

1 头条信息

东北大学易红亮教授团队在高锰钢领域取得系列研究进展

东北大学数字钢铁全国重点实验室易红亮教授团队近期在高锰钢领域取得系列研究进展。研究成果连续发表于材料与力学领域期刊 *International Journal of Plasticity*、*Journal of Materials Science & Technology* 和 *Scripta Materialia*。第一作者为团队博士生刘栋, 通讯作者为易红亮教授、杨达朋副教授和德国多特蒙德工业大学洪堡学者侯勇博士(现为上海交通大学材料科学与工程学院金属基复合材料全国重点实验室副教授)。

高锰钢, 尤其是锰含量为 20%~30% 的 TWIP 钢, 凭借其孪晶诱导塑性效应和强位错增殖能力, 展现出卓越的高强度与高延性组合, 使其成为结构材料应用的理想选择, 已成功应用于挖掘机铲斗、防撞结构件以及低温设备等关键领域。正因这些独特优势, 此类材料长期以来备受国际研究学者的高度关注。合金的应变硬化能力是否仅由亚结构演化所决定? 传统认知认为, 钢的应变硬化能力主要源于各种亚结构的增殖, 例如位错、孪晶以及相变等。这些机制的核心在于通过设计变形亚结构以提升应变硬化率。然而, 微观缺陷的增殖存在物理极限, 这表明基于亚结构演化的硬化机制存在固有瓶颈, 即无法根本突破材料固有的强度-塑性倒置关系。

针对这一科学问题, 东北大学数字钢铁全国重点实验室易红亮教授团队聚焦“高锰钢应变硬化机制设计”主题, 开展了系统性研究。团队创新性地提出, 利用间隙溶质原子对可移动位错的动态拖曳效应, 是一种不依赖亚结构演化即可获得持续高应变硬化能力的有效策略。通过实验设计与理论计算, 成功回应并解决了学界关于溶质原子在室温下扩散有效性的争议。具体工作包括:

(1) 动态碳扩散诱导高碳奥氏体持续应变硬化

通常情况下, 由于正应变速率敏感性的存在, 钢材在准静态应变速率下会表现出相对较低的强度但更好的延展性。然而, 高碳奥氏体钢却呈现出负应变速率敏感性的异常现象。针对这一现象, 研究发现, 经过严重变形的样品在低应变速率下, 尽管其微观结构中的亚结构密度降低, 却表现出更高的流变应力。这种反常现象表明合金的硬化行为偏离了传统的亚结构演化规律。通过多尺度微观结构表征, 揭示出在热激活作用的影响下, 低应变速率会抑制额外孪晶系的形成, 并促进以交叉滑移为主导的胞状结构。基于位错与扩散动力学的理论计算进一步证实, 动态应变时效主导着合金的应变速率敏感性和应变硬化能力。通过高温拉伸和循环时效试验, 明确证实了动态间隙原子的扩散对应变硬化及应变速率响应的关键性影响。基于上述发现, 提出了一种创新策略: 通过高碳成分设计, 利用动态应变时效效应钉扎位错, 从而在准静态应变速率下同步提升钢材的抗拉强度和延性。该方法无需依赖复杂的微观结构调控, 为设计未

来在准静态应变速率下兼具高强度与高延性的合金开辟了新途径。相关研究成果以题为“Dynamic carbon diffusion induced sustainable strain-hardening at quasi-static strain rates in high-C Al-added austenitic steels”发表于 *International Journal of Plasticity* 191 (2025) 104391。

论文链接: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2025.104391>

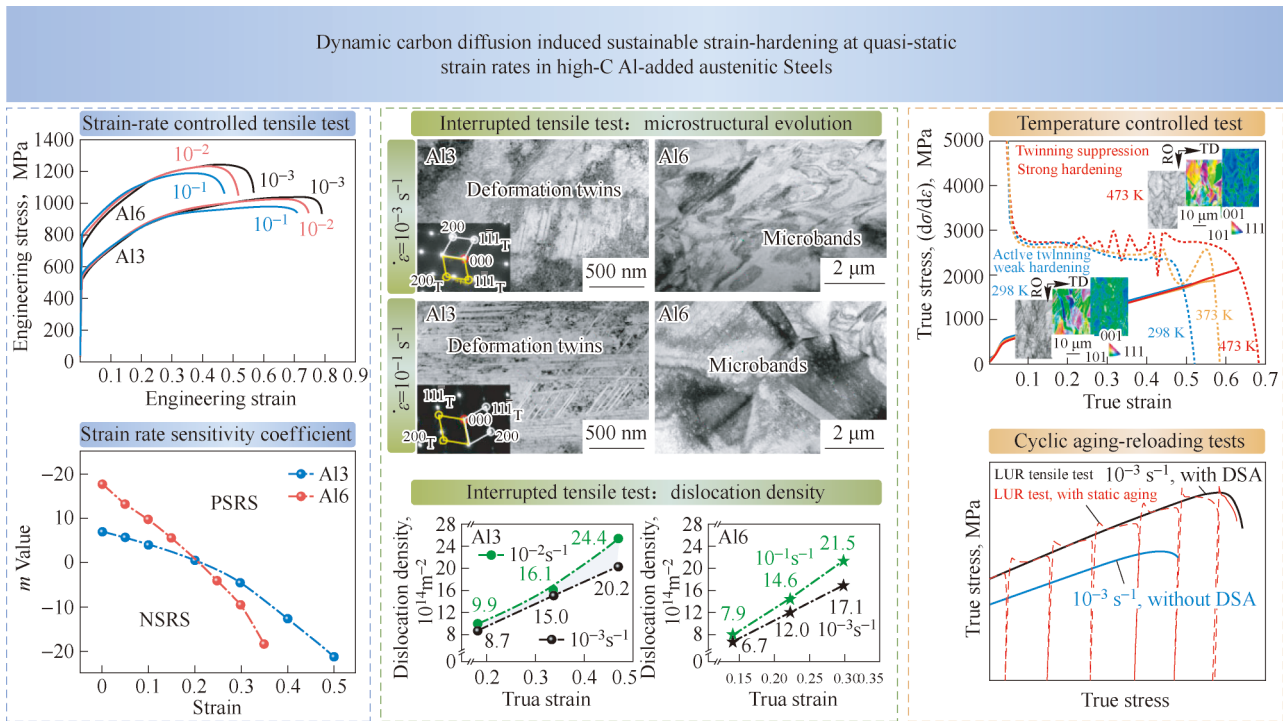


图1 动态碳扩散诱导高碳奥氏体持续应变硬化

(2) 量化动态应变时效对奥氏体钢应变硬化中 Taylor 分量的贡献

在先前的研究中, 间隙溶质对增强合金应变硬化能力的潜力已被初步确认。然而, 这种强化效应究竟如何作用于可移动位错的机制尚不明确。建立间隙溶质与可移动位错相互作用的物理模型, 并量化其对位错运动的拖曳能力至关重要。聚焦此核心问题, 基于位错弓出模型, 深入探究并量化了间隙溶质对位错的动态钉扎效应及其对高碳奥氏体钢整体硬化能力的贡献。通过精确解耦其他强化机制, 提出了一种基于位错密度的、经间隙溶质修正的动态硬化分量模型, 从而成功捕捉并解释了该材料中观察到的异常流动应力行为。明确揭示了溶质-位错相互作用在位错硬化中扮演的关键性角色, 提出的修正模型有效解决了经典 Taylor 硬化理论仅考虑林位错强化时导致的强度预测低估问题。相关研究成果以题为“Quantifying the contribution of dynamic strain aging to dislocation component for strain-hardening in high-carbon austenitic steels”发表于 *Scripta Materialia* 266 (2025) 116767。

