引用格式：杨希明，任磊，杨吉春，等. La-Ce 协同改性 U71Mn 重轨钢夹杂物及其强韧化研究[J]. 中国材料进展，2026，45(10)：1096-1105.

YANG X M, REN L, YANG J C, *et al*. Synergistic La-Ce Modification of Inclusions in U71Mn Heavy Rail Steel and Its Strengthening-Toughening [J]. Materials China, 2026, 45(10): 1096-1105.

La-Ce 协同改性 U71Mn 重轨钢夹杂物及其强韧化研究

杨希明[1]，任 磊[1,2]，杨吉春[1,2]，张新房[1,2]

（1. 内蒙古科技大学稀土产业学院，内蒙古 包头 014010）

（2. 轻稀土资源绿色提取与高效利用教育部重点实验室(内蒙古科技大学)，内蒙古 包头 014010）

摘 要：稀土元素作为改性剂，在微合金化、改性夹杂物、改善组织、细化晶粒等方面具有高能效性。为提高重轨钢的综合力学性能以及服役性能，使其适用于复杂的铁路工况，采用真空感应炉冶炼了不同 La-Ce 混合稀土含量梯度的 U71Mn 重轨钢，通过 FactSage、扫描电子显微镜、全自动夹杂物分析软件对夹杂物演变规律进行分析表征，并测试维氏显微硬度、室温与低温抗冲击性能及拉伸性能，同时开展断口形貌分析。结果表明：稀土加入使夹杂体系由“MnS、硅酸盐主导”转变为“$(La,Ce)_2O_2S$ 主导”，基于球化改性作用，夹杂物形貌由不规则状演化为球形或椭球形，随稀土含量提高，在扫描视场内的夹杂物数量逐级减少。力学性能随稀土含量递增而协同提升：混合稀土质量分数由 0 增加至 0.0127%和 0.026%，显微硬度由 278 增至 287 与 294 HV_3；屈服强度由 538 增至 582 与 610 MPa，抗拉强度由 907 增至 948 与 978 MPa；断后延伸率由 8.00%增至 11.73%与 19.13%。实验钢在 20，-20 及-40 ℃下的冲击功分别最高提升至 7.6，7.4 与 6.8 J，相对未加稀土样品最大增幅达 52.00%，54.17%与 112.5%。显微硬度离散系数先增后降，在混合稀土质量分数为 0.026%条件下达到最低(≈4.80%)，表明组织与性能更加均质化。

关键词：稀土；夹杂物；改性；U71Mn 重轨钢；热力学；MnS

中图分类号：TG142.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-3962(2026)10-1096-10

Synergistic La-Ce Modification of Inclusions in U71Mn Heavy Rail Steel and Its Strengthening-Toughening

YANG Ximing[1], REN Lei[1,2], YANG Jichun[1,2], ZHANG Xinfang[1,2]

(1. School of Rare Earth Industry, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

(2. Key Laboratory of Green Extraction & Efficient Utilization of Light Rare-Earth Resources (Inner Mongolia University of Science and Technology), Ministry of Education, Baotou 014010, China)

Abstract: Rare-earth elements, as modifiers, exhibit high effectiveness in microalloying, inclusion modification, microstructural optimization, and grain refinement. To improve the comprehensive mechanical properties and service performance of heavy rail steel for complex railway operating conditions, U71Mn heavy rail steels with different La-Ce mixed rare-earth contents were melted in a vacuum induction furnace. The evolution of inclusions was characterized and analyzed using FactSage, SEM, and automatic inclusion analysis software. Vickers microhardness, impact resistance at room and low temperatures, and tensile properties were also tested, together with fracture morphology analysis. The results showed that rare-earth addition transformed the inclusion system from MnS- and silicate-dominated inclusions to $(La,Ce)_2O_2S$-dominated inclusions. Owing to spheroidization modification, the inclusion morphology evolved from irregular shapes to spherical or ellipsoidal forms. The number of inclusions within the scanned field progressively decreased,

收稿日期：2025-09-28 **修回日期**：2025-12-20

基金项目：国家自然科学基金项目(52464043，52264045)；内蒙古自治区杰出青年基金项目(2025JQ004)；2023 年青年科技人才培养项目(NJYT23117)；内蒙古自治区一流学科专项(YLXKZX-NKD-010，YLXKZX-NKD-001)；内蒙古科技大学基础科研业务费专项(0406082229)；白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室开放项目(NKDHX2025016)

第一作者：杨希明，男，2001 年生，硕士研究生

通讯作者：任 磊，男，1989 年生，教授，博士生导师，Email：ren_lei@imust.edu.cn

DOI：10.7502/j.issn.1674-3962.202509018

with the increasing of rare-earth content. As the total mixed rare-earth content increased from 0 to 0.026%, the microhardness increased from 278 to 287 and 294 HV_3, the yield strength increased from 538 to 582 and 610 MPa, the tensile strength increased from 907 to 948 and 978 MPa, and the elongation after fracture increased from 8.00% to 11.73% and 19.13%. The impact energies at room temperature, −20 and −40 ℃ reached maximum values of 7.6, 7.4, and 6.8 J, respectively, with maximum increases of 52.00%, 54.17% and 112.5% compared with the steel without rare-earth addition. The coefficient of variation of microhardness first increased and then decreased, reaching a minimum of approximately 4.80% at a total rare-earth content of 0.026%, indicating improved homogeneity of the microstructure and mechanical properties.

Key words: rare-earth; inclusions; modification; U71Mn heavy rail steel; thermodynamics; MnS

1　前　言

铁路运输凭借其运载能力强、运输成本低、安全可靠性高等优势，已成为现代物流体系中的重要运输方式。随着社会经济持续发展，铁路运输负荷显著提升，致使钢轨磨损加剧，服役周期明显缩短[1-6]。目前 U71Mn 钢与 U75V 钢在国内轨道线路中广泛应用，为适应高载荷、多循环的工况环境，其性能亟需更新迭代。

