

## 项目名称：冶金炉窑强化供热关键技术及应用

### 一、项目基本情况

项目名称:冶金炉窑强化供热关键技术及应用

提名者:中国有色金属工业协会

提名意见：拟提名国家科学技术进步奖二等奖

完成单位：昆明理工大学，中国铜业有限公司，北京赛维美高科技有限公司，金川集团股份有限公司，宝山钢铁股份有限公司

完成人：王华，王冲，刘日新，刘玉强，饶文涛，施哲，孔德颂，王仕博，杨伟，黄夏兰

### 二、项目简介

冶金炉窑种类多，其中熔池熔炼炉和加热炉最为典型。强化供热是决定冶金炉窑节能增效的关键，以加大富氧/燃料供应量的现有方法存在以下主要问题：1、加大熔池熔炼炉富氧供应量导致搅拌过度喷溅冲刷影响炉体寿命、搅拌不均匀富氧利用率低和金属直收率低；2、加大加热炉燃料供应量导致炉温过高且不均匀、金属工件过热过烧及产品成材率低。针对此难题，进行了长达 26 年的持续科技攻关，取得了如下创新成果：

1、**建立了冶金炉窑最低燃耗强化供热理论模型**。针对传统的强化供热是用增大热负荷的方式来实现因而导致能耗高等问题，基于混沌数学提出了旋流混沌强化方法，建立了冶金炉窑最低燃耗强化供热数学模型，并用于指导技术研发，以实现用最小的搅拌动能达到充分搅拌熔池减小喷溅，促进氧-硫的放热反应和自热熔炼或用最低的燃料消耗达到均匀加热、提高质量。

2、**研发了熔池熔炼炉富氧旋流混沌搅拌强化供热技术**。针对熔体喷溅导致设备寿命短的难题，提出了旋流混沌搅拌方法，开发了富氧浸没式顶吹旋流混沌搅拌强化供热技术、炉膛底部富氧旋流脉动振荡混沌搅拌强化供热技术、富氧侧吹射流泉涌混沌搅拌强化供热技术和富氧旋流混沌搅拌效果测控技术。产业化表明：用最小的搅拌动能促进了氧-硫的放热反应，达到了均匀搅拌熔池、减小喷溅的目的；喷枪寿命由 4~6 天提高至 12~15 天，提高了 170.0%，炉体寿命由 28 个月延长至平均 35 个月，提高了 25.0%，最长炉寿达 50 个月。渣中金属含量由 0.767%降至 0.572%，降低了 25.42%，金属直收率由 93.46%提高至 94.10%提高了 0.68%，能耗由 176.0kgce/tCu 下降至 130.1kgce/tCu，下降了 26.1%。

3、**研发了加热炉旋流混沌燃烧强化供热技术**。针对金属工件加热均匀性难以精准化的难题，提出了旋流混沌燃烧与高温炉气涡旋流态耦合的强化加热方法，开发了智能“黑匣子”温度检测技术及设备、最佳加热制度精准调控技术和混沌旋流燃烧与高温炉气涡旋流态强化加热技术。产业化表明：实现了用最小的燃料消耗均匀加热，达到金属工件的实际加热温度曲线与理论值的精确匹配，保证了加热质量。铝轮毂热处理温度可精确到 1~3℃，能耗下降了 15.2%。400×2300×4800mm 宽厚钢板的加热温度均匀度可达 8~10℃以内；应用于航空航天、高铁等领域的 23×2200×13000mm 大尺寸高性能铝板的加热均匀度控制到 3℃以内、成材率突破了 99.8%。

该项目分别应用于中铜、金川、宝钢，以及炉窑制造、车轮和高铁轴承制造、有色型材

热处理等企业，近三年累计实现新增销售额超过 600 亿元，经济效益及节能减排等社会效益显著。部分技术已出口美、德、日、俄罗斯等 21 个国家。

该项目获授权专利 23 项（发明专利 13 项），计算机软件著作权登记 2 项，发表论文 157 篇，出版专著 1 部，已培养硕士博士生 46 人及一批企业专业技术人员。推动了我国冶金炉窑行业的科技进步。

### 三、客观评价

#### （1）科技成果评价

2017 年 9 月 22 日，中国有色金属工业协会对该项目成果进行了会议评价，形成如下评价结论：

构建了冶金炉窑最低燃耗强化供热理论及热过程强化数学模型；开发出熔池熔炼炉富氧旋流混沌强化搅拌技术，提高了富氧利用率，促进了自热反应，实现节能并显著延长炉寿，提高了金属回收率；自主研发了加热炉均匀强化加热技术，实现加热炉的均匀强化供热，提高产能，降低了燃料消耗和氧化烧损，提高了大型金属型材的加热温度均匀性，保证了产品质量。