论文链接: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2025.116767>

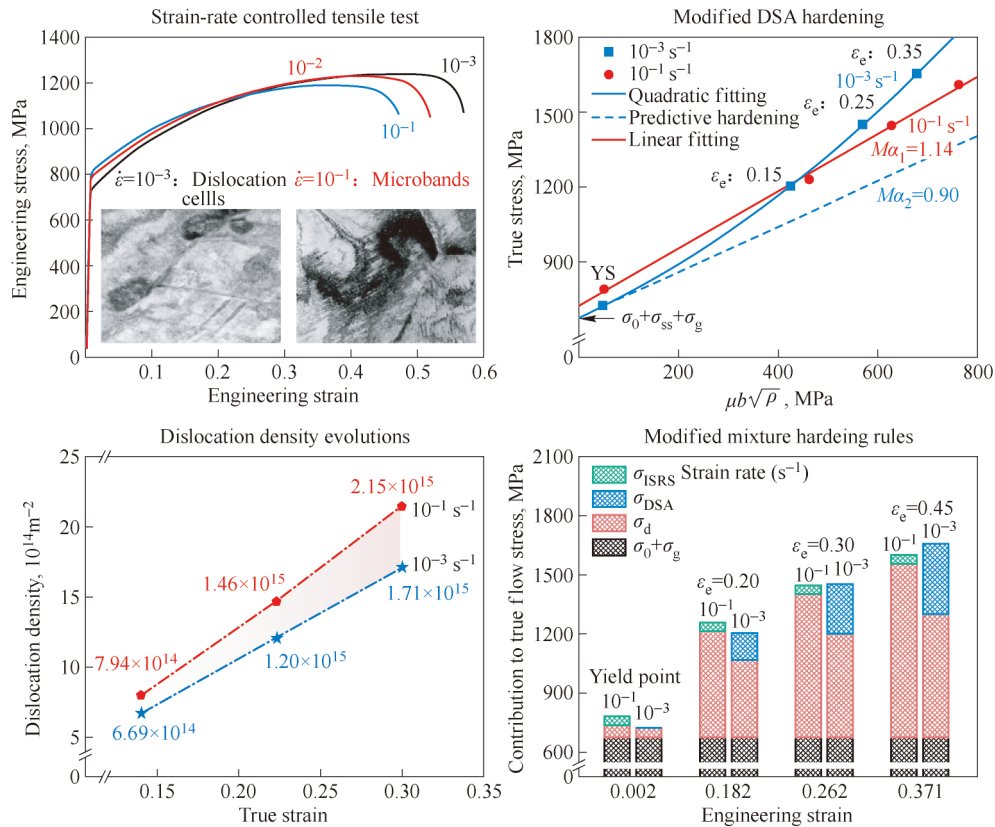


图 2 量化动态应变时效对奥氏体钢应变硬化中 Taylor 分量的贡献

(3) 综述：应变速率对高锰钢力学性能、微观组织演变及变形机制的影响

高锰钢因其优异的强度-塑性协调特性，在承受动态载荷的应用场景中日益受到重视。在前期研究的基础上，系统阐述了应变速率对高锰钢力学性能和微观组织演变的综合影响，重点关注应变速率硬化、绝热软化和动态应变时效三大核心现象。文章深入分析了应变速率对材料的屈服强度、极限抗拉强度、应变硬化能力和延性的影响规律，并揭示了不同合金成分和应变速率区间所导致的正/负应变速率敏感性差异。系统评述了形变孪生、位错滑移和相变等多种变形机制对应变速率的响应特性，及其对微观组织演变、合金设计和工业应用的影响。同时对 DSA 的复杂作用机制进行了深入剖析，强调其在决定高锰钢应变速率敏感性方面发挥的关键作用。文章指出，为进一步优化高锰钢在动态服役环境下的性能，未来研究应聚焦于发展先进的本构模型与加工技术、开发原位表征方法，并积极探索热激活过程和层错能控制的相关机制。该综述为全面理解高锰钢的应变速率效应、指导新型高锰钢合金设计和加工工艺革新提供了重要的理论参考。相关综述工作以题为“Strain rate effects on mechanical properties, microstructural evolution, and deformation mechanisms of high manganese steels”发表于 *Journal of Materials Science & Technology* 237 (2025) 219-255。

论文链接: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2025.03.026>

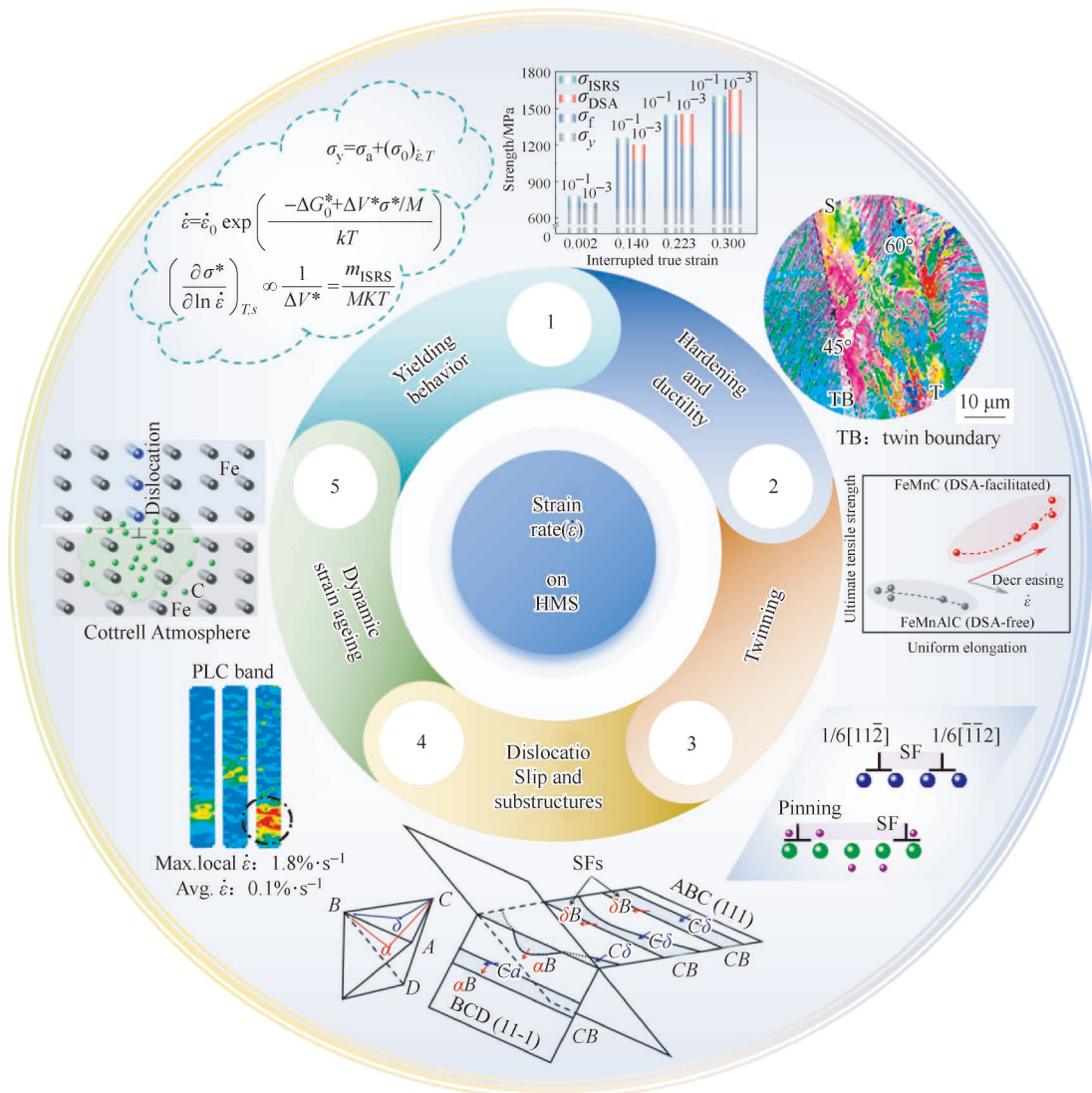


图 3 综述：应变速率对高锰钢力学性能、微观组织演变及变形机制的影响

东北大学徐伟教授团队在 *Acta Materialia* 发表富铬碳化物溶解助力 免镀层热成形钢实现优异抗氧化性能相关论文

传统热成形钢在高温奥氏体化过程中极易发生严重氧化，形成疏松、易剥落的氧化皮，不仅会损伤模具、降低零件尺寸精度，还会影响后续焊接与涂装性能。当前工业上普遍采用 Al-Si 镀层抑制氧化，但镀层会降低钢材焊接性与弯曲韧性，并增加工艺复杂度和制造成本。因此，如何在无需镀层和保护气氛的条件下，依靠钢材本征组织设计提升高温短时抗氧化性能，成为汽车用热成形钢绿色制造与低成本应用亟需解决的关键问题。

围绕这一问题，东北大学数字钢铁全国重点实验室徐伟教授团队在通用汽车中国科学研究院对抗氧化热成形钢应用需求、工艺适配性与服役问题的支持下，联合澳大利亚蒙纳士大学开展系统研究。相关工作由徐伟教授团队王灵禹副教授负责，通用汽车中国科学研究院王建锋院长和王舟博士共同指导，澳大利亚

蒙纳士大学吴宇祥博士支持模拟计算, 第一作者李昭为东北大学 / 通用汽车联合培养博士生。研究以预退火工艺为调控手段, 利用富 Cr 碳化物调控高温相变行为, 系统探究了不同尺寸与 Cr 含量的 M_7C_3 型碳化物对免镀层热成形钢高温短时抗氧化行为的作用机制。团队以 Cr-Si 合金化免镀层热成形钢为对象, 通过调控 700 °C 预退火时间制备差异化碳化物组织, 结合 950 °C 空气高温氧化实验、多尺度表征与热力学动力学模拟, 揭示了基体固溶态 Cr 与富 Cr 碳化物缓慢溶解释放 Cr 共同作用的“双 Cr 源供给机制”。该机制可有效延缓亚表面 Cr 贫化, 维持保护性 Cr_2O_3 层稳定生长, 使长时预退火样品在 950 °C 空气氧化过程中仅生成 $(0.12 \pm 0.02) \mu\text{m}$ 的致密氧化层, 抗氧化性能显著优于已报道的商用及实验热成形钢。相关工作“Dissolution of Cr-rich carbides enables superior oxidation resistance in a coating-free press-hardened steel”发表于 *Acta Materialia*。

论文链接: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2026.122260>

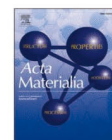
Acta Materialia 312 (2026) 122260



Contents lists available at ScienceDirect

Acta Materialia

journal homepage: www.elsevier.com/locate/actamat



Full Length Article

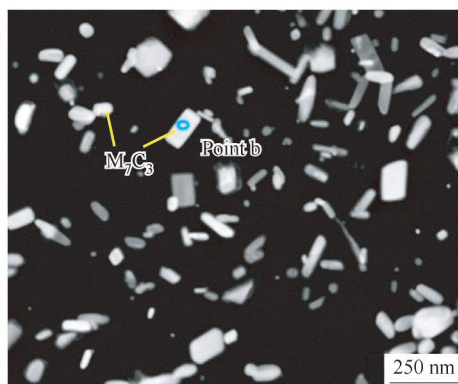
Dissolution of Cr-rich carbides enables superior oxidation resistance in a coating-free press-hardened steel

Zhao Li^a, Lingyu Wang^{a,*}, Zhou Wang^b, Jianfeng Wang^b, Yuxiang Wu^c, Wei Xu^a

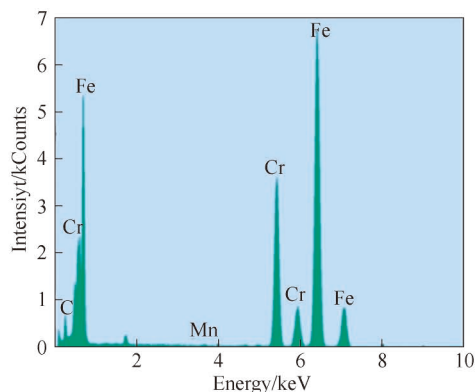
^a State Key Laboratory of Digital Steel, Northeastern University, Shenyang, 110819, China

