

## 2019 年度国家技术发明奖项目公示材料

### 项目基本信息

项目名称：含铬型钒钛磁铁矿高炉冶金分离与资源综合利用关键技术

拟报奖种：技术发明奖

完成人：薛向欣、张志祥、姜涛、张勇、储满生、文永才

### 提名专家基本情况

专家一：彭金辉、昆明理工大学、教授/院士、冶金物理化学

专家二：刘炯天、郑州大学、教授/院士、矿物加工

专家三：邱冠周、中南大学、教授/院士、矿物加工、生物冶金

## 一、提名意见

提名意见：

钒钛磁铁矿资源是一种非常重要的战略资源，是铁、钒、钛等多种金属的主要载体，其诸多深加工产品广泛应用于冶金、化工、航空航天、国防军事等领域，是我国国民经济发展和国家安全的重要物质保障。含铬型钒钛磁铁矿作为一种特殊的钒钛磁铁矿资源，其中不仅蕴含铁、钒、钛有价元素，还伴生有我国严重短缺的铬资源，综合利用价值极高，研究开发意义非常重大。但与普通钒钛磁铁矿相比，因含铬型钒钛磁铁矿的矿相组成更加复杂，其冶炼与资源综合利用更加困难，迄今为止国内外尚无大规模利用的工业生产实践。我国攀西红格地区拥有 36 亿吨含铬型钒钛磁铁矿资源，但因国内外无成熟的综合利用技术可借鉴，致使该资源至今尚未得到有效的开发利用。

鉴于此，东北大学与建龙集团和攀钢集团公司合作，在国家科技部、基金委等项目经费大力资助下，以进口含铬型钒钛磁铁矿为主要研究对象，系统开发了含铬型钒钛磁铁矿烧结和氧化球团生产、高炉合理炉料结构、渣系优化、有价组元高效分离提取与二次资源综合利用等关键技术。该技术成果获得了含铬型钒钛磁铁矿烧结和球团生产的合理工艺条件及其冶金性能优化措施，确定了高炉合理炉料结构和最优操作制度，在确保高炉技术经济指标的前提下，实现了含铬大于 0.4%，含钒大于 1%的含铬型钒钛矿高炉冶炼的顺行，在三座 530M<sup>3</sup>高炉上进行了工业生产以及 1350 m<sup>3</sup>高炉的工业实践，为该矿高炉分离流程奠定了基础，得到满足提钒要求的含钒铬铁水，取得了一批具有自主知识产权的发明专利技术，填补了含铬型钒钛磁铁矿高炉冶炼及资源综合利用工业技术空白，促进了企业乃至我国含铬型钒钛磁铁矿资源综合利用技术进步，为国家资源安全及经济可持续发展提供了重要保障。该技术成果具有国际领先水平，2015 年获得了黑龙江省技术发明一等奖、中国有色金属工业技术发明一等奖。

鉴于该技术成果符合国家产业政策和国家重大战略需求，且意义重大。特此提名该项目申报国家技术发明奖。

提名该项目为国家技术发明奖 二 等奖。

## 二、项目简介

本发明是在“863 计划”“高钒高铬型钒钛磁铁矿高效综合利用技术开发”及第一完成人任首席的国家自然科学基金重大项目中第四课题“钒钛组元相际迁移的动力学规律及其影响因素”支持下，同时，在与攀钢集团有限公司合作承担的国家科技支撑计划课题“高铬型钒钛磁铁矿高效冶炼关键技术研究”、“973 计划”课题“高铬型钒钛磁铁矿还原新过程基础研究”的支持下，无任何参考资料，针对含铬型钒钛磁铁矿矿物组成复杂、原料造块及高炉-转炉冶金分离极为困难的情况，协同考虑资源综合利用和有价值组元迁移规律，系统开展了如下研究：（1）含铬型钒钛磁铁矿基础特性；（2）含铬型钒钛磁铁矿烧结试验及工艺优化；（3）含铬型钒钛磁铁矿氧化球团试验及工艺优化；（4）含铬型钒钛磁铁矿高炉冶金分离合理炉料结构和渣系优化；（5）含铬型钒钛磁铁矿高炉冶金分离工业试验；（6）含钛炉渣生态化综合利用技术。上述研究已得到工业实践验证。