夹杂物作为影响钢材性能的关键因素，会显著降低钢材的耐腐蚀性能[7-9]、抗冲击性能[10]、疲劳性能、焊接性能，以及会成为裂纹萌生的源头[11, 12]。稀土元素作为改性剂，在改善夹杂物性质方面表现出色，主要应用于微合金化、改性夹杂物[13-15]、改善凝固组织等。研究表明，稀土元素加入会与钢中其他元素发生反应实现微合金化，从而净化晶界，细化晶粒，对钢基体的强度、韧性和拉伸等性能产生影响[16-20]。稀土元素凭借其活泼性质，在钢液中迅速与 O，S 元素发生反应，生成细小且弥散分布的稀土夹杂物，可有效促进钢液凝固过程中 δ-Fe 和 γ-Fe 的形核，有利于强化钢的凝固组织[21-26]。杨吉春等[27]研究发现对 S32550 双相不锈钢进行稀土 Ce 微合金化处理，不仅可以改质 MnS 夹杂物，使多余的 S 元素与 Ce 反应形成颗粒较小的 Ce_2O_2S、CeS 夹杂弥散分布在钢中，还可以细化组织晶粒，使形状、分布不均匀的 α-Fe 与 γ-Fe 组织均匀化。Fan 等[28]发现添加稀土 La 可明显细化柱状晶体，使 AlN 由块状转变为球形，热轧板中心的带状结构也得到显著改善。Xu 等[29]发现稀土 Y 的添加可以使渗碳体球化，增强第二相强化作用，减少应力集中，同时抑制网状渗碳体的形成，减少对晶界的危害。罗钢等[30]研究发现 La-Ce 稀土处理对小尺寸($D \leqslant 5\ \mu m$)夹杂物的改性作用较为明显，MnS 夹杂物形貌趋近于球形，横向冲击功提高 20%。Zhong 等[31]发现稀土元素 Er 和 Pr 的混合添加显著影响 Al-Zn-Mg-Cu 合金的微观结构和析出行为，添加稀土元素后，残余相数量减少，低角晶界比例增加，扎钉力提升，合金耐腐蚀性能显著增强。任磊等[32]在冶炼 U75V 重轨钢时加入了适量的稀土 Ce 并配合热处理，夹杂物形态和尺寸改变明显，显著降低了夹杂物长宽比。Wang 等[33-35]通过添加 La，Ce，Y 等稀土元素在钢中形成氧化物，该氧化物作为 MnS 的异质形核核心，改善了钢的微观组织和性能。

目前该领域主要研究方向以单一稀土元素改性钢中夹杂物为主，混合稀土改性钢中夹杂物的研究较少。由于 La 和 Ce 在热力学亲氧、亲硫能力及扩散动力学方面存在一定差异，二者在析出温度区间和夹杂形核行为上可形成“错峰配合”与“优势互补”。在提纯工艺层面，混合稀土较单一稀土更容易提炼，且与包头白云鄂博矿区的资源特点高度契合。因此混合稀土(La-Ce)在钢冶炼中相比单一稀土元素具有协同净化、成本较低、资源匹配三重优势。本文以 U71Mn 重轨钢为研究对象，采用真空感应炉完成冶炼全流程，制备不同混合稀土含量的 U71Mn 钢，借助 Factsage8.2 软件计算夹杂物析出情况，从微观组织到宏观力学性能方面进行印证，探究混合稀土 La-Ce 对钢材综合性能的影响，验证了混合稀土的加入具有良好的改性效果，同时还兼顾成本优势，为工业规模化生产稀土改性钢提供了经济可行的技术路线。

2　实　验

采用 ZG-0.01 型 25 kg 真空感应炉冶炼实验钢，设备参数如表 1 所示。冶炼流程为：纯铁装入坩埚→抽真空至 15 Pa→40 kW 加热熔化→20 kW 保温精炼 15 min→充入 Ar 保护→依次加入碳粉、结晶硅、金属锰及稀土 La，Ce 充分熔合均匀→浇铸冷却出钢。冶炼完成后切除缩孔，于铸锭连续部位取样检测。其中 C，S 元素采用碳硫分析仪检测，P 元素采用紫外分光光度计检测，O 元素采用氧氮氢分析仪检测，Mn，Si，Al，La，Ce 采用电感耦合等离子体发射光谱仪检测，结果显示 3 炉基体成分均满足国家标准，具体化学成分见表 2。沿铸造方向电火花线切割 10 mm×10 mm×10 mm 立方体，逐级磨抛至镜面，用于金相与夹杂观察。利用 ZEISS Sigma 300 场发射扫描电子显微镜结合能谱系统观察钢中典型夹杂物形貌并采用图像分析软件(全自动夹杂物分析系统)进行定量统计，冶炼取样全流程如图 1 所示。为全面评价材料性能，在不同温度下，利用 N1500C 摆锤式冲击试验机进行冲击试验，并通过万能试验机对金相试样进行拉伸实验，结束后对冲击和拉伸断裂试样力学性能测试后的断口形貌及夹杂物进行系统的表征分析，拉伸、冲击取样示意图如图 2 所示。最终采用全自动维氏显微硬度计对 3 组 U71Mn 实验钢进行硬度测定。

表 1 U71Mn 钢化学成分

Table 1 Chemical composition of U71Mn steel (w/%)

Type	Total power	Voltage	Frequency	Rated power	Rated voltage	Capacity	Rated temperature
ZG 0.01	50 kW	380 V	0 Hz	50 kW	370/250 V	0.01 t	1700 ℃

表 2 ZG-0.01 型真空感应炉技术参数

Table 2 Technical parameter of the ZG-0.01 type vacuum induction furnace

No.	C	Si	Mn	S	P	Al	O	La	Ce	Fe
1#	0.667	0.260	0.956	0.0040	0.006	0.001	0.0026	0	0	
2#	0.677	0.272	1.030	0.0032	—	—	0.0022	0.0082	0.0045	Bal.
3#	0.687	0.288	1.080	0.0035	—	—	0.0030	0.0160	0.0100	

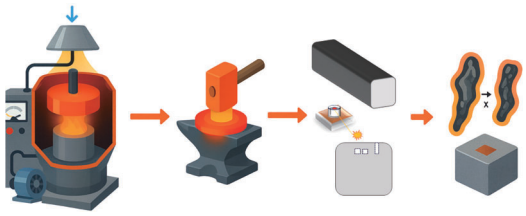


图 1 金相取样流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the metallographic sampling procedure