^b China Science Laboratory, General Motors Global Research & Development, Shanghai, 201206, China

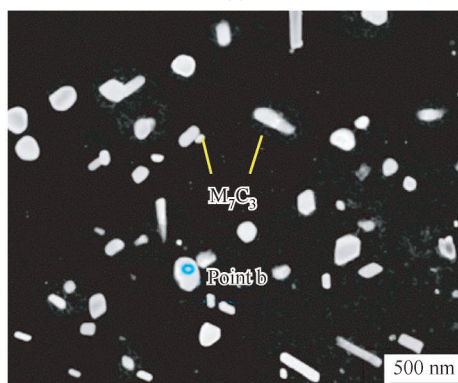
^c Department of Materials Science and Engineering, Monash University, Clayton, VIC 3800, Australia



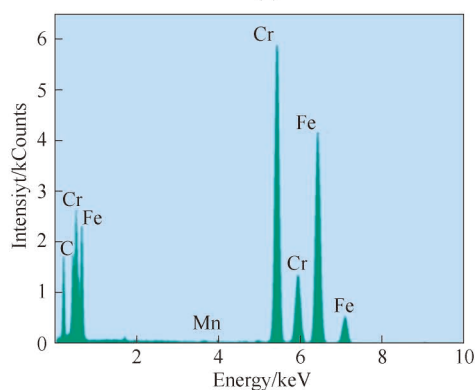
(a)



(b)



(c)



(d)

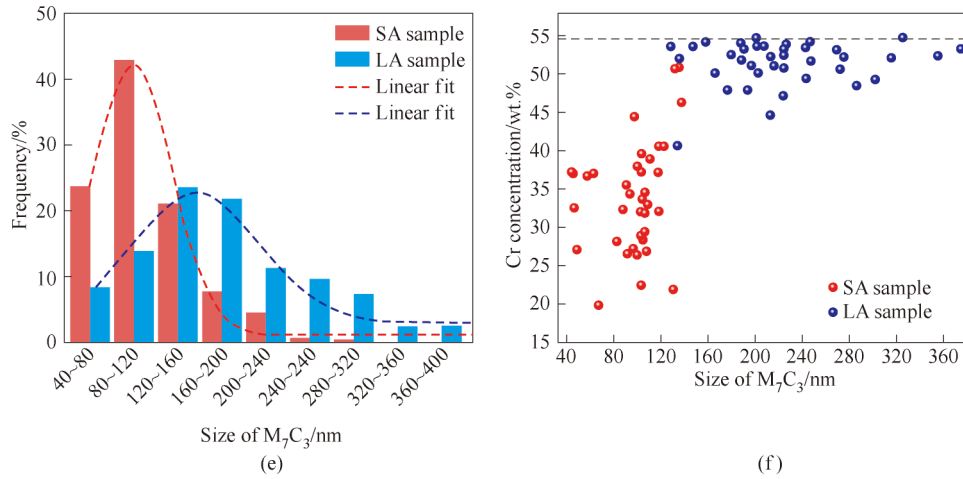


图 1 热成形前 (a, b) SA 和 (c, d) LA 样品的 HAADF-STEM 显微照片和 EDS 点扫描, (e) M_7C_3 尺寸分布直方图, (f) 碳化物直径与 Cr 含量之间的相关性

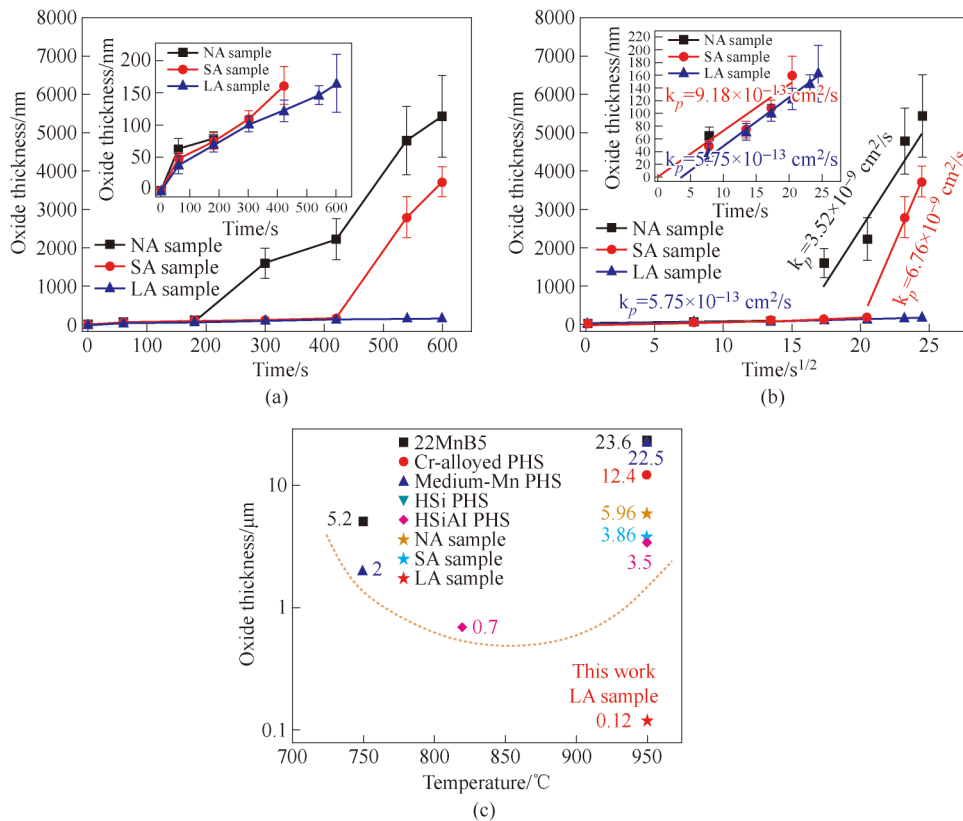


图 2 在 950 °C 下氧化 600 s 的 NA、SA 和 LA 样品的氧化动力学曲线

(a) 氧化层厚度增厚和 (b) 通过曲线拟合获得的相应 k_p 值; (c) 本工作中实验 PHS (600 s) 与传统 22MnB5 PHS 以及其他抗氧化 PHS (300 s) 在 725~950 °C 空气中抗氧化性能的比较

