轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
钢铁共性关键工艺技术与装备研发创新平台

简报

NEWSLETTER

1
2024 年（季刊）
Vol.12

内容提要

欢迎访问
http://www.ral.neu.edu.cn
查看更多内容

1 头条信息

RAL 方案入选“智能制造系统解决方案揭榜挂帅项目”

近日，工信部公示了 2023 年度智能制造系统解决方案揭榜挂帅项目名单，东北大学《钢铁全流程数字孪生与智能制造系统》入选 2023 年度智能制造系统解决方案揭榜挂帅项目。

钢铁工业为大型复杂流程工业，全流程各工序均为“黑箱”，实时信息极度缺乏，属于严重的“不确定性”生产过程。东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室和 2011 钢铁共性技术协同创新中心长期从事钢铁全流程数字化研究工作，以工业互联网为载体，以数字孪生为核心，以智能优化为手段，面向钢铁全生产流程、全应用场景数字化转型，研发各工序数字化关键技术，促进我国钢铁行业转型升级。

本项目将构建钢铁材料创新基础设施，建设底层实体设备平台、边缘数字化核心平台和资源配置与管理平台。采用数据驱动、软件定义、数据感知 / 数据处理的双层架构，融合钢铁生产全流程大数据，构建高保真度数字孪生模型，破解生产过程“黑箱”，构建各工序与全流程信息物理系统，实现生产过程全局一体化调控，解决生产过程“不确定性”问题。项目将充分发挥数字技术的放大、倍增、叠加作用，大大加快钢铁行业数字化转型的速度，降低钢铁行业数字化转型的成本。

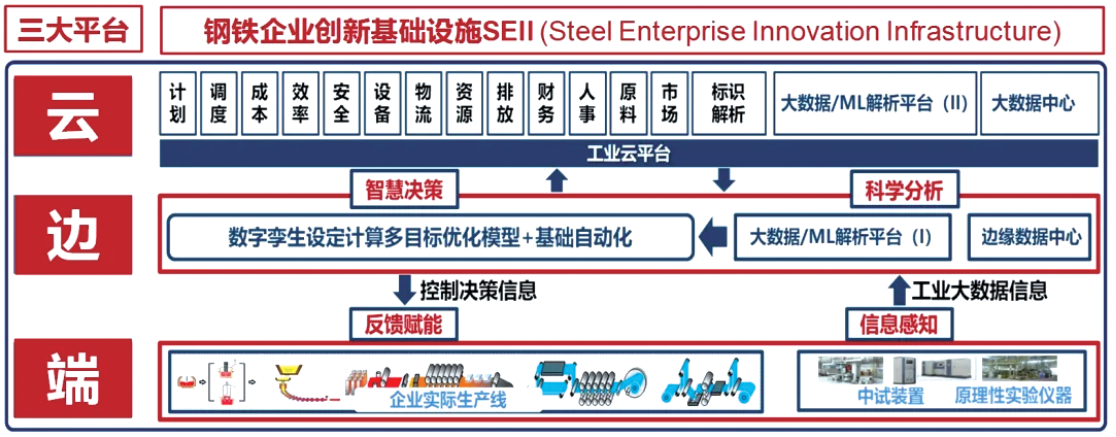


图 1　工业互联网架构下的钢铁企业创新基础设施

据悉，智能制造系统解决方案揭榜挂帅项目由工业和信息化部、市场监管总局联合组织开展，主要任务是面向重点行业领域智能工厂和智慧供应链建设需求，聚焦 21 个智能制造系统解决方案攻关方向，发掘培育一批掌握关键核心技术、具备较强自主可控供给能力的优势单位，推进工艺、装备、软件、网络技术的深度融合，突破一批先进适用、可大规模复制推广的智能制造系统解决方案，提升专业化、标准化的智能制造集成服务能力。

推进钢管行业颠覆性创新，王国栋认为——面临三大难题　寻求三大突破口

“目前，钢管行业推进颠覆性工艺创新、绿色发展面临管坯芯部质量差、内壁质量差、缺少在线组织调控手段三大难题，需要重点解决。针对此三大难题，提出连铸坯凝固组织调控、铸坯直接穿孔高温再结晶控轧组织调控和热轧后控制冷却组织调控 3 个绿色化的系统解决方案。”在 3 月 20 日举办的 2024 第二届中国钢管产业创新发展大会上，中国工程院院士、东北大学教授王国栋在做《追求未来的钢管行业探索未知的钢管行业》主题报告时，如是指出了钢管行业面临的瓶颈问题与解决方案，并提出通过数字化转型赋能钢管行业绿色化、高质化和强链化发展。

三大难题对应三大突破口

王国栋表示，目前钢管行业推进颠覆性工艺创新、绿色发展面临三大难题。

一是管坯芯部质量差。连铸坯凝固及冷却至室温后形成严重缩孔和中心疏松，芯部集中杂质和合金元素，严重影响最终钢管的质量。

二是内壁质量差。因冷却后再加热的连铸坯心部存在疏松、偏析等质量缺陷，在顶头到达之前钢管内部即已开裂，造成内壁折叠和裂纹等缺陷，降低了内壁质量，并严重影响钢管的整体使用性能和承载能力。同时，连铸坯冷却后重新加热穿孔、轧制，需要额外的能源供给。

三是钢材组织性能调控完全依靠合金与离线热处理，缺少组织调控手段。轧制和冷却过程组织调控手段缺失或落后，组织性能调控完全依靠高度合金化 + 离线热处理，成本高、消耗大、质量差、效率低。

王国栋提出，面对三大难题，钢管行业可以从三方面进行颠覆性创新，寻求突破口。

一是连铸坯凝固组织调控。“这也包括三方面的技术内容。”王国栋介绍，可以采用电磁搅拌、连铸坯凝固末端重压下、电磁旋流水口等技术，消除管坯中心缩孔、疏松等缺陷和宏观偏析，提高铸坯芯部质量。

二是连铸坯直接穿轧大变形控轧。王国栋介绍，在实际生产过程中，管坯芯部的严重疏松和杂质偏析等缺陷，是在其由高温冷却的室温过程中形成的。它们是穿孔时造成内壁缺陷的根源。如果采用铸坯免加热直接穿孔，在芯部疏松和杂质偏析形成之前，对高温的芯部金属进行穿孔和碾压变形，实现高温动态再结晶控制轧制，并避免了顶头前铸坯芯部开裂，故可以获得细晶、均匀、无缺陷的内壁组织。铸坯直接穿孔轧制，利用了高温再结晶技术从根本上改变了钢管内部的组织和性能。为了在铸坯穿孔过程中使铸坯的表面和芯部都获得必要的温度，建议综合采用反射式保温罩、提高拉速、合理选择铸坯火切位置等措施，控制铸坯在切断点的芯部温度在 1300 ℃左右，表面温度在 1000 ℃左右。由于温度较高、材料可塑性强，再加上大变形锻压过程，钢管内壁及整个断面的质量都会大幅提升。

三是轧后在线控制冷却进行组织调控。王国栋介绍，东北大学和宝钢合作，借鉴板材控轧控冷技术的

经验，依托宝钢鲁宝 PQF460 机组，在国际上率先研发成功热轧无缝钢管控制冷却技术，在工艺减量化、合金减量化以及性能高质化等方面体现出显著成效。这标志着热轧无缝钢管组织性能调控进入新阶段。该技术作为热轧无缝钢管颠覆性的组织调控手段，突破了传统钢管生产工艺的技术瓶颈，开辟了热轧无缝钢管高效组织调控、实现高质量发展的新路径。

夯实基础设施底座，推进数字换脑、模型换代

王国栋表示，钢铁工业为大型复杂流程工业，巨大的不确定性是钢铁生产过程面临的重大挑战。在此背景下，数字化转型成为钢铁行业解决上述问题的关键。钢铁行业要按照习近平总书记指示，夯实数字底座，实行“人工智能 +”，建设智能化综合性数字信息基础设施，智改数转，推动数字换脑、模型换代，建成生成式 AI（人工智能）大模型，低成本、高效率、零风险地实现数字化转型，用数字化赋能绿色化、高质化、强链化。

钢管是钢铁行业重要产品，为了突破钢管行业的三大技术瓶颈、实现钢管行业的高质量发展，钢管企业必须尽快建立自己的企业数字化创新基础设施，即数字化转型的底座。他介绍，钢铁企业创新基础设施包括：一网，即工业互联网；三平台，即底层实体设备平台（端）、边缘数字化核心平台（边）、资源配置与管理云平台（云）；四功能，即绿色化转型、数字化转型、高质化发展、强链化运行。该创新基础设施让数据在整个系统中闭环自动流动，通过状态感知、实时分析、科学决策、精准执行实现钢铁生产过程的自组织、自适应、自学习、高度自治的智能化控制，并对资源进行优化配置和管理。大量蕴含在物理空间中的隐性数据经过状态感知被转化为显性数据，进而能够在信息空间进行计算分析，将显性数据转化为有价值的信息。不同系统的信息经过集中处理形成对外部变化的科学决策，将信息进一步转化为知识，通过最优化设计应用于物理空间，形成一个闭环赋能循环系统，使得物理空间生产过程更加智能、资源调度和设备运维更加合理顺畅，各环节智能协同效果更加优化。

最后，王国栋为包括钢管行业在内的钢铁企业推进数字换脑、模型换代、开发工控大模型、实现新型工业化提出 4 点建议。

一是夯实数字底座。他建议，一方面组织企业建设钢铁企业新型信息基础设施，扩大工业感知网络覆盖面，打造海量物联接入能力；另一方面聚焦数字化转型、智能化发展、工业控制大模型系统等重点环节，增强源头技术供给。

二是强化应用牵引。王国栋建议，利用钢铁行业数据资源、应用场景和反馈赋能的优势，智改数转、数字换脑、模型换代，建立并应用钢铁行业大模型系统，制订项目目标、树立标杆、建立评价标准，推进数字化、智能化技术全方位、深层次赋能钢铁行业新型工业化。

三是加强技术服务。“通过产学研深度融合、联合组队等方式，推动装备、软件、网络等成组连线创新突破，提出系统解决方案；开展技术交流和推广工作，促进先进钢铁企业数字化推广应用。”他说。

四是营造良好生态。他建议，加快钢铁企业数字人才培训和关键标准研制推广，建设数字化转型开源生态，同时深化工业互联网安全管理。

“未来 5 年，建成 15~20 条全流程一体化企业数字化转型生产线，完成钢铁产业数字化转型标准与规范的制定。未来 10 年，基本完成数字化转型，建成钢铁行业管理控制优化大模型，形成国家钢铁企业创新基础设施体系，实现行业高质量发展。”他最后说。

2 RAL 要闻

RAL 成果入选 2023 年度钢铁工业十大技术要闻

近日，《世界金属导报》作为国内钢铁行业权威的专业媒体，重磅揭晓了“2023 年度钢铁工业十大技术要闻”。经过网络投票、行业知名专家评选等环节的层层筛选，轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（RAL）“2000 MPa 级超高强钢增塑新机制问世”成果榜上有名。

成果介绍

2000 MPa 级超高强钢增塑新机制问世

2023 年，东北大学创新提出“马氏体拓扑学结构设计 + 亚稳相调控”的协同增塑新机制，解决了超高强钢塑 / 韧性低的共性难题，成功制备出系列低成本 C-Mn 系新型超高强钢，打破了超高强钢对复杂制备工艺和昂贵合金成分的依赖，也突破了现有 2000 MPa 级超高强钢性能边界。研究团队构筑出一种全新拓扑学双重有序排列的马氏体和多尺度亚稳奥氏体的纳米级多层次组织结构。该组织结构通过多种增强增塑机制，实现了 1600~1900 MPa 屈服强度、2000~2400 MPa 抗拉强度和 18%~25% 均匀伸长率的极致性能。此外，研究团队进一步提出“低强度成形 + 超高强度使用”新策略，即通过成分设计调节马氏体与奥氏体的相比例，零件经热处理后可获得屈服强度高达 2200 MPa、均匀伸长率 >10% 的使用性能，大幅度提高了零件的服役安全性。

上述新理论可应用于轧制、锻造等多个领域，以生产制备大尺寸轴类、薄板、厚板等，同时适用于不同的合金体系，其置换型元素 Mn、Ni、Cr 可替换，以提升材料韧性、耐磨性及耐腐蚀性等，满足不用的应用场景需求。

点评

该项目创新提出超高强钢增塑新机制，并取得了系列关键技术创新，突破了 2000 MPa 级超高强钢的性能极限，具有重要的科学价值，研究成果获得了 *Science* 期刊认可，引领了超高强塑性钢新的发展方向。同时，形成的科学理论可拓展应用于多个加工领域及合金体系，对推动超高强钢的低成本制备和大规模化应用具有重大现实意义。

背景介绍

《世界金属导报》作为国内钢铁行业最具权威性的专业媒体，通过网络征集、自主推荐、报社初选、行业知名专家评选，最终确定了“2023 年度钢铁工业十大技术要闻”，内容涵盖钢铁生产主流程工序重大技术创新成果，并于 2023 年 12 月 30 日正式发布。

RAL 实验室青年教师杨达朋入选 2023 年度中国汽车工程学会“青年人才托举工程”

近日，2023 年度中国汽车工程学会“青年人才托举工程”人选名单公布，轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（RAL）青年教师杨达朋入选。

根据《关于开展中国汽车工程学会“青年人才托举工程项目”2023 年度项目申报工作的通知》（中汽学编〔2023〕199 号）要求，中国汽车工程学会开展 2023 年度“青年人才托举工程”遴选工作。2023 年 9~11 月，经过广泛推荐、形式审查、函评等环节，共计遴选出 18 位青年人才进入终评答辩环节。2023 年 12 月 11 日，2023 年度中国汽车工程学会“青年人才托举工程”终评答辩会以线上汇报 + 线下评审的形式在北京召开，最终遴选出 10 位青年人才进入 2023 年度中国汽车工程学会“青年人才托举工程”人选名单。

据悉，中国汽车工程学会“青年人才托举工程”（简称“中汽学青托工程”），旨在探索新的人才培养模式和评价机制，培育造就大批优秀汽车青年科技人才，打造国家高层次汽车科技创新人才后备队伍，为建设汽车强国、实现中国式现代化提供重要人力资源保障。本项目面向有较大创新能力和发展潜力的 32 周岁及以下汽车青年科技人才。重点支持自主科研选题和设计，帮助托举对象在创造力黄金时期做出突出业绩，成长为品德优秀、专业能力出类拔萃、社会责任感强、综合素质全面、具有国际视野的学术带头人，成为汽车产业高层次领军人才和高水平创新团队技术负责人的重要后备力量。

第十四届辽宁青年科技奖揭晓！ 2 位东大人获奖！

近日，中共辽宁省委组织部、辽宁省人力资源和社会保障厅、辽宁省科学技术厅、共青团辽宁省委员会、辽宁省科学技术协会联合印发《关于表彰第十四届辽宁青年科技奖获奖者的决定》。东北大学资源与土木工程学院孙永升、轧制技术及连轧自动化国家重点实验室孙杰获第十四届辽宁青年科技奖，孙永升获第十四届辽宁青年科技奖“十大英才”称号。

孙永升，东北大学教授、博士生导师，国家优秀青年科学基金获得者、霍英东青年教师基金获得者、“兴辽英才计划”青年拔尖人才。主要从事战略矿产资源清洁高效利用领域的教学和科研工作；主持国家重点