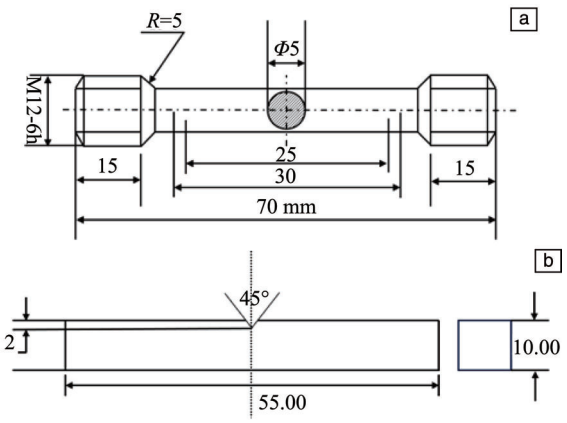


图 2 拉伸(a)和冲击(b)试样尺寸

Fig. 2 Tensile (a) and impact (b) specimens size

3 结果与讨论

3.1 钢中夹杂物析出情况

使用 Factsage 8.2 中的 equlib 模块，基于 1600 ℃等温平衡条件分别预测了不同稀土含量梯度的钢中夹杂物析出序列。结果表明，未添加稀土的 1#钢中夹杂物以 MnS 为主，数量级达到 1.2×10^{-4}，并含有少量 Al_2O_3，温度降至 1300 ℃时，Mn-Al-Si-O 多元复合氧化物开始大量析出，如图 3a 所示。添加 La 和 Ce 含量分别为 0.0082%和 0.0045%(质量分数，下同)的混合稀土的 2#钢中，由于稀土元素的加入，钢中 MnS 析出数量级迅速降至 5×10^{-5}，Mn-Al-Si-O 夹杂物析出数量级也减少 1/2，此时稀土夹杂物的生成量远低于有害夹杂物 MnS，说明此时稀土的添加量未达到饱和状态，析出结果如图 3b 所示。在添加 La 和 Ce 含量分别为 0.016%和 0.010%的混合稀土的 3#钢中，由于稀土总量优势显著，故稀土夹杂物成为新主相，以 Re_2O_2S 为主，析出序列如图 3c 所示。进一步分析 3#钢析出序列可知，稀土夹杂物在 1600 ℃高温区就已大量析出，至 1400 ℃达到稳定状态，意味着凝固前期就提供了大量细小、弥散的异质形核点。FactSage 计算结果表明，随着 La 和 Ce 含量增加，MnS 及 Mn-Al-Si-O 系夹杂物的平衡析出量逐渐降低，而稀土氧硫化物的析出量明显增加。结合稀土氧硫化物在 1600 ℃高温区已大量析出的结果，说明 La，Ce 优先与钢液中的 O，S 反应，从而抑制 MnS 及复合氧化物的析出。

3.2 夹杂物形貌、成分、数量分析

利用 ZEISS Sigma 300 场发射扫描电子显微镜对钢中夹杂物进行形貌观察，并结合能谱仪分析其成分特征，结果表明，未经混合稀土改性的 1#钢中主要存在以下几类典型夹杂物。纯 MnS 夹杂物较为常见，形貌多呈长条状(图 4a 和 4b)，属于典型的塑性夹杂物；其次，Mn-Al-Si-O 系复合氧化物夹杂物数量较多，形态不规则，大多数表现为长条状(图 4c 和 4d)；再次，纯 Al_2O_3 夹杂物也少量分布于钢基体中，此类夹杂物多呈不规则棱角状，属于脆性夹杂，极易削弱材料的整体力学性能(图 4e 和 4f)；此外，还发现 MnS-Mn-Al-Si-O 复合夹杂物，形成机制在于 Mn-Al-Si-O 氧化物具有较高熔点，可在钢液中稳定存在，在钢液凝固降温过程中，随着 Mn 和 S 元素在液相中富集，当其活度积达到 MnS 的热力学析出条件时，MnS 开始析出，MnS 往往以 Mn-Al-Si-O 夹杂物为成核点而长大，最终形成 MnS-Mn-Al-Si-O 复合夹杂物(图 4g)。在后续轧制加工中，由于 MnS 为塑性夹杂物，易沿轧制

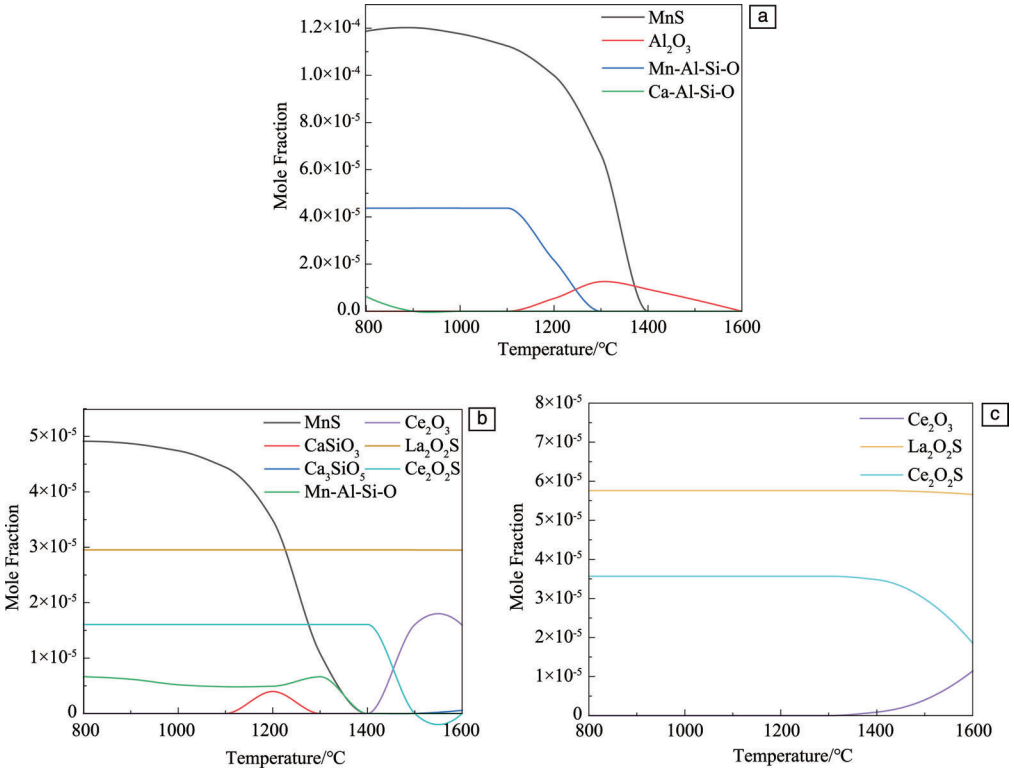


图 3　未添加和添加稀土时 U71Mn 钢中夹杂物析出预测结果：(a)1#钢析出序列，(b)2#钢析出序列，(c)3#钢析出序列

Fig. 3　Prediction results of inclusion precipitation in U71Mn steel without and with rare-earth addition: (a) precipitation sequence of steel #1, (b) precipitation sequence of steel #2, (c) precipitation sequence of steel #3

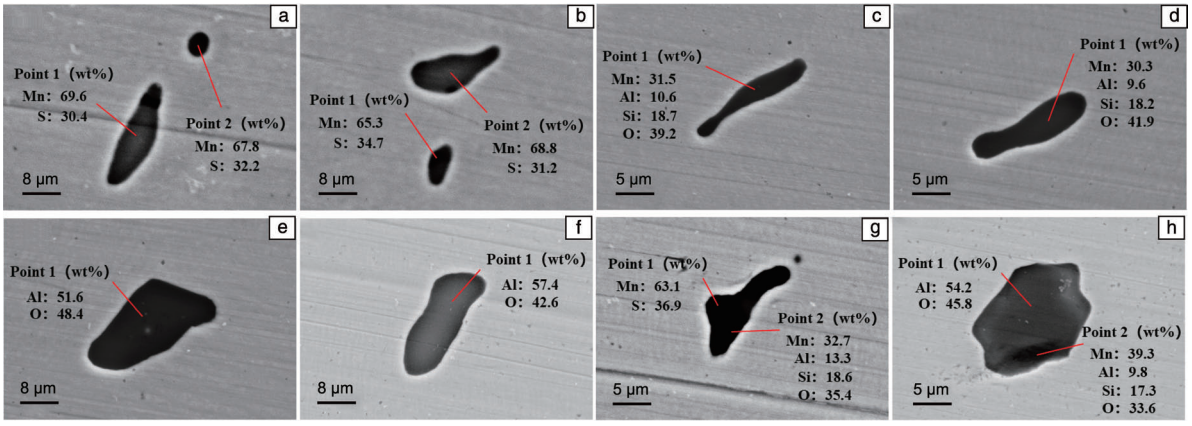


图 4　未添加稀土时 1#U71Mn 钢中典型夹杂物：(a，b)MnS 夹杂物，(c，d)Mn-Al-Si-O 夹杂物，(e，f)Al_2O_3 夹杂物，(g)MnS-Mn-Al-Si-O 复合夹杂物，(h)Al_2O_3-Mn-Al-Si-O 复合夹杂物

