

项目名称：有色冶金炉窑强化供热关键技术及应用

推荐单位：云南省

推荐奖种：科技进步奖

主要完成人：王华，王冲，刘日新，刘玉强，施哲，孔德颂，王仕博，杨伟，张博亚，徐建新

主要完成单位：昆明理工大学，云南铜业股份有限公司，北京赛维美高科技有限公司，金川集团股份有限公司

推荐单位意见：

强化供热技术是冶金炉窑节能增效的核心技术，该项目以有色金属熔池熔炼炉和有色金属工件热处理用加热炉为代表，针对现有的冶金炉窑强化供热一般是采用加大富氧/燃料供应量的方式，熔池熔炼炉加大富氧供应量存在搅拌过度喷溅冲刷导致炉体寿命短、搅拌不均匀导致炉渣中有价金属含量高和金属直收率低，而加热炉加大燃料供应量存在炉内燃料燃烧不完全、炉温不均匀导致被加热的金属工件过热过烧及产品成材率低等问题，该项目进行了长达 24 年的持续科技攻关，基于混沌数学和拓扑学，提出了旋流混沌强化方法和最低燃料供热法则、建立了有色冶金炉窑最低燃料供热理论模型、成功研发了以**熔池熔炼炉强化动量传递的富氧旋流混沌搅拌供热技术和加热炉旋流混沌燃烧及强化供热制度调控技术**为代表的有色冶金炉窑强化供热关键技术，突破了搅拌过度或不均匀、喷溅冲刷严重、燃烧不完全、加热不均匀的技术瓶颈，实现了冶金炉窑节能增效的显著提高。先后分别推广应用于云铜、金川等有色冶炼企业及中信戴卡等 113 家车轮制造企业，取得了显著的社会及环保效益。部分技术和设备已出口到德国、澳大利亚、日本、加拿大、俄罗斯等 21 个国家，全球累计用户达到 1608 家。有力推动了我国有色金属工业装备的升级发展与技术进步。

符合国家科学技术进步奖申报条件，推荐该项目申报 2017 年度国家科学技术进步奖二等奖。

项目简介：

有色冶金炉窑主要有冶炼炉和加热炉，其中熔池熔炼炉和热处理用加热炉由于供热的复杂性最为典型。强化供热技术是决定冶金炉窑节能增效的关键，现存在以下主要问题：1、搅拌过度或不均匀导致炉渣中有价金属含量高，喷溅冲刷导致炉体寿命短；2、加热炉炉温不均匀导致金属工件过热过烧及产品成材率低。针对此问题，进行了长达 24 年的持续科技攻关，建立了最低燃料供热理论模型，研发了基于旋流混沌强化的有色冶金炉窑强化供热系列技术和设备，突破了喷溅冲刷严重、加热不均匀的技术瓶颈，实现了节能增效的显著提高，促进了我国有色冶金炉窑的技术升级与发展。取得的创新成果如下：

1、建立了有色冶金炉窑最低燃料强化供热理论模型。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，基于混沌数学和拓扑学提出了旋流混沌强化方法和最低燃料供热法则，建立了有色冶金炉窑最低燃料强化供热数学模型。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，氧气与矿中硫的放热反应

彻底、实现自热熔炼或用最低的燃料消耗达到均匀加热、提高产品质量。

2、研发了熔池熔炼炉强化动量传递的富氧旋流混沌搅拌供热技术及装备。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、全氧超音速旋转射流顶吹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。

3、研发了加热炉旋流混沌燃烧及强化供热制度调控技术与装备。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方法，开发了最佳加热制度精准调控技术、火焰旋流混沌燃烧效果测控技术和绝热耐高温并能在高温炉膛内保存记录同时向炉外无线传送数据的智能“黑匣子”温度检测技术及设备。

该项目获授权专利 20 项，发表论文 84 篇，出版专著 1 部，获中国有色金属工业技术发明一等奖和云南省科技进步一等奖；已培养硕士、博士生 46 人及一批企业专业技术人员。推动了我国有色冶金炉窑的科技进步。先后应用于云铜、金川等有色冶炼企业及中信戴卡等车轮制造企业，产业化应用表明：实现了用最小的搅拌动能达到充分搅拌熔池、减小喷溅，炉体寿命提高了 42.8%，喷枪寿命提高了 120%，渣中金属含量降低了 22.4%，金属直收率提高了 0.68%，炉窑产能提高了 44.3%、能耗下降了 55.7%；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，铝合金轮毂的热处理温度可精确到 1~3℃，成材率提高了 8.3%，产能提高了 18.3%、能耗降低了 15.2%。近三年取得了显著的经济与社会效益。部分技术已出口德国、澳大利亚、日本、加拿大、俄罗斯等 21 个国家，全球累计用户达 1608 家。