该项目研发的工艺技术和装备已应用于中铜、金川、宝钢等冶金企业，生产表明该技术具有良好的重现性和稳定性，部分成果还应用于轮毂制造、合金铝材加处理等有色金属材料热加工企业，温度检测仪已实现广泛应用，对促进冶金行业节能减排和科技进步具有重要意义。

该成果技术经济指标先进，整体技术达到国际领先水平。

#### （2）科技查新

国家一级科技查新咨询单位-云南省科学技术情报研究院针对本成果所做的国内外科技查新报告中与本项目内容相关的查新结论：

1、首次提出了冶金炉窑最低燃耗供热法则；2、研发了熔池熔炼炉富氧旋流混沌搅拌强化供热技术体系；3、提出了基于混沌数学和拓扑学计算多相体系混合效果的方法，从而构建了富氧旋流混沌搅拌混合效果测控技术；4、研发了加热炉旋流混沌燃烧及强化供热制度调控技术体系以及火焰旋流混沌燃烧效果测控技术。

除委托课题组成员发表的文献外，国内外均未见与该查新项目以上技术特点完全相符的文献报道。

#### （3）论文评价

1、 Xu J, Wang H, Fang H. Multiphase mixing quantification by computational homology and imaging analysis [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(35):2160-2171.

Ferretti G, Montanari G, Solari F, et al. Advanced Design of Industrial Mixers for Fluid Foods Using Computational Fluid Dynamics[J]. International Journal of Food Engineering, 2013, 9(3):309-325.

引用原话： This is, for instance, the case of multiphase fluids, where mixing should ensure homogeneity of solid and liquid contents, at the same time keeping the solid fraction as constant as possible . “例如：在多相流体的情况下，混合应当确保固相与液相成分的均匀，同时要尽量保证固相分数恒定”

2、 Fan G F, Shan Q, Wang H, et al. Support Vector Regression Model Based on Empirical Mode Decomposition and Auto Regression for Electric Load Forecasting[J]. Energies, 2013, 6(4):1887-1901.

Lee C W, Lin B Y. Application of Hybrid Quantum Tabu Search with Support Vector Regression (SVR) for Load Forecasting[J]. Energies, 2016, 9(11).

引用原话：Hong et al. [44-56] developed various SVR-based load forecasting models by hybridizing evolutionary algorithms, chaotic mapping functions and cloud theory with an SVR model, to effectively determine its three parameters to improve the forecasting accuracy.

“通过混合进化算法、混沌映射函数以及云理论与 SVR 模型发展了多种基于 SVR 模型的负荷预测模型，这些模型可以有效地确定三个参数来提高预测精度。”

目前共有新加坡南洋理工大学教授、IEEE 会士 Suganthan P N 等 12 篇国际期刊作者对该论文关于混沌映射函数负荷预测模型提高预测精度及其应用做出了较高评价。

#### (4) 获奖情况

“冶金炉窑强化供热关键技术及应用”获 2018 年度云南省科技进步特等奖；“加热炉均匀精准加热关键技术及应用”获 2017 年度中国有色金属工业科技进步一等奖；“有色金属熔池熔炼过程强化与搅拌效果评价关键技术及应用”获 2015 年度中国有色金属工业科技发明一等奖。

#### 四、应用情况

该技术自 2012 年起先后在中国铜业、金川公司的熔池熔炼炉上应用至今，显著提高了熔炼炉冶炼强度和金属直收率；自 2010 年起先后在 113 家铝合金轮毂热处理企业的加热炉上应用至今，显著减少了金属工件的加热缺陷、提高了加热质量和成材率。还应用于宝山钢铁股份公司的工信部智能制造首批试点项目“1580 热轧智能车间”示范生产线年产 300 万吨的加热炉，大型宽厚板加热温度均匀性可精确到 10℃ 以内，达到国际领先，该技术填补了国内空白。

在铝合金轮毂热处理及车轮涂装领域应用 113 家，行业企业覆盖率超过 50%。

部分技术及设备还推广应用于宝钢等钢铁企业，范围覆盖国内超过 45% 的大中型钢铁企业，尤其是应用于我国高铁用轴承生产，使得轴承产品精度达 P5 级、使用寿命达二百万公里，从而结束了我国高铁用轴承依赖进口的历史。

