

## 技术发明奖公示：

项目名称	高纯净超厚尺度均质钢制备技术与应用
提名者	中国科学院沈阳分院
提名意见	<p>核电压力容器大锻件、高档轴承等是重大装备的核心零部件，也是亟需国产化的关键材料，其性能好坏主要取决于钢锭（铸坯）的品质。钢锭的纯净度、均质性在很大程度上决定了锻件/锻材的合格率和质量稳定性。该项目历经 10 余年的系统研究，通过模拟计算、机理研究与工程化试验，从纯净化冶炼出发，发现了氧含量的关键作用，提出了夹杂物驱动宏观偏析的新机制，发明了低氧纯净化技术，成功应用于大型铸锻件的均质制造。进一步发现了稀土金属中氧含量的决定性作用，发明了钢液和稀土金属中“双低氧技术”，有效解决了多年来稀土在钢中添加导致的钢的性能波动、时好时坏的瓶颈问题。微量稀土的添加，显著提升了钢的韧塑性和疲劳性能等，这为稀土特殊钢的稳定工业化应用做出了重要贡献。结合大钢锭铸造、锻造、热处理等工艺流程，发明了凝固自补缩、软芯锻造和铁素体膜构筑技术，有效解决了大锻件/锻材成形过程中成分均匀性和性能均匀性的难题。上述研究成果属于国际首创，获得授权发明专利 40 余项（其中包括 2 项国际专利），发表论文 100 余篇，在辽宁省成功转化，并推广到全国多家企业，企业新增产值 90 多亿元，创造了显著的经济和社会效益，偏析等新机理的研究也推动了钢铁冶金学科的发展。</p> <p>对照辽宁省技术发明奖授奖条件，提名该项目为 2018 年度辽宁省技术发明奖一等奖。</p>
项目简介	<p>核电大锻件、高档轴承等是重大装备的核心零部件，是特殊钢的代表，也是衡量一个国家工业水平的重要标志，亟需国产化。其合格率和质量稳定性在很大程度上取决于大钢锭（铸坯）的纯度和均质性。但均质性与超厚尺度是一对矛盾，钢的厚度越大，越容易产生偏析缺陷。如何解决超厚尺度钢的纯净性、均质性？这是一个国际性难题，也是该项目的立项宗旨。该项目结合超厚尺度钢的制备全流程，历经十余年系统研究，取得了如下发明成果：</p> <p><b>1) 在大钢锭研制过程中，发现了氧的关键作用，提出了夹杂物驱动宏观偏析的新机制，发明了低氧纯净化技术，成功应用于大型铸锻件/锻材的均质制造</b></p> <p>宏观偏析是影响大型铸锻件品质和质量稳定性的主要因素。上世纪 60 年代建立起来的经典偏析理论认为自然对流主导了宏观偏析的形成，钢锭越大，偏析越严重，特别是通道偏析，难以根除。该项目通过百吨级大钢锭的实物解剖和多尺度计算，发现夹杂物浮力流才是引起通道偏析的主要机制。通过控制钢水中氧含量（&lt;10ppm），显著减少了夹杂物，从而减轻甚至消除了通道偏析。从纯净化冶炼出发，该项目提出了由夹杂物而非自然对流驱动的偏析形成新机制，开发出冶炼与浇注流程的低氧纯净化技术，为核电等大型铸锻件的均质制造找到了新途径。Nature Communications 以“钢中夹杂物浮力流驱动通道偏析”为题发表了这一成果。</p> <p><b>2) 发现了稀土中氧的决定性作用，发明了钢液和稀土金属“双低氧技术”，解决了多年来稀土在钢中添加导致钢的性能波动、时好时坏的瓶颈问题</b></p>