研发计划青年科学家项目、国家自然科学基金及服务企业科研项目 16 项，获国家和省部级科技奖励 5 项、省级教学成果奖 3 项，授权发明专利 20 余项，发表学术论文 70 余篇，出版国家出版基金资助的学术专著 2 部，获强国青年科学家提名奖、沈阳市优秀科技工作者等荣誉。

孙杰，东北大学教授、博士生导师，国家级青年人才、辽宁省青年拔尖人才，国家重点研发计划项目负责人，辽宁省第十四届人大代表。主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重点项目等纵向项目 16 项，主持或技术负责轧制控制系统研发项目 30 余项。发表学术论文 160 余篇，主编专著 1 部，授权发明专利 50 余项，登记软件著作权 20 余项。牵头成果经多位院士评价为“总体技术达到国际领先水平”，获省部级科技进步一等奖 3 项（排 1、2、6）。

据悉，为深入贯彻落实习近平总书记在两院院士大会、中国科协十大上的重要讲话精神，立足新发展阶段、贯彻新发展理念，深入实施人才强国战略、创新驱动发展战略，全力激发我省广大青年科技工作者的创新创造热情，造就一批引领科技进步和学科发展的青年学术和技术带头人，为辽宁全面振兴、全方位振兴提供坚强人才支撑和智力支持，由中共辽宁省委组织部、辽宁省人力资源和社会保障厅、辽宁省科学技术厅、共青团辽宁省委员会、辽宁省科学技术协会联合开展本届辽宁青年科技奖评选工作，共评选出 41 名同志为第十四届辽宁青年科技奖获奖者人选，其中 10 名同志为第十四届辽宁青年科技奖“十大英才”人选。

3 科研进展

东北大学徐伟教授团队《Acta Materialia》：增材适用型镍基合金设计研发

增材制造技术因其可实现复杂构件高效成型的巨大优势，越来越多地被应用于航空航天精密结构件的制备。高温合金是目前最具价值的增材制造关键材料之一。然而现有的高性能高温合金复杂的成分体系与增材制造非平衡、强约束的特殊工艺过程不匹配，普遍存在开裂、性能不达预期等问题，难以实现工程应用。如何开发适应增材制造特征冶金条件的专用高性能镍基合金，已成为目前制约航空关键装备选材的瓶颈问题。

东北大学轧制技术与连轧自动化国家重点实验室徐伟教授团队针对增材适用镍基合金的研发问题，基于材料基因工程方法，充分利用高通量计算技术结合热动力学模拟，构建了镍基合金基于多目标优化的成分设计模型，在极广域成分空间（10^6 解集空间）中快速甄别筛选出优化方案，大幅提升了增材适用型镍基合金的研发效率。创新性的引入相界作为控制元素局域偏析行为的位点，并综合考虑裂纹敏感性判据以优化合金的打印性能，在此基础上，同时考虑合金组织稳定性、力学性能及耐氧化性能的多重判据，设计出新型增材制造适用的高性能镍基合金，新合金可以在相当宽的增材工艺窗口下打印而不出现裂

纹，具有很好的打印工艺鲁棒性，并且制备态合金的力学性能及耐氧化性能可以对标商用合金。应用相界调控元素偏析的合金设计策略可以推广于其他多种合金元素体系，并且可以进一步推广应用于增材专用的多体系合金开发，为材料基因工程方法的落地应用提供了良好示范。相关工作以题为“Robust additive manufacturable Ni superalloys designed by the integrated optimization of local elemental segregation and cracking susceptibility criteria”发表在 Acta Materialia。

论文链接 : https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.119658

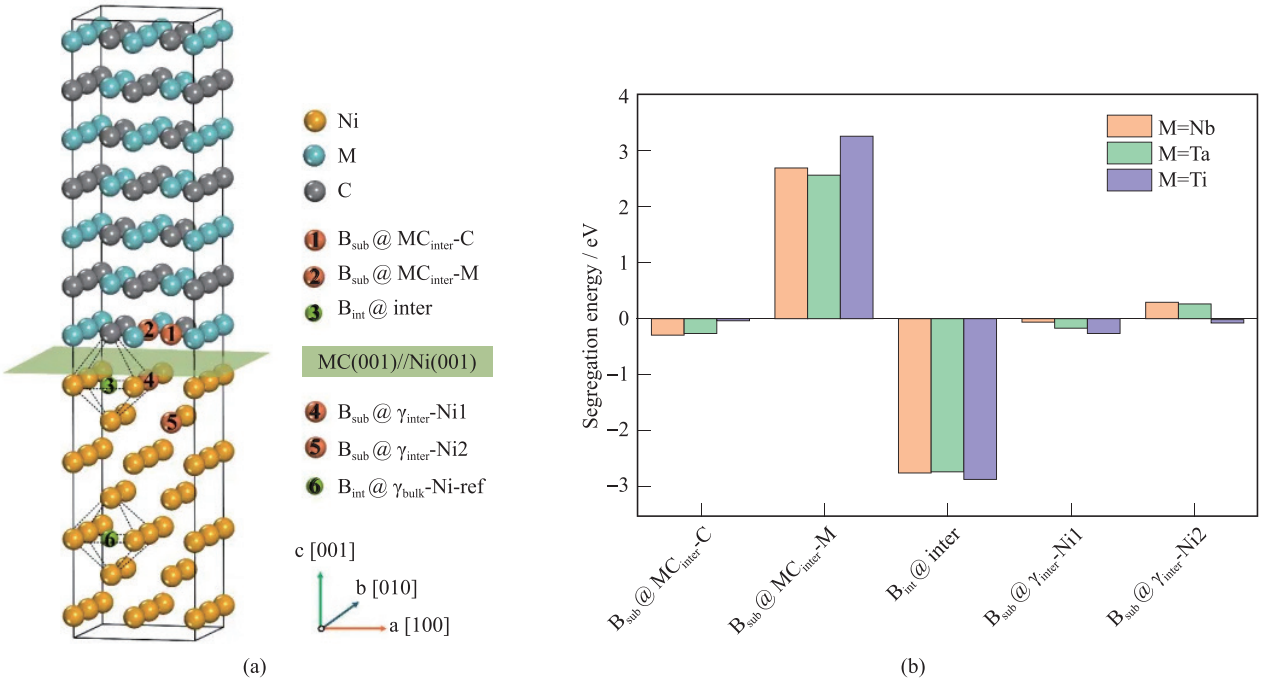


图 1　第一性原理构建了碳化物 / 基体相界面的稳定超胞构型（a）和硼元素在不同位置的偏析能，验证了硼原子在相界面的偏析倾向（b）

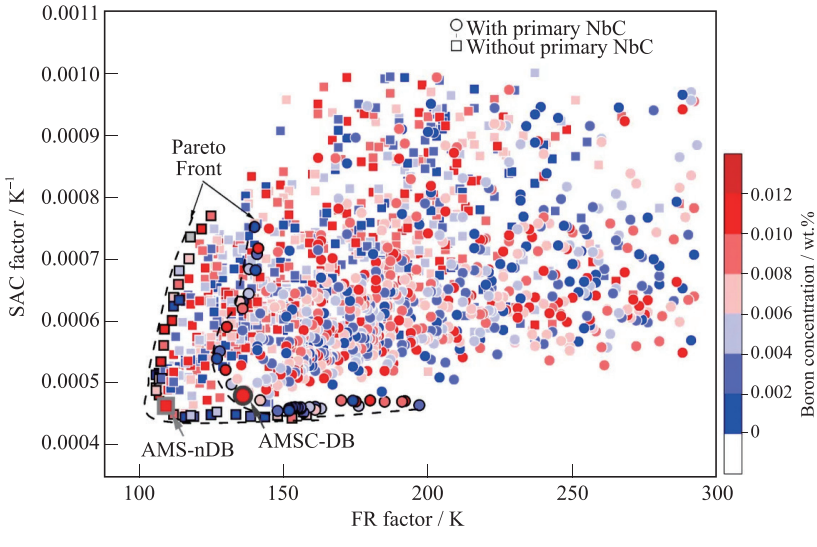


图 2　考虑裂纹敏感性准则及服役性能筛选准则后计算获得的所有合金成分点（圆形和方形点分别代表有和没有初生碳化物的成分，颜色代表硼元素含量）

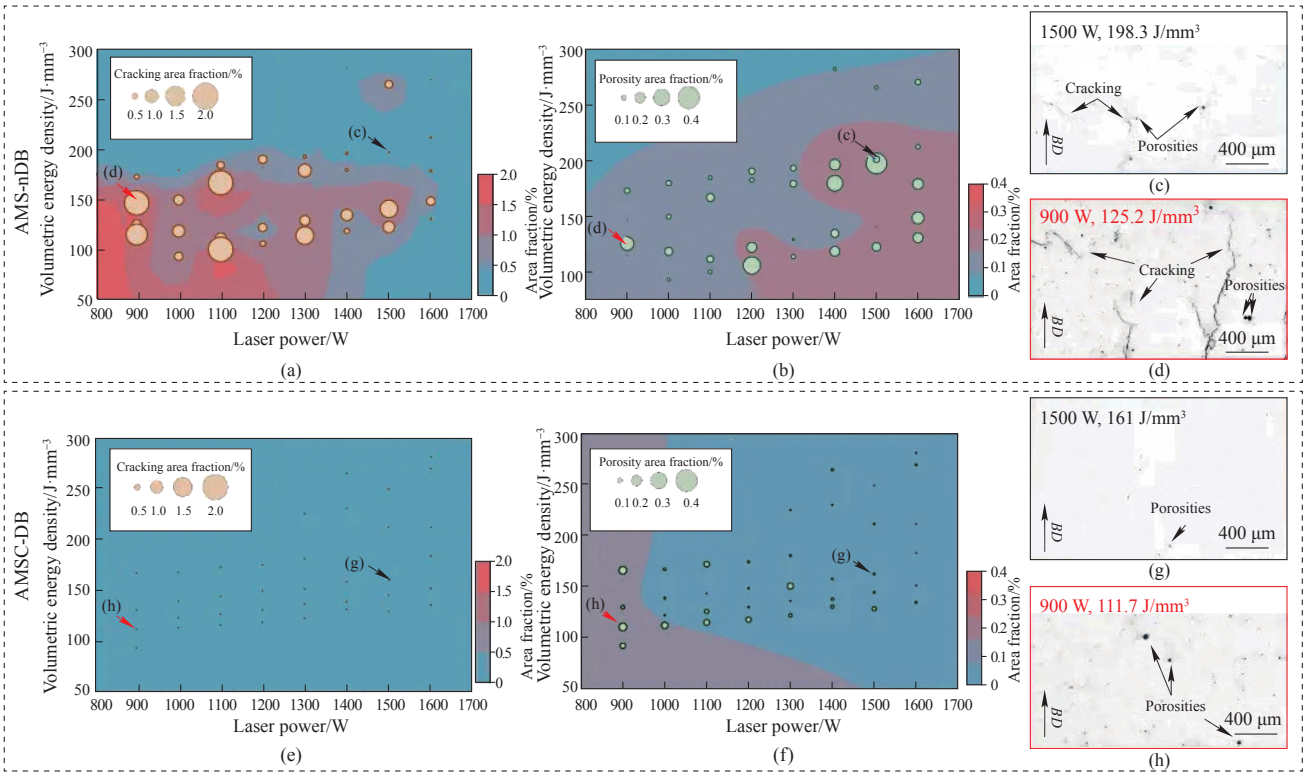


图 3　气泡图显示在宽打印工艺参数下新设计的 AMS-nDB 合金 (a)(b) 和 AMSC-DB 合金 (e)(f) 的裂纹面积分数和孔隙率，光学显微照片分别显示 AMS-nDB 合金 (c)(d) 和 AMSC-DB 合金 (g)(h) 最低和最高缺陷分数对应的样品形貌