本项目的主要技术发明点如下：

（1）研发了高炉冶炼含铬型钒钛磁铁矿技术，成功实现了三座 530 m<sup>3</sup> 高炉同时工业验证以及 1350 m<sup>3</sup> 高炉的工业实践，为该矿高炉分离流程奠定了基础，得到满足提钒要求的含钒铬铁水；（2）以高炉铁水含钒量在 0.2% 以上为准则，研发了将提钒弃渣返回烧结生产等一系列措施的该矿优化烧结技术，为高炉提供优质烧结矿；（3）通过优化竖炉工艺，研发了以该类矿为主要原料的含钒 4.5% 以上的球团矿，为高炉提供优质球团矿；（4）研发了含钛炉渣的生态处理方法，其处理后的物料可用作生产光催化材料的原料及应用于其他技术领域；（5）研发了一次性分离钒铬还原沉淀的方法，流程简单，成本低廉；（6）研发了含钛炉渣提取 TiO<sub>2</sub> 的技术，实现了含钛炉渣整体无污染的生态化处理和利用。

该项目成功解决了含铬型钒钛磁铁矿高炉难冶炼、难分离的关键技术问题，为我国含铬型钒钛磁铁矿资源综合利用提供了一条工业技术路线，满足国家对钒、铬战略产品的均衡配置，率先给出有价值组元在全流程中的价态变化规律，填补了含铬型钒钛磁铁矿高炉冶金分离及资源综合利用工业技术空白，年均经济效益 1.0 亿元，授权 41 项国家发明专利，发表论文 52 篇，专著 1 部。含铬型钒钛磁铁矿采用高炉冶金分离流程是目前最好的技术路线，该技术成熟度高、经济性好、单体设备产能高，且无六价铬产生，国内外冶炼该矿除该项目采用高炉流程外，未见其他同类报道。

该技术在黑龙江建龙和承德建龙的实施结果：高炉利用系数分别为 3.47 和 2.85t/m<sup>3</sup>·d，喷煤比均为 160 kg/t，综合焦比分别为 500 kg/t 和 485 kg/t；在攀钢实施结果：利用系数 2.427t/m<sup>3</sup>·d，燃料比 573kg/t，钒、铬收得率分别达到 72% 和 80%。

该项目主要成果分别通过黑龙江省、辽宁省科技厅和中国钢铁工业协会的科技成果鉴定，评价为国际领先水平，获 2015 年黑龙江省和中国有色金属工业技术发明一等奖。

### 三、客观评价

从世界范围看，钒钛磁铁矿主要有三种利用途径：一是用作高炉炼铁的原料，回收铁和钒，如我国攀钢、承钢、前苏联下塔吉尔钢厂等；二是用作直接还原的原料，后经电炉熔化还原回收铁和钒，如南非 Highveld 和 新西兰钢铁公司等；三是含  $\text{TiO}_2$  很高的钛精矿用作电炉冶炼高钛渣的原料，主要目的是回收钛，铁作为副产品回收，如加拿大 QIT 等。重要的是：上述工业过程所用原料均不是该项目所用的含铬型钒钛磁铁矿，所以，无法比较主要参数。

上世纪 60~70 年代，我国成功攻克普通钒钛磁铁矿高炉冶炼的技术难关，成为世界上第一个以工业规模从钒钛磁铁矿中综合提取铁、钒、钛的国家。目前我国钒钛磁铁矿的利用主要采用高炉冶炼-转炉吹钒渣-转炉炼钢流程，回收了大部分铁、一半左右的钒，但约 50% 以上钛以  $\text{TiO}_2$  形式进入高炉渣，受含钛高炉渣特殊性的影响，渣中钛基本没有得到回收利用，资源总体利用效率低。如何最大限度且高效地从钒钛磁铁矿中回收铁、钒、钛等资源仍是今后科学研究和工业实践的重要发展方向。