	<p>受氧对偏析影响机制的启发，该研究发现了稀土钢中氧的决定性作用。发明了稀土金属与钢液双低氧技术，并制定钢水冶炼与浇注全流程防氧化工艺，有效解决了多年来钢中加入稀土导致的性能不稳定、时好时坏的难题，大幅度提高了钢的韧塑性和使役性能，成功实现稀土特殊钢的工业化应用。将稀土应用于铁路、风电等领域的高档轴承钢，拉压疲劳寿命提高一个数量级以上，优于进口高档轴承钢水平。</p> <p><b>3) 结合铸造、锻造和热处理流程，发明了凝固自补缩、软芯锻造和铁素体膜构筑技术，解决了大锻件/特厚板等的成分均质性与性能均匀性难题</b></p> <p>发明 900mm 厚大铸坯高温先脱模后保温技术，实现了大铸坯凝固过程自补缩，解决了大铸坯凝固致密性和组织均匀性问题，成功用于 170mm 以上特厚板制造，材料利用率提高 15% 以上；发明了凝固过程“软芯锻造”技术，通过在凝固末期对铸坯进行多向形变，显著改善了超厚尺度钢的成分均匀性问题，在压力容器等大锻件中成功应用，吨钢制造成本降低 1000 元以上；发明了超厚尺度低合金钢的铁素体膜构筑技术，显著细化了粒状贝氏体组织中的马奥岛，解决了核电大锻件心部冲击功不合格的难题，将我国核电锻件最大壁厚的制造能力提升到 378mm。</p>
客观评价	<p>研究工作发表在 Nature Communications 上，并作为研究亮点在 Nature Materials 上以“均质钢”为题给予高度评价。MRS Bulletin 发表了“低氧含量消除钢中通道偏析”的专题报道。经典偏析理论的创始人、美国麻省理工学院 Flemings 教授认为“这些研究者提供了令人信服的证据，发现了以前在枝晶间流动导致宏观偏析未考虑到的驱动力，祝贺他们卓越的工作”。“控氧可有效控制偏析”成为行业共识，研究成果极大地推动了核电等大型铸锻件/锻材国产化制造。合作企业评价钢与稀土金属“双低氧技术”突破了稀土在钢中应用的技术瓶颈，取得了稀土钢工业化应用的历史性突破。凝固过程自补缩技术、软芯锻造技术和热处理过程铁素体膜构筑技术，切实解决了超厚尺寸大锻件/锻材在制备过程中的成分均质性与性能均匀性难题，打破了若干大锻件/锻材依赖进口的被动局面。</p>
推广应用情况	<p>该项目获得授权发明专利 40 余项，其中国际专利 2 项，发表论文 100 余篇。研究成果在辽宁省鞍钢重机、抚钢、营口石钢京诚、沈阳铸锻公司、福鞍重工、铁岭北祥重工等企业成功应用，并推广到全国多家企业，合作企业新增产值 90 多亿元，创造了显著的经济和社会效益，实现了若干关键零部件的国产化与核心技术的自主化。同时，偏析等新机理的研究也推动了冶金学科的发展。</p>

主要知识产权证明目录（不超过 10 件）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人	专利有效状态
核心 1	发明专利	Method for controlling A-shaped segregation by purification of liquid steel	美国	US9234 252B2	20160112	US0092 34252B2	中国科学院金属研究所	李殿中 傅排先 刘宏伟 夏立军 李依依	有效
核心 2	发明专利	一种高纯稀土金属及其制备方法和用途	中国	ZL2016 1026557 5.5	20171103	2679792	中国科学院金属研究所	李殿中 栾义坤 杨超云 高金柱 夏立军 刘宏伟 傅排先 李依依	有效
核心 3	发明专利	A Method for Enhancing the Self-Feeding Ability of A Heavy Section Casting Blank	日本	2013-53 9120	20151211	5852126	中国科学院金属研究所	李殿中 栾义坤 傅排先 夏立军 李依依	有效
4	发明专利	一种通过钢水纯净化控制钢锭 A 偏析的方法	中国	ZL2012 1025178 4.6	20140305	1353804	中国科学院金属研究所	李殿中 傅排先 刘宏伟 夏立军 李依依	有效
5	发明专利	一种钢锭智能浇注系统	中国	ZL2015 1032875 1.0	20180309	2841121	中国科学院金属研究所	刘宏伟 胡小强 栾义坤 傅排先 刘 连 李殿中 李依依	有效
6	发明专利	一种钢中添加稀土金属提高性能的方法	中国	ZL2016 1063104 6.2	20180309	2841386	中国科学院金属研究所	栾义坤 刘宏伟 傅排先 杨超云 夏立军 李殿中 李依依	有效