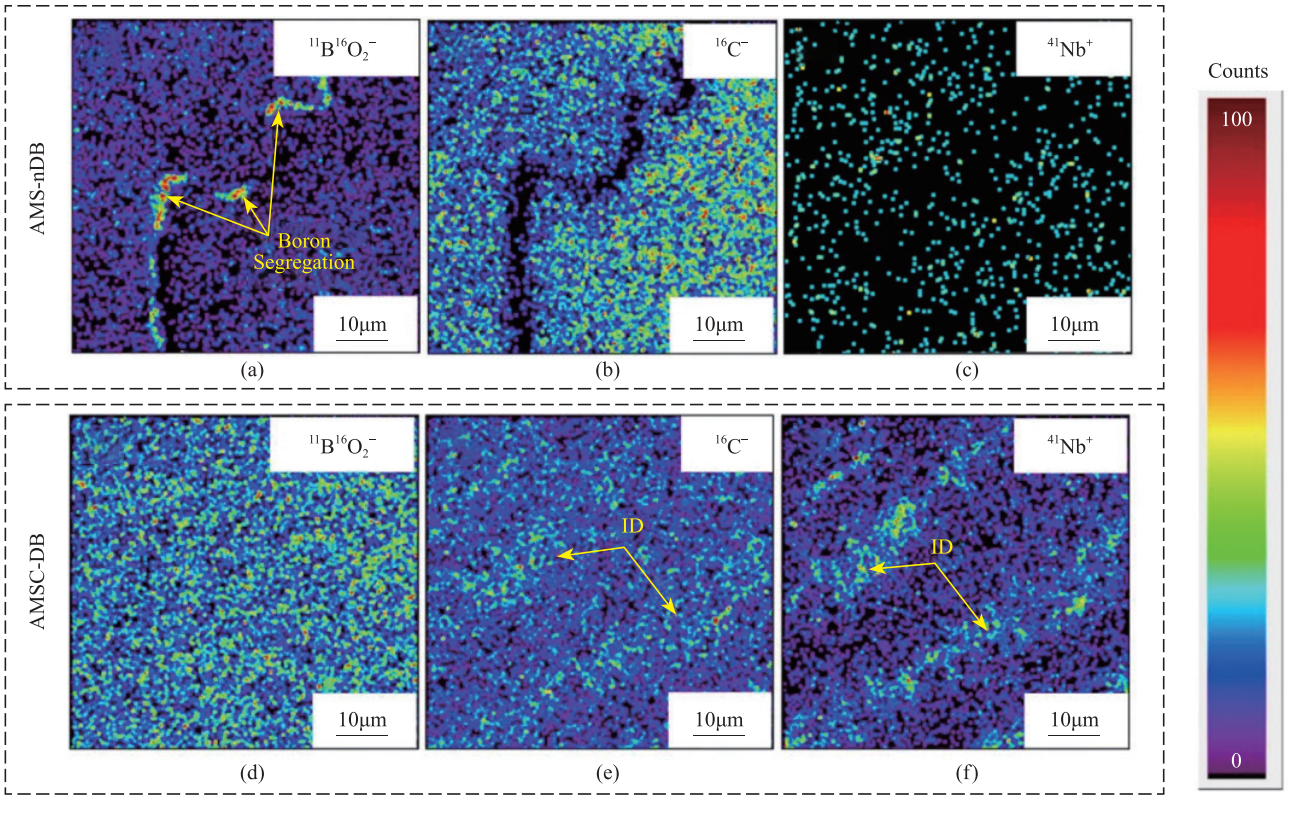


图 4　二次离子质谱面扫结果显示 AMS-nDB 合金 (a)~(c) 和 AMSC-DB 合金 (d)~(f) 的 B、C、Nb 元素分布

（AMS-nDB 合金沿裂纹路径出现了硼元素富集，而 AMSC-DB 合金未发现硼元素的宏观偏析行为）

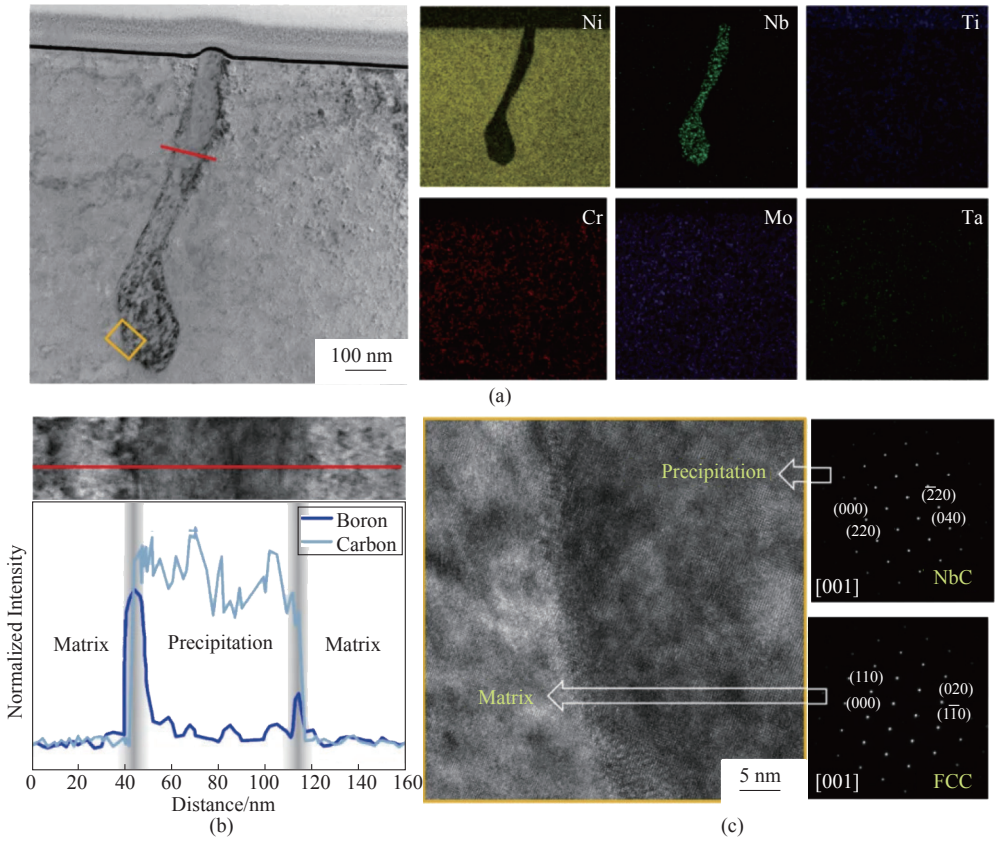


图 5　AMSC-DB 合金中碳化物的 STEM、EDS 面扫及电子能量损失谱线扫

（结果表明，硼元素未发生宏观偏析的原因是碳化物 / 基体的相界面分散了硼元素）

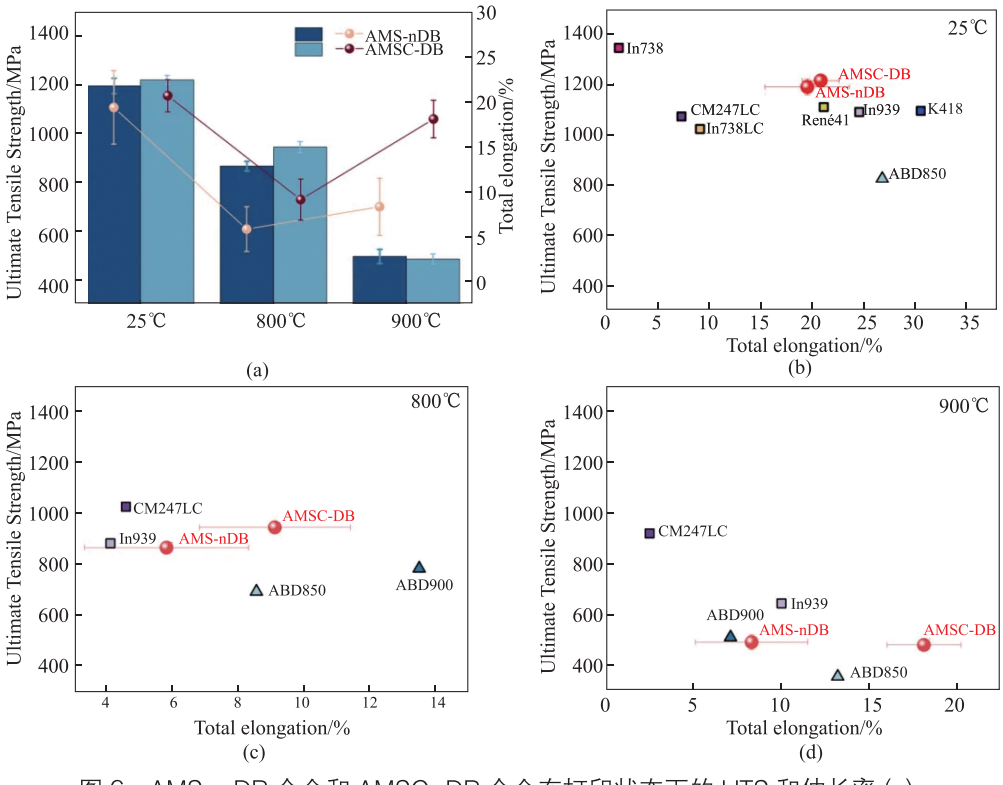


图 6　AMS-nDB 合金和 AMSC-DB 合金在打印状态下的 UTS 和伸长率 (a)，以及 25 ℃ (b)，800 ℃ (c) 和 900 ℃ (d) 温度下与现有合金拉伸性能的比较

（新合金的力学性能可以对标已有的商用合金）

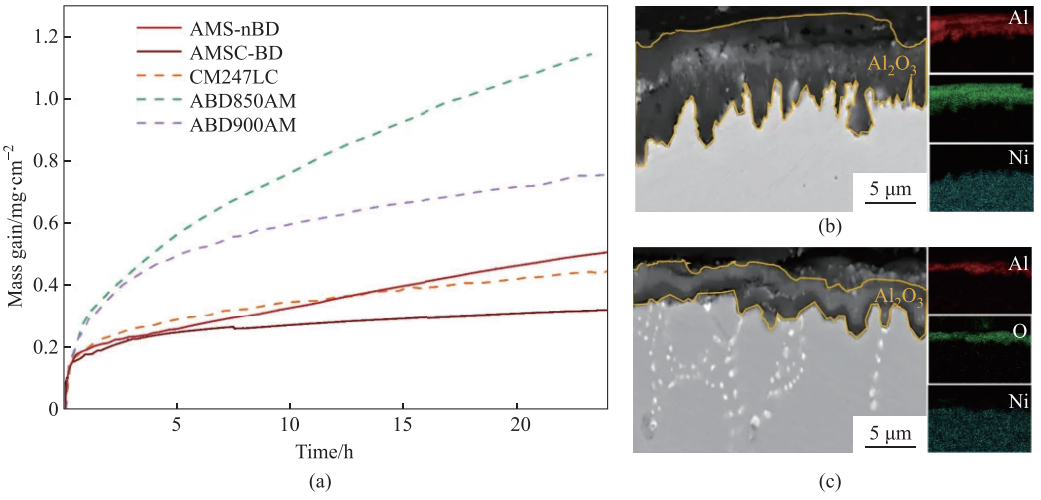


图 7　AMS-nDB 合金和 AMSC-DB 合金在 1000 ℃等温热重测试中的质量变化，以及与现有合金的比较 (a) 以及对应的表面形成氧化层背散图像及元素分布 (b)(c)

总之，本文提出了引入碳化物 / 基体的高能相界来调控硼元素偏析的新策略，并基于材料基因方法构建合金高通量计算设计流程，通过第一性原理计算初步验证了碳化物 / 基体界面捕获硼原子的可行性。在此基础上，将相界面固硼方法与裂纹敏感性准则结合，构建了增材适用镍基合金的成分设计模型。基于此模型，开发出 AMSC-DB 的新合金成分。新合金具有很好的打印工艺鲁棒性，可以在相当宽的打印工艺范围内获得无裂纹的块体。显微组织分析结果表明在 AMSC-DB 合金中没有观察到宏观的硼元素偏析行为，而原子尺度的分析发现了硼原子沿着基体 /NbC 相边界富集现象，验证了相界面通过调控 AMSC-DB 合金中硼偏析而抑制增材裂纹的有效性。此外，新设计的 AMSC-DB 合金表现出良好力学性能及抗氧化性，可以对标商用合金。应用相界调控元素偏析的合金设计策略可以推广于其他多种合金元素体系，并且可以进一步推广应用于增材专用的多体系合金开发。

本工作受“十四五”国家重点研发计划项目“增材制造专用高性能高温合金集成设计与制备”（No.2021YFB3702500）和国家自然科学青年基金“增材制造镍基合金基于先析相热动力学特征的裂纹敏感性改善机制”（No.52204383）的资助。

2000 MPa 以上级超高强钢增塑新机制及组织创新设计

一、研究的背景与问题

超高强钢是交通、深海、航空航天及国防军工等领域的关键材料，能满足国家对大型装备轻量化、安全性、极端服役环境和特殊使用性能的重大需求。然而，超高强钢普遍面临难以同时增强、增塑 / 韧的共性科学难题，尤其当强度达到 2000 MPa 时，其塑性显著下降（均匀伸长率 <8%），同时存在工艺复杂、合金成本高等问题，严重制约其成型及应用。

针对金属材料的强塑性“倒置”关系，科研学者们提出了一系列解决办法，如 TRIP/TWIP 效应、梯度结构、异质结构、位错工程等。但是，因上述机理、机制本身所需的特定工艺、钢铁材料相变的复杂性以及 2000 MPa 级超高强度等因素，导致很难将上述机理、机制进行有机结合，用于开发高塑性的 2000 MPa 超高强度钢。引入亚稳相是当前提升强塑性的常用手段，然而在 2000 MPa 级超高强度下其效果仍然有限。马氏体时效钢作为最高强度级别材料的代表，其通过纳米共格析出调控手段可以获得良好的强韧性组合，但均匀伸长率难以突破 8%，并且需要消耗大量的 Co、Ni、Mo 等昂贵合金。近年来，一些制备 2000 MPa 超高强钢的新思路相继提出，在中锰成分体系钢中得到了良好的应用。例如，变形 - 配分（D&P）钢利用“位错工程 + 亚稳相 TRIP 效应”可以实现 2.2 GPa 屈服强度和 18% 均匀伸长率的优异性能；采用快速加热技术制备的化学界面工程（CBE）钢可以获得 2 GPa 抗拉强度和 20% 左右的均匀伸长率。两项重要研究促进了高塑性 2GPa 金属材料的进步，为极端环境需求材料提供了新的选择。然而，优异性能的获得对工艺依赖性较强，通常需要热轧、冷轧、温轧、多次退火、快速热处理等多种方式相结合，给大规模生产制备带来了巨大挑战，同时相应的产品规格局限于薄板，难以满足工程机械、深海、航空航天等特殊领域的苛刻要求。

因此，探索新的共性机制，突破超高强钢性能“倒置”瓶颈，并实现成分节约和绿色工艺的超高强钢低成本制备，对推动我国装备制造业的高质量发展意义重大，并将助力实现我国“双碳”战略目标。

二、解决问题的思路与技术方案

2000 MPa 级超高强钢的硬相基体为马氏体，其通常呈现无序几何排列方式、多层次结构和高位错密度等特征，变形过程中极易发生应力 / 应变集中，导致其较差的变形能力，甚至发生脆断。从马氏体变形机理的根本出发，东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室研究团队发现马氏体的性能由空间几何排列结构以及晶体学取向结构共同决定，这源于马氏体自身为长条形晶粒形态，并具有极高位错密度。马氏体中密排面上的滑移系并不等价，其中板条面滑移系（In-lath-plane）的开动有利于提高马氏体的持续变形能力，从而提高高强马氏体的塑韧性，但该滑移系仅在有利几何取向下才能开动。因此，通过调控马氏体亚结构的几何有序排列有望进一步提高其塑韧性。

三、主要创新性成果

针对 2000 MPa 级超高强钢的强塑性倒置问题，东北大学 RAL 实验室围绕超高强钢强韧化机理，开展了基础理论研究，取得了多个原创性理论与技术创新。代表性进展如下：

（1）提出“马氏体拓扑学结构设计 + 亚稳相调控”增塑新机制，突破 2000 MPa 级超高强钢的性能极限

基于调控马氏体亚结构的几何有序排列有望进一步提高其塑韧性的思路，研究团队创新提出“马氏体拓扑学结构设计 + 亚稳相调控”的增塑新机制，并将该机制应用于两种低成本 C-Mn 系钢种（A 钢：Fe-0.34 C−7.4 Mn、B 钢：Fe-0.39 C−7.8 Mn）。采用锻造和低温回火工艺调控两种实验钢中马氏体 - 奥氏体的

形态以及稳定性，最终构筑出一种全新的拓扑学双重有序排列马氏体和多尺度亚稳奥氏体的纳米级多层次组织结构。

以 A 钢为例，其组织演变过程为：1）将锻造后的钢材冷却至室温，获得 38.2% 体积分数奥氏体和马氏体的双相组织；2）为了进一步消除大块奥氏体组织，将实验钢进行深冷处理，保留了 18.7% 体积分数的奥氏体；3）最后对实验钢进行低温回火处理，回火过程中发生 C 配分和界面迁移等行为，最终获得了 21.3% 体积分数且具有较高稳定性的亚稳奥氏体。该组织结构在介观尺度上母相奥氏体和马氏体呈现几何有序排列（图 1）；在微观尺度上，亚微米 / 纳米级亚稳奥氏体镶嵌于马氏体板条间，纳米析出相呈弥散分布（图 2）。在变形过程中，该独特组织结构可以激发板条界面位错滑移、界面塑性和相变诱发塑性（TRIP）等多种增强增塑机制（图 3），促使材料具有持续较高的加工硬化能力，从根本上改变马氏体塑 / 韧性低的问题，实现了 1600~1900 MPa 屈服强度、2000~2400 MPa 抗拉强度和 18%~25% 均匀伸长率的极致性能（图 4），突破了对昂贵合金及复杂工艺的依赖，并拓展了 2000MPa 级超高强钢强度—塑性的性能边界。2023 年 1 月 13 日，超高强钢增塑新机制及组织创新设计的研究成果以“Ductile 2-GPa steels with hierarchical substructure”为题，成功发表在 Science 期刊（2023, 379: 168-173），并入选 ESI 高被引论文。