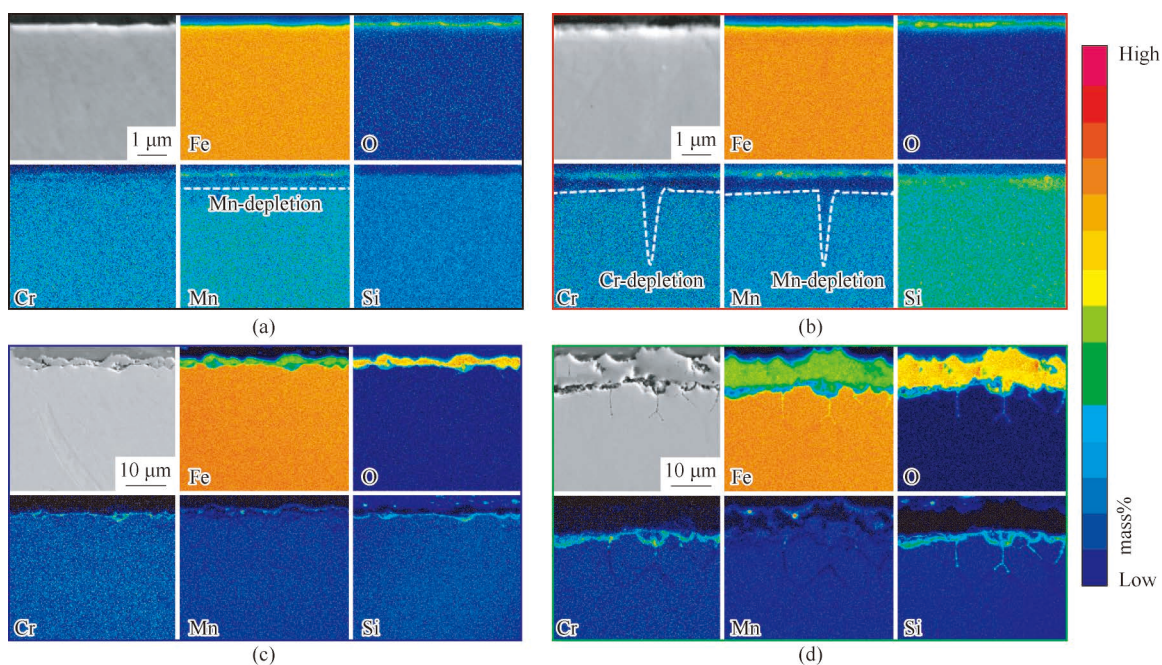


图 3 在 950 °C 下氧化不同时间的 NA 样品的电子探针元素分布分析结果

(a) 60 s ; (b) 180 s ; (c) 420 s ; (d) 600 s

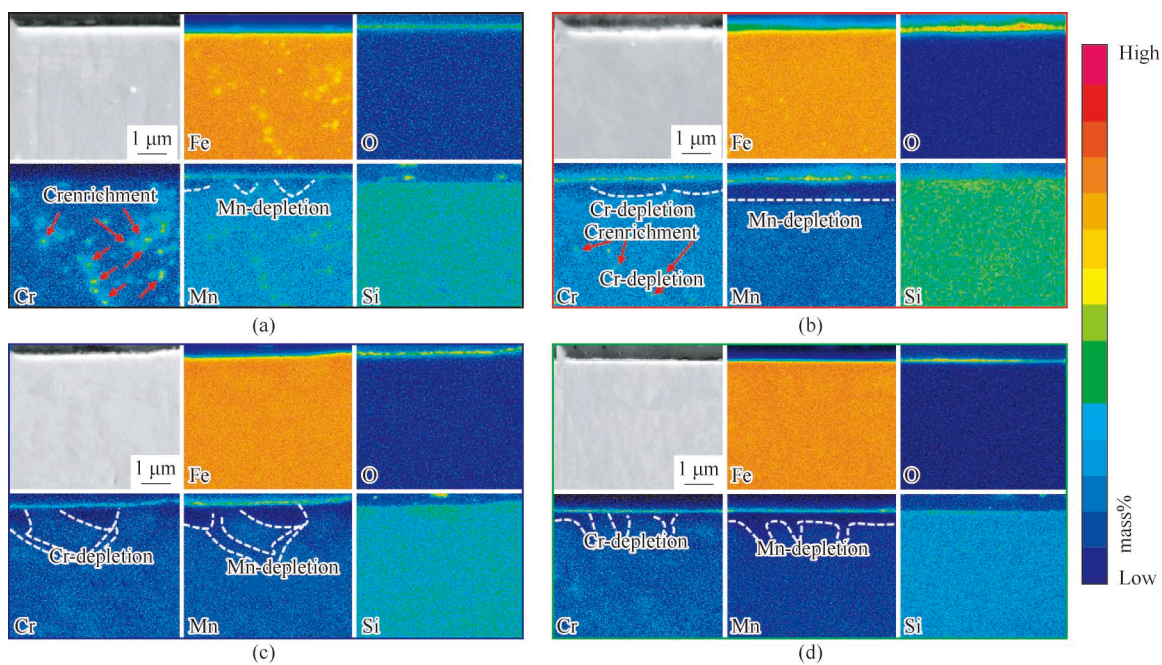


图 4 在 950 °C 下氧化不同时间的 LA 样品的电子探针元素分布分析结果

(a) 60 s ; (b) 180 s ; (c) 420 s ; (d) 600 s

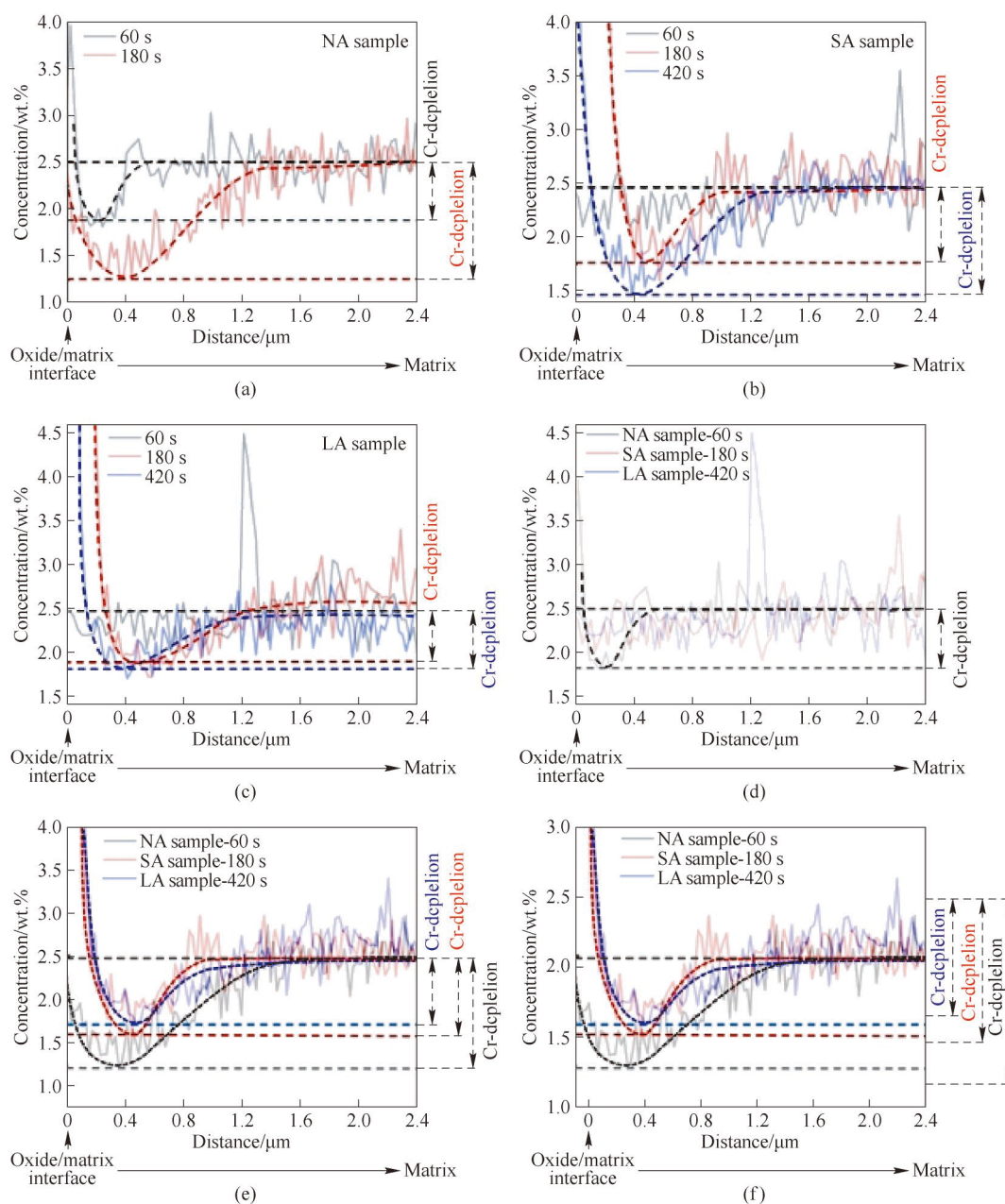
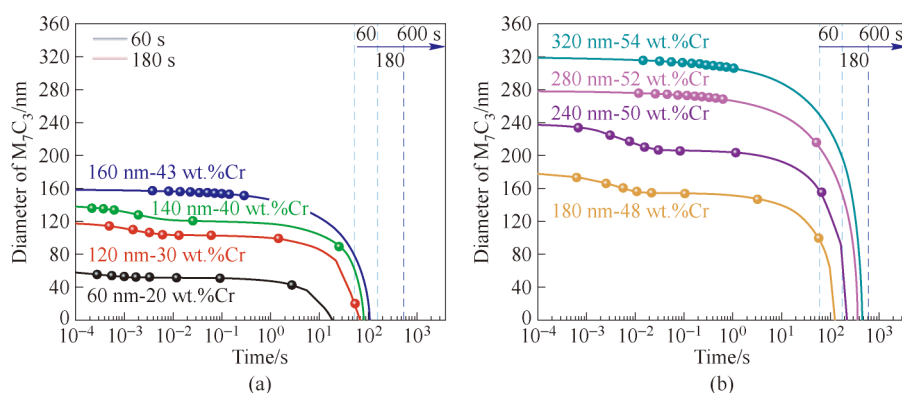


图5 在950 °C氧化后亚表层 EDS 线扫结果

(a) NA 样品; (b) SA 样品; (c) LA 样品; (d) ~ (f) 不同样品对比



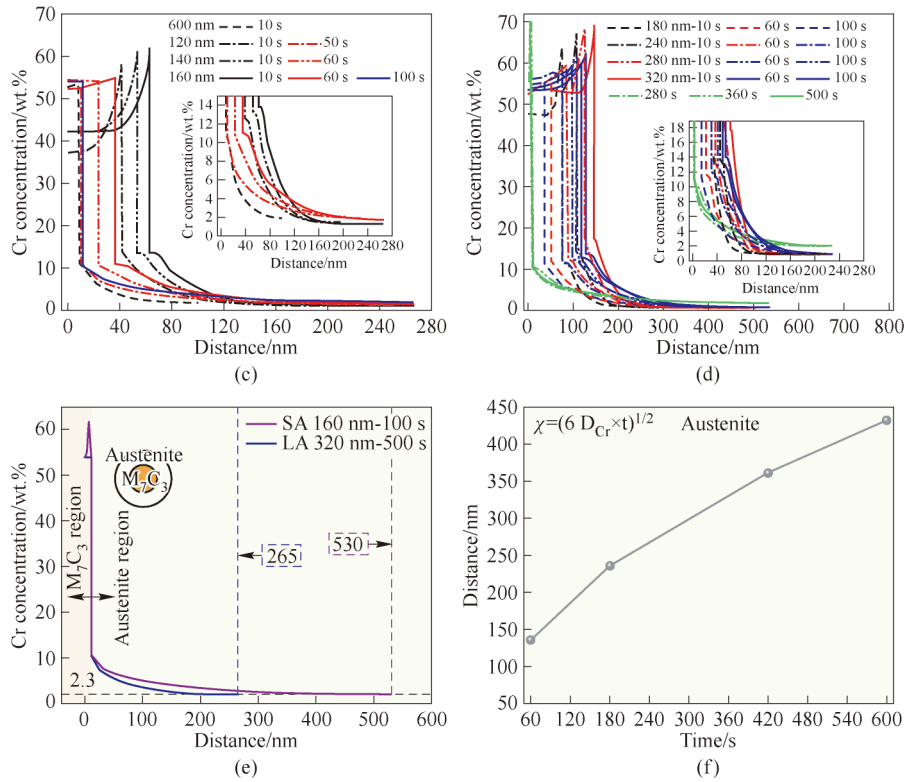


图 6 950 °C氧化过程中 M_7C_3 碳化物的溶解动力学曲线

(a) SA 和 (b) LA 样品中富 Cr 碳化物颗粒的溶解曲线; (c) SA 和 (d) LA 样品中 M_7C_3 和奥氏体中 Cr 的分布;
(e) SA 和 LA 样品中奥氏体和 M_7C_3 中 Cr 分布的比较; (f) Cr 在奥氏体中的扩散距离