Fig. 4　Typical inclusions in U71Mn steel #1 without rare-earth addition: (a, b) MnS inclusions, (c, d) Mn-Al-Si-O inclusions, (e, f) Al_2O_3 inclusions, (g) MnS-Mn-Al-Si-O composite inclusion, (h) Al_2O_3-Mn-Al-Si-O composite inclusion

方向拉长，MnS-Mn-Al-Si-O 夹杂物则继承了这种变形特征，因此其长宽比较大。最后，还观察到 Al_2O_3-Mn-Al-Si-O 复合夹杂物，通常以不规则多角形或簇状聚合体的形式存在(图 4h)，其中 Al_2O_3 成分的脆性特征使它不利于材料连续性。总体来看，这些夹杂物弥散分布于钢基体中，对钢材的综合力学性能均会产生不同程度的影响。

采用扫描电子显微镜观测添加混合稀土总量为 0.0127%的 2#钢，由于稀土总量未达到完全改性的阈值，反应不够彻底，故扫描视场中常见的几类夹杂物以分层结构的复合夹杂物为主，这些复合夹杂物尺寸较小，处于 4~6 μm 区间，较未添加稀土的 1#钢中夹杂物尺寸显著减小。分层结构以稀土相为内核，而非金属相包裹稀

土相，这是由于稀土相在 1600 ℃以上的高温区就已经生成，而非金属夹杂物的析出温度区间处于钢液凝固区内，故稀土相作为异质形核核心被其他相(如 MnS、Al_2O_3)包覆，形成“外层包裹”结构，其形貌如图 5 所示。

由于复合夹杂物周围局部存在收缩孔洞和微裂纹，导致夹杂物-基体界面并非完全致密连续，能谱仪线扫和面扫信号不可避免会受到周围孔洞及基体信号的干扰，故给定元素分布更适合作为定性或半定量证据。将该类夹杂描述为稀土相为核、非金属相外包的分层结构，主要强调其成分与形貌上的层次特征，并不意味着形成严格意义上的全包裹壳层结构。

扫描电子显微镜观测混合稀土总添入量为 0.026%的 3#实验钢，发现在扫描视场内，非金属相包裹稀土相的分层结构数量极少，以纯稀土夹杂物$(La,Ce)_2O_2S$为主，说明此时钢液中的夹杂物已完全改性。纯稀土夹杂物尺寸较小，仅有 1~2 μm，且形状趋于球形，如图 6 所示。形成的稀土夹杂物与钢基体有相近的线性膨胀系数，可以降低钢材的应力集中从而提升钢材性能[15]。

基于大量组织观测分析发现，在高稀土添加量的 3#钢中，夹杂物聚集现象突出，许多小尺寸的稀土夹杂物

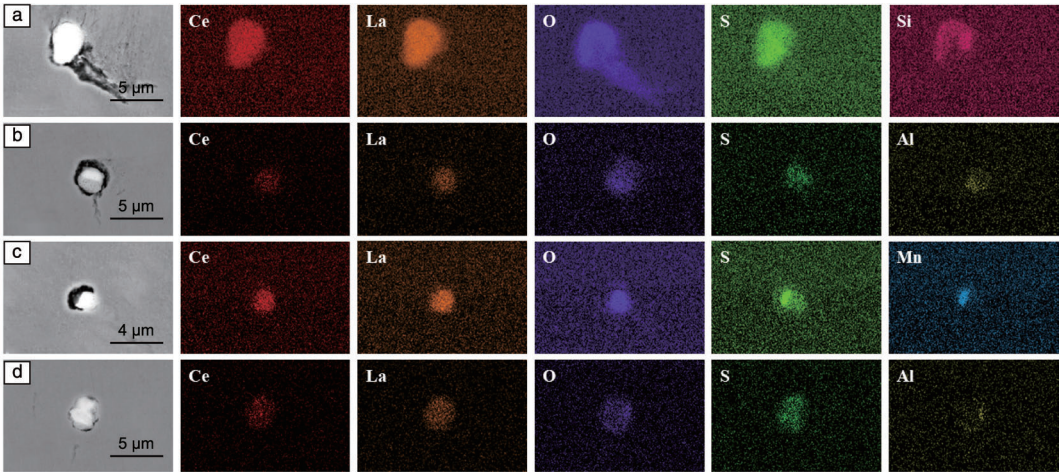


图 5 混合稀土改性的 2#U71Mn 钢中典型夹杂物：(a)$(La,Ce)_2O_2S$-硅酸盐复合夹杂物，(b)$(La,Ce)_2O_2S$-Al_2O_3 复合夹杂物，(c)$(La,Ce)_2O_2S$-MnS 复合夹杂物，(d)$(La,Ce)_2O_2S$-Al_2O_3 复合夹杂物

Fig. 5 Typical inclusions in U71Mn steel #2 modified with mixed rare earths: (a) $(La,Ce)_2O_2S$-silicate composite inclusion, (b) $(La,Ce)_2O_2S$-Al_2O_3 composite inclusion, (c) $(La,Ce)_2O_2S$-MnS composite inclusion, (d) $(La,Ce)_2O_2S$-Al_2O_3 composite inclusion

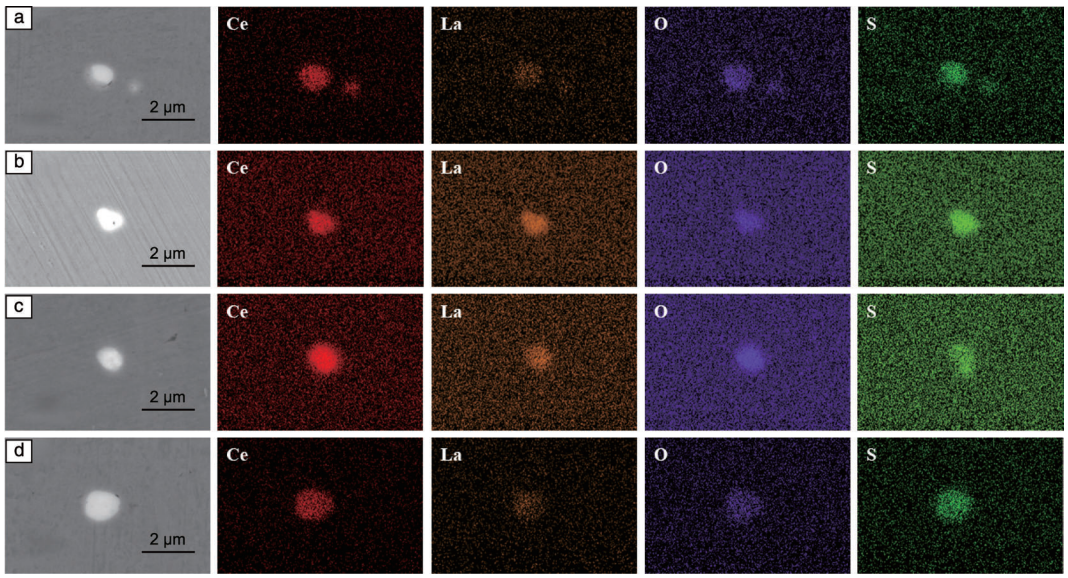


图 6 混合稀土改性的 3#U71Mn 钢中典型$(La,Ce)_2O_2S$夹杂物

Fig. 6 Typical $(La,Ce)_2O_2S$ inclusions in U71Mn steel #3 modified with mixed rare earths