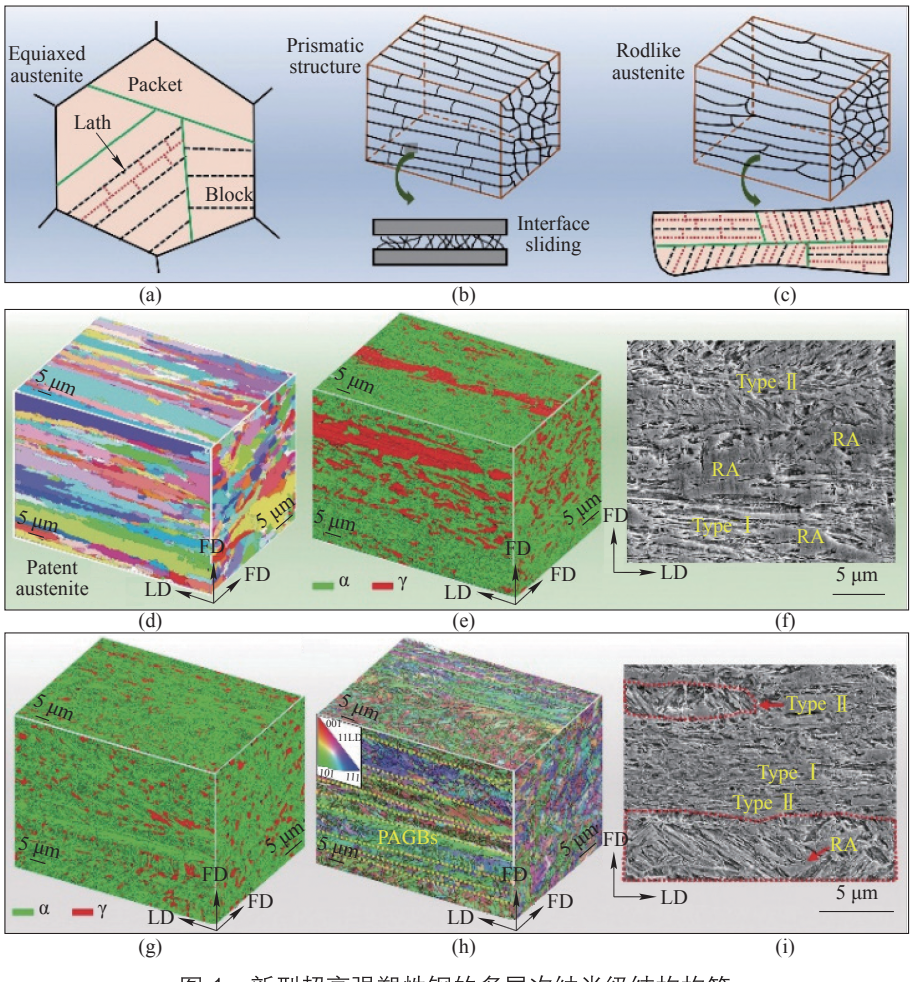


图 1　新型超高强塑性钢的多层次纳米级结构构筑

(a) 传统马氏体无序排列结构；(b) 贝壳材料棱柱状结构；(c) 拓扑学有序的马氏体相变结构；
(d) 原奥氏体重构；(e)(f) 锻造 + 空冷后组织；(g)~(i) 锻造 + 深冷 + 回火后组织

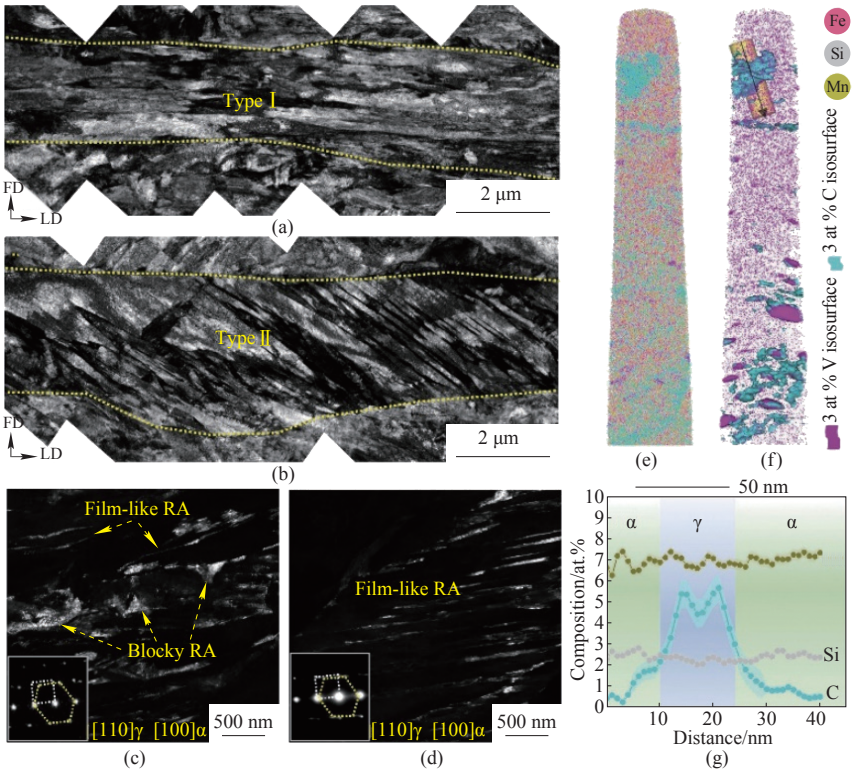


图 2　新型超高强塑性钢的透射电镜和原子探针结果

(a)(b) 水平和倾斜排列的马氏体纳米结构；(c)(d) 马氏体结构中间的亚微米 / 纳米级多尺度亚稳奥氏体；(e)~(g) 纳米析出和碳配分

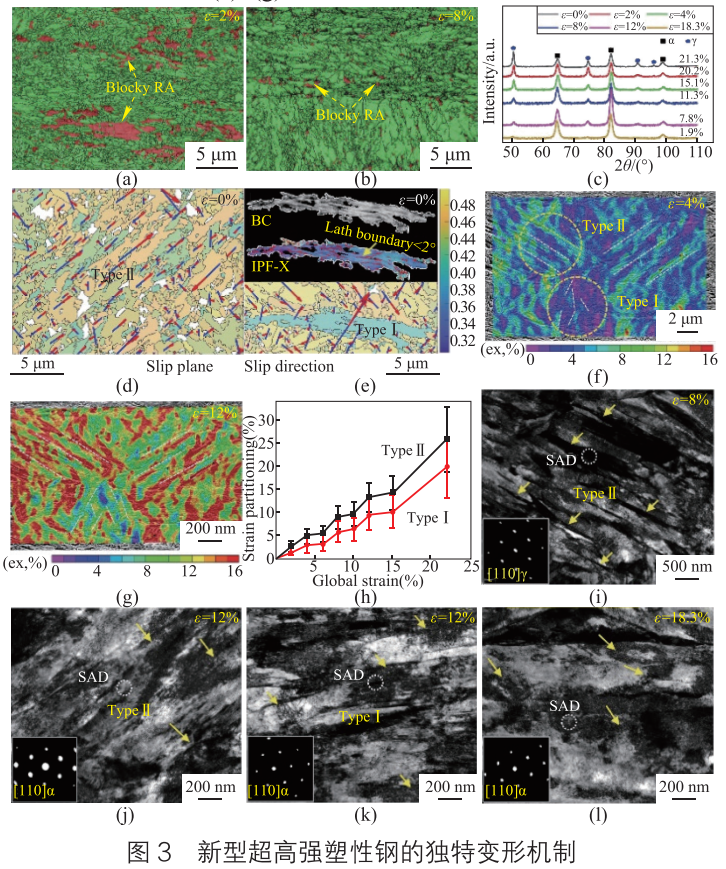


图 3　新型超高强塑性钢的独特变形机制

(a)~(c) TRIP 效应；(d)~(l) 马氏体位错滑移和变形行为：倾斜增塑结构马氏体在变形过程中具有较大的应变配分

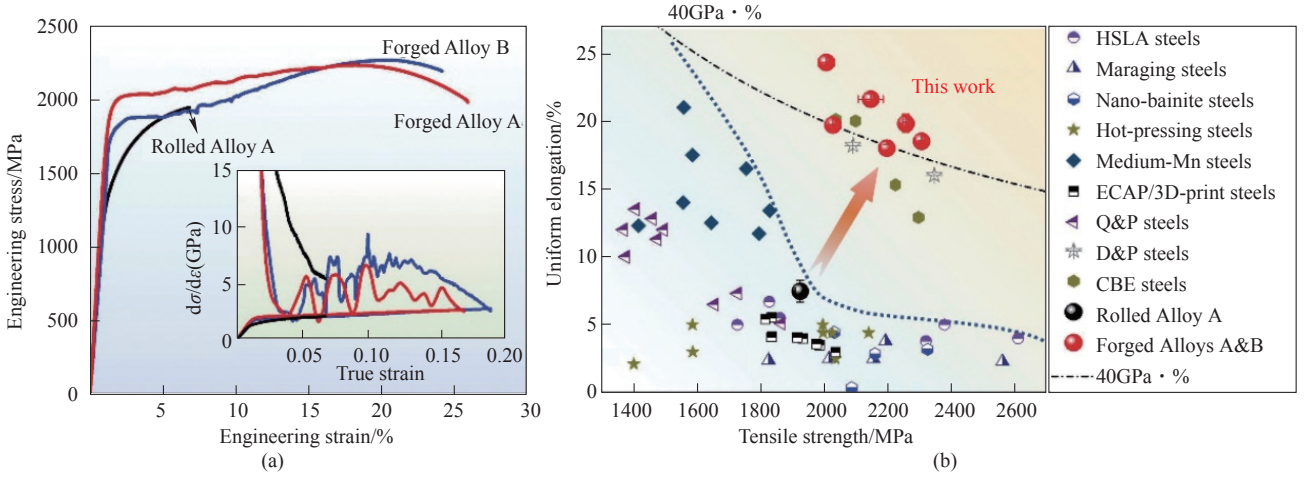


图 4　新型超高强塑性钢的力学性能

（2）提出“低强度成形 + 超高强度使用”新策略，实现 2200 MPa 以上屈服强度 +10% 以上均匀伸长率的零件使用性能

高屈服强度和高塑性是材料的重要服役性能，然而二者不可兼得，原因在于具有高屈服强度的材料已经消耗了较多的加工硬化，很难在后续变形过程中继续产生加工硬化，因此屈服强度达到 2GPa 的材料，在拉伸初期容易发生塑性失稳，其均匀伸长率一般低于 5%。同时，当材料屈服强度极高时，其成形极为困难，因此我们期望获得低强度的板料性能，而在其成形后获得超高屈服强度和高剩余塑性的使用性能，以提高零件的抗侵入能力和能量吸收能力。基于上述拓扑学有序排列组织设计原理，研究团队进一步提出“低强度成形 + 超高强度使用”策略来解决 2000 MPa 级超高强钢的成形难题，并保证超高的服役性能。通过 C-Mn 合金设计和 Strain-aging 工艺成功开发出新型低成本中锰钢，其零件使用性能为 2.0~2.3 GPa 屈服强度和 8%~14% 的均匀伸长率。具体原理为：Fe−7.4 Mn−0.24 C 合金的初始组织含有 35.7% 的亚稳奥氏体，使得材料具有低屈强比特性，同时部分奥氏体在成形过程中发生 TRIP 效应，获得良好的成形性能（图 5）。

成型后组织中剩余 10% 以上稳定性较高的纳米级奥氏体，可在零件服役过程中进一步提高其强塑性。最终效果为，热加工态材料的屈服强度低于 1000 MPa，而经过 Strain-aging 处理后材料的屈服强度增加至 1760~2343 MPa，提升 1 倍以上，同时在合适的变形范围保持 10% 以上的均匀伸长率（图 6）。

高屈服强度的获得归结于成形过程中的加工硬化以及低温回火处理的烘烤硬化效应。在该合金体系下，其烘烤硬化效应可高达 465 MPa，为目前已知的最高水平。此外，在 2GPa 高屈服条件下仍然获得了大于 10% 均匀伸长率的剩余塑性，其关键机制为吕德斯带的低平均加工硬化率以及更为缓慢的 TRIP 效应降低了材料加工硬化的消耗速率。将该技术应用于 0.34C/0.39C 等中锰合金，可获得高达 2300MPa 屈服强度和 10% 以上均匀伸长率的极致零件性能（图 7），远远优于同强度级别的其他材料，同时不同合金体系可承受的最佳变形量有区别，可为不同复杂程度的结构材料量身定做。2023 年 5 月，相关研究成果以“Achieving unprecedented yield strength of 2.2 GPa with high ductility in formed parts using strain-aging”为题发表在金属领域 TOP 期刊 Scripta Materialia（2023, 233: 115521）。该技术很好地解决了超高强度钢应用的技术瓶颈之一，

