

## 一、项目名称

冶金功能耐火材料关键服役性能协同提升技术及在精炼连铸中的应用

## 二、推荐单位意见

当前，我国钢铁工业面临转型，向价值链高端发展是《中国制造二〇二五》的战略任务，高品质冶金功能耐火材料是其重要基础，支撑着钢铁精炼、连铸的高效运行，其服役行为对钢铁行业提质增效、高品质钢材生产有重要影响，为国际耐火材料发展前沿，被同行和钢铁、有色等行业高度关注。

中钢洛耐院功能耐火材料创新团队针对传统设计与制备不能协同提升冶金功能耐火材料的抗热震性、抗侵蚀性及功能性的国际技术难题，通过多年对功能耐火材料服役行为、失效机理、材料设计制备及评价的系统研究，提出了组成梯度与微结构梯度多层复合设计的创新学术思想，设计了系列防氧化、自修复、低维增强材料的新技术，通过功能分区、多层复合及增强关键部位性能，突破了制约材料关键服役性能协同提升的技术难题，开发出系列服役性能卓越的梯度多层复合结构的新型冶金功能耐火材料，获得 22 项发明专利，技术水平国际领先。

该成果已在洛耐院、濮阳濮耐、卫辉熔金等推广应用，近三年新增产值 10.6 亿元，新增利润 1.2 亿元；产品在国内外多家钢厂应用，寿命超过国外同类产品水平，满足并促进了高效高品质钢生产，社会经济效益显著。该项目研究成果对耐火材料行业转型升级发展高性能耐火材料、减少资源消耗具有重要意义。

我单位认真审阅了该项目推荐书及附件材料，确认全部材料真实有效，相关栏目均符合国家科学技术奖励工作办公室的填写要求。同意推荐该项目申报 2016 年度国家技术发明奖一等奖。

## 三、项目简介

本发明属无机非金属材料领域，涉及钢铁冶金用功能耐火材料。

功能耐火材料是应用于高温工业的结构功能一体化材料，冶金用功能耐火材料（下称功能耐材）包括透气元件、长水口、浸入式水口、塞棒及滑板等，是支撑钢铁精炼、连铸高效运行的关键材料，起到均匀钢水成份和温度、控制流量及其分布、促进夹杂物上浮、防止钢水氧化等重要作用，其服役行为对钢铁行业提质增效、高品质钢材生产有重要影响，为国际耐火材料发展前沿，被同行和钢铁、有色等行业高度关注。

当前，我国钢铁工业面临转型，向价值链高端发展是《中国制造二〇二五》的战略任务，高品质功能耐材是其重要基础。然而，由于服役环境苛刻复杂，经受剧烈热冲击、高温钢液和渣液侵蚀及氧化损伤，功能耐材常出现热震断裂、局部严重侵蚀、功能劣化甚至污染钢液，远不能满足高品质钢材高效化生产急需。

高品质功能耐材需兼具高抗热震性和高抗侵蚀性，功能稳定并不污染钢液。但是，在耐火材料的传统制备中上述性能相互制约难以兼顾，一直是改善其服役行为和发展高性能功能耐材的瓶颈。国内外对材料研制进行了诸多尝试，在本发明以前，未见有显著突破的报道。

通过多年对功能耐材服役行为、失效机理、材料设计制备及评价的系统研究，本项目突破单一材料组份设计理念，通过组成梯度和微结构梯度设计及多层复合，有效降低了材料经受热冲击时产生的最大热应力，优化了关键部位的抗侵蚀性能和服役功能，解决了制约材料关键服役性能协同提升的国际难题，开发出高服役性能系列梯度功能耐材，寿命显著提高，并获得广泛应用。主要发明点有：

1、通过对热震、高温侵蚀等损伤机理及材料功能复合的基础研究，采用数值、水力物理及高温热场等模拟，系统研究了功能耐材在高温强热冲击下温度场和应力场响应、钢液与渣液侵蚀及功能劣化机理，提出了组成梯度与微结构梯度及多层复合设计的创新学术思想，以制备具在线自修复特点的新型功能耐材，实现其关键服役性能的协同提升。

2、设计了系列防氧化、自修复、低维增强材料的技术体系，通过热处理及利用高温服役时物相和微结构的演化，开发了基质结构低维化功能耐材服役性能调控新技术。

3、设计构建不同材料界面，实现功能分区多层复合，设置应力缓释区、增强关键部位性能，研制了服役功能优、热应力低、抗侵蚀性好的梯度多层复合功能耐材，并发展了关键性能评价技术。

4、发明了梯度多层复合结构的长水口、浸入式水口、塞棒、透气元件等专利产品，在洛耐院等单位实现产业化，近三年销售收入达 10.6 亿元，利润 1.2 亿元；产品在国内外钢厂应用，寿命提高 30%以上，超过国内外同类材料寿命，满足了高效高品质钢生产，降低了耐火材料消耗和固废排放，社会效益显著。

