVIC Failure Analysis Center, Beijing 100095, China)

(3. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China)

(4. Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China)

(5. AECC Central Transmission Machinery Co., Ltd., Changsha 410200, China)

(6. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: [Objective] The 15Cr14Co12Mo5Ni alloy represents a new generation of low-carbon, high-alloy steels characterized by exceptional strength, elevated-temperature stability, and superior wear resistance, making it widely applicable in high-performance sectors such as aerospace engineering and automotive transmission systems. Magnetic particle inspection (MPI) serves as a critical non-destructive evaluation method for ensuring the structural integrity of components fabricated from this alloy. However, the presence of short rod-shaped magnetic indications frequently complicates defect assessment by introducing non-relevant signals. This study systematically examines the formation mechanism of such magnetic indications, with particular emphasis on their correlation with the alloy's internal microstructural characteristics, carbide distribution patterns, and forging parameters. The findings provide a scientific foundation for optimizing forging practices, refining grain structure, mitigating excessive dislocation slip bands, and minimizing spurious magnetic indications in quality control processes. [Methods] Samples were collected from both the magnetic-indication-displaying and non-displaying regions of the alloy gear shaft hole. By integrating magnetic particle inspection (MPI), scanning electron microscopy (SEM) observation, metallographic analysis, and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analysis, comparative studies were conducted on the morphological characteristics, carbide compositions, and grain structure differences of magnetic indications at both macroscopic and microscopic scales. [Results] Comprehensive macroscopic and microscopic investigations reveal that the formation of these magnetic indications is strongly associated with the chain-like clustering of Cr-Mo-rich carbides within the microstructure. These carbide aggregates induce local variations in magnetic permeability, thereby generating magnetic flux leakage fields that promote the accumulation of magnetic particles during inspection. Further analysis has elucidated a sequential microstructure evolution chain leading to the development of short rod-shaped magnetic traces: "coarse grains → dislocation slip bands → Cr/Mo segregation → interfacial directional precipitation → carbide banding → magnetic permeability gradient → magnetic particle accumulation."

Key words: Short rod-shaped magnetic trace; Magnetic permeability gradient; Cr-Mo based carbides; Dislocation slip band; Microstructure evolution chain; Forging process (编辑: 刘星泽)