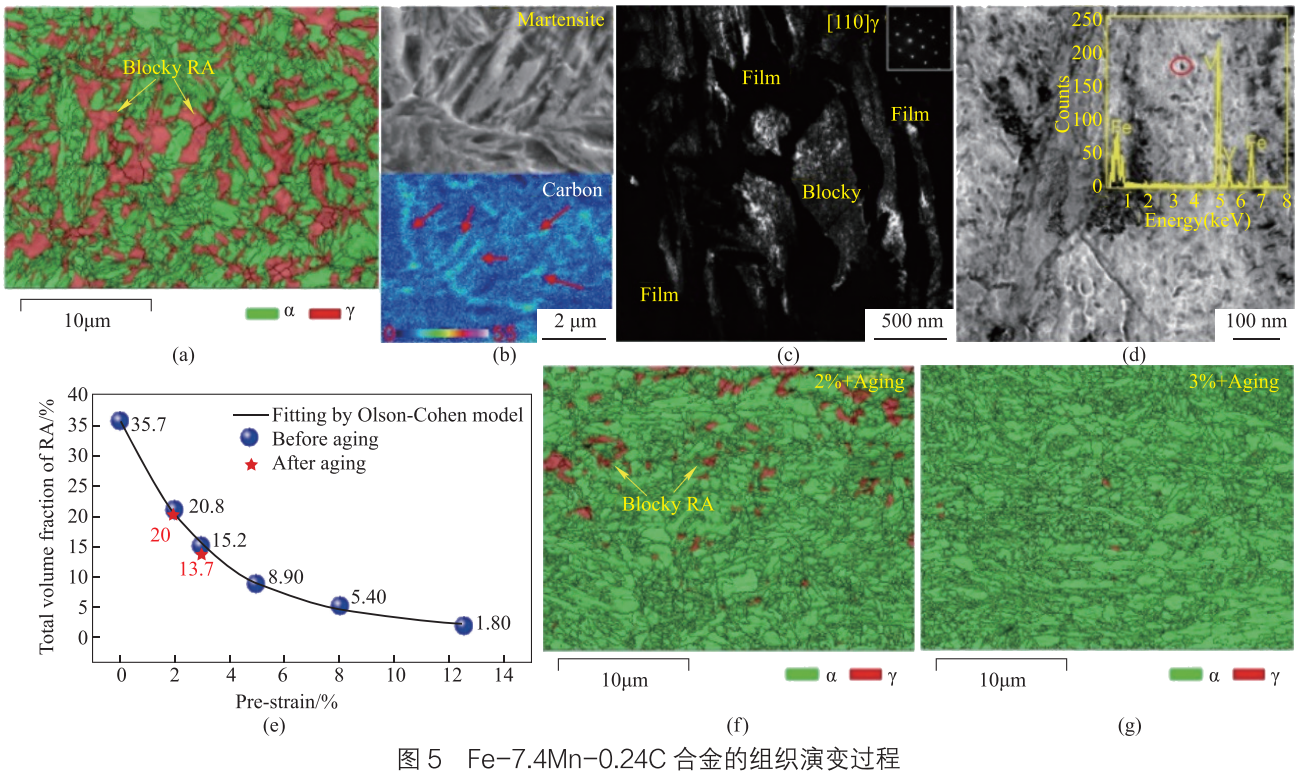


图 5　Fe−7.4Mn−0.24C 合金的组织演变过程

(a)~(d) 热变形态的初始组织；(e)~(g) Strain−aging 过程的组织演变

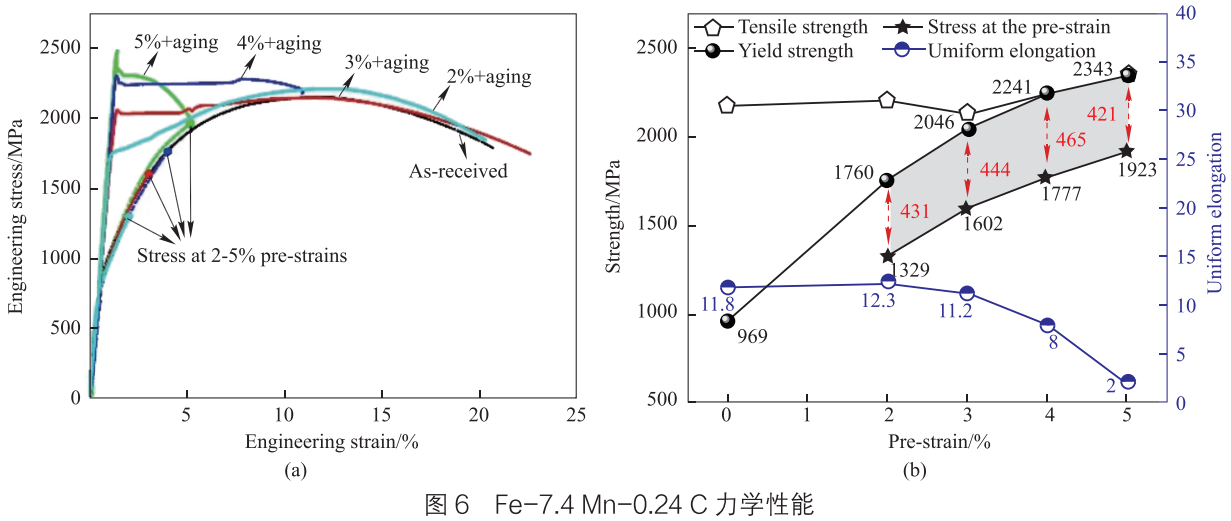


图 6　Fe−7.4 Mn−0.24 C 力学性能

即成型困难的问题。此外，由于系列设计合金在室温可以获得较高体积分数的奥氏体，其焊接性能优于传统超高强钢，目前正在开展评估研究。

四、应用情况与效果

本研究提出的“马氏体拓扑学结构设计 + 亚稳相调控”增塑新机制具有较大的普适性，开辟了超高强塑性钢新的研究方向，有利于充分挖掘材料潜力，加快推动超高强钢在关键工业、军工等领域的实践应用，提升我国战略国防科技力量。该机制的普适性可以体现在两个方面：一是该机制可应用于轧制、锻造等多个领域，以生产制备大尺寸轴类、薄板、厚板等；二是该机制适用于不同的合金体系，其置换型元素 Mn、

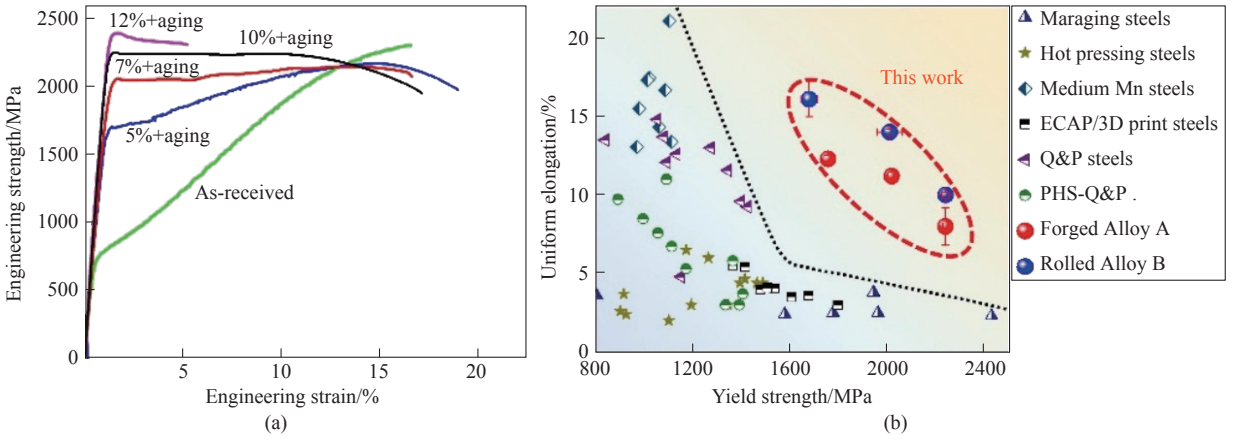


图 7　合金 Fe−7.4 Mn−0.24 C 和合金 Fe−7.8 Mn−0.39 C 的力学性能

Ni、Cr 可替换，以提升材料韧性、耐磨性及耐腐蚀性等。

如图 8 所示，利用该机制，合金 Fe−0.34C−7.4Mn 在热轧和冷轧加工后经热处理均可以获得 2200~2650 MPa 抗拉强度，10% 以上均匀伸长率的优异性能。此外，该类材料可以实现薄规格到厚规格的灵活制备，由于合金淬透性足够高，其板材厚度可覆盖 1 mm 到几百毫米范围，以满足多样化应用场景的需要。图 9 显示了不同合金体系下该机制的应用效果，均获得了超高强度—超高塑性的力学性能。

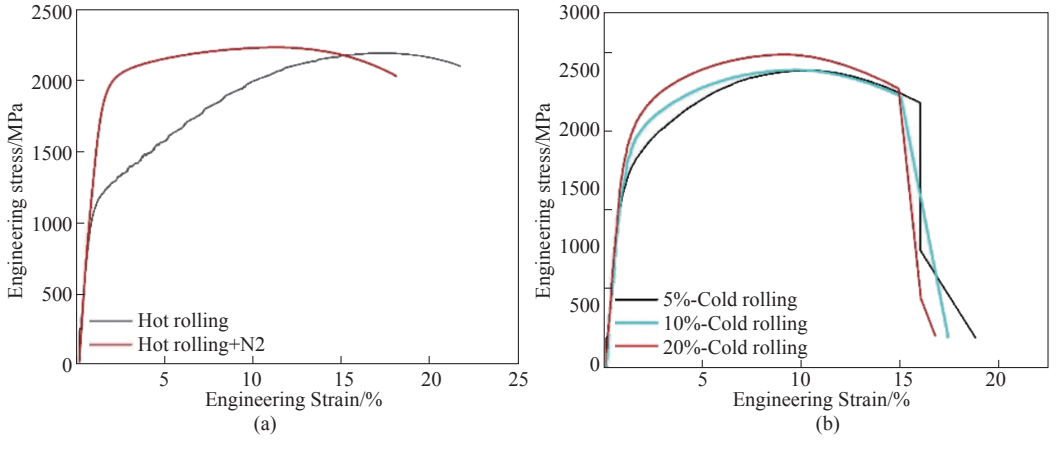


图 8　合金 Fe−7.4Mn−0.34C 在热轧 (a) 和冷轧 (b) 加工状态下的力学性能

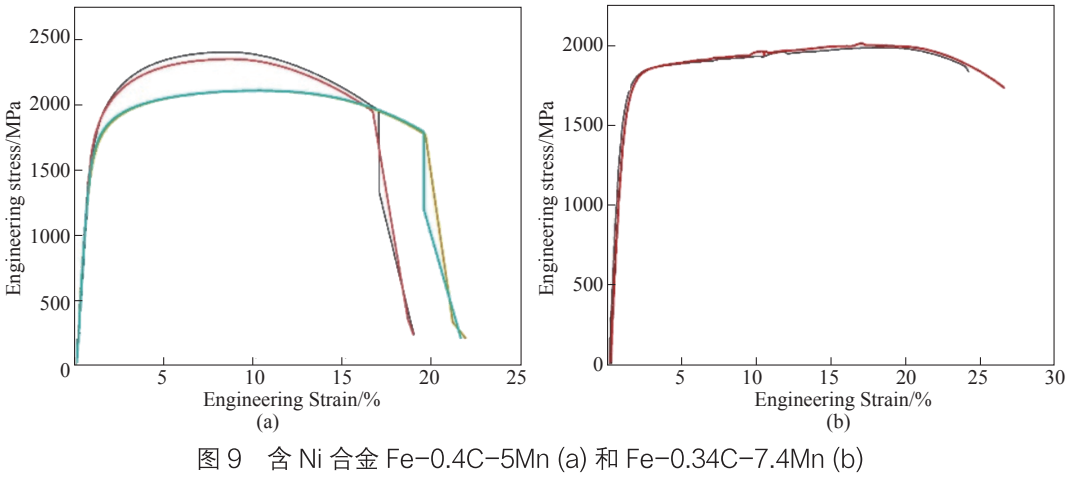


图 9　含 Ni 合金 Fe−0.4C−5Mn (a) 和 Fe−0.34C−7.4Mn (b)

该组织结构设计思路可以实现 2000 MPa 级以上超高强钢的强－塑－韧多性能的同步提升。目前已在汽车钢、装甲钢、盾构机刀圈以及飞机起落架等方面的进行了材料设计工作。部分力学性能指标情况如表 1 和表 2 所示。可以看到，新型材料较传统材料在力学性能方面有显著提升，尤其塑 / 韧性可以实现翻倍的效果。

表 1　装甲钢新材料设计

材　　料	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	冲击 A_{kv}/J
传统装甲钢	1400~1600	＜ 2000	＜ 10	−40℃ : 10~15
新型装甲钢	＞ 1600	2200~2500	＞ 15%	−40℃ : 22~26

表 2　刀圈新材料开发

材　　料	硬度 HRC	冲击 A_{ku}/J
传统 H13 刀圈材料	54~58	5~15
新型 C-Mn 刀圈材料	59~60	40~45

本项目“2000MPa 级超高强钢增塑新机制问世”入选“2023 年世界钢铁工业十大技术要闻”，并获得高度评价：“该项目创新提出超高强钢增塑新机制，并取得了系列关键技术创新，突破了 2000 MPa 级超高强钢的性能极限，具有重要的科学价值”。研究成果获得了 Science 期刊认可：“实现了工艺、成分、性能及机制的多重创新，具有重要科学价值，可进行大规模工业化生产，大力支持下一代高性能钢材的长期可持续发展，推动材料性能边界，降低能源消耗，提高材料的可回收性，促进循环经济”。

本项目提出了相应的解决方案有望在汽车、工程机械、深海、深地等领域进行实际应用，目前正在积极推动该成果的落地转化。

东北大学成功研发热连轧板带钢超快速冷却技术

热连轧板带钢是产量最大的板材门类。高效准确地实现组织性能调控，同时保证良好的钢材形状，实现热连轧板带钢的低成本高质量开发生产，是热轧板带钢产品开发和生产长期以来追求的目标。

控轧控冷作为热轧钢铁材料关键共性技术，冷却均匀、冷却速率大范围可调的基于射流冷却机制的新一代控制冷却—超快速冷却技术，是优化热轧带钢合金成分体系和改善板材板形等综合质量的主要工艺途径。尤其是在当前激烈的竞争形势下，无论是对于降低生产成本，还是对于企业高质量转型发展，均具有重要的意义。

前言

超快速冷却原理：采用一定压力的冷却水，以一定角度喷射至高温钢板表面，有效去除钢板表面汽膜

和钢板残水，使新水和高温钢板直接接触，并在钢板表面形成有序壁面流动，从而大大提高钢板和冷却水之间的热交换和均匀性，实现基于射流冲击换热机制的高效高均匀性冷却。基于该冷却机制，通过喷嘴结构的优化设计实现喷嘴出口流量沿带钢宽度方向的合理分布，从而实现带钢冷却速率大范围可调的高均匀性冷却。

热轧钢铁材料－冷却速率－合金元素的关系：结合钢铁材料连续冷却相变曲线（CCT 曲线），在适当高冷速的冷却条件下，采用节约型的成分设计可以获得低冷速下同类高合金元素产品的组织与性能。

图 1　开发的热连轧板带钢超快速冷却系统

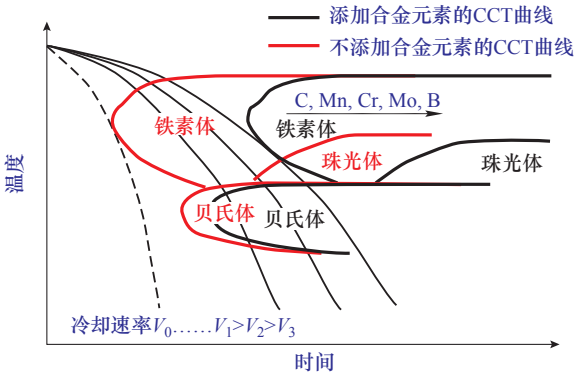


图 2　冷速－合金元素－相变曲线关系示意图

为此，在应用超快速冷却技术进行热轧钢铁材料组织性能调控中，可以丰富轧后冷却路径控制手段，针对不同的组织性能要求通过轧后冷却路径的灵活、精准控制，在组织性能调控方面显现出强大的技术优势。

以超快冷为核心的新一代控轧控冷技术在组织性能调控方面具有广阔的应用前景，主要优势体现在：（1）更加有利于综合运用细晶强化、析出强化、相变强化等强化机制，降低了对合金元素提高强度的依赖，“一钢多级”，降低了钢的冶炼成本，实现了减量化、集约化的轧制生产；（2）基于超快冷的高效高均匀性冷却，全面提升热连轧板带钢产品的板形及性能稳定性；（3）具备宽广的冷速控制范围，可以实现空冷与超快速冷却之间的无级调速，满足多样的冷却路径控制要求，采用相对简单的化学成分就可以获得不同强度级别和性能需求的钢铁材料。

超快冷设备工艺布置

东北大学 RAL 热连轧超快冷技术自 2004 年经历中试装置研发、首套装备开发，目前已形成完善成熟的热连轧带钢超快冷装备与工艺技术。

在热连轧产线上，超快冷在轧后有两种布置方式：

（1）前置式超快速冷却系统：前置式超快速冷却设备布置在精轧机后，用于将热轧板带钢按给定的工艺要求冷却到所需温度。可在不添加合金元素或少添加合金元素用量的情况下，开发同等级别的热轧板带材，降低生产成本。

（2）后置式超快速冷却系统：后置式超快速冷却设备布置在层冷精冷段后、卷取机前，将热轧板带钢

按给定的工艺要求冷却到终冷温度，可经济地实现双相钢、TRIP 钢等高附加值产品的大批量连续稳定生产。

除轧后控制冷却工艺外，在粗轧区域应用超快冷技术，开发形成粗轧控温技术，即在粗轧区设置超快冷，与轧制过程进行配合，即时调整轧件温度，实现轧制温度的高精度、高效率调整与控制，以及实现对轧制过程奥氏体晶粒尺寸、形貌、微合金元素的固溶和析出的调控，为随后的冷却相变过程奠定基础。