获授权发明专利 22 件，河南省科技进步一、二等奖各 1 项，梯度功能耐火材料获国家重点新产品。中国耐火材料行业协会认为项目成果引领和促进了我国

耐火材料行业的科技进步，保障了钢铁工业高效运行，中国金属学会将该成果列为冶金行业重点推广项目。

## 四、客观评价

### 1、技术成果鉴定

1) 2011年12月3日河南省科技厅组织，以江东亮院士、王国栋院士等专家组成的鉴定委员会对“梯度功能耐火材料的研究开发”进行了鉴定，专家组认为：针对功能耐火材料结构特点和服役环境，项目开发出高可靠性和长寿命精炼、连铸用长水口、浸入式水口、整体塞棒和钢包用透气元件等功能耐火材料，在功能元件整体抗热冲击性能和关键部位的抗侵蚀性提高上取得突破。开发的产品综合使用寿命提高30%以上，实现了透气元件与钢包衬耐火材料服役寿命同步，长水口与浸入式水口和整体塞棒同步。**梯度功能耐火材料和复合结构技术研究处于国际领先水平。**

2) 2001年12月15日河南省科技厅组织有关专家组成的鉴定委员会对成果“薄板坯连铸用浸入式水口的研究开发”进行了鉴定，专家组认为：采用复合防氧化添加剂、石墨表面处理工艺、氮气保护热处理工艺和非氧化物表面涂层等多项新工艺、新技术研制的薄板坯连铸用浸入式水口，**产品性能优异，其理化性能和使用效果与国外进口同类产品相当，具有国际先进水平。**

3) 2002年11月16日河南省科技厅组织有关专家组成的鉴定委员会对成果“连铸洁净钢用无硅无碳内衬复合浸入式水口”进行了鉴定，专家组认为：采用内孔复合无碳 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-ZrO}_2$ ，渣线复合 $\text{ZrO}_2\text{-C}$ 材料等多项新技术、新工艺研制的**连铸洁净钢用无硅无碳内衬的复合浸入式水口，其理化性能和使用效果具有国际先进水平，属国内首创**，完全能满足低碳钢及洁净钢的生产需求，经济效益和社会效益显著。

### 2、重要科技奖励

梯度功能耐火材料的研究开发获得河南省科技进步一等奖。

不吹氩防  $\text{Al}_2\text{O}_3$  沉积浸入式水口内衬材料及其应用研究获得河南省科技进步二等奖。

### 3、国家重点新产品

梯度功能耐火材料获国家重点新产品称号。

### 4、相关技术检测报告

经国家耐火材料产品质量监督检验测试中心等权威检测机构检测，项目产品指标检测结果符合相关标准要求。

## 5、验收意见

受科技部委托，2012年6月26日中钢集团公司组织以王国栋院士为组长的验收专家组对承担的国家科技支撑项目“连铸用梯度功能耐火材料的研究开发，2007BAE53B01”进行了会议验收。专家组一致认为项目开发的低热应力功能耐火材料复合结构优化设计技术显著提高了产品的抗热震性、抗侵蚀性等高温使用性能，形成了具有国际先进水平的功能耐火材料设计和制造成套技术。

## 6、使用单位评价

宝山钢铁股份有限公司：复合结构长水口、整体塞棒、浸入式水口平均使用寿命分别达到13.6小时、22.5小时和13.9小时，较其它国内外耐材厂家分别提高38.4%、33.7%和32.9%。

八一钢铁股份有限公司：复合结构长水口寿命长，不易断裂，通过调整渣线，平均寿命提高了37.4%；复合结构浸入式水口寿命达到855min，平均寿命提高了近50%，且未出现断裂等异常行为；复合结构整体塞棒寿命达到22.6小时。

宁波钢铁有限公司：浸入式水口抗侵蚀优良，平均寿命13.3小时，超过原浸入式水口寿命40%以上。复合结构长水口平均使用寿命提高39%。复合塞棒使用过程中未出现不耐侵蚀断裂、无法控流的现象，寿命提高33.8%。

广州珠江钢铁责任有限公司：浸入式水口质量稳定，最高寿命大于13h，比2009年浇注寿命9-10小时提高了30%以上。通过对比某进口产品，尤其是在浇注低碳钢时本项目产品的使用效果超过了同类进口产品的技术水平。长水口最高使用寿命达到12小时以上，比2009年浇注寿命9-10小时提高了30%以上，实现了和中间包同步，超过了同类进口产品和国内产品的技术水平。

