附件：

2023年度陕西省科学技术进步奖申报项目公示内容

**一、项目名称**

高品质工业硅绿色节能关键技术研究与应用

**二、提名单位及意见**

**提名单位：**陕西有色金属控股集团有限责任公司

**提名意见：**

工业硅是半导体芯片、太阳能光伏等产业的基础原料。受传统工艺能耗高、含杂多、效率低、污染重等因素制约，我国虽是工业硅生产大国，但该项目实施前我国工业硅产业大而不强。

该项目依托陕西省三秦学者创新团队和云南省硅冶金与硅材料创新团队，历时5年研发，突破了传统碳还原剂理论束缚，在国际上首创了“复合生物质还原剂制备-矿热炉强化熔炼-复合炉外精炼-烟气高效治理及余热发电”集成技术，攻克了本领域挑战性难题，提升了我国工业硅矿热炉强化熔炼水平并建成了工业示范。

该项目已建成高品质工业硅生产线，连续稳定向电子级多晶硅生产企业供货，为破解我国本领域“卡脖子”问题提供了基础原料。该项目技术还在云南、陕西其他6家企业，以及陕西省政府环境技术机构应用，经济效益和社会效益显著。

该项目获授权发明专利7件；在国际学术期刊发表论文10篇，均被SCI\EI收录，其中一区及二区TOP期刊5篇；制定技术规程3部；获2022年度陕西有色金属工业科学技术奖一等奖。中国有色金属工业协会组织本领域院士及相关专家对项目成果的评价认定：促进了我国工业硅产业结构调整和产品升级换代，使我国工业硅冶炼整体技术达到国际先进水平，部分技术跃升至国际领先水平。推动了本领域科学理论和工程实践的进步与发展。

提名该项目参评陕西省科学技术进步奖三等奖。

**三、项目简介**

**（一）项目背景**

1.工业硅又称金属硅，是半导体芯片、太阳能光伏、合金硅等产业的基础原料，2018年列入国家《战略性新兴产业目录》。我国是工业硅生产大国也是消费大国，2022年我国工业硅产量约321万吨，占全球73%，但该项目实施前，我国工业硅产业因技术因素制约大而不强，主要原因包括：传统工艺高焦高煤还原剂导致能耗较高；强化熔炼效果差导致炉底上涨、冶炼效率低；炉外精炼水平低导致杂质去除困难；超细烟气粉尘粘结堵塞管道导致烟尘污染重、余热利用低。

2.该项目依托中共陕西省委“三秦学者”创新团队和“云南省硅冶金与硅材料”创新团队，自2016年3月至2021年3月，历时5年研发，突破了传统碳还原剂理论束缚，在国际上首创了“复合生物质还原剂制备-矿热炉强化熔炼-复合炉外精炼及装备-烟气高效治理及余热发电”系统集成技术，攻克了工业硅冶炼电单耗高、炉底上涨导致停炉、炉外精炼效果差、烟气治理难等本领域挑战性难题，以绿色低碳方式产出了高品质工业硅，连续稳定向电子级多晶硅生产企业供货，为破解我国本领域“卡脖子”问题提供了基础原料，使我国矿热炉工业硅强化熔炼技术达到国际先进水平，部分技术跃升至国际领先水平。

**（二）关键技术与创新点**

1.首创的“统计学+人工神经网络模型预测”理论，揭示了复合生物质碳还原剂的在冶炼过程中的作用机理，阐明了还原剂工业成份、杂质含量等物化性能对生产过程电耗、㶲效率的影响规律，厘清了提升单炉产量、降低冶炼电耗的因素，奠定了提升工业硅强化熔炼水平的理论和原料基础。

2.发明的新型炉外精炼技术、优化的矿热炉结构与电气参数设计，实现了工业硅强化熔炼。矿热炉结构参数和电气参数的优化，结合复合生物质还原剂和碱金属添加剂，实现了炉料物化性能调控，扩大了“坩埚”反应区域，有效抑制了炉底上涨；研发的新型炉外精炼装备、建立的高品质工业硅新型精炼理论及炉外复合精炼新技术体系，降低了产品中铁、铝、钙、硼、磷杂质含量。在实际生产中降低了冶炼电耗，产出了高品质工业硅，满足了电子级多晶硅对工业硅原料的要求。