超快速冷却在热连轧板带钢生产线的工艺布置如图 3 所示。

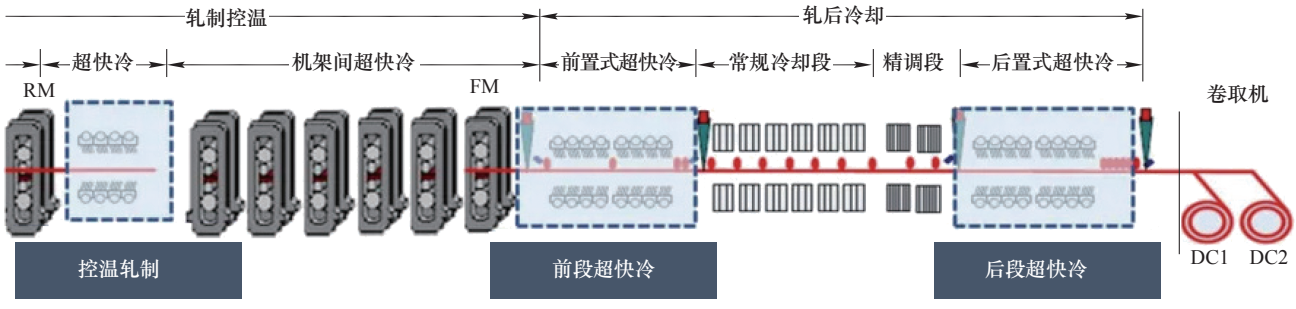


图 3　超快速冷却工艺布置示意图

典型产品工艺应用

结合超快冷设备条件和热轧板带钢产品特点，在热连轧产线上单独采用超快冷系统，相继开发出 UFC-F、UFC-B、UFC-M 及后置式 UFC-DP 等轧后冷却工艺，减少 Mo、Nb、V 等昂贵合金元素的添加。同时，可同比采用更经济的 Mn 等元素，减少产品板坯连铸过程碳锰偏析，改善内部组织及焊接性能，很好地满足全系列低合金钢、汽车结构钢、管线钢、超 / 高强钢以及冷轧基板的高质量低成本经济型生产，实现特色化、高品质的热连轧板卷工艺技术及产品开发，促进了热连轧板带钢开发生产的降本增效及提质增效。

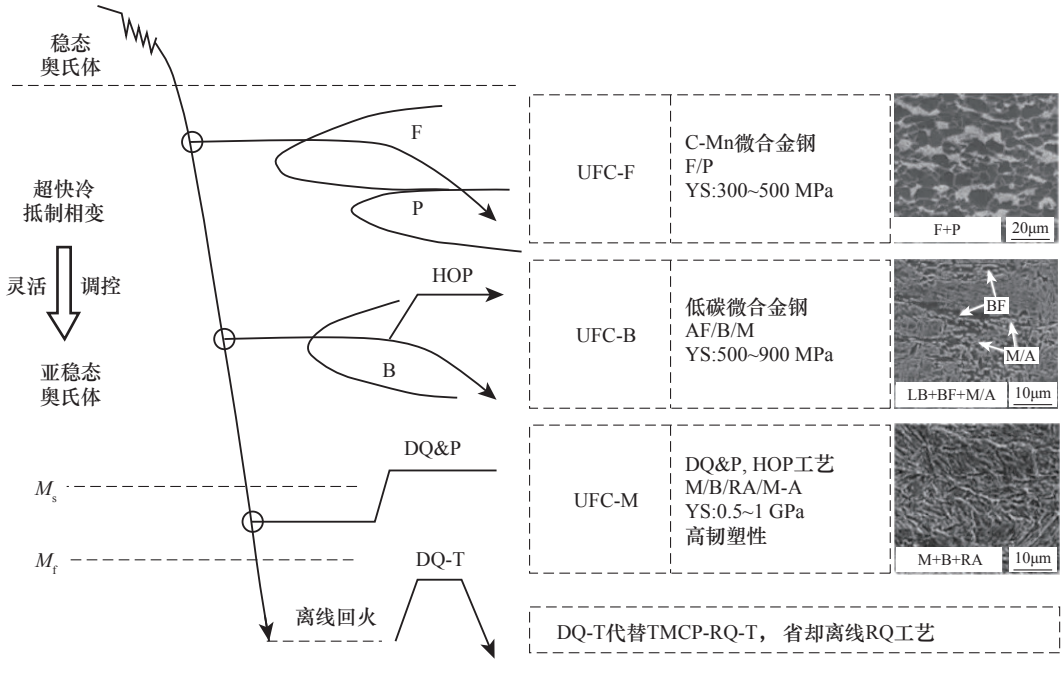
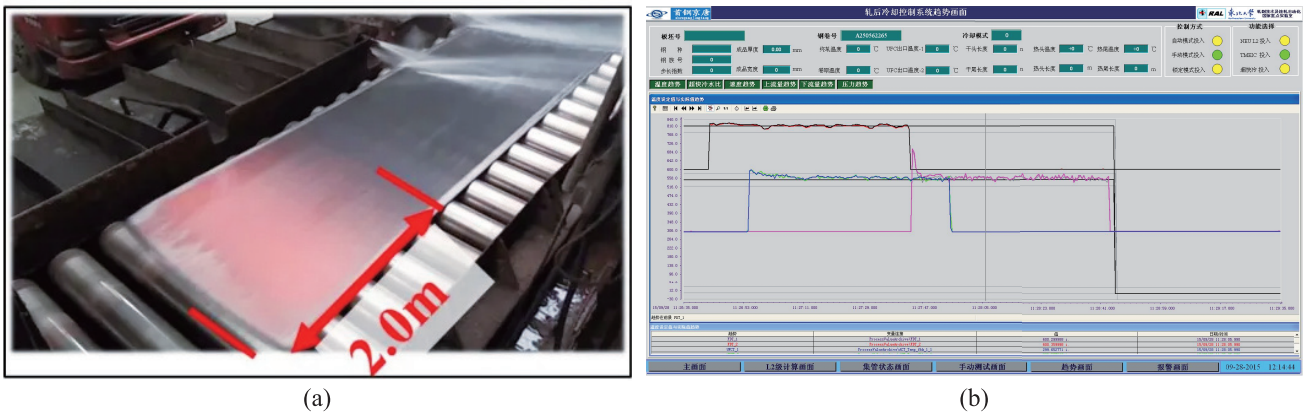


图 4　基于超快速冷却技术的热轧钢材组织调控工艺

针对热轧碳素结构钢产品，基于 UFC-F 工艺，开发出细晶结构钢，如普通碳素结构钢、车轮钢以及窄性能波动的热轧高强板卷产品。热轧带钢经前置超快冷系统，富含“缺陷”的加工硬化奥氏体被快速冷却至动态相变温度 A_{r3} 以下，促进了铁素体和珠光体组织细化，提高了产品强度与韧性。

针对高钢级管线钢产品，创新开发 UFC-B 工艺技术。高冷却能力确保钢板心部仍具有较高冷速，利于心部获得大量细化针状铁素体，从而可在低碳当量成分设计条件下获得低温冲击韧性、DWTT 等性能稳定的管线钢产品。进一步拓展管线钢产品厚度范围，实现了极限厚规格 X70、X80 管线钢的开发与工业化应用。

此外，利用超快冷高强度均匀化冷却特点和板厚方向的“温度梯度”特性，有效解决了常规工艺下管线钢残余应力高的难题，实现了低残余应力高钢级管线钢的开发及大批量工业化生产，如图 5 和图 6 所示。



(a) (b)

图 5　生产过程中的管线钢

(a) 管线钢头部不冷段控制效果；(b) 低残余应力管线钢冷却温度曲线

(a) (b)

图 6　19.65mm 厚度规格 X70 钢卷开发生产

(a) 基于传统层流冷却的低温卷取工艺；(b) 基于超快速冷却的卷取工艺

图 7　11.0mm 厚度规格 DP590 钢卷及典型心部组织

结语

开发的超快速冷却技术，通过工艺－装备－产品一体化技术创新，不仅在资源节约型高品质热连轧板带钢产品开发，而且在提高热轧板带钢轧后冷却均匀性，降低热轧板带残余应力、改善热轧板带钢温度均匀性和板形质量等方面体现出显著成效，也为我国资源节约型高品质热轧板带钢产线技术升级提供了保障。

热连轧板带钢超快速冷却技术创新与应用实践，得到了湖南华菱涟钢、首钢迁钢、首钢京唐、包头钢铁、江苏沙钢、山钢日照精品基地、攀钢西昌、河钢乐亭、广西盛隆、日照钢铁、天津荣程等大型钢铁企业的大力支持，推广应用至二十余条热连轧生产线，形成了我国成熟完善的自主知识产权的热轧板带钢新一代控制冷却工艺与装备技术。工业化应用实践表明，超快速冷却技术作为重要的工艺手段，为开发生产系列化、特色化、高品质热连轧板带钢产品做出了重要贡献。

东北大学易红亮教授课题组：晶粒尺寸对 TRIP 钢中奥氏体本征机械稳定性的影响

第一作者：杨达朋

通讯作者：杨达朋、易红亮

通讯单位：东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室

DOI: 10.1016/j.jmst.2023.03.013


Journal of Materials Science & Technology 162 (2023) 38–43

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Materials Science & Technology

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

ELSEVIER

Letter

Effect of grain size on the intrinsic mechanical stability of austenite in transformation-induced plasticity steels: The competition between martensite transformation and dislocation slip

The deformation accompanied by austenite to martensite transformation was first studied in Fe-Ni alloys, high-Mn steels, and austenitic stainless steels with a full austenite microstructure. site for thermal martensite is also at the austenite grain boundaries [29].

In the present study, we intend to separate grain size from other factors (e.g., chemical composition and strain partitioning) and clarify the effect of grain size (ranging from submicron to a few micrometers) on the intrinsic mechanical stability of austenite in TRIP steels, and then explain it in the essence of mechanical stability of austenite.

全文速览

晶粒细化能够提高 TRIP 钢中奥氏体机械稳定性似乎已成为公知常识，但令人困惑的是，在单相奥氏体钢中，亚微米奥氏体通常表现出比微米级晶粒更低的机械稳定性。本研究颠覆了“晶粒细化提高奥氏体机械稳定性”的传统认知，阐明了奥氏体机械稳定性的本质是位错滑移和马氏体相变两种变形机制的竞争，晶粒细化将增加马氏体相变的趋势，降低奥氏体机械稳定性。有趣的是，当晶粒尺寸小于某一临界值时，奥氏体发生马氏体相变需要的应力将低于位错滑移所需的应力，此时马氏体相变将诱发奥氏体屈服。

背景介绍

TRIP 效应是指变形过程中奥氏体相变为马氏体，可同时提高材料的强度和塑性。该现象最早在全奥氏体组织的 Fe-Ni 合金、高锰钢以及奥氏体不锈钢中被广泛研究。在过去的几十年里，一系列具有多相组织的汽车用 TRIP 钢被研发出来，包括低合金 TRIP 钢、无碳化物贝氏体钢、δ -TRIP 钢、Q&P 钢以及中锰钢等。TRIP 钢的力学性能很大程度上取决于奥氏体的机械稳定性。影响奥氏体机械稳定性的因素有奥氏体的化学成分、晶粒尺寸、取向、形貌以及周围相特性等。在多相组织 TRIP 钢变形过程中，小晶粒奥氏体通常表

现出比大晶粒奥氏体更高的机械稳定性，这似乎表明晶粒细化可提高奥氏体的机械稳定性，但小晶粒奥氏体中通常含有更多 C、Mn 元素，且分配的应变较小，并不能说明晶粒细化本身提高了奥氏体机械稳定性。本研究采用单相奥氏体不锈钢，排除了化学成分和应变分配的影响，阐明了晶粒尺寸对 TRIP 钢中奥氏体本征机械稳定性的影响。

本文亮点

（1）阐明了晶粒细化降低 TRIP 钢中奥氏体的机械稳定性；

（2）奥氏体机械稳定性的本质是马氏体相变和位错滑移两种塑性变形机制的竞争；

（3）晶粒尺寸对位错滑移所需应力的影响高于马氏体相变；

（4）随着奥氏体晶粒尺寸的减小，奥氏体的屈服机制由位错滑移转变为马氏体相变。

图文解析

图 1 为了理解晶粒尺寸对奥氏体机械稳定性的影响，首先需要阐明奥氏体机械稳定性的本质。金属材料中除了位错滑移和孪生，剪切型相变（简称“切变”）也会导致塑性变形，马氏体相变为典型的切变。因此，TRIP 钢中奥氏体存在位错滑移和马氏体相变两种相互竞争的变形机制，奥氏体机械稳定性取决于上述两种变形机制所需应力的相对大小。如图 1（a）所示，随着测试温度降低，位错滑移所需应力增加，而马氏体相变所需应力减小，所以奥氏体机械稳定性降低。理论计算结果表明，马氏体相变和位错滑移所需应力均随奥氏体晶粒尺寸的减小而增加，如图 1（b）所示，但晶粒尺寸对位错滑移的影响更大。随着奥氏体晶粒尺寸减小，马氏体相变所需应力与位错滑移所需应力的相对值减小，所以奥氏体发生马氏体相变的趋势增加，奥氏体的机械稳定性降低。两条曲线相交时晶粒尺寸约为 0.45 μm：晶粒尺寸更小时马氏体相变所需应力较小，此时马氏体相变将诱发奥氏体屈服；晶粒尺寸较大时，位错滑移所需应力较小，此时位错滑移导致奥氏体屈服。

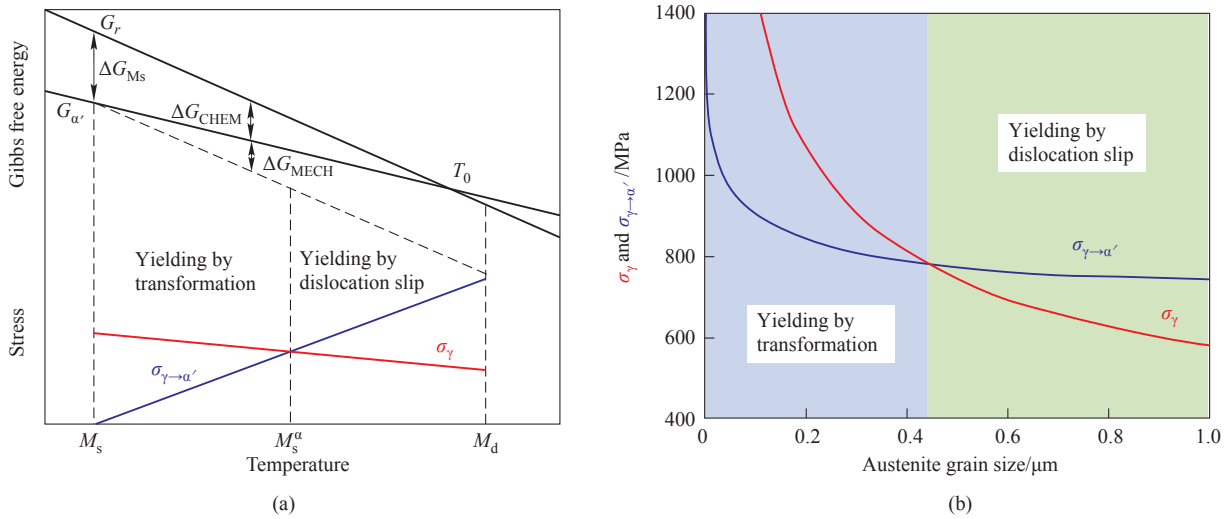


图 1

图 2 为验证计算结果的准确性，采用奥氏体不锈钢，经冷轧和不同温度退火后得到平均晶粒尺寸为 0.2 μm、1.0 μm、3.5 μm 的试样，0.2 μm 试样的奥氏体含量随应变增加呈线性降低，而 1.0 μm 试样和 3.5 μm 试样应变分别达到 5% 和 20% 后才开始发生马氏体相变，这说明奥氏体的机械稳定性随着晶粒尺寸的减小而降低，与图 1(b) 的计算结果一致，而与“晶粒细化提高奥氏体机械稳定性”的传统认知相反。