客观评价：

（一）科技成果评价

2015 年 7 月 31 日，中国有色金属工业协会在北京组织邱定番、张国成、张文海三位院士在内的专家组对项目成果进行了会议评价，形成如下评价结论：

提出了冶金炉窑最低燃耗供热法则，构建了冶金炉窑最低燃耗强化供热理论模型，自主研发了高温智能“黑匣子”温度检测仪及其配套的检测技术，通过加热炉旋流混沌强化供热制度调控技术体系实现了热处理用加热炉的强化供热，降低了燃料消耗和被加热金属工件表面的氧化烧损；构建了气泡旋流混沌搅拌强化供热的数学模型，开发了熔池熔炼炉强化动量传递的富氧旋流混沌搅拌供热技术体系，促进自热反应实现节能并显著延长炉子寿命，提高了金属回收率；独创性地开发了基于贝蒂数、混沌理论和图像处理方法的熔池熔炼炉富氧旋流混沌搅拌效果测控技术。

该成果技术经济指标先进，整体技术达到国际先进水平。

（二）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、首次提出了有色冶金炉窑最低燃耗供热法则，构建了有色冶金炉窑最低燃耗强化供热理论模型，除该项目组发表的论文外国内外均未见其它文献报道。
- 2、研发的熔池熔炼炉强化动量传递的富氧旋流混沌搅拌供热技术体系，除本项目组发表的

论文外国内外均未见其它文献报道；

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，建立了测度熔池混沌搅拌气-固-液混合质量数学模型，自主开发了根据熔池搅拌效果测度值采用变频喷吹调控方法在线调节熔炼炉喷枪操作和富氧气体供给状态参数的熔池熔炼炉旋流混沌强化供热调控系统，从而构建了富氧旋流混沌搅拌混合效果测控技术，除本项目组发表的论文外国内外均未见其它文献报道；

4、研发的加热炉旋流混沌燃烧及强化供热制度调控技术体系，包括耐高温智能“黑匣子”温度检测仪、最佳加热制度精准调控技术和火焰旋流混沌燃烧效果测控技术，国内外均未见相关的文献报道。

（三）论文评价

1、“Multiphase mixing quantification by computational homology and image analysis (《基于计算同调群与图像分析量化多相混合》)”于 2011 年发表在应用数学领域 TOP 期刊《Applied Mathematical Modelling》上，被匿名审稿人评价为：

1)“This paper presents a straightforward method for assessing the homogeneity or inhomogeneity of gas agitated reactor mixtures stirred by top lance gas injection. It is of interest to all members of the scientific community involved with studies of the topology of multiphase flows and deserves to be published”

本文展示了一个用于评估顶吹气体混沌搅拌反应器内混合均匀性与非均匀性的简单方法，这对于研究多相流拓扑结构的学术团体的所有成员来讲，必将引起广泛的兴趣与关注。

2) 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.

上述作者及期刊引用该论文关于混合效果论文的原话：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.

1) 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 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。

（四）获奖情况

该项目的部分成果“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技术发明一等奖，该成果的第一完成单位昆明理工大学冶金节能减排创新团队于 2014 年度获得云南省科学技术进步奖一等奖（创新团队奖）。

推广应用情况：

该技术自 2012 年起先后在云铜公司、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 年起先后在中信戴卡股份公司的 12 条铝合金轮毂热处理生产线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。近三年（2014.1.1~2016.12.31）产能提高等实现销售额 256.139 亿元，因降低渣含金属提高金属直收率及提高被加热金属工件的成材率等增收节支实现的新增利润 9.257 亿元。

应用到中信戴卡轮毂制造、万丰汽轮等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%。

部分技术及设备还推广应用于宝钢、天津钢管、马钢等钢铁企业，范围覆盖国内超过 45% 的大中型钢铁企业。并已成功出口德国、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。全球累计用户达到 1608 家（世界 500 强企业中有 17 家、中国制造业 100 强中有 27 家）。