在毛细管力的作用下相互吸引，聚合形成大尺寸的稀土夹杂物，如图 7 所示。这是由于熔体中局部[RE]、[S]、[O]过饱和，析出大量纳米级核心，过剩稀土使细小夹杂物通过碰撞-聚合快速长大，出现 5 μm 以上甚至 10 μm 的聚集颗粒，数量密度反而升高，若稀土添加量持续增长，则会对钢的力学性能产生负面影响。

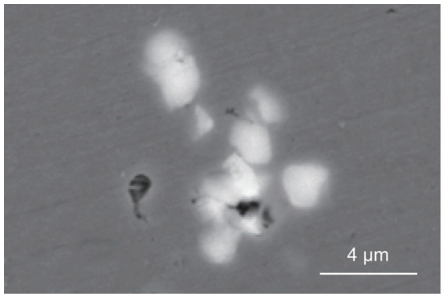


图 7　过量稀土导致夹杂物聚集现象

Fig. 7　Agglomeration of inclusions caused by excessive rare-earth addition

借助 ZEISS Sigma 300 场发射扫描电子显微镜与全自动夹杂物分析系统，在 4.05 mm^2 视场、600 倍放大条件下对钢中夹杂物进行定量表征。结果显示，未经混合稀土处理的 1#钢中夹杂物总数为 310 个，添加混合稀土后，2#和 3#钢中夹杂物分别降至 205 与 114 个，降幅达 33.87%与 63.23%，如图 8 所示。随稀土掺量阶梯式递增，它对夹杂物的改性效应愈发显著。在全自动夹杂物分析系统统计中，1#钢中夹杂物以 MnS 与 Mn-Al-Si-O 为主，而 2#和 3#钢中夹杂物以稀土夹杂物为主，与热力学计算、电子显微镜累计观测到的结果相吻合。

3.3　稀土 La-Ce 对 U71Mn 钢力学性能的影响

3.3.1　稀土 La-Ce 对 U71Mn 钢硬度的影响

硬度是材料抵抗外物压入其表面的综合能力，也是评定轮轨磨损、噪声水平与运行安全性的关键力学指标。本次实验采用全自动维氏显微硬度计对 3 组 U71Mn 实验钢进行系统硬度测定。为保证实验准确性，每个试样测量

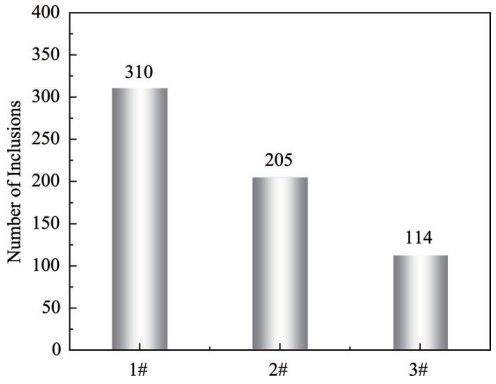


图 8　不同稀土添加量 U71Mn 钢中夹杂物数量变化

Fig. 8　Variation in the quantity of inclusions in U71Mn steel with different rare-earth contents

8 组，测量结果取平均值，如图 9a 所示。未添加稀土的 1#钢硬度为 278 HV_3，添加混合稀土的 2#和 3#钢硬度分别为 287 和 294 HV_3，分别提升 3.24%和 5.76%。传统冶炼流程因成分偏析、夹杂物聚集及珠光体片层间距波动，常出现“硬度高低点”现象，导致轮轨接触疲劳寿命离散。对每一钢样的八点硬度值进行分析，求其离散系数，离散系数越低表示其各显微区域的硬度值与平均值越相近，均质化效果越好，波动情况如图 9b 所示，统计结果见表 3。

统计结果表明，随稀土总量提高，U71Mn 平均硬度呈单调上升；硬度变异系数(coefficient of variation，CV)先增后降，未加稀土时的 1#钢硬度 CV 为 4.96%；添加稀土含量为 0.0082% La 和 0.0045% Ce 的 2#钢硬度 CV 升至 6.77%；添加稀土含量为 0.016% La，0.010% Ce 的 3#钢硬度 CV 回落至 4.80%，达到 3 组最低，表明稀土可显著改善显微硬度均匀性，实现“硬度均质化”。而 2#钢出现硬度离散偏高是由于总含量为 0.0127%左右的稀土元素不足以引起钢中夹杂物的完全改性，仍存在大量有害夹杂物与稀土夹杂物相互包覆的复合夹杂物，故出现硬度波动大的情况。

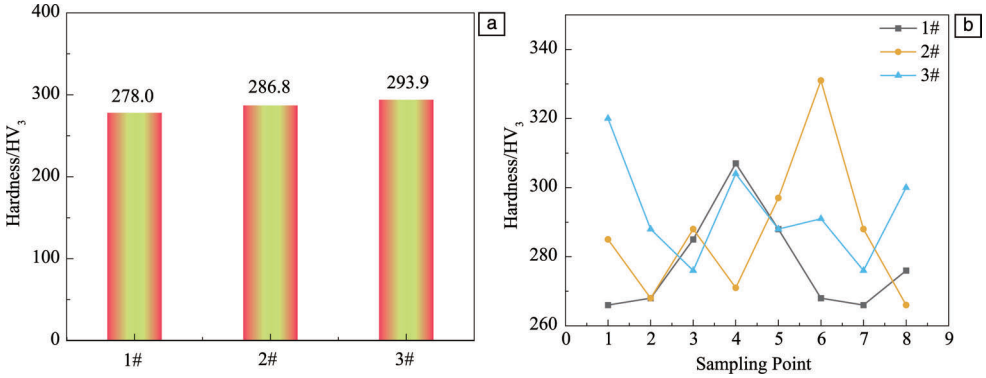


图 9　未添加与添加稀土后 U71Mn 钢硬度变化：(a)维氏硬度测定；(b)取样点硬度离散

Fig. 9　Hardness change of U71Mn steel without and with rare-earth addition：(a) Vickers hardness measurement；(b) hardness dispersion at sampling points