攀枝花红格矿为含铬型钒钛磁铁矿，储量约 36 亿吨，极具开发潜质。上世纪 80 年代以来，国内多家科研单位先后开展了红格钒钛磁铁矿工艺矿物学、选矿及资源综合回收试验。其中地质部矿产综合利用研究所开展了选矿、回转窑预还原—电炉炼铁、转炉吹钒铬渣、钒铬渣提取  $\text{V}_2\text{O}_5$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  等试验；攀钢钢铁研究院开展的红格铁精矿先提钒铬—浸出后精矿用竖炉气体还原—磁选分离试验，后提钒铬—钒铬分离等试验，得到了  $\text{V}_2\text{O}_5$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 。但上述研究偏重于非高炉流程，受当时经济和技术装备水平等的制约，含铬型钒钛磁铁矿的综合开发利用仅是实验室规模，没有形成产业化技术。相比之下，高炉冶炼含铬型钒钛磁铁矿的研究属空白，更无工业化。可见，为促进我国钒钛资源的高效利用，满足国家重大战略需求，含铬型钒钛磁铁矿的大规模研究开发势在必行。建龙钢铁有限公司、攀钢集团有限公司与东北大学合作，率先开展含铬型钒钛磁铁矿高炉冶金分离关键技术的研究和开发，弥补了国内外利用高炉流程冶炼含铬钒钛磁铁矿的技术空白，为我国攀枝花红格矿的冶金分离提供了一条切实可行的技术路线。

该项目实现了含铬型钒钛磁铁矿的工业化生产，建龙钢铁公司烧结机、竖炉、高炉利用系数分别为  $1.5 \text{ t}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、 $6.8 \text{ t}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、 $3.47 \text{ t}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ，高炉综合焦比为  $485\text{-}500 \text{ kg}/\text{t}$ ；攀钢集团有限公司烧结机、高炉利用系数分别为  $1.381 \text{ t}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、 $2.427 \text{ t}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ，高炉综合焦比为  $565\text{-}580 \text{ kg}/\text{t}$ 。所有的主要技术经济指标均达到和超过了项目的立项目标和生产要求，各工序技术经济指标完全达到了普矿冶炼水平，并且部分指标优于普矿冶炼，且为国内外首次发布。

2013 年黑龙江省科技厅主持了该项目在黑龙江建龙钢铁公司的成果鉴定，黑龙江建龙的含铬型钒钛磁铁矿在球团中配比稳定在 70%-80%；采用 60%高碱度烧结矿和 40%钒钛球团矿合理炉料结构；根据入炉原料的特点，优化炉渣成分，确定碱度稳定在  $1.20\pm 0.05$ ，MgO 含量 10%左右，满足了高炉强化冶炼的要求；烧结机、竖炉、高炉利用系数分别为  $1.5 \text{ t}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、 $6.8 \text{ t}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、 $3.47 \text{ t}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ，高炉综合焦比为 490-500 kg/t；应用提钒废水和炉窑烟气综合治理技术的钒产品生产线已经建成并投产，成功生产出片钒、铬渣和钒渣球团矿三大产品，并且实现废水废气零排放，与会专家一致通过了技术鉴定，并评价成果达到了国际领先水平。该成果获得 2015 年黑龙江省技术发明一等奖。

2014 年河北省科技厅主持了该项目部分成果在承德建龙钢铁公司的技术鉴定，承德建龙的钒钛矿搭配比例为全部含铁料的 86%，普矿搭配比例为 8%，烧结矿低温还原粉化率  $\text{RDI}_{+3.15}\geq 80\%$ ；转鼓指数  $T\geq 75\%$ ；球团矿平均抗压强度 2500 N/个，低于 1500 N/个 $\leq 8\%$ ，转鼓强度  $T\geq 93\%$ ，还原膨胀  $\text{RSI}\leq 13\%$ 。高炉焦矿混装配比为焦丁 200 kg/批，小粒焦 400 kg/批，合计混装比 10.91%，高炉炉渣的二元碱度为 1.15-1.20，MgO 10.5-11.5%， $\text{Al}_2\text{O}_3$  12.5-13.5%， $\text{TiO}_2$  8-9%，高炉入炉风量  $3100 \text{ m}^3/\text{min}$ ，透气性指数 20-22，2 号炉入炉风量  $2000 \text{ m}^3/\text{min}$ ，高炉利用系数  $2.85 \text{ t}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ，1 号高炉综合焦比 485 kg/t。最终的技术指标均达到和超过项目要求。鉴定委员会专家经过充分讨论，一致通过了技术鉴定，并评价成果达到了国际领先水平。