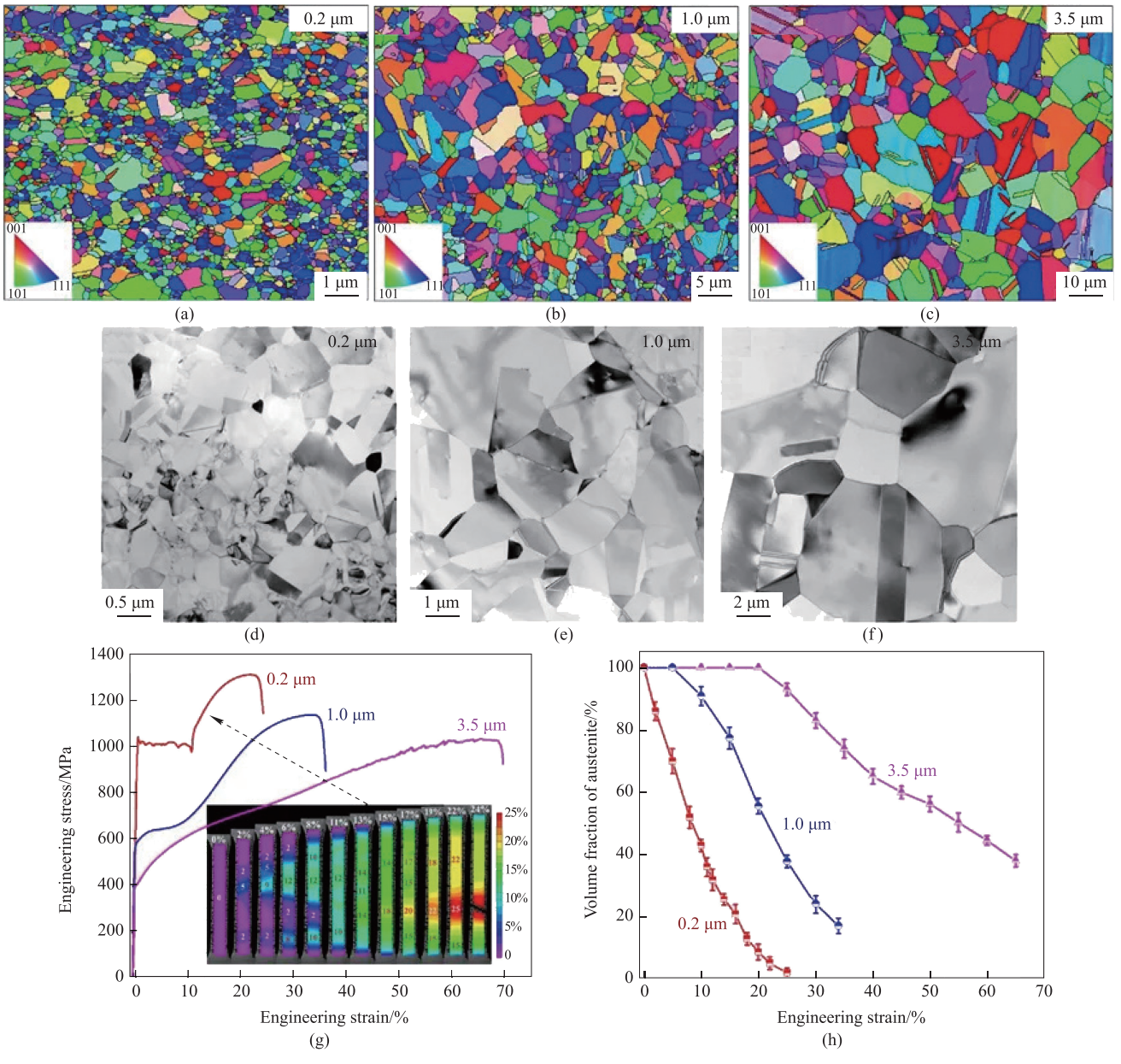


图 2

图 3 中 0.2 μm 试样变形量为 1% 时，此时刚进入塑性变形阶段，马氏体已在奥氏体晶界处形成，随着变形量增加到 11%，大部分奥氏体发生相变，说明马氏体相变导致了奥氏体的屈服并且为奥氏体变形初期的主要变形机制。而对于 1.0 μm 和 3.5 μm 试样，在变形初期产生了大量的位错，未发生马氏体相变，说明

奥氏体屈服机制为位错滑移，随着应变增加，位错增殖产生加工硬化，材料应力达到相变所需应力时马氏体开始生成。上述结果验证了图 1(b) 计算结果的准确性。需要注意的是，本研究中马氏体主要在奥氏体晶界形核，这与经典的“应变诱发马氏体相变”不同，可能与奥氏体晶粒尺寸较小抑制了剪切带形成和交叉有关。

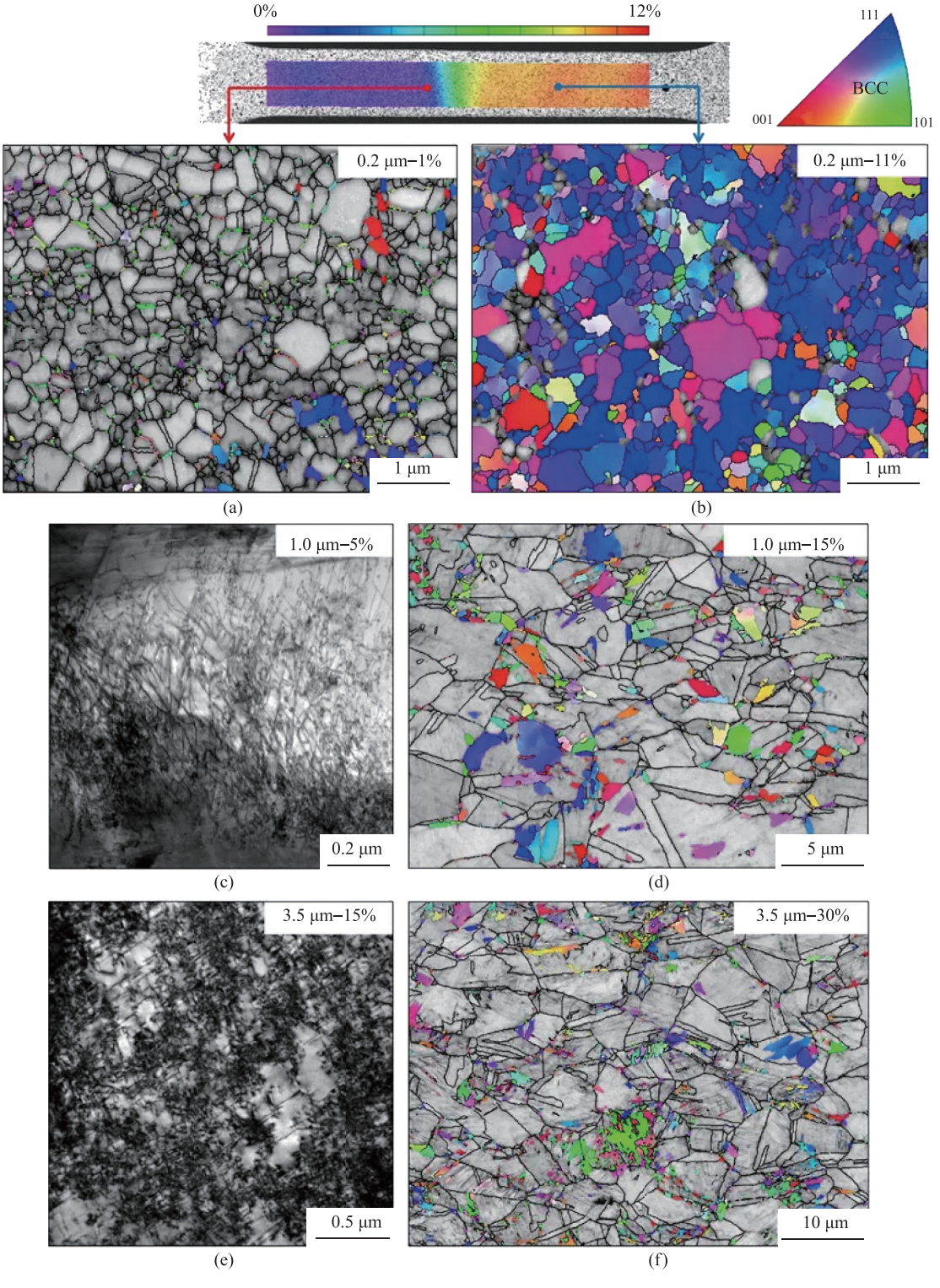


图 3

总结与展望

TRIP 钢中奥氏体存在两种相互竞争的塑性变形机制：位错滑移和马氏体相变，奥氏体的机械稳定性取决于诱发上述两种变形机制所需应力的相对大小。两种应力均随奥氏体晶粒尺寸的减小而增大，但晶粒尺寸对位错滑移所需应力的影响高于马氏体相变。随着晶粒尺寸的减小，马氏体相变所需应力与位错滑移所需应力的相对值减小，因此奥氏体的机械稳定性降低。当晶粒尺寸小于某一临界值时，马氏体相变所需应力将小于位错滑移所需应力，此时，马氏体相变将诱发奥氏体屈服。值得注意的是，上述规律适用于尺寸小于 4 μm 的奥氏体晶粒，此时马氏体优先在奥氏体晶界形核。事实上，多相组织 TRIP 钢中大多数奥氏体的晶粒尺寸小于 2 μm，本研究将有助于理解 TRIP 钢中奥氏体的机械稳定性和变形机制，从而指导 TRIP 钢的设计。

课题组简介

东北大学易红亮教授课题组依托轧制技术及连轧自动化国家重点实验室，主要从事高强韧钢铁材料基础理论和应用技术研究。为促进科技成果的应用，易红亮教授与合伙人创立了育材堂（苏州）材料科技有限公司，进行新技术的研发和产业化推广。团队贯通了钢铁材料基础研究、技术创新和产业应用，主要工作如下：（1）发现铝硅镀层热冲压钢“镀层 / 基体界面富碳致脆”机制，研发的高韧性铝硅镀层热冲压钢打破了国际垄断，累计生产 10 万吨，获 2023 年中国汽车工程学会“技术发明奖”一等奖；（2）提出马氏体“纳米析出韧化”机制，全球首次实现 2000 MPa 级热冲压钢工业化批量应用，获 2020 年冶金科学技术奖一等奖；（3）研发的“高应力板簧”技术帮助国内客车龙头企业宇通客车成功对标丰田竞品车型，解决了宇通客车精品车型多年未解决的“卡脖子”难题，入选中国汽车工程学会“年度轻量化标志性技术进展事件”；（4）提出兼具高强韧和低密度特性的全新钢种“δ-TRIP 钢”，被列入《中国制造 2025》重点领域技术。此外，团队在高强韧轴承钢、高导热模具钢、大尺寸耐磨钢、超高强装甲钢等方面也进行了系列基础理论研究与技术创新，并取得了显著进展。

引用本文

D.P. Yang, T. Wang, Z.T. Miao, P.J. Du, G.D. Wang, H.L. Yi, Effect of grain size on the intrinsic mechanical stability of austenite in transformation-induced plasticity steels: The competition between martensite transformation and dislocation slip, J. Mater. Sci. Technol. 162 (2023) 38–43.

4 合作交流

王国栋院士到衡阳钢管进行技术交流并作学术报告

12 月 22 日，轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（RAL）王国栋院士到湖南衡阳钢管（集团）有限公司进行技术交流并作学术报告。衡阳钢管党委书记、执行董事、总经理郑生斌，中国工程院院士王国栋，RAL 实验室主任袁国教授出席报告会。

报告会上，王国栋院士以“钢铁企业新型工业化数字底座与生成式 AI 大模型系统”为题作了学术报告。王国栋院士指出，数字时代，钢铁行业面临机遇与挑战。数据成为全球新一轮产业竞争的制高点、改变国际竞争格局的新变量。钢铁行业要走中国特色的新型工业化道路，需要创新引领，完成钢铁绿色化、数字化、高质化、强链化的产业升级任务；同时，钢铁工业作为大型复杂流程工业，严重的不确定性是钢铁生产过程面临的重大挑战，钢铁行业数字化转型是唯一最优方案。他分析指出，钢铁行业实现“绿色、数字、高质、强链”战略转型的解决方案是：夯实数字底座，建设钢铁企业创新基础设施（SEII），以“智改数转”和“数字换脑”为重要抓手。我国钢铁行业应以企业为主体，以市场为导向，深度融合产学研用，加速数字化转型和高质量发展，努力实现新型工业化，创建世界领先的工业集群。

衡阳钢管党委书记、执行董事、总经理郑生斌对王国栋院士莅临衡钢指导表示欢迎和感谢。郑生斌指出，当前公司正在进行工业互联网建设，此次讲座王国栋院士结合衡钢生产发展实际，为我们指明了衡钢未来数字化发展的方向，极大地开拓了公司的创新视野，鼓舞了我们的创新意识。全司上下要认真学习吸收讲座内容，抓住数字化时代关键历史机遇，为把衡钢建设成为世界一流专业化无缝钢管企业而不懈奋斗。

在技术交流环节，双方围绕钢管生产新工艺、相关产线技术实施方案、智能制造等问题与衡阳钢管技术人员进行了深入交流。

东北大学与鞍钢集团续签战略合作框架协议

近日，东北大学与鞍钢集团有限公司战略合作签约仪式在东北大学国际学术交流中心举行。鞍钢集团有限公司总经理、党委副书记李镇，鞍钢集团有限公司党委常委、副总经理徐世帅，东北大学党委书记郭海，东北大学校长冯夏庭，中国工程院院士王国栋，副校长张皓出席签约仪式。副校长唐立新主持会议。

郭海代表东北大学向鞍钢集团对学校的厚爱和支持表示衷心感谢。郭海表示，鞍钢集团作为世界 500 强企业，处于行业领先地位，被誉为“新中国钢铁工业的摇篮”。自 2018 年双方签订战略合作框架协议以来，合作取得丰硕成果，并结下深厚友谊。党的二十大报告提出，教育、科技、人才是全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑。服务钢铁行业高质量发展是东北大学优势所在、使命所在，希望以本次战略合作为契机，聚焦企业所需、发挥自身所能，持续加强与鞍钢集团在科学研究、技术创新、产业合作、人才培养等全方面的合作，力争突破一批关键核心技术，促进更多科技成果转化落地，打造校企合作新标杆、新典范，为推进新型工业化、服务国家重大战略需求和东北全面振兴作出新的更大贡献。

李镇代表鞍钢集团向东北大学长期以来对鞍钢创新发展的大力支持表示衷心感谢。李镇表示，重返母校倍感亲切，为母校的发展成就深感骄傲和自豪。2018 年以来，双方秉承创新合作优良传统，优势互补、协作共赢，取得了丰硕的创新合作成果，为鞍钢高质量发展提供了强有力的人才支撑。希望双方以新一轮战略合作为新起点，聚焦提升核心竞争力和增强核心动能，围绕国家重大战略和产业升级发展，依托先进材料工程研究院等科研平台，进一步拓展合作广度、增加合作深度、加快创新速度，在矿产资源、先进材料、智能生产、低碳冶金、极致效能等领域开展协同创新合作，加快科技成果转移转化产业化。同时，依托东北大学丰富的创新资源，加强创新人才培养，探索校企协同育人新路径，携手书写鞍钢集团与东北大学共赢发展新篇章，为推进新型工业化，为东北、辽宁全面振兴作出新的更大贡献。