7	发明专利	一种提高厚大断面铸坯自补缩能力的方法	中国	ZL2010 1060426 0.1	20121107	1071995	中国科学院 金属研究所	李殿中 栾义坤 傅排先 夏立军 李依依	有效
8	发明专利	用于大型特厚板坯的高温带液芯打箱的方法	中国	ZL2013 1001769 1.1	20150812	1752691	中国科学院 金属研究所	栾义坤 傅排先 刘宏伟 康秀红 夏立军 李殿中 李依依	有效
9	发明专利	一种钢锭超高温软芯锻造方法	中国	ZL2014 1034915 2.2	20170419	2460009	中国科学院 金属研究所	李殿中 孙明月 栾义坤 刘宏伟 傅排先 徐 斌 李依依	有效
10	发明专利	一种厚大断面低碳低合金钢铸锻件的热处理工艺	中国	ZL2014 1027381 2.3	20160330	2006393	中国科学院 金属研究所	蒋中华 王 培 李殿中 李依依	有效
完成人情况		<p>姓名、排名、行政职务、技术职称、工作单位、完成单位、对本项目贡献。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>李殿中 排名第 1，研究员，中国科学院金属研究所（工作单位、完成单位） <ul style="list-style-type: none"> <li>项目负责人，负责项目的总体实施，全面设计超厚尺度钢铸造、锻造和热处理热加工全流程的纯净化、均质化研究与技术开发工作。</li> <li>发现了氧对偏析的影响规律，提出了夹杂物漂浮驱动通道偏析形成的新机理，拓展了经典偏析形成理论，有效地控制了核电大锻件中的碳偏析。</li> <li>发现了稀土金属中氧含量的决定性作用，发明了钢液和稀土金属中的“双低氧技术”，解决了钢液中稀土添加导致的钢的性能剧烈波动、时好时坏的难题，显著提升了风电轴承等特殊钢的性能。</li> <li>对三个发明点均有重要贡献。</li> </ul> </li> <li>栾义坤 排名第 2，研究员，中国科学院金属研究所（工作单位、完成单位） <ul style="list-style-type: none"> <li>负责稀土钢“双低氧技术”研发与应用，制备了全氧含量小于 50ppm 的工业化商用高纯稀土金属，进行稀土钢集成技术开发，突破了稀土钢工业化应用的技术瓶颈。</li> <li>发现了金属凝固过程中的自补缩现象并揭示了其形成机制，开发原型技术并进行工业化应用，解决了大断面大高径比铸坯致密性和均质性难题，大幅提升材料利用率 15% 以上。</li> <li>对三个发明点均有重要贡献。</li> </ul> </li> </ol>							

	<p>3. 傅排先 排名第 3, 副研究员, 中国科学院金属研究所 (工作单位、完成单位)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>负责低氧纯净化冶炼与大单重钢锭的宏观偏析控制研究。组织解剖三支百吨级大钢锭, 阐明通道型偏析形成的机制, 并通过开发低氧纯净化技术, 显著改善了宏观偏析缺陷。</li> <li>负责稀土钢模铸钢锭的洁净化冶炼技术开发, 并将技术推广到西宁特钢等多家企业进行示范应用。</li> <li>对三个发明点均有重要贡献。</li> </ul> <p>4. 孙明月 排名第 4, 研究员, 中国科学院金属研究所 (工作单位、完成单位)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>负责锻造过程机理研究与技术开发, 针对超厚尺度钢的成分偏析与中心疏松问题, 发明了凝固末期软芯锻造技术。通过计算模拟与实验研究相结合的手段, 优化了软芯锻造工艺, 并实现工业化应用, 取得显著效果。</li> <li>对第三个发明点有重要贡献。</li> </ul> <p>5. 王培 排名第 5, 研究员, 中国科学院金属研究所 (工作单位、完成单位)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>负责材料成分优化设计与热处理过程的相变机理研究与技术开发, 提出超厚尺度钢的组织与性能均匀的创新思路, 通过形成纳米尺度铁素体膜将相变过程碳元素扩散“局域化”, 进而细化组织, 并成功在“华龙一号”核电机组关键部件制备中应用。</li> <li>对第二、三个发明点有重要贡献。</li> </ul> <p>6. 李依依 排名第 6, 院士, 中国科学院金属研究所 (工作单位、完成单位)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>提出了超厚尺度均质钢制备理论与技术的研究方向, 并带领项目完成人和研究生从材料的成分优化、冶炼、凝固、锻造和热处理全流程出发, 进行组织均匀性和性能均匀性的讨论和研究。</li> <li>对三个发明点均有重要贡献。</li> </ul>
<p>完成人合作关系说明</p>	<p>项目完成人都来自于完成单位的同一团队。项目第一完成人李殿中研究员为项目完成单位中国科学院金属研究所材料加工模拟研究部主任, 科技部重点领域“大型铸锻件模拟仿真与工程应用”创新团队负责人, “万人计划”科技创新领军人才, 一直从事大型铸锻件组织与缺陷控制、特种钢纯净化冶炼与偏析控制等研究。项目第六完成人李依依院士是材料加工模拟研究部顾问, 负责提出研究方向, 组织讨论。项目第二完成人栾义坤研究员、第四完成人孙明月研究员是第一完成人指导的研究生; 第三完成人傅排先副研究员、第五完成人王培研究员为第一完成人和第六完成人共同指导的研究生, 分别于 2010 年 7 月、2009 年 7 月、2009 年 7 月和 2011 年 7 月获得博士学位, 并留所工作, 与第一完成人和第六完成人共同开展高纯净超厚尺度均质钢制备技术与应用研究工作。</p>