2013 年辽宁省科学技术厅主持了“含钛矿物关键技术开发及应用”成果鉴定。鉴定委员会专家认为该项目基于资源综合利用、生态材料制备及污染治理协同研究理念，依据含钛高炉渣的矿物组成与物理化学性质，充分利用含钛高炉渣中的钛元素制备环境友好的材料，详细研究了利用含钛高炉渣制备光催化材料、泡沫微晶玻璃等的可行性，获得了良好的研究结果，并开发出了相关技术，对实现工业化整体利用含钛高炉渣有着重要借鉴和推动作用。尤其在利用含钛高炉渣制备泡沫微晶玻璃和制备适于农作物的生长剂方面，相关技术已成功应用于实际生产，产生了良好的经济和社会效益。鉴定委员会专家一致评价该鉴定项目整体达到国际领先水平。该成果获得 2015 年中国有色金属工业技术发明一等奖。

攀枝花钢铁研究院检测中心对该项目下游产线的五氧化二钒产品检测结果合格；多家用户对五氧化二钒产品质量表示满意。

## 四、应用情况

该项目在黑龙江建龙钢铁有限公司实施后，在稳定铁水产、质量的前提下，通过优化烧结、球团中钒钛矿配比，使铁前系统配矿成本大幅度降低，为企业创造显著的经济效益。黑龙江建龙钢铁有限公司于 2010 年 11 月 5 日始逐渐配加含铬型钒钛磁铁矿，截止 2016 年底，总计使用 496.87 万吨，通过本项目实施，全面替代辽吉粉，原料吨成本降低 100 余元，累计节约成本 4.92 亿元，近三年节约成本 0.371 亿元。

该项目在承德建龙特殊钢有限公司应用实施后，烧结矿中钒钛粉配比达到 86%，球团矿钒钛粉配比 97%，在确保了入炉原料质量的前提下，逐步增加了钒投入量，并大大降低了铁前成本，生铁合格率为 100%；1350m<sup>3</sup> 高炉指标逐步攀升，全厂综合焦比从 2012 年的 532kg/t 降低到目前 485kg/t，钒还原率达到了 90.52%。本项技术在承德建龙特殊钢有限公司应用以来，近三年为公司创效 32271 万元，并取得了良好的社会效益。

该项技术 2017 年在攀钢集团有限公司 1350m<sup>3</sup> 高炉上实施工业试验后，本项目研究形成的高铬型钒钛磁铁矿高炉冶金分离技术达到了攀钢采用钒钛磁铁矿工业生产同样的技术指标，具备了产业化应用的技术条件。从原料至半钢，试验期间的吨铁成本比基准期高 16.24 元，主要原因是试验期间的炉温水平提高和使用价格较高的南非进口矿所致。总体看，试验期的成本差异不大，说明本项目研究形成的含铬型钒钛磁铁矿冶金分离技术，具备了产业化应用的经济条件。

总体来看，该项目创造效益 7 亿元以上。

本项目所研发的含铬型钒钛磁铁矿高炉冶炼技术、钒产品、钒微合金钢系列产品直接面向国内外需求。现存问题的解决及关键技术的突破，不仅使含铬型钒钛磁铁矿利用程度以及铁、钒、铬等有价值组元的回收率达到更高水平，而且在促进冶金企业发展的同时又可带动相关产业的发展，将会对区域经济产生巨大的带动作用。同时还可为社会提供新的就业机会，为整个社会的可持续发展打下良好的基础。

通过含铬型钒钛磁铁矿高炉冶炼及资源综合利用关键技术项目的研发，不仅有效解决建龙钢铁公司富矿资源短缺问题，也为我国同类型含铬型钒钛磁铁矿高炉冶炼提供示范和借鉴作用，一定程度上促进我国含铬型钒钛磁铁矿产业化技术的发展。本项目的开展符合我国产业政策和技术发展趋势，满足市场需求，对我国国民经济的稳定发展具有重要的意义。