福建三钢闽光股份有限公司：浇注普碳钢时整体塞棒寿命大于20h，比2009年平均浇注寿命提高30%以上，超过了同类产品的技术水平，此项产品改善了生产效率，为公司带来了显著的经济效益，年增收90万元以上。

宝山钢铁股份有限公司：精炼过程中透气砖产品透气量稳定，吹通率高，接近100%；使用寿命长，比其他厂家提高30%以上。

武汉钢铁有限公司：透气砖使用寿命不小于32次，与包底同步，未出现因透气砖原因导致钢包提前下线的情况。透气砖性能稳定，吹通率高，总体吹通率大

于99%，较其它厂家透气砖相比有显著优势，保证了炼钢过程的正常有序进行。

俄罗斯美国北方钢铁公司：梯度功能透气砖性能稳定，吹通率增加，使用寿命由原先的42炉提高到55炉，提高了31%，降低了工人的劳动强度，节约了耐火材料成本。

邯钢集团邯宝钢铁有限公司：透气砖吹通率达100%，透气量稳定，钢水搅拌效果好。平均吹氩时间1787.8min，使用寿命增幅33%。

攀钢集团江油长城特殊钢有限公司：透气砖使用寿命提高了83.2%，蚀损速度下降39.1%，寿命和蚀损速度稳定，吹通率100%。

福建三安钢铁有限公司炼钢厂：氮化硅铁-刚玉复合滑板性能稳定，使用寿命由1-2次提高到3-4次，寿命提高了100%，降低了劳动强度，提高了经济效益。

安阳钢铁股份有限公司：氮化硅铁-刚玉复合滑板使用中扩孔小，耐特种钢侵蚀，使用寿命增加1-2次，总体使用效果较好。

## 7、行业评价

中国耐火材料行业协会评价：该项目研究工作开辟了协同优化耐火材料关键服役性能的技术途径，项目形成了功能耐火材料结构复合设计技术、相组成和显微结构高温演变优化调控技术等多项技术，并实现了产业化。项目的实施引领和促进了我国耐火材料行业的科技进步，保障了钢铁工业高效运行。

中国金属学会评价：项目开发的产品在宝钢、武钢、俄罗斯北方钢厂等国内外大中型钢厂规模化应用，使用寿命达到或超过国外同类产品寿命，大大提高了钢厂生产效率，满足了洁净钢冶炼的需要，降低了耐材消耗和吨钢耐火材料成本，取得了良好的社会经济效益。为提高中国钢铁工业的国际竞争力，促进钢铁产品的质量提升，我会已将“高效连铸用功能耐火材料与工业应用”列为重点推广项目。

## 五、推广应用情况

本项目梯度复合结构的透气元件、长水口、浸入式水口、整体塞棒和滑板等功能耐火材料成套集成技术已在中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司、濮阳濮耐高温材料（集团）股份有限公司、卫辉熔金耐火材料有限责任公司推广实施和工业化规模生产。据近三年统计，累计新增产值达 10.6 亿元，利润 1.2 亿元。

## 六、主要知识产权目录

| 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   | 免预热复合结构长水口              | 中国     | ZL200410060354.1 | 2008-07-2  | 407487  | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 杨彬、李红霞、杨金松、刘国齐      | 有效       |
| 发明专利   | 一种硼化锆原位复合连铸用铝碳耐火材料的制备方法 | 中国     | ZL200910066117.9 | 2012-05-23 | 955013  | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 李红霞, 刘国齐, 杨文刚, 于建宾等 | 有效       |
| 发明专利   | 一种被纳米碳包覆的陶瓷复合粉体及其制备方法   | 中国     | ZL201210123568.3 | 2013-10-30 | 1295196 | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 李红霞, 吴小贤, 刘国齐, 马天飞等 | 有效       |
| 发明专利   | 酚醛树脂低温石墨化的方法            | 中国     | ZL201310285733.X | 2015-07-22 | 1729621 | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 李红霞, 刘国齐, 马天飞, 吴小贤等 | 有效       |
| 发明专利   | 一种连铸用镁碳复合整体塞棒的制备方法      | 中国     | ZL200910227625.0 | 2011-06-15 | 794719  | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 李红霞, 刘国齐, 于建宾, 闫广周等 | 有效       |
| 发明专利   | 复合结构整体塞棒                | 中国     | ZL200410060356.0 | 2008-07-2  | 407488  | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 杨金松、杨彬、李红霞、刘国齐      | 有效       |
| 发明专利   | 直通式气道透气砖的制备方法           | 中国     | ZL201110279764.5 | 2013-05-22 | 1199794 | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 陈卢, 张志雄, 尹洪丽, 刘鹏等   | 有效       |
| 发明专利   | 一种含铝氮化物原位复合铝碳耐火材料的制备方法  | 中国     | ZL200910066116.4 | 2012-07-11 | 1001017 | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 刘国齐, 李红霞, 闫广周, 杨文刚等 | 有效       |
| 发明专利   | 一种连铸用含碳耐火材料的热震评价方法      | 中国     | ZL201010596231.5 | 2012-11-21 | 1084791 | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 王刚、王来稳、周继伟、王龙庆等     | 有效       |
| 发明专利   | 一种抗氧化剂复合粉体的制备工艺         | 中国     | ZL200910066119.8 | 2012-07-25 | 1012021 | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 周军, 王刚, 李红霞, 刘国齐等   | 有效       |