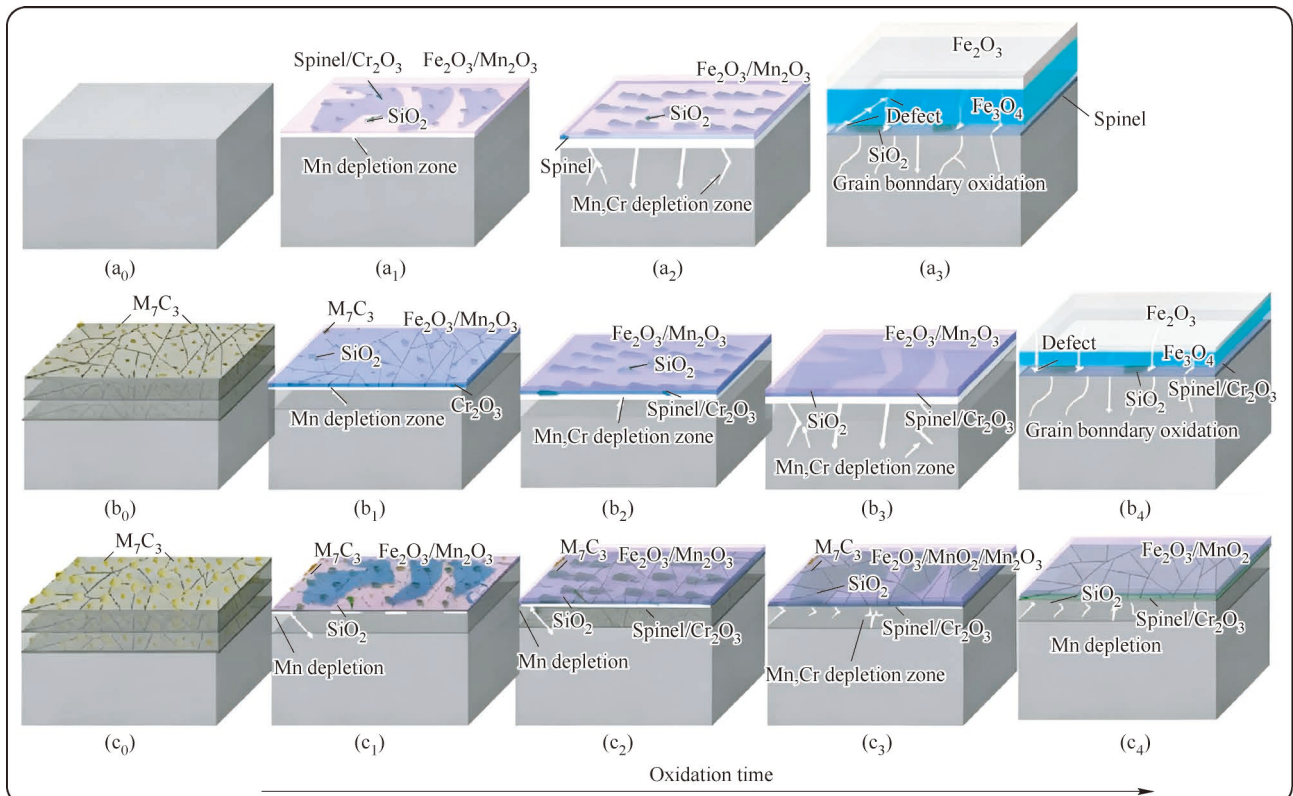


图 7 950 °C氧化过程中氧化物结构演变的示意图

综上, 本文提出了利用富 Cr 碳化物调控免镀层热成形钢高温抗氧化性能的全新策略, 通过工业场景下常见的预退火工艺实现碳化物尺寸与成分的精准调控, 系统验证了富 Cr 碳化物溶解动力学、双 Cr 源供给与抗氧化性能之间的构效关系。在此基础上, 获得了在 950 °C 空气环境下具备优异抗氧化性能的免镀层热成形钢, 该钢材无需防护镀层、无需特殊保护气氛, 可直接适配现有热成形工业流程。微观表征与模拟分析证实, 大尺寸、高 Cr 含量的 M_7C_3 碳化物可通过缓慢持续溶解释放 Cr, 实现短程扩散补 Cr, 有效抑制基体亚表面 Cr 贫化, 稳定生成致密的三层保护性氧化结构。此外, 这种基于富 Cr 碳化物溶解调控抗氧化性能的设计思路可推广至其他 Cr 合金化高强钢体系, 为下一代低成本、绿色化无镀层热成形钢的集成设计与工业化应用提供了核心理论支撑与技术方案。

东北大学徐晓宁博士后在材料科学领域顶刊 *Materials Today* 上发表 高止裂韧度钢材增韧结构设计最新进展相关论文

近日, 数字钢铁全国重点实验室徐晓宁博士后在克服体心立方 (BCC) 金属材料极低温脆性上取得重大突破。该研究摒弃了依赖高合金化增韧的传统路径, 通过创新的跨尺度微观结构设计, 在低成本的普通低碳微合金钢中实现了“反常逆温增韧效应”——温度越低, 材料的冲击韧性越高。相关研究成果以“Inverse temperature-dependent toughness and exceptional cryogenic damage tolerance in a plain bcc steel”为题, 发表于国际材料科学领域顶刊 *Materials Today* (IF : 22)。我室徐晓宁博士后为论文第一作者, 我室田勇教授、香港城市大学 (东莞) 李毅教授与美国加州大学伯克利分校 Robert O. Ritchie 教授为共同通讯作者, 参与此项工作的还包括新加坡南洋理工大学和辽宁材料实验室等科研机构。

基于超大型船舶、极地装备等工业领域对钢铁材料服役安全性的严苛要求, DSL 持续在大厚度止裂钢复相组织调控、低温增韧微观结构设计方面开展了大量探索与技术攻关, 打通从基础理论到工业应用的链条, 探索真正具备工业化量产可行性的低成本方案。在这项研究中, 研究团队利用常规控轧控冷工艺 (TMCP), 在极简成分的低碳微合金钢中成功构筑出双相铁素体 / 马氏体超细晶层状结构。该材料不仅在极低温液氮环境 (-196 °C) 下展现了韧性断裂, 起裂韧性达到 $193\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, 更实现了反直觉的“逆温增韧”现象: 当温度从 110 °C 降至液氮环境 (-196 °C) 时, 其冲击吸收功从 226 J 逆势狂升至 434 J 。其内在机理在于: 超细层状结构宏观上诱发了主裂纹前沿受控的裂纹分层与桥接, 极大缓解了尖端应力集中; 微观上, 在极低温变形区发现超细晶马氏体板条边界上分布着厚度仅为 $5\sim 10\text{ nm}$ 的残余奥氏体薄膜, 在 -196 °C 的极端冷冲击下依然保持了良好的力学性能和热稳定性。这些薄膜如同“纳米润滑剂”, 诱导原本硬脆的马氏体以亚结构协同滑动机制变形而非解理断裂。同时, 高密度的铁素体 / 马氏体相界面在极低温下转化为活跃的“位错源”, 赋予了超细晶铁素体连续的塑性变形能力。这种跨尺度协同变形机制显著提升了材料的能量吸收水平, 打破了铁素体和马氏体在极低温下必然脆断的传统认知。

基于“多尺度微观结构增韧设计”理念, DSL 近年来在低成本、高止裂韧性钢铁材料的研发理论方面持续取得重要进展, 并着力推动科研成果深度融入我国钢铁工业的转型升级进程。通过与国内头部钢企

的深入产学研合作, 团队将先进的微观结构设计理念成功转化为实际生产力, 先后攻克了 100 mm 大厚度 EH40、EH47 级别止裂钢板的工业化制备技术, 突破新一代 EH51 级高强韧船用止裂钢的关键制备技术。这些标志性成果填补了国内多项技术空白, 增强了我国特种钢材的自主可控能力, 也为深远海开发、极地航行等国家重大战略工程提供了坚实的材料保障。

