

“百万吨级硫磺回收和尾气处理关键技术与装备研发及应用”

项目成果报奖公示材料

项目名称：百万吨级硫磺回收和尾气处理关键技术与装备研发及应用

提名单位意见：（达州市科学技术局）

经审查，该项目推荐材料真实有效，相关栏目符合填写要求，已在主要完成单位完成项目公示，结果无异议。

该项目针对百万吨级硫磺回收和尾气处理装置存在设备超温、腐蚀失效等技术问题，通过开展液硫脱气及停工清洁生产工艺研究、大型硫磺回收反应炉工艺设计技术研究、余热锅炉管头制造及检测技术研究、尾气回收余热锅炉管头结构及相应非平面插入式射线检测技术研究，成功开发高效节能环保的硫磺回收反应炉、硫磺回收反应炉余热锅炉及尾气焚烧余热锅炉，形成一套百万吨级硫磺回收和尾气处理关键技术与装备研发及应用技术，并实现工业化应用，保证了装置长周期稳定的运行。

项目成果已在国内同类装置中推广应用，包括采用液硫脱气（改进后）工艺装置 5 套，热氮吹硫工艺装置 6 套，硫磺回收反应炉 16 台、反应炉余热锅炉 16 台、尾气焚烧余热锅炉 1 台，应用效果良好，取得了显著的社会和经济效益

由于该项目总体技术达到国际先进水平，填补了国内空白，在系统集成上有创新，技术难度大，市场竞争力强，成果转化程度高，经济、社会效益显著，同意推荐该项目为 2019 年度四川省科技进步奖一等奖。

项目简介：项目针对百万吨级硫磺回收和尾气处理装置存在反应炉壳体超温、腐蚀失效等技术问题，通过开展液硫脱气及停工清洁生产工艺研究、大型硫磺回收反应炉工艺设计技术研究、反应炉余热锅炉管头制造及检测技术研究、尾气回收余热锅炉管头结构及相应非平面插入式射线检测技术研究，成功开发液硫脱气及停工清洁生产工艺技术、高效节能环保的硫磺回收反应炉、硫磺回收反应炉余热锅炉及尾气焚烧余热锅炉，形成一套百万吨级硫磺回收和尾气处理关键技术与装备研发及应用技术，并实现工业化应用，保证了装置长周期稳定的运行，技术整体达到国际先进水平。

客观评价：

项目创新情况

项目针对百万吨级硫磺回收和尾气处理装置存在反应炉壳体超温、腐蚀失效等技术问题，通过开展液硫脱气及停工清洁生产工艺研究、大型硫磺回收反应炉工艺设计技术研究、余热锅炉管头制造及检测技术研究、尾气回收余热锅炉管头结构及相应非平面插入式射线检测技术研究，成功开发高效节能环保的硫磺回收反应炉、硫磺回收反应炉余热锅炉及尾气焚烧余热锅炉，形成一套百万吨级硫磺回收和尾气处理关键技术与装备研发及应用技术。创新形成如下 3 项关键技术：

(1) 创新形成液硫脱气及停工清洁生产工艺

优化改进液硫脱气系统工艺，通过机械搅动和气体搅动相结合的方式，降低液硫中硫化氢含量，提高产品硫磺品质；创新形成停工清洁生产工艺，采用高温惰性气体吹除的方式，避免了吹

硫作业中系统飞温，烧毁设备，有效降低排放尾气中的二氧化硫浓度，满足环保排放要求。

（2）创新形成大型硫磺回收反应炉研发及应用技术

通过对不同长径比炉体、停留时间、花墙结构的模拟、分析、计算和试验，形成大直径、薄壁壳体改造技术，解决壳体振动，垂直变形问题，提高了硫磺回收率；研究设计卵榫型 3 层反应炉衬里结构与高抗热震稳定性能耐火材料，解决了炉体外壁超温的问题，提高衬里寿命；通过对燃烧性能的模拟分析及改进，保证大流量酸气高温稳定燃烧，实现燃烧器关键部件国产化，攻克了净化厂长周期运行的瓶颈问题，实现了硫磺回收系统安全平稳长周期运行。