本项目填补了黑龙江省无钒铬钛生产技术和企业的空白，使我国钒铬钛战略资源生产和产品加工产业布局北移，形成了攀枝花、承德和黑龙江三足鼎立的钒钛产业格局，为我国高钒高铬型钒钛磁铁矿资源综合利用技术探索了一条工业路

线，为国家资源安全及经济的可持续发展提供重要保障。本发明还为未来我国攀西地区含铬型钒钛磁铁矿资源工业化应用提供了一条成熟技术路线。最后，本发明的成功极大促进了中俄技术和资源合作。



## 五、主要知识产权证明目录

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	发明专利有效状态
发明专利	高铬高钒钒钛矿的高炉冶炼方法	中国	201210002025.6	2013-11-06	1301599	黑龙江建龙钢铁有限公司	张勇; 薛向欣; 姚本金; 储满生; 陈立军; 陈立文; 曲刚; 巩明健; 张路春; 纪守考; 曹淑华	未缴费失效
发明专利	高品位高钒含铬型钒钛磁铁精矿混合料制备烧结矿的方法	中国	ZL201710513046.7	2018-10-23	3120928	东北大学	薛向新; 张勇; 姜涛; 张志祥; 杨松陶; 周密; 张显峰; 程功金; 姚本金; 周晟程	有效
发明专利	一种高钒高铬型钒钛磁铁矿球团	中国	ZL201710448511.3	2018-8-28	3051941	东北大学	薛向新; 张勇; 程功金; 张志祥; 姜涛; 张显峰; 杨合; 姚本金; 杨松陶; 周晟程	有效
发明专利	一种高钒高铬型钒钛磁铁矿球团的制备方法	中国	ZL201710447611.4	2018-10-23	3120470	东北大学	薛向新; 张勇; 程功金; 张志祥; 姜涛; 张显峰; 杨合; 姚本金; 杨松陶; 周晟程	有效
发明专利	一种含钛高炉渣的处理方法	中国	200510047819.4	2008-1-16	372043	东北大学	薛向欣; 杨合; 姜涛; 段培宁; 张志宏; 赵娜; 董学文; 刘卯	有效
发明专利	一种含铬型钒钛磁铁精矿配加弃渣制备烧结矿的方法	中国	200510018057.9	2017-04-12	2454261	东北大学	薛向欣、姜涛、杨松陶、周密	有效
发明	一种用高铬	中国	20151	2017-	23435	东北大	薛向欣、周密、姜	有效

专利	型钒钛混合料制备烧结矿的方法		0064694. X.	01-11	67	学	涛、杨松陶、段培宁	
发明专利	一种利用含钛高炉渣生产二氧化钛的方法	中国	201010576206. 0	2012-08-29	1033011	东北大学	薛向欣；于洪浩；段培宁；姜涛；杨合	有效
发明专利	一种钒铬浸出液中分离提取钒铬的方法	中国	201310204829. 9	2014-12-10	1541910	东北大学	薛向欣；毛林强；杨合；刘东；李亮；历明涛.	有效
发明专利	一种钒钛磁铁矿高炉冶炼炉料及高炉冶炼方法	中国	201010140451. 7	2016-05-04		攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司	付卫国；蒋胜；文永才；张海军	未缴年费终止失效

## 六、主要完成人情况表

姓 名	薛向欣	排 名	1
行政职务	所长	技术职称	教授
工作单位	东北大学		
完成单位	东北大学		
<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>全面负责本项目的总体设计以及烧结、球团、高炉冶炼关键技术开发、工业化应用与总结，对项目核心技术发明内容做出了创造性贡献，获得授权发明专利 35 项，发表相关论文 42 篇。</p>			

姓 名	张志祥	排 名	2
行政职务	董事长	技术职称	无
工作单位	北京建龙重工集团有限公司		
完成单位	北京建龙重工集团有限公司		
<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>负责项目烧结、球团、高炉冶炼关键技术工业化应用过程的组织、实施与管理，对项目部分核心技术发明内容做出了创造性贡献。 获得授权发明专利 4 项。</p>			