已成功出口德国、澳大利亚、日本、加拿大、俄罗斯、泰国、埃及、印度、越南、印度尼西亚等 21 个国家。

## 五、主要知识产权目录：

序号	知识产权类别	知识产权 具体名称	权利人	发明人
1	发明专利	一种金属硫化矿全氧负能火法冶炼方法	昆明理工大学	王华, 李博, 魏永刚, 孙财, 李建武
2	发明专利	一种超音速旋转射流氧枪、应用装置及其应用方法	昆明理工大学	王仕博, 李鹏, 王华
3	发明专利	一种表征工业炉燃烧不均匀性特征的方法	昆明理工大学	王华、徐建新、范国峰
4	发明专利	一种工业炉窑火焰不稳定性实时检测控制方法	昆明理工大学	王华、徐建新、张坤、 朱道飞、孙辉
5	发明专利	用于验证多相搅拌混合均匀状态及程度的方法	昆明理工大学	王华、徐建新、范国峰、 朱道飞、王仕博、 孙辉
6	发明专利	基于 EMD 的预测多相混合效果的时间序列模型建立方法	昆明理工大学	王华、范国峰、徐建新、 王仕博、朱道飞
7	实用新型专利	一种旋流混沌顶吹浸没式防喷溅氧枪	昆明理工大学	王华, 王冲, 施哲, 王仕博, 王嘉伟
8	实用新型专利	一种炉膛底部供热的旋转射流氧枪	昆明理工大学	王华, 李鹏, 王仕博
9	实用新型专利	一种熔池熔炼侧吹用旋流射流喷枪	昆明理工大学	王华, 王仕博, 王嘉伟
10	实用新型专利	一种旋流混沌燃烧装置	昆明理工大学	王华, 王嘉伟, 王仕博

## 六、主要完成人情况：

排名	候选人	性别	职称/职务	学位	工作单位/完成单位	对项目的贡献
1	王华	男	教授/校长	博士	大理大学/昆明理工大学	项目总负责人，创新点1、2、3的第一负责人，全面负责整体技术的研发与推广。
2	王冲	男	教授级高工/ 副总裁	博士	中国铜业有限公司	项目主要负责人，参与创新点2.1、2.2、2.3和2.4的研究，是富氧旋流混沌搅拌供热技术产业化应用的执行负责人。
3	刘日新	男	教授级高工/ 总经理	博士	北京赛维美 高科技有限公司	项目主要负责人，项目创新点3.1和3.2的研究执行负责人，参与了创新点1的研究，是耐高温智能温度检测技术应用的执行负责人。
4	刘玉强	男	教授级高工/ 副总经理	硕士	金川集团 股份有限公司	项目主要完成人，参与创新点2.1的研究，负责技术成果在金川公司的产业化应用推广。
5	饶文涛	男	教授级高工/ 主任研究员	博士	宝山钢铁 股份有限公司	项目主要完成人，创新点3.2主要完成人，参与创新点3.1和3.3的研究。
6	施哲	男	教授/无	博士	昆明理工大学	项目主要完成人，参与了创新点1、2的研究。
7	孔德颂	男	高级经济师/ 副总经理	学士	中国铜业有限公司 云铜西南铜业分公司	项目主要完成人，参与了创新点2.2和2.5的研究。
8	王仕博	男	讲师/无	博士	昆明理工大学	项目主要完成人，参与了创新点2和创新点3.3的研究，构建了熔池熔炼旋流混沌搅拌供热数学模型。
9	杨伟	男	高级工程师/ 副总经理	硕士	中国铜业有限公司 云铜西南铜业分公司	项目主要完成人，参与了创新点2.1的研究。
10	黄夏兰	女	高级工程师/ 热轧厂副厂长	硕士	宝山钢铁 股份有限公司	项目主要完成人，对加热炉内最佳空燃比控制提供现场应用的专业指导，并对应用效果进行分析改进。

## 七、主要完成单位及创新推广贡献

1、昆明理工大学是本项目的主要研究单位，全面负责整个项目的方案论证、机理研究、技术创新、工程试验及现场实施，并对本项目的顺利实施提供研究经费和其他相关条件，全面参与创新点1~3的研究工作，获得授权发明专利12项，实用新型专利9项，软件著作权2项，并将本项目的研究成果推广应用在中铜、金川、宝钢等大型冶炼企业以及轮毂制造企业，获得了良好的经济和社会效益。

2、中国铜业有限公司是本项目的主要研究单位和技术实施应用基地，参与创新点创新点2的研究，主持了熔池熔炼炉富氧旋流混沌搅拌强化供热技术及装备的工业化应用，为技术应用提供场地和设备，负责制定现场施工方案、设备安装指导以及调试过程中的现场数据记录、安全监督和技术应用后的持续改进与优化。