3.研发的智能化可移动烟罩、钢珠连续抛丸清灰系统、烟气控制和阀门密封系统，突破了超细SiO2粉尘粘结造成的管道堵塞和余热锅炉换热管管束积尘结垢瓶颈，解决了高温烟气导致阀板变形烟气泄漏行业共性难题，实现了工业硅生产、烟气治理、余热锅炉、发电机组系统协同与耦合。

**（三）主要技术指标**

1.新型复合碳质还原剂固定碳大于75%、反应活性大于99.2%、比电阻大于3500µΩ∙m；实际生产中㶲效率提升至35%，比传统工艺提升5个百分点，单炉日产量由传统工艺40t提升至48t，领先同类型其他矿热炉。

2.矿热炉结构参数与电气参数优化，有效缓解了矿热炉电极下插困难、炉底上涨、连续运行周期短等技术难题，扩大了“坩埚”反应区域、提高了反应温度，提高了中间产物SiC的转化率，实现了矿热炉的强化熔炼。单位电耗从传统工艺的12450-12900 kW∙h/t降低到11350-11600 kW∙h/t。新型炉外精炼抬包将炉外精炼时间缩短30min以上，硼、磷含量由传统工艺的50、30ppmw，均降至30ppmw以下。

3.余热锅炉出口烟气温度降至140℃以下，余热回收率达到 63%，除尘器运转率提升至 99.5%以上。单位产品余热发电1100-1500度，回收了总电耗的10-15%。粉尘排放降至1.2-1.4mg/m³，远低于国标限值30mg/m³，实现了超净排放。

**（四）项目主要成果**

1.项目完成单位建成了30MVA高品质工业硅生产线，年产能由原来的1.2万吨提升至1.4万吨。近三年累计产出高品质工业硅4万吨，连续稳定向电子级多晶硅生产企业及其他企业供货，保障了电子级多晶硅生产，为破解我国本领域“卡脖子”问题提供了基础原料。

2.获授权发明专利7件；在国际学术期刊发表论文10篇，均被SCI\EI收录，其中一区及二区TOP期刊5篇，最高影响因子11.1；制定3部技术规程，促进了技术推广；获2022年度陕西有色金属工业科学技术奖一等奖。推动了本行业科学理论、技术实践和工程落地的发展与进步。

3.中国有色金属工业协会组织本领域院士及相关专家对项目成果的评价认定：该项目为高品质工业硅生产提供了技术示范，促进了我国工业硅产业结构调整和产品升级换代，整体技术达到国际先进水平，其中生物质协同强化熔炼技术、精炼系统装置达到国际领先水平。

**（五）经济效益及推广应用**

1.完成单位因该项目技术近三年新增销售收入7.42亿元，新增利润2753万元。

2.项目技术还在云南、陕西6家工业硅生产企业商南中剑、怒江鼎盛、芒市永隆、云南永昌、盈江弘大、龙陵顺康成功应用，取其4家经济效益统计结果，近三年新增销售收入44.82亿元，新增利润4.17亿元

3.冶炼烟气有组织和无组织排放分析及治理技术，在陕西省政府环境保护技术机构获得应用，指导了冶炼行业大气污染成因分析和监测工作，为省政府出台生态环境政策提供了工程实例参考，推动了冶炼行业节能减排工作的技术进步。

**（六）社会效益**

1.推动了我国工业硅产业结构调整和产品升级换代，为高品质工业硅生产提供了技术示范，引导我国多晶硅生产企业迈入电子级多晶硅应用市场。

2.实现了绿色节能生产，近三年年均节约能耗1.73万吨标煤、年均减少CO2排放5.1万吨、年均减排粉尘1300吨。

3.制定的本行业企业技术规程，为冶炼行业环境保护工作提供了典型示范。

4.建立了省级科研团队“陕西省冶金炉窑及系统节能减排三秦学者创新团队”和“云南省硅冶金与硅材料创新团队”，培养了国家级青年科技人才。

**四、客观评价**

该项目取得的系统性科技创新成果得到了国内同行专家、国际TOP学术期刊审稿人、陕西省政府生态环境机构、第三方环境检测机构、电子级多晶硅生产企业，以及高品质工业硅生产企业等单位的充分肯定和高度评价。