姓 名	姜涛	排 名	3
行政职务	系副主任	技术职称	教授
工作单位	东北大学		
完成单位	东北大学		
<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>具体负责高钒高铬型钒钛磁铁矿烧结、球团、高炉冶炼、资源综合利用关键技术开发与工业化应用，对项目核心技术发明内容做出了创造性贡献，获得授权发明专利 13 项，发表论文 11 篇。</p>			

姓 名	张勇	排 名	4
-----	----	-----	---

行政职务	处长	技术职称	工程师
工作单位	北京建龙重工集团有限公司		
完成单位	北京建龙重工集团有限公司		
<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>负责高钒高铬型钒钛磁铁矿烧结、球团、高炉冶炼工业化应用方案的制定、生产实施和应用总结，对本项目的核心技术发明内容做出了创造性贡献。获得授权发明专利 8 项，发表相关论文 6 篇。</p>			

姓 名	储满生	排 名	5
行政职务	系副主任	技术职称	教授
工作单位	东北大学		
完成单位	东北大学		
<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>参加项目烧结、球团关键技术开发，对项目部分核心技术发明内容做出了创造性贡献，获得授权发明专利 4 项，发表论文 17 篇。</p>			

姓 名	文永才	排 名	6
行政职务	副所长	技术职称	高级工程师
工作单位	攀钢集团有限公司		
完成单位	攀钢集团有限公司		
<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>参加含铬型钒钛磁铁矿资源综合利用关键技术开发，组织实施了 1350m<sup>3</sup> 高炉工业实践，对项目部分核心技术发明内容做出了创造性贡献，获得授权发明专利 1 项。</p>			

## 七、完成人合作关系说明

完成人薛向欣、姜涛和储满生均为东北大学冶金学院教授，其中薛向欣、姜涛是东北大学资源与环境研究所的核心成员，长期进行钒钛磁铁矿相关研究。薛向欣为本项目负责人，是本项目 35 项专利的主要发明人，是本项目多篇论文的主要作者。姜涛负责或参与了本项目若干子课题的具体实施、实验研究和理论分析，是本项目 13 项专利的主要发明人。储满生是本项目骨干，参与了本项目若干子课题的实验研究和理论分析，是本项目 4 项专利的主要发明人。薛向欣是“863 计划”项目“高钒高铬型钒钛磁铁矿高效综合利用技术开发（2012AA062304）”、国家自然科学基金重大项目中的第四课题“钒钛组元相际迁移的动力学规律及其影响因素（51090384）”、国家科技支撑计划“高铬型钒钛磁铁矿高效冶炼关键技术研究（2015BAB19B02）”、“973 计划”课题“高铬型钒钛磁铁矿还原新过程基础研究（2013CB632603）”子课题的主要负责人，姜涛、储满生为主要研究参与者。薛向欣和姜涛共同获得 2015 年中国有色金属工业技术发明一等奖项目“含钛高炉渣生态化处理技术”。

完成人张志祥、张勇为本项目在北京建龙重工集团有限公司的技术负责人，与东北大学长期合作，联合攻关了“863 计划”项目“高钒高铬型钒钛磁铁矿高效综合利用技术开发（2012AA062304）”，合作开发了高钒高铬型钒钛磁铁矿烧结和氧化球团生产、高炉合理炉料结构、渣系优化、有价值组元高效分离提取等关键技术，张志祥是本项目 4 项专利的主要发明人，负责本项目主要技术成果在所在公司的成果转化应用。张勇为本项目 4 项专利的主要发明人，为本项目 530m<sup>3</sup>高炉工业实验的实施者，与薛向欣、姜涛、储满生共同获得黑龙江省技术发明一等奖项目“高钒高铬型钒钛磁铁矿资源综合利用关键技术”。

完成人文永才为本项目在攀钢集团有限公司的技术负责人，与东北大学长期合作，为国家科技支撑计划“高铬型钒钛磁铁矿高效冶炼关键技术研究（2015BAB19B02）”、“973 计划”课题“高铬型钒钛磁铁矿还原新过程基础研究（2013CB632603）”的主要负责人，负责 1350m<sup>3</sup>高炉的工业实验，是本项目 5 项专利的主要发明人。