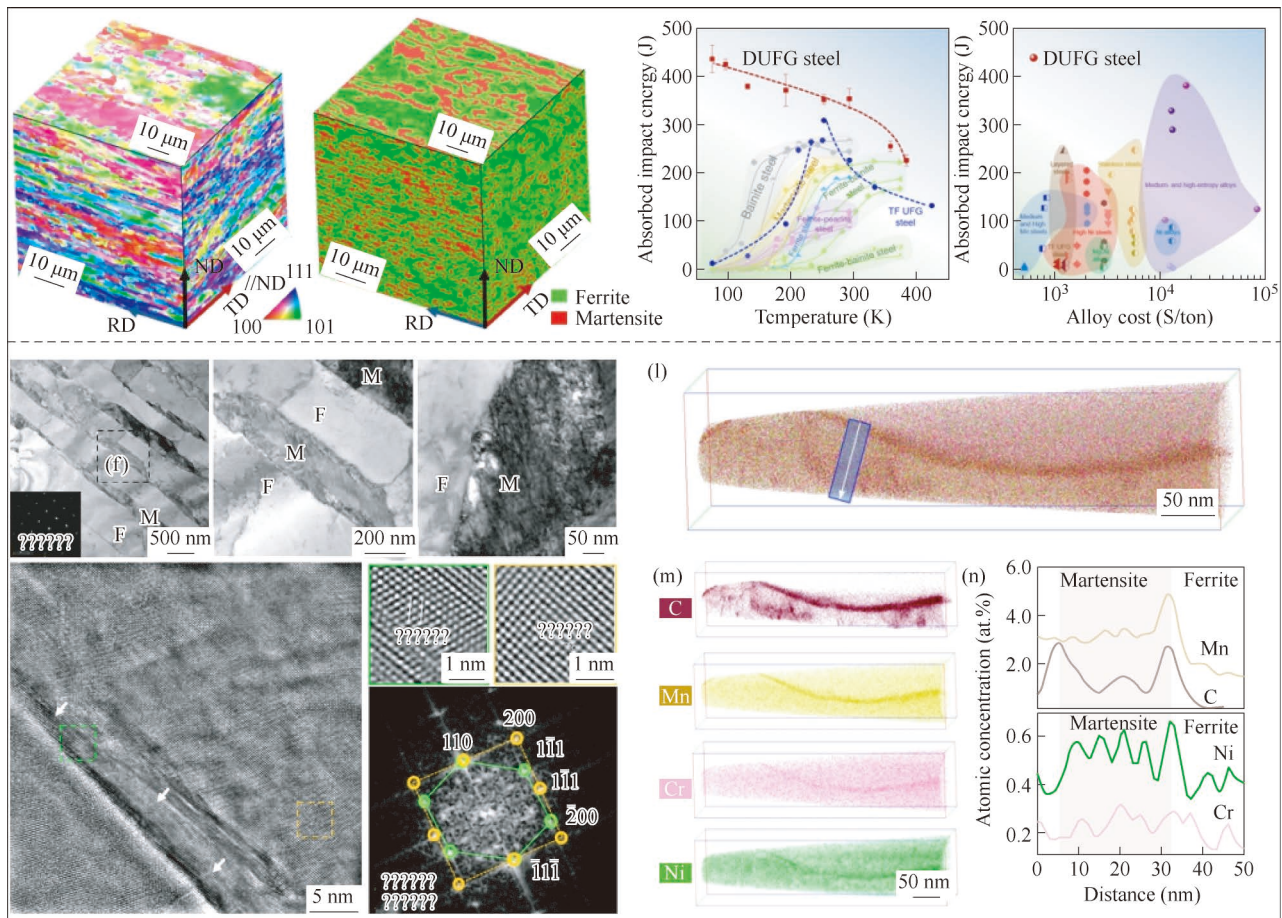


图 1 多尺度增韧结构设计

东北大学李琳琳教授课题组在 *Materials Today* 上发表短程有序调控 多主元合金疲劳性能新机制相关论文

金属材料的疲劳失效是航空航天、能源交通和先进装备等领域结构安全面临的关键问题。多主元合金因具有优异的综合力学性能和广阔的微观结构调控空间, 被认为是新一代高性能结构材料的候选者。如何通过微观结构设计提升其在循环载荷下的服役可靠性, 一直是材料科学领域长期关注的重要课题。

针对这一问题, 数字钢铁全国重点实验室李琳琳教授课题组聚焦短程有序在循环载荷下的动态演化及其对多主元合金疲劳变形行为的调控作用, 展开系统研究并取得了重要突破。研究揭示了 CrCoNi 中熵合金中短程有序 (SRO) 在循环载荷下的动态演化规律, 阐明了循环变形约束 SRO 发展、促进相变并提

升疲劳抗力的内在机制。相关成果以“Cyclic suppression of chemical short-range ordering enhances fatigue resistance via phase transformation in CrCoNi medium-entropy alloy”为题, 发表于国际材料科学领域期刊 *Materials Today* (IF=22)。我室博士研究生王玉洁为论文第一作者, 西南交通大学双思垚为论文共同第一作者, 我室李琳琳教授、悉尼大学安祥海教授、西南交通大学张旭教授和美国加州大学伯克利分校 Robert O. Ritchie 教授为共同通讯作者, 东北大学材料学院与中国科学院金属研究所的多位老师也参与了论文工作并给予了大力支持。

多主元合金具有复杂的局部化学环境, 其纳米尺度短程有序结构会影响层错能、位错运动和变形机制, 进而调控材料的强度、塑性和疲劳响应。为厘清短程有序在循环载荷下的作用机制, 研究团队设计了弱 SRO 的水淬态合金和强 SRO 的时效态合金。研究发现, 单向拉伸会机械诱导 SRO 发展, 而循环载荷下位错的往复滑移会抑制 SRO 的持续长大, 形成“机械约束有序”状态。这一动态过程保留了两种状态合金之间的初始 SRO 差异, 并进一步促进弱 SRO 合金发生面心立方密排六方 (HCP) 的转变, 而强 SRO 合金则主要通过形变孪生协调塑性变形。相较于形变孪生, HCP 相变能够引入更强的界面阻碍和强化作用, 有效缩短位错平均自由程, 抑制循环软化, 并延缓疲劳损伤累积, 使水淬态合金表现出更优异的疲劳抗力。

当前, 短程序对多主元合金强化作用的研究已如火如荼。作为该领域研究的补充, 本研究发现, 尽管 SRO 对合金的单向拉伸强度具有积极作用, 但在疲劳载荷作用下, 其含量越低越有利于提升合金疲劳性能; 此外, SRO 并非静态的微观结构特征, 而是循环载荷作用下可被动态调控的关键变量。研究表明, 通过调控“SRO-层错能-变形机制”之间的耦合关系, 不仅有望为高强韧、长寿命多主元合金的设计提供新的理论支撑, 也能为航空航天及先进装备领域耐疲劳结构材料的开发提供重要思路。

论文链接: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2026.103374>

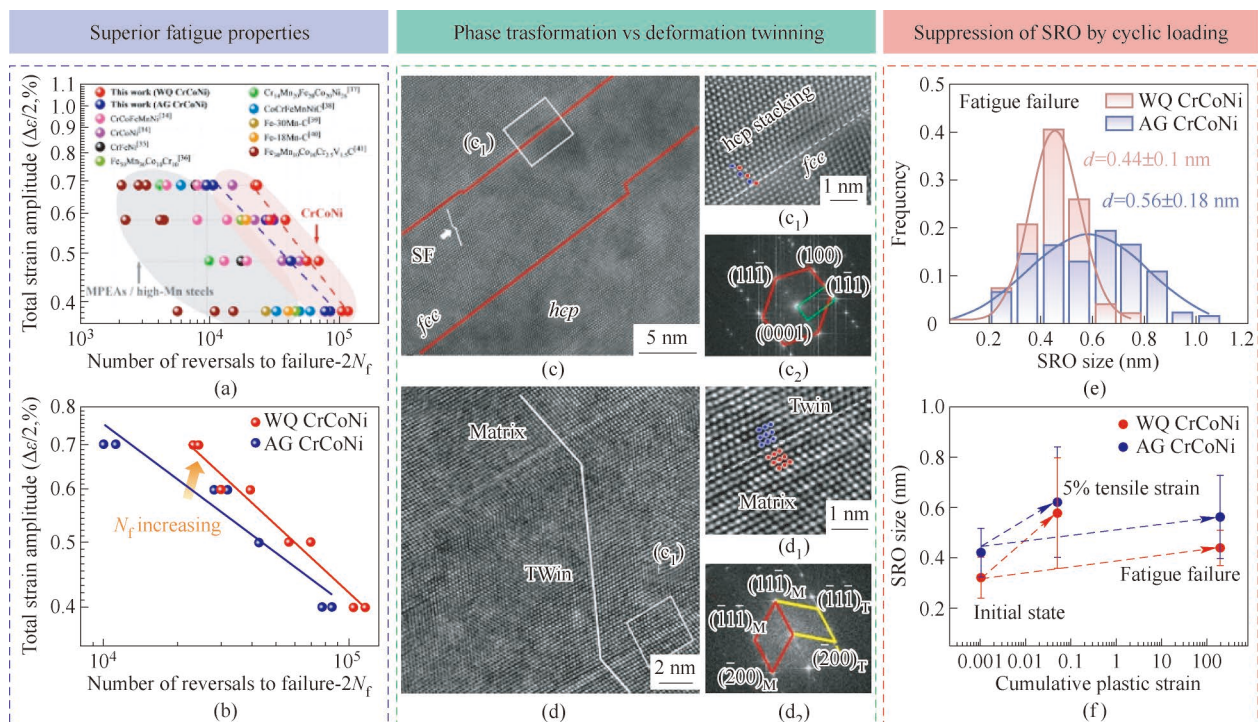


图1 不同短程有序度 CrCoNi 中熵合金在循环加载下的短程有序演变规律及相应的变形机制

2 DSL 要闻

深圳开鸿数字产业发展有限公司来校交流

2026年3月31日，深圳开鸿数字产业发展有限公司CEO王成录博士一行来校交流。学校党委书记郭海会见了王成录，中国工程院院士王国栋，党委副书记、副校长唐立新出席。

郭海对王成录一行来校交流表示欢迎。郭海表示，学校锚定中国新型工业化战略需要，确立“两个深度融入”的办学思路，在推进产业智能化、绿色化、融合化发展方面形成特色优势。学校将进一步深化双方合作，推动科技创新与产业创新深度融合，推进人工智能领域的跨界协作，共同为钢铁行业数字化转型与效能提升作出新贡献。

王成录全面介绍了深开鸿公司建设发展历程。王成录表示，构建自主可控的国产工业软件是国家重大战略，深开鸿公司愿意与东北大学聚焦人工智能+钢铁，共建科研创新平台，加强人才培养合作，共同打造钢铁智能体，不断深化双方各领域合作，在服务国家战略中一体推进教育科技人才创新。

在校期间，学校与深圳开鸿数字产业发展有限公司、归初科技有限公司举行技术交流会。

会上，王国栋指出，深入贯彻国家关于“人工智能+”行动的文件精神，推动从生成式人工智能向智能体智能转变，坚持“数据密集、智慧涌现、人机协同、目标驱动”的新科研范式，加强与深开鸿跨界融合，将开源鸿蒙系统的宝贵成果应用于钢铁材料领域，携手开辟钢铁工业智能化发展的新路径，为中国信息行业和材料行业的高质量发展注入强劲动力。

王成录表示，开源鸿蒙操作系统从设计之初就聚焦海量异构设备的智联互通，核心价值在于从底层统一数据格式，构筑高价值的数据资源；推进在工业控制领域的自主可控，一体推进硬件、软件与场景开发，构建全场域生态需要开放多元的跨界合作；立足东北大学在钢铁行业的深厚积淀、深开鸿的技术优势，协同归初科技的支持，期待共同为我国工业数字化转型书写新篇章。

深开鸿、归初科技相关技术专家与学校科学技术研究院、数字钢铁全国重点实验室、钢铁共性技术协同创新中心等相关人员参加活动。

刘振宇教授团队获评“辽宁省劳模创新工作室”