表 3 实测硬度波动离散统计

Table 3 Statistical analysis of measured hardness fluctuation dispersion

No.	8-point hardness values (HV_3)	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation
1#	266,268,285,307,288,268,266,276	278.0	13.8	4.96%
2#	285,268,288,271,297,331,288,266	286.8	19.4	6.77%
3#	320,288,276,304,288,291,276,300	293.9	14.1	4.80%

3.3.2 稀土 La-Ce 对 U71Mn 钢抗冲击性能的影响

为探究添加混合稀土后的 U71Mn 重轨钢在承受冲击载荷时的受力情况，对 3 组实验钢进行冲击试验，实验结果如图 10 所示。在常温下(20 ℃)，未添加稀土元素的 1#钢的冲击功为 5 J，而添加混合稀土的 2#、3#钢冲击功提升至 6.1 与 7.6 J，较未添加稀土的 1#钢分别提升了 22%和 52%。由于轨道钢铁的应用跨纬度较广，故处于极寒地带的重轨钢应用十分考验低温下的力学性能。特此增加一组对照实验，探究低温条件下(-20 和 -40 ℃)添加不同含量的混合稀土对钢力学性能的影响。在-20 ℃的条件下，未添加稀土元素的 1#钢的冲击功为 4.8 J，添加混合稀土的 2#和 3#钢冲击功提升至 5.9 与 7.4 J，较未添加稀土的 1#钢分别提升了 22.92%和 54.17%；当温度条件达到-40 ℃时，未添加稀土元素的 1#钢的冲击功为 3.2 J，添加混合稀土的 2#和 3#钢冲击功提升至 5.1 与 6.8 J，较未添加稀土的 1#钢分别提升了 59.38%和 112.5%，故在极寒条件下稀土元素的加入可以显著提高 U71Mn 重轨钢的抗冲击性能。

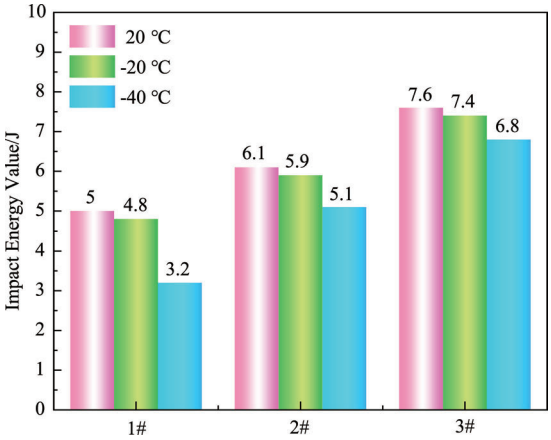


图 10 U71Mn 钢在不同温度条件下的冲击功

Fig. 10 Impact energy of U71Mn steel under different temperature conditions

分析实验结果发现，不论是在常温条件下还是低温条件下，随着稀土含量的不断升高，冲击功逐级递增。这是由于加入混合稀土后的 2#、3#实验钢中夹杂物尺寸减小且呈弥散分布，有效促进了晶粒的细化，通过夹杂物球化与细晶净化组织双微观杠杆，同步抑制裂纹生长，从而提高钢的冲击韧性[36]。

冲击试验结束后，使用场发射扫描电子显微镜完成全区域低倍与微区高倍观察，从微观尺度分析混合稀土对 U71Mn 重轨钢冲击断裂行为的影响。图 11 为 3 组实验钢在常温冲击下的断口形貌。在宏观形貌上，1#、2#、3#钢均以解理面为主，属脆性断裂。未添加稀土的 1#钢断口起伏剧烈，凹凸差较大，如图 11a 所示；加入混合稀土后的 2#、3#钢断口整体趋于平坦，凹凸差显著减小，如图 11b 和 11c 所示。观察结果表明，随着 La-Ce 混

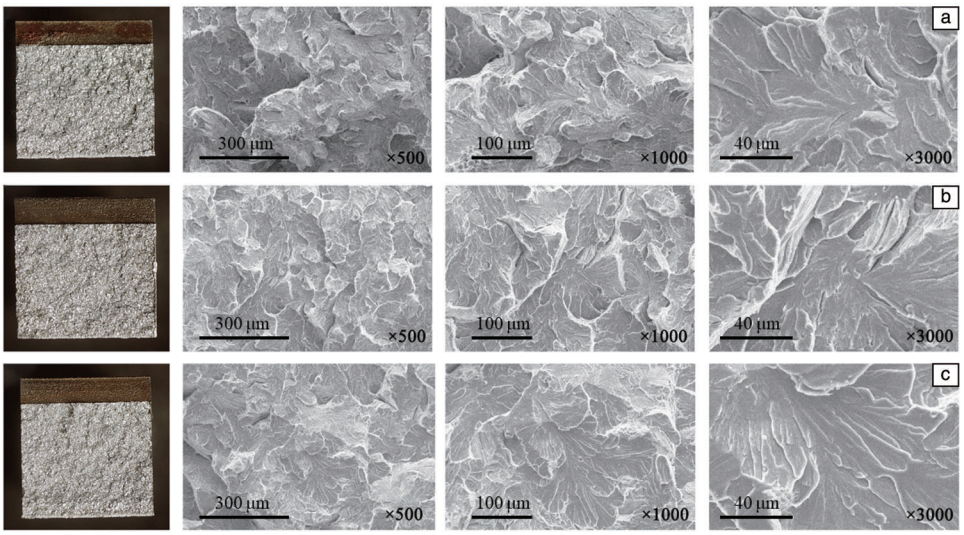


图 11 U71Mn 钢在常温条件下冲击断口形貌：(a)1#钢，(b)2#钢，(c)3#钢

Fig. 11 Impact fracture morphology of U71Mn steel at room temperature: (a) Steel #1, (b) Steel #2, (c) Steel #3

合稀土含量增加，断口形貌逐渐平缓，细小韧窝数量增多，裂纹扩展阻力下降，断裂过程耗散能升高。进一步对冲击断口进行微观形貌观察后发现，未添加稀土的 1#钢断口形貌为台阶及河流状，并且撕裂棱较大；添加混合稀土后的 2#、3#钢断口河流状台阶断裂层比较平缓，并且细小的韧窝相对于未添加稀土的 1#钢增多。3 组实验钢均为脆性断裂，但是添加混合稀土的 2#、3#钢有向韧性断裂转变的趋势，抗冲击性能也相对较好。这是由于混合稀土通过“晶粒细化与夹杂物球化”双机制协同，降低解理面尺寸、增加微坑耗散，通过微观孔洞形成、扩展、连接，耗散冲击能量，从而抑制裂纹快速扩展，提高韧性，使 U71Mn 钢在保持高强度的同时，抗冲击性能得到提升[37]。

尽管添加稀土后的实验钢冲击功随着 La-Ce 的增量不断提高，但随着外界温度的不断降低，在 20，−20 和 −40 ℃下的冲击功总体呈下降趋势，这是大多数钢材在低温条件下的共性表现，主要与材料的韧脆转变行为有关，转变方式如表 4 所示。