**（一）科学技术成果评价**

2023年3月20日，中国有色金属工业协会组织召开科技成果评价会，邀请国内同行业产学研方面的院士及相关专家共9人，对该项目成果进行了评价。评价意见指出：项目研发的“复合生物质还原剂制备-矿热炉强化熔炼-复合炉外精炼及装备-烟气高效治理及余热发电”系统工艺装备集成创新技术，解决了工业硅冶炼电耗较高、炉底上涨导致停炉、炉外精炼效果差、烟气治理难及余热利用效率低等本领域长期存在的挑战性难题，为高品质工业硅生产提供了技术示范，提升了我国工业硅矿热炉强化熔炼技术水平。开发的生物质协同强化熔炼、精炼系统装置等成套技术和配套装备，提升了工业硅产品品质，降低了单位产品能耗和生产成本，促进了我国工业硅产业结构调整和产品升级换代。生产的低硼、磷高品质工业硅引导项目完成单位迈入电子级多晶硅应用市场。

评价结论：“该项目整体技术达到国际先进水平，其中生物质协同强化熔炼技术、精炼系统装置达到国际领先水平”。

**（二）国际TOP学术期刊审稿人评价**

项目论文“Effect of off-centered silicon ladle on the removal strength of aluminum and calcium impurities”在中科院一区国际TOP学术期刊《Separation and Purification Technology》(2018, 201:301-308，影响因子8.44)发表，期刊审稿人评价：作者建立了一个数学模型，研究利用中心喷嘴和偏心多孔喷嘴在硅冶炼底吹抬包中的瞬态三维气液流动。论文组织严密，结果非常有意义。特别是，理论模型与工业结果相结合，非常有应用价值。

**（三）陕西省政府生态环境机构评价**

陕西省环境监测中心站评价：项目冶炼烟气有组织和无组织排放分析及治理技术，在我站相关工作中成功应用，在技术层面指导了冶炼行业大气污染成因分析和监测工作，为省政府出台生态环境政策提供了工程实例参考，推动了冶炼行业节能减排工作的技术进步。

**（四）第三方环境检测机构评价**

陕西中润检测有限公司2022年8月出具的监测报告指出：有组织颗粒物排放监测值为1.2-1.4mg/m³,远低于国标限值30mg/m³。无组织排放废气方面，厂区内4个监测区域无组织排放监测值为0.08-0.18mg/m³远低于1.0mg/m³的限值要求。

**（五）电子级多晶硅生产企业评价**

中美合资电子级多晶硅生产企业陕西有色天宏瑞科硅材料有限责任公司，在用户报告中指出：该项目所生产的高品质工业硅粉，自2021年以来向我公司连续稳定供货，产品品质优良，各项参数稳定达标，符合电子级多晶硅原料质量标准，保障了我公司电子级多晶硅生产，为破解本领域“卡脖子”问题提供了基础原料。

**（六）同行企业评价**

国内同行业高品质工业硅生产企业商南中剑、怒江鼎盛、芒市永隆、云南永昌、盈江弘大、龙陵顺康等6家企业在用户证明中评价：该项目技术在我公司获得了成功应用，其中，复合生物质还原剂制备、矿热炉强化熔炼、复合炉外精炼及装备、烟气高效治理及余热发电等多项关键技术，优化了工业硅生产的铁、铝、钙、磷、硼等指标，减少了颗粒物、氮氧化物、二氧化硫排放，提高了产品质量，降低了能耗，在工业硅生产中发挥了技术支撑作用，促进了企业的技术进步和产业升级，带动了工业硅和高纯硅行业的技术进步，取得了良好的经济效益和环境效果。