2026年4月30日，刘振宇教授团队“辽宁省劳模创新工作室”授牌仪式在实验室411会议室举行。东北大学党委副书记张皓出席仪式并授牌，校工会主席沙海影、副主席张琦，数字钢铁全国重点实验室党委书记于海钢、实验室主任孙杰及实验室领导班子成员、刘振宇教授团队骨干科研人员参加授牌活动。



张皓代表学校党委，对刘振宇教授团队获评辽宁省劳模创新工作室表示热烈祝贺，对团队长期开展钢铁冶金核心领域科研攻关取得的突出成果给予高度评价和充分肯定。张皓强调，劳模创新工作室是集聚科研人才、汇聚创新动能、传承工匠精神、培育骨干力量的重要平台，团队要以此次授牌为新起点，持续深耕核心科研领域，勇挑科研攻关重担，深化产学研协同创新，加速科研成果落地转化，助力钢铁行业高端化、智能化、绿色化转型发展，为服务学校高质量发展、国家钢铁产业重大战略需求再立新功。

刘振宇教授衷心感谢学校党委、工会及实验室长期以来对团队建设发展的关心与支持。他表示，团队将继续持续深耕主业，潜心科研创新，做好核心技术研发、科研人才培养、科研成果转化等各项重点工作，为实验室高质量发展和学校一流大学建设贡献力量。

实验室党委书记于海钢和主任孙杰表示，实验室将以此次授牌为契机，进一步凝聚科研合力、强化团队建设，聚焦国家重大战略部署和行业发展核心需求，全力攻坚关键核心技术，力争在科研创新、产业赋能、人才培养等领域取得更大突破。

东北大学自主研发国内首台高温高精铜合金气垫炉投产 突破高端铜加工关键装备技术壁垒

近日，福建广闽铜业有限公司年产3.5万吨高精铜板带项目正式投产，由东北大学数字钢铁全国重点实验室自主研发的国内首台高温高精铜合金气垫炉成功投入工业化运行。该装备的投产应用，有效破解了我国高端铜加工核心装备依赖进口的技术难题，实现高端铜合金热处理关键装备自主可控，打破了国外长期技术垄断，为我国高端铜加工产业国产化、高端化发展提供了核心技术与装备支撑。

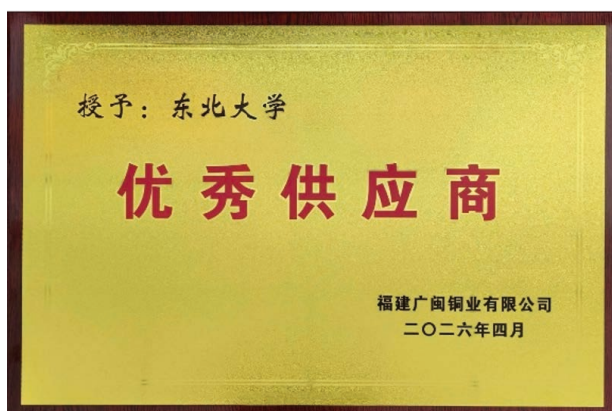
据了解，福建广闽铜业由紫金矿业集团、广州



工控集团两大行业龙头企业联合共建, 面向新能源汽车、5G 通信、高端电子等战略性新兴产业布局, 依托区域产业集群优势, 搭建了集智能生产、绿色制造、精密加工于一体的现代化铜加工生产体系。项目建设过程中, 企业坚持自主创新导向, 联合东北大学开展关键高温高精热处理技术攻关, 生产线熔铸、轧制、双面铣、热处理、精整、包装等全流程核心装备国产化升级, 整体技术水平与产品精度达到行业一流标准。

针对我国高端铜合金气垫式热处理装备存在的高温易变形、温度均匀性差、薄带悬浮稳定性差、气氛控制严苛、智能化程度低等行业痛点, 东北大学王国栋院士团队依托学校在冶金材料加工、过程智能控制、高端热处理装备研发领域的长期技术积累, 承担本次气垫炉核心研发任务。科研团队历经数年持续技术攻关, 围绕高温材料和结构设计、精密温控、带材气垫悬浮稳定运行、全流程智能调控等核心技术瓶颈开展系统性研究, 通过多物理场耦合仿真优化炉膛结构、创新研发智能运行控制系统, 成功攻克高温循环风机、高均匀性循环导流喷嘴, 带材自对中气垫喷嘴等多项关键核心技术, 实现装备整体设计、核心部件、控制算法的完全自主可控。

本次投产的高温高精铜合金气垫炉可适配紫铜、锡磷青铜、镍硅铜等多品类高端高精铜合金带材规模化生产。装备采用氮气 ($\geq 96\%$) + 氢气 ($\leq 4\%$) 混合保护气氛, 可实现 300~500 mm 宽度、0.1~1.5 mm 厚度铜带材的稳定加工, 工艺运行速度可调范围为 10~100 m/min。经工艺验证, 该装备热处理后的铜合金带材无氧化、无水痕、表面光洁无划伤, 产品成型质量优异, 装备气垫退火温度可达 850 $^{\circ}\text{C}$ 、温度均匀性精度达到不超过 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、氧分压低至 $10^{-23}\sim 10^{-22}$ bar (1 bar= 10^5 Pa), 核心性能指标成功比肩国际同类先进设备水平, 填补了国内高端精密铜合金气垫热处理装备的技术空白, 为国产高端高精铜带替代进口产品筑牢了装备基础。



广闽铜业相关负责人对东北大学的技术支撑给予高度认可, 表示该国产化气垫炉装备的成功落地与快速投产, 为项目顺利投产达产提供了关键保障, 有效解决了高端铜带材精密热处理的核心工艺难题。

此次高温高精铜合金气垫炉的成功研发与工业化应用, 是东北大学深化产学研用深度融合、推动科研成果落地转化的重要实践成果; 东北大学数字钢铁全国重点实验室团队将持续聚焦制造强国、质量强国等国家重大战略需求, 紧盯高端冶金加工装备国产化核心目标, 持续深化行业关键技术攻关, 加强与行业龙头企业的协同创新, 不断推动更多原创性、引领性科研成果转化为产业生产力, 助力我国有色金属加工产业高端化、智能化、国产化高质量发展。

东北大学宽厚板轧机镰刀弯控制系统研发与应用取得新进展

宽厚板在轧制过程中, 由于轧件对中偏差、温度分布不均、来料楔形以及轧机两侧刚度差异等因素的综合影响, 钢板在长度方向上极易出现侧向弯曲, 产生镰刀弯缺陷。该缺陷不仅增大切边损失、降低成材率, 严重时还会导致设备损坏事故, 是制约宽厚板产品质量与生产效率提升的主要技术瓶颈, 也是宽厚板生产线长期存在且难以根治的典型行业难题。传统的镰刀弯控制依赖人工经验调节辊缝偏差, 存在响应滞后、控制一致性差、劳动强度大等局限, 难以获得稳定的调整效果, 产品成形质量稳定性难以保障。随着宽厚板高端化、精品化生产要求持续提升, 行业对具备高稳定性、高实时性、高精度度的自动镰刀弯智能控制技术与成套控制系统的应用需求愈发凸显。

近年来, 随着机器视觉与数据驱动融合技术的发展, 为镰刀弯智能控制提供了全新技术路径。以王君、何纯玉、矫志杰、吴志强、赵忠老师为核心的东北大学数字钢铁全国重点实验室中厚板智能化团队, 在王国栋院士悉心指导下, 依托团队在中厚板轧机自动化控制领域的长期工程实践和技术积累, 综合运用机器视觉检测、机理-数据联合驱动建模、多智能体协同控制等技术, 研发了涵盖“检测—预测—决策—控制”全流程闭环的镰刀弯智能控制系统。该系统首次在国内 5 m 宽厚板轧机实现了线上成功应用, 显著提升了国内宽厚板板形质量及轧制过程的智能化控制水平。

1. 基于机器视觉的镰刀弯高精度检测

钢板镰刀弯的高精度在线检测是智能控制的前提条件。针对现场设备遮挡、轧件高温辐射、氧化铁皮、水汽干扰等恶劣工况, 研发了由多组高清工业相机、冷却防护装置和图像处理单元构成的视觉检测系统。基于自适应迭代图像处理算法增强钢板边缘, 有效抑制了复杂工况对检测过程的干扰; 利用图像关键点特征匹配与仿射变换技术实现了对多相机采集图像的时空匹配与高精度拼接融合, 获得了对钢板镰刀弯精确的量化表征。系统检测周期不超过 30 ms, 测量偏差不超过 ± 5 mm, 满足实时闭环控制需求。

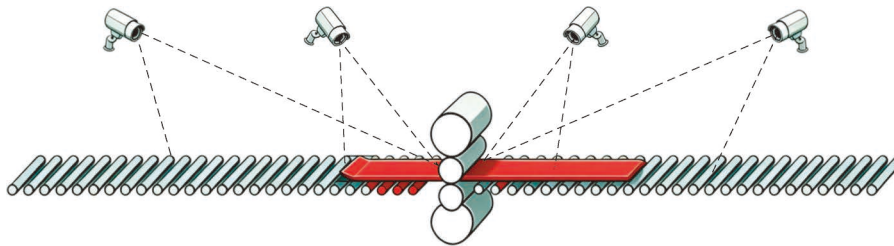


图1 钢板镰刀弯检测系统

2. 机理 - 数据驱动的镰刀弯预测模型

镰刀弯形成影响因素复杂，依靠机理模型难以精准描述其非线性演化规律。项目团队将轧制工艺机理剖析与现场生产大数据深度结合，运用混合驱动建模技术，成功构建多层次镰刀弯趋势预测体系。依托于自主研发的大数据平台实时采集生产数据，通过分析轧制力、辊缝、厚度、温度等工艺参数，构建表征变形不对称程度的机理特征参数，降低镰刀弯预测模型对纯数据样本量的依赖，提高了跨规格、跨钢种的泛化能力。同时，针对宽厚板往复轧制的特点，引入注意力机制捕捉道次间镰刀弯存在的时序关联与累积效应，获得工艺参数的时序波动特征对当前镰刀弯预测贡献的影响权重，快速解析轧机刚度差与辊间隙等影响镰刀弯的关键参数，实现对镰刀弯的精准预测，为及时预判镰刀弯缺陷、快速调整轧制工艺、抑制镰刀弯持续恶化提供可靠理论依据与技术支持。