3、北京赛维美高科技有限公司本项目的研究单位和技术推广应用单位，参与了创新点1和创新点3的研究，并将耐高温智能“黑匣子”温度检测仪和最佳加热制度精准调控技术推广应用到铝合金轮毂制造行业龙头企业，在铝合金轮毂热处理及车轮涂装领域应用113家，行业企业覆盖率超过50%。还推广应用于宝钢等钢铁企业，范围覆盖国内超过45%的大中型钢铁企业，此外，还推广到高铁用轴承制造企业，从而结束了我国高铁用轴承依赖进口的历史。部分技术已成功出口德国、澳大利亚、日本、加拿大、俄罗斯等21个国家。

4、金川集团股份有限公司是本项目的主要研究单位和技术实施应用基地，参与了创新点2.1与2.4的研究，为技术应用提供场地和设备，包括为顶吹混沌搅拌强化供热技术提供

了现场实施方案的制定与现场施工指导，并进行安全监督与方案修正，实现技术应用后的持续改进与优化。

5、宝山钢铁股份有限公司是本项目的主要研究单位和技术实施应用基地，参与了创新点3的研究，技术成果先后在宝钢股份热轧三大类型（常规加热、蓄热加热、脉冲加热）加热炉上实现应用，显著降低了烟气量和综合能耗，氧化烧损率降低了20%，并在中国国家工信部智能制造首批试点项目“1580 热轧智能车间”示范生产线上的1号加热炉上实现了在线应用，加热温度均匀性达到国际领先，整套系统填补了国内空白。

## 八、完成人合作关系说明

王华教授、施哲教授、王仕博老师所在的昆工冶金节能减排创新团队与中国铜业有限公司的王冲、杨伟及孔德颂等长期组成产学研联合技术创新团队，共同申报并建设了云南省铜冶金工程技术研究中心。该产学研创新团队十余年来致力于有色冶金过程强化与节能领域的研究，将王华教授提出的冶金炉窑最低能耗供热法则应用于富氧熔池熔炼工艺的创新性改造，合作发表了多篇高水平论文及申报并获得多项国家专利，实现了熔池熔炼炉富氧旋流混沌搅拌强化供热技术在中铜公司的大规模工业化应用，取得了显著的节能减排效益。

刘日新博士于1989年~1994年在昆工工作并在职攻读博士学位，与王华教授是一个课题组及同一位博士生导师；饶文涛高工在1989~1992年与王华教授在昆工同一导师门下攻读硕士，期间与王华、刘日新共同开展了加热炉强化供热方面的研究。两人与王华教授共同参与了云南省应用基础研究科学基金项目及有色金属系统高等学校重点学科科学研究基金项目“煤粉工业炉燃烧过程强化、净化与优化研究”，共同参与了“昆钢650加热炉供热系统优化的研究”课题。自上世纪九十年代以来王华、刘日新、饶文涛一直长期保持合作关系共同开展加热炉强化与优化加热研究，刘日新博士毕业后则自主创业，将以往研究成果不断应用于生产实践，开发出“黑匣子”测温仪并形成成熟产品，创立北京赛维美高科技有限公司，与王华合作推动该技术成功在加热炉上实现工业化应用，并逐步推广至铝合金轮毂热处理高铁用轴承制备其他大中型钢铁企业等热加工行业；饶文涛在宝山钢铁股份有限公司与王华团队合作开发了加热炉旋流混沌燃烧强化供热技术，并与黄夏兰共同主持其在宝钢的工业化应用，都为冶金炉窑强化供热技术的推广应用做出了巨大贡献。

王华教授自1992年起就长驻金川公司冶炼厂进行富氧熔池熔炼技术的强化理论研究与技术开发，在国家“八五”科技攻关项目子课题“自热熔炼熔化机理研究”中，与刘玉强等金川技术骨干人员共同组成了产学研联合攻关课题组，实现了熔炼炉强化供热技术在金川公司的产业化应用。

以上5家单位的10位科研及技术人员组成的联合课题组在王华教授的带领下，从上世纪九十年代至今，以熔炼炉和加热炉的最优燃料供给为目标，深入研究了冶金炉窑内部复杂的燃烧、传热与化学反应过程，开发了冶金炉窑强化供热关键技术，并实现了创新技术的大规模工业化应用，是冶金节能减排领域一次成功的产学研用合作典范，并将继续精诚合作，在冶金炉窑的节能减排新技术等相关领域做出更大的理论突破与技术进步，为我国冶金行业的节能减排做出应有的科技贡献。