**（七）科技查新报告评述**

该项目发明的“生物质协同强化石油焦、煤等原料物化性能强化熔炼制备高品质硅关键技术”，“K2CO3等碱金属添加剂强化硅熔炼技术”，“抬包偏心底吹耦合复合精炼剂强化炉外精炼技术”，“高比电阻碳质还原剂调控控制硅冶炼烟气余热利用发电技术”等关键技术，经过国内外查新，均未见明确述及。

**（八）项目曾经获奖情况**

1.该项目部分成果“高纯工业硅炉窑节能减排工艺及制粉控制技术”获2022年度陕西有色金属工业科学技术奖一等奖。

2.因该项目业绩突出，中共陕西省委组织部授予项目依托团队“冶金炉窑及系统节能减排三秦学者创新团队”称号。

3.因该项目业绩突出，云南省政府授予项目合作团队“云南省冶金与硅材料研究省级创新团队”称号。

**五、推广应用情况**

本项目自2016年3月至2021年3月，历时5年研发，建成高品质工业硅生产线，以绿色节能方式产出了高品质工业硅。

1.项目在完成单位建成了年产1.4万吨30MVA高品质工业硅生产线，反应速率比传统工艺提升13.7%，单炉日产量达由传统工艺的40吨提升至48吨，生产电耗下降10.3%，年产能由传统工艺的1.2万吨提升至1.4万吨。近三年累计产出高品质工业硅4万吨。

2.阐明的炉外精炼理论、发明的复合炉外精炼技术、研制的炉外精炼配套装备在项目完成单位成功应用，使炉外精炼时间缩短30min以上，效率提升20%以上，工业硅产品硼、磷含量降至30ppmw以下。2021年1月以来，该项目生产的低硼、磷高品质工业硅向中美合资企业陕西有色天宏瑞科硅材料有限公司连续稳定供货，产品品质优良，各项参数稳定达标，符合电子级多晶硅原料质量标准，保障了电子级多晶硅生产。

3.研发的智能移动烟罩、抛丸清灰系统、烟气控制和阀门密封系统在项目完成单位成功应用，突破了超细SiO2粉尘粘结造成的管道堵塞和余热锅炉换热管管束积尘结垢瓶颈，解决了高温烟气导致阀板变形烟气泄漏的行业共性难题，避免了停产清堵，保障了烟气治理系统、余热锅炉系统、发电机组系统高效、协同、连续运行。近三年年均节约能耗1.73万吨标煤、年均减少CO2排放5.1万吨、年均减排粉尘1300吨。粉尘排放降至1.2-1.4mg/m³，远低于国标限值30mg/m³，实现了超净排放。

4.研发的冶炼烟气有组织和无组织排放分析及治理技术，在陕西省政府环境保护技术机构获得成功应用，在技术层面指导了冶炼行业大气污染成因分析监测、环境影响评价、排污许可管理、大气污染防治等项工作，为省政府出台生态环境政策提供了工程实例参考。

5.研发的复合生物质还原剂制备、矿热炉强化熔炼、烟气高效治理等关键技术成果在云南和陕西同行业其他6家企业商南中剑、怒江鼎盛、芒市永隆、云南永昌、盈江弘大、龙陵顺康获得成功应用，优化了这些企业工业硅生产的铁、铝、钙、磷、硼等多项指标，减少了颗粒物、氮氧化物、二氧化硫排放，降低了单位产品生产电耗，带动了这些企业的技术进步和产业升级，提高了企业的市场竞争力。