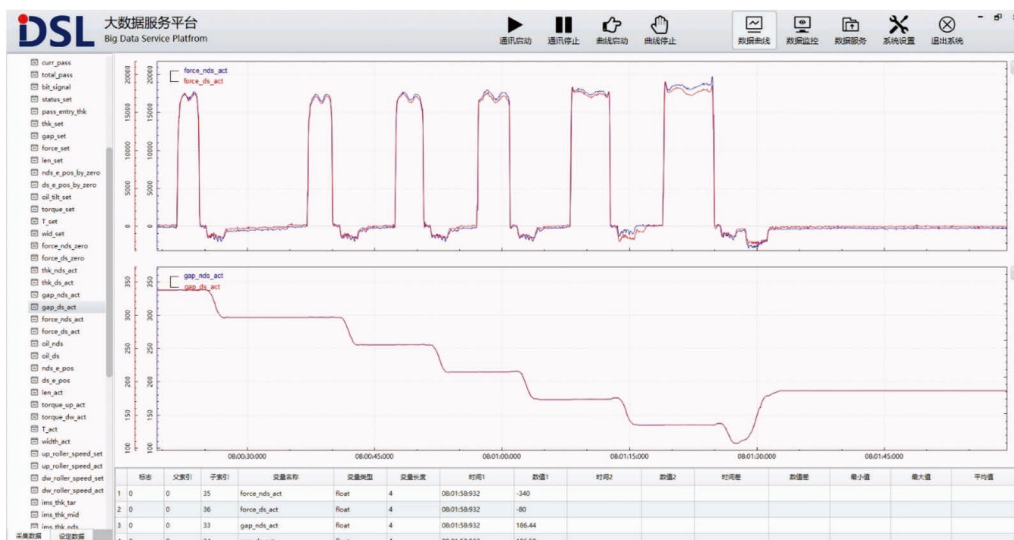


图2 工业大数据平台

3. 镰刀弯智能控制系统研发

镰刀弯智能控制系统采用预控与反馈双闭环控制架构。预控模型基于轧机弹跳模型与机器学习模型为核心，在道次开始前预先计算最优辊缝倾斜补偿值，从源头抑制镰刀弯的发生；反馈模型以机器视觉实时检测的轧件远端横移量作为镰刀弯反馈信号，动态整定辊缝倾斜补偿量，有效抵消系统大滞后带来的控制偏差，满足工业生产现场工艺约束条件。双闭环协同使镰刀弯系统的响应速度与稳态精度得到兼顾。

为解决钢板温度波动、轧辊磨损、水印温差等因素造成的镰刀弯突发异常问题,研发了基于离线强化学习驱动的智能自学习优化策略。以钢板镰刀弯状态为环境状态空间、辊缝调整量为动作空间、校正效果为奖励函数,基于时序差分算法从历史数据中提取最优调控策略。该方法在离线框架下避免了在线探索的安全风险,随经验库增长持续提升自适应能力,形成镰刀弯闭环自学习机制。

将镰刀弯控制系统的各功能模块封装为具有独立感知和决策能力的智能体,通过数据共享与消息传递机制协同工作:①视觉感知智能体负责图像采集与特征提取,自动识别钢板边部特征并输出镰刀弯指标;②状态辨识智能体融合视觉信息与工艺参数,动态辨识轧机工况与镰刀弯状态;③决策优化智能体综合调用预控、反馈和强化学习模型,在线生成最优辊缝差调整指令;④执行协同智能体基于大数据平台下发指令并监控执行效果,同时反馈给其他智能体形成闭环。各智能体具备自学习接口,可在线或离线更新策略模型,构成了“感知-辨识-决策-执行-学习”的持续进化闭环。



图 3 镰刀弯控制系统

4. 系统集成与应用效果

基于宽厚板生产线对镰刀弯管控的实际应用需求,依托现场总线高速通信技术、镰刀弯智能感知手段以及预控与反馈协同精准调控模型,研发出多模型融合架构的镰刀弯闭环智能控制系统,完成对宽厚板镰刀弯全流程自动化调控。所开发的自动镰刀弯控制系统已在国内 5 m 宽厚板生产线进行了成功应用,覆盖了最薄 6 mm,最长 46 m 钢板的自动镰刀弯自动调控,系统闭环响应不超过 50 ms,镰刀弯控制精度不超过 10 mm/10 m,已初步实现对传统人工调控方式的替代。目前,镰刀弯系统可持续汇聚现场生产海量运行数据,依托数据驱动实现模型自主学习与动态优化迭代,精准完成轧机辊系运行状态智能辨识,持续优化调控策略,进一步提升镰刀弯整体控制精度与稳定性能。



图4 基于自动镰刀弯控制的8 mm钢板控制效果

宽厚板镰刀弯智能控制系统的成功研发与工业化落地，是东北大学深化产学研用协同融合、加速冶金领域前沿科研成果产业化转化的标志性实践成果。东北大学数字钢铁全国重点实验室中厚板智能化科研团队将持续紧扣制造强国、质量强国等国家重大战略部署，锚定宽厚板轧线智能控制攻坚目标，持续深耕轧制领域关键核心技术攻关，深化与行业骨干企业产学研协同创新，将更多原创性、实用性科研技术成果转化为实际生产力，全面助力我国钢铁行业朝着数字化、绿色化、高质化、强链化方向稳步迈进。

东北大学与中国商飞举行技术交流会



2026年5月29日，东北大学与中国商用飞机有限责任公司技术交流会在数字钢铁全国重点实验室411会议室举行。中国商飞制造总师、业务总监姜丽萍，C919型号副总设计师章骏，东北大学党委常委、副校长徐伟，中国工程院院士、钢铁共性技术协同创新中心主任王国栋等双方代表出席会议。

徐伟在致辞中介绍了东北大学的办学定位与发展目标。他表示，学校致力于在新型工业化进程中发挥引领作用，建设中国特色世界一流大学。中国商飞是国家骄傲，使命光荣、责任重大。数字钢铁全国重点实验室在王国栋院士带领下，在钢铁材料全流程创新方面国内首屈一指，同时在轻合金等领域也有良好基础。他希望东北大学能够在中国大飞机事业中贡献智慧和力量。

姜丽萍在致辞中回顾了双方合作历程。她介绍，大飞机先进材料联盟于2021年成立，东北大学于2024年正式加入。联盟现有33家单位，涵盖国内主要材料工艺结构相关国家重点实验室。联盟旨在推动民用飞机材料自主可控，解决材料应用中的机理问题。她表示，联盟每年通过需求对接了解各高校及实验室的研究工作，经学术委员会评审后择优立项，希望东北大学发挥学科优势，持续为大飞机材料研发提供技术支撑。

王国栋院士在讲话中表示，服务国家战略是大家共同的责任，要深入贯彻中央关于科技自立自强的部署要求。他指出，实验室在钢铁材料及轻合金领域拥有深厚积累，期待与中国商飞在材料研发、工艺优化等方面开展实质性合作，共同推动研究成果在国产大飞机上的应用，为国家和行业发展贡献力量。

会议期间，双方围绕东北大学相关科技成果进行了深入探讨。中国商飞上飞院材料工程部、东北大学科学技术研究院、材料科学与工程学院、材料电磁过程研究教育部重点实验室、工业智能与系统优化国家级前沿科学中心、数字钢铁全国重点实验室等相关工作负责人和代表参加交流。

DSL 实验室成功举办 2026 年科技活动周公众开放活动

为深入贯彻《科技部 中央宣传部 中国科协关于举办2026年全国科技活动周和全国科技工作者日活动的通知》精神，辽宁省科学家精神教育基地——数字钢铁全国重点实验室（DSL）于5月24日至31日期间，以“奋进‘十五五’科技谱新篇”为主题，面向社会公众开展了系列科普活动。百余名校内外师生及科技爱好者参与其中，共同感受钢铁材料与数字技术融合的创新魅力。

国际学术前沿交流

2026年5月27日，实验室邀请英国南安普顿大学 Pedro Rivera 教授、兰卡斯特大学温伟教授分别作专题报告。两位专家围绕“重载轴承疲劳失效机制”“金属材料多尺度力学模拟”等国际学术热点展开深入讲解，与会听众对相关领域的最新进展与未来趋势有了更深入的了解。



产学研协同创新讲座

活动期间，实验室何纯玉副教授、李海军副教授分别作《中厚板轧线智能化控制》《奥氏体不锈钢热轧板卷在线固溶退火技术创新与产业化应用》报告，系统介绍了实验室取得的关键技术突破与产业化实践，展示了从基础研究到工程应用的全链条创新成果。

科研场景实地探访

在实验室开放环节，参观者走进中试车间、数字化虚拟现实平台与检测中心。实验室教师结合现场设备运行，让参观者深切感受到实验室“自主创新、钢铁报国”的精神传承与时代担当。





背景介绍：

2026年是“十五五”开局之年，是深入推进科技强国建设的关键之年。5月24—31日是第二十六个全国科技活动周，5月30日是第十个全国科技工作者日。深入学习贯彻习近平总书记关于科技创新的重要论述，广泛宣传习近平总书记勉励广大科技工作者厚植报国情怀、发扬奋斗精神的重要指示，大力弘扬科学家精神，强化广大科技工作者攻坚克难、勇攀高峰的爱国之情和强国之志，激励广大科技工作者在推进高水平科技自立自强、建设科技强国新征程上建功立业，科技部、中央宣传部、中国科协将共同主办2026年全国科技活动周和全国科技工作者日活动。