表 4　U71Mn 钢的韧脆转变行为

Table 4　Ductile-to-brittle transition behavior of U71Mn steel

Temperature/℃	Fracture morphology	Ductile-brittle transition region
20	Fiber content≥90%	Upper-shelf region
−20	Fibrous area ratio≈50%	Ductile-to-brittle transition zone
−40	Crystalline area ratio≥90%	Lower-shelf region

3.3.3　稀土 La-Ce 对 U71Mn 钢拉伸性能的影响

为探究添加混合稀土后的 U71Mn 重轨钢在拉力载荷下的变形与承载行为，对 3 组实验钢进行了室温拉伸测试。应力-应变曲线刻画了材料从受力到断裂的全过程，通常可分为弹性变形、屈服及塑性强化-颈缩 3 个阶段，其中工程应变 ε 为无量纲量，图 12a 横坐标以百分数表示。

如图 12a 所示，在小应变区(工程应变 $\varepsilon \leqslant 0.6\%$)内，3 组实验钢的应力-应变曲线几乎完全重合，呈现出良好的线性关系，表明材料处于典型的线弹性变形阶段，服从胡克定律，卸载后变形可完全恢复。随着应变进一步增加，曲线出现首个明显拐点，对应材料的屈服行为，标志着弹性阶段结束、塑性变形开始；此后曲线斜率明显降低并逐渐趋于平缓，塑性变形不可恢复。在塑性变形阶段，随着载荷持续增加，不同实验钢之间的力学响应差异逐渐显现，添加混合稀土的 2#和 3#钢整体应力水平明显高于未添加稀土的 1#钢。继续加载至曲线应力峰值，材料达到抗拉强度，随后由于颈缩效应的出现，应力逐渐回落，试样最终发生断裂。

图 12b 为 3 组实验钢的屈服强度和抗拉强度。对比实验数据发现，未添加稀土的 1#钢屈服强度为 538 MPa，添加混合稀土的 2#、3#钢屈服强度升至 582 和 610 MPa，相较于 1#钢分别提升了 8.18%与 13.38%。未添加稀土的 1#钢抗拉强度为 907 MPa，而添加混合稀土的 2#、3#实验钢抗拉强度升至 948 和 978 MPa，相较于 1#钢分别提升了 4.52%与 7.83%。结果表明，在添加混合稀土 La 和 Ce 后，实验钢的屈服强度与抗拉强度都得到明显的提升，并随着稀土含量的逐步增加，屈服强度与抗拉强度的提升效果更加显著，这是由“组织细化”与“夹杂物变质”2 个维度的改善所造成的。一方面，La-Ce 在固-液界面富集，引发成分过冷，提高形核率，显著细化原始奥氏体晶粒，并且降低稀土共析转变温度并提高碳活度，使珠光体片层间距减小；另一方面，大尺寸不规则有害夹杂物被稀土元素改性，细小球状稀土硫氧化物均匀分布，避免了局部应力集中[38]。故随着稀土加入量的逐级提升，3 组实验钢的屈服强度与抗拉强度逐级提高，塑性与韧性得到加强。

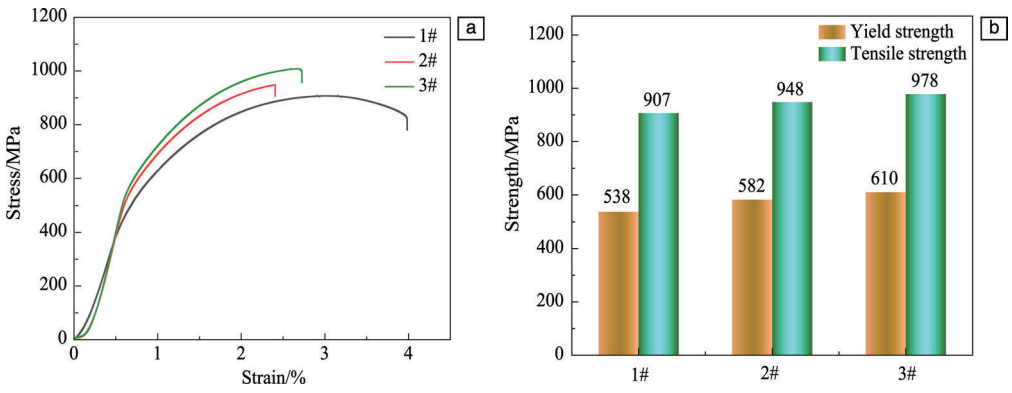


图 12　U71Mn 钢拉伸性能：(a)拉伸应力-应变曲线，(b)屈服强度和抗拉强度

Fig. 12　Tensile properties of U71Mn steel: (a) tensile stress-strain curves, (b) yield strength and tensile strength

拉伸断裂后的断后延伸率与断口收缩率是判断材料塑性的重要参数。断后延伸率是材料在拉伸试验中，试样拉断后标距的延展变形量与原始坐标距长度之比，断面收缩率是指材料在拉伸断裂后，断面最大缩小面积与原断面积百分比。使用螺旋测微器以及全自动游标卡尺测量试样拉伸后断后延伸长度和断面收缩直径，计算结果见表 5 和表 6。

表 5 实验钢拉伸断后延伸率

Table 5 Post-fracture elongation of the tested steel after tensile fracture

No.	Original length/mm	Post-fracture length/mm	Fracture elongation/%
1#	30	32.40	8.00
2#	30	33.52	11.73
3#	30	35.74	19.13

表 6 实验钢拉伸断面收缩率

Table 6 Reduction of area of the tested steel after tensile fracture

No.	Original cross-sectional area/mm^2	Fracture cross-sectional area/mm^2	Reduction of area/%
1#	19.625	18.1618	7.56
2#	19.625	17.1199	12.76
3#	19.625	16.0379	18.28

实验钢拉伸试样原始标定长度为 30 mm，未添加稀土的 1#钢拉伸后长度为 32.40 mm，断后延伸率为 8.00%；添加混合稀土的 2#和 3#钢拉伸后长度为 33.52 和 35.74 mm，断后延伸率分别为 11.73%和 19.13%，相比于 1#钢分别提高了 3.73%和 11.13%。实验钢拉伸试样原始截面积为 19.625 mm^2，未添加稀土的 1#钢拉伸断口颈缩处面积为 18.1618 mm^2，断面收缩率为 7.56%；添加混合稀土的 2#和 3#实验钢拉伸断口颈缩处面积分别为 17.1199 和 16.0379 mm^2，断面收缩率分别为 12.76%和 18.28%，相比于 1#钢分别提升了 5.2%和 10.72%。

4 结 论

(1)La-Ce 混合稀土在高温区优先与钢液中 O，S 反应生成$(La,Ce)_2O_2S$，成为凝固前期的异质形核核心，促使夹杂体系由“MnS、复合硅酸盐主导”转变为“稀土氧硫化物主导”，实现夹杂物数量显著下降、尺寸细化与形貌球化。

(2)当混合稀土质量分数为约 0.0127%时，典型夹杂以“稀土相为核、非金属相外包”的分层复合体为主；混合稀土质量分数提升至约 0.026%后，夹杂以细小球状$(La,Ce)_2O_2S$为主，MnS 与 Al_2O_3 析出明显受到抑制。稀土含量继续增加将诱发纳米级稀土氧硫化物通过碰撞-聚集形成大尺寸团聚体，存在过量风险。

(3)力学指标在实验范围内随稀土含量递增而协同提升，显微硬度、屈服强度、抗拉强度及断后延伸率均呈单调上升；冲击功在室温与低温下显著提高，断口由典型脆断向脆中带韧的方向转变。晶粒细化与夹杂物改质的双重作用降低解理单元尺寸、削弱应力集中并增加微坑耗能。

参考文献 References

[1] 陈林, 崔健伟, 邹运, 等. 稀土[J], 2021, 42(2): 41-47.
CHEN L, CUI J W, ZOU Y, *et al*. Chinese Rare Earths[J], 2021, 42(2): 41-47.