1. **主要知识产权**

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权  名称 | 国家  （地区） | 授权号 | 授权日期 | 证书编号 | 权利人 | 发明人 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 发明  专利 | 一种应用于工业硅冶炼生产的复合还原剂的制备方法 | 中国 | ZL201510704636.9 | 2018.1.12 | 第2778277号 | 昆明理工大学 | 马文会，陈正杰，伍继君，魏奎先，董艳奇，杨兴卫，雷 云，李绍元，谢克强，杨 斌，戴永年 |
| 2 | 发明  专利 | 一种工业硅用复合碳质还原剂及其制备方法 | 中国 | ZL201410176478.X | 2016.5.25 | 第2089408号 | 昆明理工大学 | 马文会，陈正杰，伍继君，魏奎先，吕国强，周 阳，于 洁，刘战伟，谢克强，杨兴卫，杨 斌，戴永年 |
| 3 | 发明专利 | 一种废弃木炭粉的综合利用及活化方法 | 中国 | ZL201510616903.7 | 2017.8.11 | 第2582919号 | 昆明理工大学 | 马文会，陈正杰，魏奎先，伍继君，李绍元，雷 云，谢克强，杨 斌，戴永年 |
| 4 | 发明专利 | 一种冶金用匣钵及其制备方法 | 中国 | ZL201810147249.3 | 2020.12.29 | 第4181151号 | 陕西盛华冶化有限公司 | 魏新华，马永宁，李兴波，王宝安，周江峰，高 琦，程 伟 |
| 5 | 发明专利 | 一种匣钵脱膜底料配方及其使用方法 | 中国 | ZL201810147249.3 | 2020.12.29 | 第3631899号 | 陕西盛华冶化有限公司 | 李兴波,马永宁,魏新华,周江峰,王宝安,高 琦,宋占福 |
| 6 | 发明专利 | 一种提高工业硅冶炼用生物质炭还原剂比电阻的方法 | 中国 | ZL201510704506.5 | 2017.12.22 | 第2747886号 | 昆明理工大学 | 马文会，杨兴卫，魏奎先，陈正杰，伍继君，董艳奇，杨 玺，谢克强，刘大春，杨 斌，王 华，戴永年 |
| 7 | 发明专利 | 一种铬铁合金的制备方法及应用于该方法中的坩埚 | 中国 | ZL201710779922.0 | 2020.01.14 | 第3666170号 | 陕西盛华冶化有限公司 | 魏新华,魏云松,李兴波,张炜,杨惠,高琦,王宝安 |
| 8 | 规范 | 工业硅冶炼烟气治理技术规程 | 中国 | YKJT019-2021 | 2021.11.2 | / | 陕西有色冶金矿业集团有限公司、陕西盛华冶化有限公司、昆明理工大学，陕西省环境调查评估中心 | 李忠民，李孝文，张 炜，王宝安，陈正杰，孟昭君，董素花，康 桢，纪 安，邓 超，马 渊，王 敏，张媛媛，杨 幸，李之浩，戚 茜，赵东旭，李 睿，马旭锋 |
| 9 | 论文 | Effect of the reactive blend conditions on the thermal properties of waste biomass and soft coal as a reducing agent for silicon production | 欧洲 | https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.080 | 2022.3.1 | Renewable  Energy | 昆明理工大学 | 张红梅，陈正杰（通讯作者），马  文会，曹世界 |
| 10 | 论文 | Effect of offcentered silicon ladle on the removal strength of luminum and calcium impurities | 欧洲 | https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.0  3.021 | 2018.8.15 | Separation and Purification Technology | 昆明理工大学 | 王杰，陈正杰（通  讯作者），马文会，魏奎先，李绍元，刘俊汝，丁卫民，文建华 |