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	用于验证多相搅拌混合均匀状态及程度的方法	中国	ZL201010168418.5	20130515	1197192	昆明理工大学	王华、徐建新、范国峰、朱道飞、王仕博、孙辉
发明专利	一种模拟冶金炉窑搅拌混合可视化过程的装置	中国	ZL201410019679.9	2015.05.20	1666448	昆明理工大学	徐建新、苏俞真、王华、桑秀丽、王仕博、刘泛函
发明专利	一种表征工业炉燃烧不均匀性特征的方法	中国	ZL201010237087.6	20130515	1105557	昆明理工大学	王华、徐建新、范国峰
发明专利	基于分形维数的多相混合效果预测模型建立的方法	中国	ZL201010261113.9	20140212	1347060	昆明理工大学	王华、徐建新、范国峰、王仕博、朱道飞
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	中国	ZL201010547491.3	20140730	1452068	昆明理工大学	王华、范国峰、徐建新、王仕博、朱道飞
发明专利	一种喷油油冷氧枪	中国	ZL201110335782.0	2015.07.22	2306525	昆明理工大学	王华、邱亚丽、卿山、李慧斌、李虎、李明磊
实用新型专利	一种有色冶金顶吹熔池熔炼优化炉型	中国	ZL201420451173.0	2015.01.28	4100826	昆明理工大学	王仕博、刘泛函、王华
实用新型专利	一种超音速旋转射流氧枪和应用装置	中国	ZL201521006738.5	20150128	4102291	昆明理工大学	王仕博、李鹏、王华

实用新型专利	一种非浸没式全氧顶吹变速射流氧枪及其应用装置	中国	ZL201620601414.4	2016.12.21	5803722	昆明理工大学	王仕博、李鹏、肖清泰、王华
发明专利	一种表征和诊断燃烧不稳定性的方法	中国	ZL200910218387.7	2011.05.18	781671	昆明理工大学	王华 孙辉 王仕博 徐建新

主要完成人情况：

姓名	王华	排名	1	职称/职务	教授 / 副校长
工作单位	昆明理工大学				
对本项目的科技贡献 项目总负责人，创新点1、2、3的第一负责人，提出了旋流混沌强化方法和有色冶金炉窑最低能耗供热法则，构建了有色冶金炉窑最低能耗强化供热数学模型，并用于指导技术研发。提出了旋流混沌搅拌方法，主持开发了熔池熔炼炉强化动量传递的富氧旋流搅拌供热技术及设备并实现产业化应用，提出了旋流混沌燃烧方法，主持开发了加热炉加热炉的最佳加热制度精准调控技术和火焰旋流混沌燃烧效果测控技术及设备并实现了其产业化应用。					
姓名	王冲	排名	2	职称/职务	教授级高工 / 副总经理
工作单位	云南铜业股份有限公司				
对本项目的科技贡献 项目主要负责人，创新点 2.1、2.2、2.3 的研究执行负责人，参与创新点 1 和 2.5 的研究，是熔池熔炼炉强化动量传递的富氧旋流混沌搅拌供热技术在云铜公司产业化应用的执行负责人并负责技术推广中的持续改进。。					
姓名	刘日新	排名	3	职称/职务	总经理
工作单位	北京赛维美高科技有限公司				
对本项目的科技贡献 项目主要负责人，创新点 3 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和“黑匣子”温度检测仪产业化研究、推广应用的执行负责人并负责技术推广中的持续改进，参与创新点 3.2 和 3.3 的研。是发明专利“一种数据记录仪耐高温绝热方法”（CN02121566.9）以及实用新型专利“一种耐高温智能温度记录仪”（ZL201420549322.7）的发明人。					
姓名	刘玉强	排名	4	职称/职务	高级工程师 / 副总经理
工作单位	金川集团股份有限公司				
对本项目的科技贡献 项目主要完成人，参与了创新点 2.4、2.5 和创新点 1 的研究，是全氧超音速旋转射流顶吹混沌搅拌强化供热技术及装备在金川公司产业化应用研究的执行负责人并负责技术推广中的持续改进。。					
姓名	施哲	排名	5	职称/职务	教授
工作单位	昆明理工大学				
对本项目的科技贡献 项目主要完成人，参与了创新点 1、2 的研究，是富氧浸没式顶吹熔池熔炼旋流混沌搅拌强化供热技术及装备产业化应用研究的主要负责人。					