## 七、完成人情况

| 姓名  | 排名 | 行政职务 | 技术职称     | 工作单位              | 完成单位              | 对本项目技术创造性贡献   |
|-----|----|------|----------|-------------------|-------------------|---|
| 李红霞 | 1  | 院长   | 教授级高级工程师 | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 项目研究、开发工作的总负责人;对发明点1、2、3、4做出创造性贡献,组织开展功能耐火材料的基础研究与应用研究,提出创新性学术思想,突破了冶金功能耐火材料关键服役性能协同提升技术瓶颈;参加科研时间占本人日常工作时间的60%。 |
| 杨彬  | 2  | 首席专家 | 教授级高级工程师 | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 项目开发技术负责人,完成了功能复合结构技术的总体设计和材料关键性能优化等工作;对发明点1、2做出了创造性贡献;本人在该项技术研发工作中投入的工作量占本人工作总量的50%。                           |
| 刘国齐 | 3  | 无    | 教授级高级工程师 | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 | 负责连铸用功能耐火材料开发、应用研究;对发明点2、3、4做出了创造性贡献;本人在该项技术研发工作中投入的工作量占本人工作总量的100%。  |
| 张厚兴 | 4  | 技术副总 | 副教授      | 濮阳濮耐高温材料(集团)股     | 濮阳濮耐高温材料(集团)股     | 主要对发明点4做出创造性贡献;组织生产了梯度结构的复合透气砖、长水口等产品,并在全国多   |

|     |   |     |     |                |                |  |
|-----|---|-----|-----|----------------|----------------|--|
|     |   | 裁   |     | 份有限公司          | 份有限公司          | 家钢厂进行推广应用；本人参加本成果所用时间占本人日常工作时间的 50%。                                     |
| 李亚伟 | 5 | 院长  | 教授  | 武汉科技大学         | 武汉科技大学         | 主要对发明点 2 做出创造性贡献；开展了部分复合粉体研究及其在功能耐火材料中的应用研究工作；本人参加本成果所用时间占本人日常工作时间的 50%。 |
| 徐跃庆 | 6 | 董事长 | 经济师 | 卫辉熔金耐火材料有限责任公司 | 卫辉熔金耐火材料有限责任公司 | 主要对发明点 4 做出创造性贡献；组织生产了梯度结构复合滑板，并在全国多家钢厂进行推广应用；本人参加本成果所用时间占本人日常工作时间的 50%。 |

## 八、合作人关系说明

项目第一发明人李红霞、第二发明人杨彬、第三发明人刘国齐是中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司河南省功能耐火材料创新团队主要成员，李红霞为组长，三人共同发表文章、申请专利等。

在本项目基础研究、应用基础研究、材料的设计与制备、实验室高温热场模拟评价及钢厂现场试用成功的基础上，项目组主导开展了新型高性能冶金功能耐火材料新技术新产品的推广应用。中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司（项目第一发明人李红霞所在公司）与濮阳濮耐高温材料（集团）股份有限公司（第四发明人张厚兴所在公司）签订了合作开展梯度结构功能耐火材料的制备应用方面的合同，第四发明人张厚兴主要负责解决生产中复合制备工艺、高温应用时材料整体匹配性以及产品在钢厂的应用推广等工作。

项目第一发明人李红霞所在研究院与武汉科技大学（项目第五发明人李亚伟所在大学）就双方共同关注的课题“陶瓷结合相原位改性含碳耐火材料研究”进行项目合作，双方就研究进展定期进行学术交流，促进了冶金用含碳功能耐火材料基础研究方面的工作，较好的完成了所承担的国家自然科学基金项目。第五发明人李亚伟主要负责含碳耐火材料陶瓷相改性方面的基础研究工作。

在项目第一发明人李红霞负责实施国家科技支撑计划项目“梯度功能耐火材料的研究开发”时，高服役性能滑板的研究为其主要内容之一，由石干教授级高工（项目第一发明人李红霞所研发团队）负责，当时与卫辉熔金耐火材料有限责任公司（项目第六发明人徐跃庆所在公司）签订了合作开发长寿命梯度结构滑板方面的协议，第六发明人徐跃庆主要负责生产技术的实施与完善，并负责滑板在钢厂的试用与推广等工作。