**七、主要完成人情况**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 陈正杰 | 排名 | 1 |
| 行政职务 | 主任 | 技术职称 | 副教授 |
| 工作单位 | 昆明理工大学 | 完成单位 | 昆明理工大学 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 项目负责人，全面负责研发工作。在“四、主要科技创新”中，对3.1关键技术与创新点1；3.2关键技术与创新点2；3.3关键技术与创新点3，均有贡献。研发了原料配比及成分对工业硅生产过程参数的影响；提出了“统计学+人工神经网络模型预测”方法，阐明了不同还原剂及其工业成份、杂质含量等对工业硅生产过程能耗及㶲效率的影响规律，全程参与了新型炉外精炼技术、矿热炉结构与电气参数设计优化及烟气治理、余热发电技术的创新优化。 | | |
| 姓名 | 王宝安 | 排名 | 2 |
| 行政职务 | 副主任 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 陕西盛华冶化有限公司 | 完成单位 | 陕西盛华冶化有限公司 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 负责总体工艺方案制定与实施，在“四、主要科技创新”中，对3.2关键技术与创新点2；3.3关键技术与创新点3有贡献。优化设计了矿热炉结构与电气参数，研发出新型炉外精炼装备，开发了节能减排技术，参与烟气治理与预热发电技术优化，3项发明专利，共同制定团体技术规范3项，规范了企业生产行为。 | | |
| 姓名 | 李忠民 | 排名 | 3 |
| 行政职务 | 董事长 | 技术职称 | 工程师 |
| 工作单位 | 陕西有色冶金矿业集团有限公司 | 完成单位 | 陕西有色冶金矿业集团有限公司 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 负责总体工艺方案制定与实施，在“四、主要科技创新”中，对3.2关键技术与创新点2；3.3关键技术与创新点3有贡献。负责工业硅节能减排技术的开发，矿热炉结构参数的优化设计与改进，提高了矿热炉反应区的温度，为强化熔炼提供了坚实的基础；扩大了“坩埚”反应区域，增加了反应界面，提高了反应速度，主导编制了技术规范三项，规范了企业生产行为，保障了生产过程安全可靠、产品质量稳定达标，促进了先进技术推广应用。 | | |
| 姓名 | 张炜 | 排名 | 4 |
| 行政职务 | 总经理 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 陕西盛华冶化有限公司 | 完成单位 | 陕西盛华冶化有限公司 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 负责前期立项、方案论证，余热发电方案的设计与实施。在“四、主要科技创新”中，对3.2关键技术与创新点2；3.3关键技术与创新点3有贡献。主要开展了不同还原剂以及还原剂工业成份、杂质含量等对工业硅生产过程能耗及㶲效率的影响规律研究，实现了工业硅中还原剂物料配比的优化配料。制定了余热发电优化方案，提升了烟气余热发电效率。 | | |
| 姓名 | 孟昭君 | 排名 | 5 |
| 行政职务 | 副主任 | 技术职称 | 高级工程师 |
| 工作单位 | 陕西省环境调查评估中心 | 完成单位 | 陕西省环境调查评估中心 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 负责环保工艺、设施的研究与方案制定实施，在“四、主要科技创新”中，对3.3关键技术与创新点3有贡献。主要研发了智能移动烟罩系统，克服烟气中极细SiO2粘结造成管道积尘堵塞；烟气管道、切换阀门、正压与负压干式除尘器布袋系统，保证了工业硅生产系统的正常运行。负责编制技术规范3项，治理了冶炼烟尘及相关污染物，实现了绿色节能生产，为冶炼行业环境保护工作提供了典型示范。 | | |
| 姓名 | 李孝文 | 排名 | 6 |
| 行政职务 | 总经理助理 | 技术职称 | 正高级工程师 |
| 工作单位 | 陕西有色冶金矿业集团有限公司 | 完成单位 | 陕西有色冶金矿业集团有限公司 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 负责工艺过程控制、生产过程对标研究与实施。在“四、主要科技创新”中，对3.2关键技术与创新点2；3.3关键技术与创新点3有贡献。具体负责碳质还原配比、工业成份等主要杂质成分对工业硅生产过程电耗及㶲效率的影响规律研究，通过矿热炉强化熔炼实践，提高了反应温度，提高了中间产物SiC的转化率，实现了矿热炉的强化熔炼。共同制定了技术规范3项，指导了产业化应用实践操作。 | | |
| 姓名 | 董素花 | 排名 | 7 |
| 行政职务 | 主任 | 技术职称 | 经济师 |
| 工作单位 | 陕西有色冶金矿业集团有限公司 | 完成单位 | 陕西有色冶金矿业集团有限公司 |
| 对本项目主要学术和技术创造性贡献 | 负责经济效益分析，原料性能、产品性能分析，文献资料管理。在“四、主要科技创新”中，对3.2关键技术与创新点2；3.3关键技术与创新点3有贡献。具体负责研究还原剂、硅矿石中物料成分、配比等对工业硅生产过程电耗及㶲效率的影响规律，工业硅用还原剂制备技术中生物质与高焦高煤组分间的协同强化性能。参与烟气治理技术参数分析研究。共同制定了技术规范3项，为高品质工业硅产出提供了基础支撑。 | | |