会上，徐世帅、张皓代表双方签署战略合作框架协议。与会人员围绕合作具体事宜进行座谈交流。

王国栋院士作加快数字钢铁建设联合创新的建议报告。王国栋表示，推进新型工业化高质量发展，要工业化和信息化并联，激发传统制造业向现代制造业转型升级。钢铁行业要建设数字化转型的基础设施底座，实施“智改数转”“数字换脑”“模型换代”，加速数字化转型，以数字化赋能绿色化、高质化、强链化，走新型工业化的道路，加快东北老工业基地振兴，着力提高我国钢铁行业的国际竞争力，使我国钢铁行业

成为中国式现代化企业的典范、国际领先的产业集群。

冯夏庭在总结讲话中对鞍钢集团多年来对东北大学的关心支持表示感谢。冯夏庭表示，鞍钢集团是中国最具资源优势的钢铁企业，作为新中国第一个恢复建设的大型钢铁联合企业和最早建成的钢铁生产基地，为国家经济建设和钢铁事业发展作出了突出贡献。希望双方落实框架协议各项内容，强化国家战略科技力量、重大任务协同攻关、关键技术突破、人才培养和社会交流等方面的深度合作，携手书写共赢发展新篇章。

鞍钢集团总部相关部门、相关子企业负责人，东北大学相关职能部门、相关学院负责人等参加会议。

东北大学与柳钢集团合作交流会举行

1 月 12 日，东北大学与柳钢集团合作交流会在轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（RAL）举行。柳钢集团副总经理、总工程师卢春宁，中国工程院院士、东北大学副校长唐立新，中国工程院院士、东北大学教授王国栋出席交流会。柳钢集团科技质量中心、广钢集团、东北大学 RAL 实验室、冶金学院等相关负责人及教授专家参加会议。交流会由东北大学科学技术研究院院长徐伟教授主持。

唐立新副校长在致辞中对卢春宁总经理一行的来访表示欢迎并对柳钢集团在钢铁行业的影响力及作出的贡献表示充分认可。唐校长指出，东北大学钢铁共性技术协同创新中心自组建以来，在王院士的带领下聚焦钢铁全流程技术，坚持理论联系实际的学风，围绕钢铁行业工艺、材料、装备、服务、智能一体化方面作了大量卓有成效的工作，取得了一系列突出的成绩。唐校长表示，柳钢集团和东北大学有着非常好的合作基础，希望通过此次交流进一步深化柳钢与东大的合作，发挥我校科研优势，在建设新型工业化过程中发挥引领示范作用，助力柳钢集团提质增效、转型升级，实现高质量发展。

卢春宁副总经理首先向与会人员简要介绍了柳钢集团近年来的业务架构、产业发展等情况，并结合柳钢集团未来发展愿景，提出了柳钢对科技创新、产学研深度融合、绿色化、数字化、高端化发展的迫切需求。卢春宁表示，长期以来柳钢集团与东北大学密切合作、协同创新，形成了深厚友谊，在推进钢铁行业蓬勃发展过程中作出了突出贡献。希望通过本次交流推动柳钢集团与东北大学在产品研发，数字化、绿色化转型等方面进一步加强合作，实现共赢发展。

王国栋院士对卢春宁一行的到来表示欢迎并详细介绍了东北大学钢铁共性技术协同创新中心的发展历程、研究领域与代表性成果等情况。王国栋院士表示，中心立足钢铁工业特点，多年来面向钢铁领域绿色

化、数字化和高质化的发展要求，以企业为主体、以市场为导向，凝练出了涵盖整个钢铁制造全流程（选矿—炼铁—炼钢连铸—热轧 / 冷轧—产品—服务）的关键共性技术，产出了一批高水平研究成果。王院士表示，希望通过此次交流深入了解柳钢集团的想法与需求，同时发挥东北大学在技术创新、产学研用深度融合等方面的特色优势，建立互利共赢的深度合作关系，切实解决企业发展面临的痛点、难点、堵点问题，为我国钢铁工业绿色化、数字化转型发展提供有力支撑。

会上，双方人员围绕感兴趣的研究议题及未来合作的领域等方面开展技术交流与研讨，并初步明确了双方具体合作方向与后续联络机制。

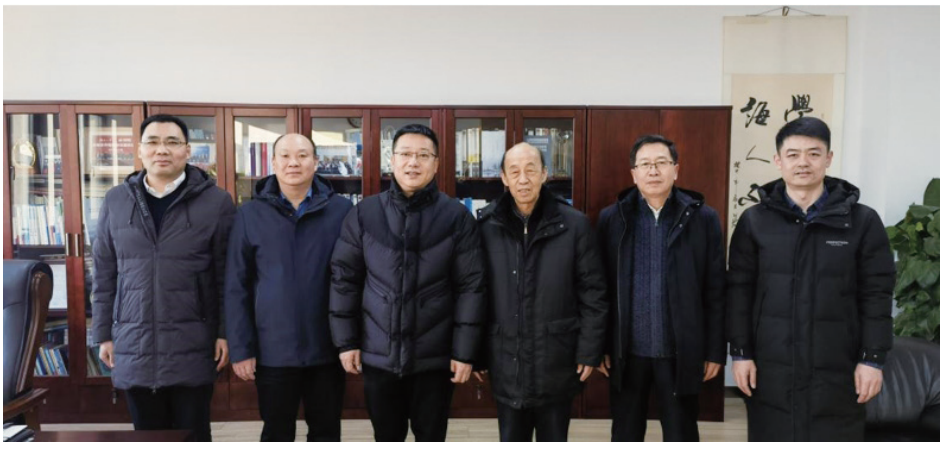
抚顺新钢铁有限责任公司总经理吴疆一行到 RAL 实验室交流访问

1 月 24 日下午，抚顺新钢铁有限责任公司总经理吴疆、节能环保研究院常务副院长王金华、技术中心副主任柴建铭、技术中心科技管理室主任倪晓东到访轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（RAL）进行交流。中国工程院院士、东北大学教授王国栋，RAL 实验室主任袁国教授出席交流会。

吴疆总经理从业务领域、发展规划等方面向与会人员介绍了抚顺新钢铁近期的基本情况。吴疆表示，抚顺新钢铁与东北大学有着深厚的合作友谊，长期以来，东北大学持续发挥人才培养与钢铁技术创新优势，为支持公司发展做出了重要贡献。希望双方进一步发挥地缘优势，加深双方合作，拓展协同领域，以数字化和智能化赋能企业精益生产，深化提产增效举措，推动双方事业共同发展。

王院士指出，抚顺新钢铁与东北大学有多年的合作基础，合作成效显著，希望双方进一步拓展合作领域，切实将地缘优势转化为合作优势。王院士表示，双方合作要紧密围绕企业实际需求，以绿色化、数字化、高质化为目标，全面赋能抚顺新钢铁高质量发展。双方要立足流程工业特点，围绕钢铁生产全流程进行协同创新，进一步促进数字经济与实体经济深度融合，加快传统产业升级换代，切实解决企业发展中的瓶颈问题，不断增强抚顺新钢铁的持久竞争力。

会上，双方就下一步合作模式与合作领域进行了具体交流。



本钢集团与东北大学联合举办数字化转型对接交流会

3 月 5 日，本钢集团与东北大学联合举办数字化转型对接交流会，会议围绕“本钢—东大钢铁全流程数字化整体方案与进度”等议题，进行了深入讨论和交流。

中国工程院院士、东北大学材料科学与工程学院教授王国栋，本钢集团副总经理齐振参加交流会。会议由本钢集团总经理助理、总工程师蒋光炜主持。

会上，王国栋院士详细阐述了钢铁企业数字化系统的发展现状及前景；东北大学专家团队介绍了东北大学与本钢集团合作推进的全流程数字化整体方案，并围绕《板坯钢轧界面高效衔接关键技术》《钢铁企业能源管理与碳排放数字化系统开发与应用》以及《钢铁企业资源、能源、排放、成本管理平台》等一系列项目进行了详细讲解。

板材公司汇报了合作方案的具体推进情况及进度，方案中部分项目技术附件已由双方确认形成，预计将在未来几个月持续取得进展。

会议指出，双方要建立常态化对接交流工作机制，方案要按项目的执行机制整体推进。要以智能化、数据化为主线，通过引入先进的信息技术和工业互联网平台，优化生产流程，提升产品质量、提高生产效率、降低企业运营成本。要通过数据分析和模型预测，让企业能够更准确地把握市场动态，提高决策效率和竞争力。要共同筹划数字化信息技术平台搭建，通过战略合作，强化校企联合，在行业当前及未来数字化、智能化应用技术方向取得突破。

与会人员一致认为，数字化转型是钢铁行业适应新发展格局、实现高质量发展的必由之路。本次交流会的成功举办，不仅为本钢集团的数字化转型指明了方向，也为企业后续实现高端化、智能化、绿色化发展提供了新的思路和路径。

东北大学专家团队成员，本钢集团相关部门、板材公司和北营公司部分单位相关负责人等参加座谈交流。

钢铁全流程数字化标准研讨会在东北大学举行

3 月 5 日，钢铁全流程数字化标准研讨会在东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（RAL）举行。工信部赛迪研究院中国软件评测中心工控事业部总经理杨学志，冶金工业信息标准研究院智能组组长、全国钢标准化技术委员会冶金智能制造标准化工作组秘书长刘斓冰，中国工程院院士、东北大学教授王国栋出席交流会。

刘斓冰秘书长围绕各制造业强国的智能制造战略规划、行业智能制造标杆引领、钢铁行业智能制造标准化工作推进情况作题为《钢铁工业智能制造标准体系建设进展》的报告。在《钢铁工业智能制造标准体系建设进展》的报告中，刘斓冰秘书长简要介绍了 2020 年信息标准院作为全国钢标准化技术委员会冶金智能制造标准化工作组秘书处承担单位以来，推进钢铁行业智能制造标准化开展的一系列相关工作。

王国栋院士简要介绍了钢铁行业的智能制造发展现状，结合今年发布的《原材料工业数字化转型工作方案 (2024—2026 年)》阐述了行业数字化转型的重要性，对 RAL 突破的行业数字化转型的关键核心技术进行了重点介绍，下一步将其中一部分技术转化成先进适用的数字化转型标准规范，为推动钢铁行业高质量发展做出积极贡献。

工信部赛迪研究院中国软件评测中心工控事业部、赛迪智库产业政策研究所、世界金属导报、东北大学钢铁共性技术协同创新中心相关负责人及教授专家参加会议。会上，与会人员围绕钢铁全流程数字化标准体系建设进行了深入交流。

东北大学与鞍钢股份鲅鱼圈钢铁分公司数字化交流会举行

3 月 13 日，东北大学与鞍钢股份鲅鱼圈钢铁分公司数字化交流会在轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（RAL）举行。鞍钢鲅鱼圈钢铁分公司总经理助理于海岐，中国工程院院士、东北大学教授王国栋出席交流会。鞍钢鲅鱼圈分公司设备工程部、炼焦部、炼铁部、炼钢部、厚板部、东北大学钢铁共性技术协同创新中心相关负责人及教授专家参加会议。交流会由 RAL 实验室副主任张殿华教授主持。

于海岐总经理助理简要介绍了鞍钢股份鲅鱼圈钢铁分公司的企业动态、产业发展情况以及在数字化转型实践中的探索与创新技术需求情况。于海岐指出，目前鞍钢鲅鱼圈分公司高度重视数字化转型工作，希

望通过此次交流进一步强化双方合作，借助东北大学强大的科研力量，为鞍钢鲅鱼圈分公司在建设数字化产线等方面提供技术支撑，推动公司创新发展。

王国栋院士对于海岐一行的到访表示热烈欢迎。王院士表示，东北大学与鞍钢有着良好的合作基础，在多年的合作中形成了优势互补、合作共赢的良好发展态势。王院士指出，钢铁企业打造数字化的全流程一体化生产线意义重大，希望通过此次交流，深入了解鞍钢鲅鱼圈钢铁分公司在数字化转型发展中的想法与需求，同时发挥东北大学钢铁共性技术协同创新中心在科技创新、数字化技术等方面的特色优势，与鞍钢鲅鱼圈分公司通力合作，面向钢铁全流程领域，统筹推进企业数字化换脑、模型换代，共建钢铁工业大模型，为钢铁行业高质量发展作出新的贡献。

会上，与会人员围绕双方感兴趣的研究议题及未来合作的领域等方面进行了技术交流与探讨，并明确了双方具体合作方向与后续联络机制。

东北大学与宝钢湛江钢铁技术交流会举行

3 月 14 日，东北大学与宝钢湛江钢铁有限公司技术交流会在轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（RAL）举行。湛江钢铁党委书记、董事长田国兵，中国工程院院士、东北大学教授王国栋出席交流会。湛江钢铁炼铁厂、人力资源部、运营改善部、技术中心、冷轧厂、炼钢厂、东北大学对外联络与合作处、钢铁共性技术协同创新中心相关负责人及教授专家参加会议。交流会由东北大学科学技术研究院院长徐伟教授主持。

王国栋院士对田国兵董事长一行的到访表示热烈欢迎。王院士指出，湛江钢铁近年来技术进步成绩显著，着力打造钢铁“梦工厂”，是我国钢铁工业中的一面旗帜。王院士表示，希望通过此次交流深入了解湛江钢铁在实际生产过程中亟待解决的痛点、难点问题，发挥东大的科研优势，深化协同创新，助力湛江钢铁提质增效、转型升级，共同在推进新型工业化过程中发挥引领示范作用。

田国兵董事长向与会人员

详细介绍了宝钢湛江钢铁有限公司的发展历程、企业优势、产业发展、未来预期目标以及创新技术需求情况。他表示，湛江钢铁高度重视科技创新工作，东北大学在科学研究、技术创新等领域具有显著优势，希望通过此次交流促进湛江钢铁与东北大学进一步合作，助推公司围绕产品高端化、工厂数字化、工艺绿色化等方面进一步发力，实现高质量发展。

会议期间，王国栋院士作了题为“关于钢铁行业开展数字换脑、模型换代、创建工业大模型工作的建议”的专题报告。王国栋院士从数字时代钢铁行业面临的机遇与挑战，钢铁行业新型工业化数字底座——钢铁企业创新基础设施 (SEII)，数字换脑、模型换代——生成式 AI 大模型系统，钢铁行业数字化转型的特征和优势，钢铁企业智改数转、数字换脑、模型换代、创建行业工控大模型 5 个方面阐述了钢铁行业数字化转型智能化发展的方向及重要意义，并结合湛江钢铁实际情况提出了数字化转型的建议方案。

会上，与会人员围绕钢铁生产流程数字化、绿色化技术问题及未来合作的领域等方面进行了技术交流与探讨，并明确了双方具体合作方向与后续联络机制。

会前，王国栋院士带领田国兵董事长一行参观了 RAL 实验室中试车间。

冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

开放 流动 联合 竞争

轧制技术公众号　　钢铁共性技术公众号

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（东北大学）
网址：http://www.ral.neu.edu.cn
地址：辽宁省沈阳市和平区文化路三巷 11 号　　邮编：110819
电话：024-83687220　　传真：024-23906472