[2] 谌智勇, 王文义, 储焰平, 等. 连铸[J], 2020(5): 57-61.
CHEN Z Y, WANG W Y, CHU Y P, *et al*. Continuous Casting[J], 2020(5): 57-61.

[3] QIU G X, DU Q, LU F, *et al*. Journal of Iron and Steel Research International[J], 2024, 31(4): 779-789.

[4] BAI W, ZHOU L, WANG P F, *et al*. Wear[J], 2022, 5(496/497): 204290.

[5] LIU Y, ZHANG S, FENG C, *et al*. Materials Science and Engineering: A[J], 2024, 897: 146353.

[6] TAKANORI K, TAKASHI F, SHINICHIRO H, *et al*. Materials Transactions[J], 2021, 62(2): 185-190.

[7] CHEN H, MA G S, LU L, *et al*. Corrosion Science[J], 2024, 230: 111938.

[8] 韩宇龙, 李健, 郭丽雅, 等. 中国腐蚀与防护学报[J], 2024, 44(5): 1255-1262.
HAN Y L, LI J, GUO L Y, *et al*. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection[J], 2024, 44(5): 1255-1262.

[9] ZHAO Y G, ZHAO X H, XIA F, *et al*. Corrosion Science[J], 2023, 224: 111555.

[10] SONG Y, ZHANG H N, REN L, *et al*. Engineering Reports[J], 2024, 6(5): e12892.

[11] HASHIMOTO K, HIRAOKA K, KIDA K, *et al*. Materials Science and Technology[J], 2012, 28(1): 39-43.

[12] TANG S Q, XU H H, AO N, *et al*. International Journal of Fatigue[J], 2024, 178: 107973.

[13] 张海南, 曹建强, 任磊, 等. 稀有金属与硬质合金[J], 2022, 50(4): 62-70.
ZHANG H N, CAO J Q, REN L, *et al*. Rare Metals and Cemented Carbides[J], 2022, 50(4): 62-70.

[14] ZHAO L, ZHAI G C, WU J D, *et al*. Journal of Materials Research and Technology[J], 2024, 33: 929-939.

[15] WANG X Q, WU Z W, LI B, *et al*. Journal of Rare Earths[J], 2024, 42(3): 431-445.

[16] QU W, HOU Y, REN H P, *et al*. Metallurgical and Materials Trans-

actions B[J], 2021, 52(3): 1194-1199.

[17] 富晓阳, 杨吉春, 赵学林, 等. 热加工工艺[J], 2015, 44(12): 68-70.
FU X Y, YANG J C, ZHAO X L, *et al*. Hot Working Technology[J], 2015, 44(12): 68-70.

[18] LI Z J, WANG J G, YAN R F, *et al*. Journal of Materials Research and Technology[J], 2022, 16: 1339-1352.

[19] LIU H F, ZUO J, NAKATA T, *et al*. Materials[J], 2022, 15(3): 1078.

[20] HUANG F, LI J, ZANG R Y *et al*. Ironmaking & Steelmaking[J], 2023, 50(7): 744-756.

[21] LI H, REN Q, ZHANG L F, *et al*. Journal of Iron and Steel Research International[J], 2023, 30(11): 2254-2266.

[22] LU P C, LI H B, FENG H, *et al*. Metallurgical and Materials Transactions B[J], 2022, 53(3): 1920-1935.

[23] MAO N, YANG W S, CHEN D H, *et al*. Materials[J], 2022, 15(22): 7952.

[24] WANG X J, LI G Q, LIU Y, *et al*. ISIJ International[J], 2021, 61(6): 1850-1859.

[25] BAO D H, CHENG G G, HUANG Y, *et al*. Metallurgical and Materials Transactions B[J], 2023, 54(2): 944-958.

[26] WANG H, BAO Y P, ZHAO M, *et al*. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials[J], 2019, 26(11): 1372-1384.

[27] 杨吉春, 王军, 任磊, 等. 钢铁[J], 2020, 55(1): 86-92+100.
YANG J C, WANG J, REN L, *et al*. Iron & Steel[J], 2020, 55(1): 86-92+100.

[28] FAN L F, RONG H Z, HE J Z, *et al*. ISIJ International[J], 2018, 58(12): 2348-2353.

[29] XU W W, LIU L H, YANG Q, *et al*. Metals[J], 2024, 14(4): 372.

[30] 罗钢, 隋亚飞, 刘彭, 等. 特殊钢[J], 2024, 45(3): 33-39.
LUO G, SUI Y F, LIU P, *et al*. Special Steel[J], 2024, 45(3): 33-39.

[31] ZHONG H L, LI S C, ZHANG Z Q, *et al*. Materials Today Communications[J], 2022, 31: 103732.

[32] 任磊, 张海南, 曹建强, 等. 钢铁研究学报[J], 2021, 33(8): 839-850.
REN L, ZHANG H N, CAO J Q, *et al*. Journal of Iron and Steel Research[J], 2021, 33(8): 839-850.

[33] WANG L, SONG B, YANG Z B, *et al*. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials[J], 2021, 28(12): 1940-1948.

[34] LUO S, SHEN Z S, YU Z M, *et al*. Steel Research International[J], 2021, 92(3): 2000394.

[35] 蔡文军, 沈正军, 詹肇麟. 稀有金属材料与工程[J], 2021, 50(7): 2495-2501.
CAI W J, SHEN Z J, ZHAN Z L. Rare Metal Materials and Engineering[J], 2021, 50(7): 2495-2501.

[36] 李晓凯, 信瑞山, 俞占扬, 等. 轴承[J], 2024(3): 58-62.
LI X K, XIN R S, YU Z Y, *et al*. Bearing[J], 2024(3): 58-62.

[37] 张慧书, 李吉航, 战东平. 钢铁研究学报[J], 2023, 35(12): 1569-1578.
ZHANG H S, LI J H, ZHAN D P. Journal of Iron and Steel Research[J], 2023, 35(12): 1569-1578.

[38] 李春剑, 徐锴, 冯伟, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2025, 54(11): 2729-2738.
LI C J, XU K, FENG W, *et al*. Rare Metal Materials and Engineering[J], 2025, 54(11): 2729-2738.