**八、主要完成单位排序及贡献**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目排名 | 完成  单位 | 对项目的贡献 |
| 1 | 陕西盛华冶化有限公司 | 主要贡献如下：陕西盛华冶化有限公司作为第一完成单位，开发的矿热炉强化冶炼技术、复合炉外精炼系统及配套装备、智能化可移动烟罩、连续钢珠抛丸清灰系统、烟气控制和阀门密封系统，攻克了工业硅冶炼电单耗高、炉底上涨导致停炉、炉外精炼效果差、烟气治理难等本领域难题，建成了30MVA高品质工业硅生产线，以绿色低碳方式产出了高品质工业硅，年产能由原来的1.2万吨提升至1.4万吨。近三年连续稳定向电子级多晶硅生产企业及其他企业供货，保障了电子级多晶硅生产。余热利用年发电5000万kWh，年节约能耗1.73万吨标煤、年减少CO2排放5.1万吨、年减排粉尘1300吨。 |
| 2 | 昆明理工大学 | 主要贡献如下：昆明理工大学在《高品质工业硅绿色节能关键技术研究与应用》研发工作中，提出了“统计学+人工神经网络模型预测”理论，揭示了复合生物质碳还原剂的在冶炼过程中的作用机理，阐明了还原剂工业成份、杂质含量等物化性能对生产过程电耗、㶲效率的影响规律，厘清了提升单炉产量、降低冶炼电耗的关键因素；发明的新型炉外精炼技术、优化的矿热炉结构与电气参数设计，结合复合生物质还原剂和碱金属添加剂，实现了炉料物化性能调控，扩大了“坩埚”反应区域，有效抑制了炉底上涨；建立的高品质工业硅新型精炼理论及炉外复合精炼新技术体系，降低了产品中铁、铝、钙、硼、磷杂质含量。在实际生产中降低了冶炼电耗，产出了高品质工业硅。 |
| 3 | 陕西省环境调查评估中心 | 主要贡献如下：陕西省环境调查评估中心在《高品质工业硅绿色节能关键技术研究与应用》研发工作中，与其他完成单位紧密合作，开发了智能化可移动烟罩、钢珠连续抛丸清灰系统、烟气控制和阀门密封系统，突破了超细SiO2粉尘粘结造成的管道堵塞和余热锅炉换热管管束积尘结垢瓶颈，解决了高温烟气导致阀板变形烟气泄漏行业共性难题。除尘器运转率提升至 99.5%以上，单位产品余热发电1100-1500度，回收了总电耗的10-15%，粉尘排放降至1.2-1.4mg/m³，远低于国标限值30mg/m³，达到了超净排放标准。实现了工业硅生产、烟气治理、余热锅炉、发电机组系统协同与耦合。 |
| 4 | 陕西有色冶金矿业集团有限公司 | 主要贡献如下：陕西有色冶金矿业集团有限公司在《高品质工业硅绿色节能关键技术研究与应用》研发工作中，与其他完成单位紧密合作，开发了工业硅强化熔炼、工业硅炉外精炼、烟气治理及余热发电创新优化等技术，攻克了工业硅冶炼电单耗高、炉底上涨导致停炉、炉外精炼效果差、烟气治理难等本领域难题。投资4800万元建成了30MVA高品质工业硅生产线，以绿色低碳方式产出了高品质工业硅，并牵头与电子级多晶硅生产企业对接，调整优化工业硅产品品质，满足相应要求。在研发工作中，颁布了《高纯工业硅冶炼工艺操作技术规程》、《高纯工业硅冶炼原料条件技术规程》、《高纯工业硅冶炼工艺操作技术规范》等3部技术规程，编制了《高品质工业硅绿色节能关键技术》研究报告。 |