姓名	孔德颂	排名	6	职称/职务	易门铜业有限公司总经理
工作单位	云南铜业股份有限公司				
项目主要完成人，参与了创新点 2.2 和 2.5 的研究，是炉膛底部富氧旋流脉动振荡混沌搅拌强化供热技术及装备产业化应用研究的负责人并负责技术推广中的持续改进。					
姓名	王仕博	排名	7	职称/职务	讲师
工作单位	昆明理工大学				
对本项目的科技贡献 项目主要完成人，参与了创新点 2.1、2.4、3.3 的研究，构建了熔池熔炼旋流混沌搅拌供热数学模型，针对熔池熔炼炉强化动量传递的富氧旋流搅拌供热技术进行了强化供热机理和工程化的理论计算及应用研究，负责相关技术应用中的数据监测与分析改进。					
姓名	杨伟	排名	8	职称/职务	高级工程师 / 冶炼加工总厂副厂长
工作单位	云南铜业股份有限公司				
项目主要完成人，参与了创新点 2.1 的研究，是富氧浸没式顶吹熔池熔炼旋流混沌搅拌强化供热技术及装备产业化应用研究的现场施工和调试负责人。					
姓名	张博亚	排名	9	职称/职务	高级工程师
工作单位	云南铜业股份有限公司				
项目主要完成人，参与了创新点 2.2 的研究，完成了以炉膛底部富氧旋流脉动振荡混沌搅拌强化供热技术取代传统密闭鼓风炉工艺技术方案论证，新技术与装备的安装调试并对技术和设备的持续改进提供现场技术指导。					
姓名	徐建新	排名	10	职称/职务	副教授
工作单位	昆明理工大学				
对本项目的科技贡献 项目主要完成人，参与了创新点 2.5 和 3.3 的研究，提出了基于混沌数学和拓扑学计算气-固-液多相体系混合效果的新方法，建立了测度熔池混沌搅拌气-固-液混合质量数学模型，负责相关技术应用中的数据综合分析 with 智能控制。					

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 9 项，实用新型专利 9 项，并将本项目的研究成果推广应用在云铜、金川等大型有色冶炼企业以及中信戴卡等轮毂制造企业，获得了良好的经济效益和社会效益。

2、云南铜业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，参与创新点 2.1、2.2、2.3、2.5 的研究，主持了熔池熔炼炉强化动量传递的富氧旋流混沌搅拌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是本项目的主要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中信戴卡轮毂制造、万丰汽轮等铝合金轮毂制造行业龙头企业，在铝合金轮

轂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、天津钢管、马钢等钢铁企业，范围覆盖国内超过 45% 的大中型钢铁企业。并已成功出口德国、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。全球累计用户达到 1608 家，取得了良好的经济和社会效益。

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 2.3 与 2.5 的研究，为技术应用提供场地和设备，包括为全氧超音速旋转射流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，为富氧旋流混沌搅拌效果测控技术进行安全监督与方案修正，从而实现各项技术应用后的持续改进与优化。

完成人合作关系说明：

王华教授所在的昆工冶金节能减排创新团队与王冲、杨伟、孔德颂和张博亚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，王冲任该中心主任，王华教授任该中心技术委员会主任。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燃耗供热法则应用于富氧熔池熔炼工艺的的创新性改造，共同开发出熔池熔炼炉强化动量传递的富氧旋流搅拌供热技术，并实现了在云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 年在昆工工作并攻读博士，与王华教授是一个课题组及同一位博士生导师，期间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”，共同参与了加热炉强化与优化加热课题的研究，以加热炉数学模型及加热最优控制研究成果为创新点合作发表多篇学术论文。自上世纪九十年代以来王华、刘日新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，成立北京赛维美高科技有限公司，与王华合作成功在宝钢热轧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及其他大中型钢铁企业等热加工行业，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，逐步将最低燃耗供热法则推广至有色熔池熔炼强化搅拌过程中，建立起熔炼炉最低燃耗供热计算模型，并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的产业化应用。

王华教授和施哲教授均是昆明理工大学省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室的有色冶金过程强化与节能方向的学术带头人，长期属于同一重点实验室同一研究方向的合作教授，王华教授是王仕博、徐建新两位青年老师的硕士和博士研究生导师，两位青年教师均为省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室有色冶金过程强化与节能方向的核心成员，一直在熔池熔炼强化搅拌供热领域开展协同研究，在多相流理论计算模型、搅拌均匀性评价理论与技术、顶吹喷枪创新设计等研究领域取得了重大突破，为冶金炉窑强化供热技术的研发打下了坚实的理论基础。

以上四家科研院所及冶金企业的 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，开发出有色冶金炉窑强化供热过关键技术，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的一次成功的产学研用合作，并将继续精诚合作，以期在闪速熔炼强化供热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。