**九、完成人合作关系说明**

该项目由陕西盛华冶化有限公司、昆明理工大学、陕西省环境调查评估中心陕西有色冶金矿业集团有限公司等4家单位共同完成。主要完成人共7位，按照贡献大小排序如下:陈正杰、王宝安、李忠民、张炜、孟昭君、李孝文、董素花。陈正杰是昆明理工大学副教授，王宝安、张炜是陕西盛华冶化有限公司高级工程师，孟昭君是陕西省环境调查评估中心高级工程师，李忠民、李孝文、董素花分别是陕西有色治金矿业集团有限公司工程师、正高工、经济师。自2016年以来，各完成人围绕高品质工业硅绿色节能关键技术联合攻关，在项目研发、技术应用、成果产业化、人才培养、技术规范制定等方面开展了全面合作，形成了紧密合作关系。

**十、完成单位合作关系说明**

本项目由陕西盛华冶化有限公司、昆明理工大学、陕西省环境调查评估中心、陕西有色冶金矿业集团有限公司4个单位共同完成，各单位紧密配合共同开发“复合生物质还原剂制备-矿热炉强化熔炼-复合炉外精炼-烟气高效治理及余热发电”系统集成技术。陕西盛华冶化有限公司作为本项目主体单位，在人力、财力、物力方面提供了有力保障，开发的矿热炉强化冶炼技术、复合炉外精炼系统及配套装备、智能化可移动烟罩、连续钢珠抛丸清灰系统、烟气控制和阀门密封系统，攻克了工业硅冶炼电单耗高、炉底上涨导致停炉、炉外精炼效果差、烟气治理难等本领域难题，建成了30MVA高品质工业硅生产线，以绿色低碳方式产出了高品质工业硅，年产能由原来的1.2万吨提升至1.4万吨。昆明理工大学结合陕西盛华冶化有限公司在工业硅冶炼方面的技术需求，提出了“统计学+人工神经网络模型预测”理论，揭示了复合生物质碳还原剂的在冶炼过程中的作用机理，阐明了还原剂工业成份、杂质含量等物化性能对生产过程电耗、㶲效率的影响规律，厘清了提升单炉产量、降低冶炼电耗的关键因素；发明的新型炉外精炼技术、优化的矿热炉结构与电气参数设计，结合复合生物质还原剂和碱金属添加剂，实现了炉料物化性能调控，扩大了“坩埚”反应区域，有效抑制了炉底上涨；建立的高品质工业硅新型精炼理论及炉外复合精炼新技术体系，降低了产品中铁、铝、钙、硼、磷杂质含量。在实际生产中降低了冶炼电耗，产出了高品质工业硅。陕西省环境调查评估中心，结合陕西盛华冶化有限公司工业硅冶炼实际，开发了智能化可移动烟罩、钢珠连续抛丸清灰系统、烟气控制和阀门密封系统，突破了超细SiO2粉尘粘结造成的管道堵塞和余热锅炉换热管管束积尘结垢瓶颈，解决了高温烟气导致阀板变形烟气泄漏行业共性难题。除尘器运转率提升至 99.5%以上，单位产品余热发电1100-1500度，回收了总电耗的10-15%，粉尘排放降至1.2-1.4mg/m³，远低于国标限值30mg/m³，达到了超净排放标准。实现了工业硅生产、烟气治理、余热锅炉、发电机组系统协同与耦合。陕西有色冶金矿业集团有限公司结合陕西盛华冶化有限公司工业硅冶炼实际，开发了工业硅强化熔炼、工业硅炉外精炼、烟气治理及余热发电创新优化等技术，攻克了工业硅冶炼电单耗高、炉底上涨导致停炉、炉外精炼效果差、烟气治理难等本领域难题。投资4800万元建成了30MVA高品质工业硅生产线，以绿色低碳方式产出了高品质工业硅，并牵头与电子级多晶硅生产企业对接，调整优化工业硅产品品质，满足相应要求。项目负责及参与单位分工明确、责任清晰。