（3）创新形成大型硫磺反应炉余热锅炉及尾气焚烧余热锅炉研发及应用技术

针对大型硫磺回收余热锅炉管接头结构尺寸受到限制，易失效的技术难点，常规设计方法与结构型式难以保证，通过有限元分析，优化设计管头结构为深坡口全焊透形式，显著降低应力水平和泄漏率，提高了设备运行可靠性。针对尾气焚烧余热锅炉管头的应用场合进行需求分析，结合工艺评定、试验验证等方法，以管头拉脱强度及水平为指标，优选最终方案。研究管头检测方法与工艺，满足管头构造结构检测需求，提高设备安全可靠。

应用情况：

项目成果已在国内同类装置中推广应用，包括采用液硫脱气（改进后）工艺装置 5 套，热氮吹硫工艺装置 6 套，硫磺回收反应炉 16 台、反应炉余热锅炉 16 台、尾气焚烧余热锅炉 1 台，应

用效果良好，取得了显著的社会和经济效益，综合指标优于国内同类产品水平。

三、总体评价

该项目在国内首次应用于特高含硫净化装置，共申请成果获授权发明专利 6 项、实用新型专利 17 项，具有自主知识产权，总体技术达到国内领先水平，填补了国内空白，为我国规模最大的高含硫气田-普光气田的安全开采、硫磺回收、尾气处理及安全生产储运做出贡献，并为其他高含硫气田的开采提供应用示范案例。建议该成果在国内同类高含硫天然气净化装置、高含硫炼油装置等装置中进行推广应用。

推广应用情况：液硫脱气技术及停工生产清洁工艺已经成功应用于普光天然气净化厂的实际生产，即使在出现了各种不利条件的工况下，液硫产品质量及尾气排放仍然合格，具有巨大的经济效益和社会效益。反应炉投用后，运行温度由 950℃ 提高至 1060℃，操作负荷从 80% 提高到能够满负荷稳定运行，单系列装置年增加外输天然气 1.49 亿方，增加硫磺产量 4 万吨，中压蒸汽产量增加 6.48 万吨，年增加硫磺销售收入 4400 万元（按照硫磺 1100 元/吨计算）。截止目前共改造 12 台，与原反应炉相比年可增加销售收入 5.28 亿元。同时每年可减少 45 天装置停工检修时间。反应炉余热锅炉投用后，与国外同类大型硫磺回收余热锅炉相比，单台购置费用减少 64%，截止目前已完成改造 12 台余热锅炉，节支 9445 万元。尾气焚烧余热锅炉投用后，按年运行 8400 小时计算，单台设备回收热量 $2.637 \times 10^{11} \text{kcal}$ ，年折合节约燃料油 26367.6t，年增加经济效益 9986.03 万元。国产尾气焚

烧余热锅炉价格仅为进口设备价格的 36%，每套余热锅炉节约购置费 829 万元。国产化改造后，排烟温度比进口设备低 46℃，每年多回收热量 1.806×10^{10} kcal，多产蒸汽 28218.75t，年多节约燃料油 1806t，年经济效益多增加 620.81 万元。本项目保障了普光气田装置的长周期安全稳定运行，为“川气东送工程”沿线六省二市 70 多个城市的稳定供气起到了重要作用，同时本项目的成功研发应用也符合国家环保政策，具有显著的环保效应。

主要知识产权证明目录（主要）：

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	液硫脱气工艺	中国	ZL201210478539.9	2015.03.04	1597170	山东三维石化工程股份有限公司	袁洪娟；李铁军；范西四	有效
发明专利	硫磺回收及尾气处理装置停工清洁生产工艺	中国	ZL201310100183.X	2013.03.27	1459003	山东三维石化工程股份有限公司	李铁军	有效
发明专利	一种天然气处理装置的适用性评价系统	中国	ZL201610561954.9	2016.07.15		甘肃蓝科石化高新装备股份有效公司	韩睿超；张玉福；李健；宋文明；周文学；赵亮；陈战杨	有效
发明专利	硫回收尾气液相处理工艺	中国	ZL201210517556.9	2014.08.13	1459508	山东三维石化工程股份有限公司	李铁军；杨想全，赵芳	有效
发明专利	基于水相态分析计算的石化设备腐蚀判定方法	中国	ZL201710575679.0	2017.07.14		甘肃蓝科石化高新装备股份有效公司	宋文明；张玉福；杨贵荣；马颖；王纪兵；卢雪梅；李玉阁；黄超鹏	有效
行业标准	石油化工管壳式余热锅炉	中国	SH/T3158-2009			中华人民共和国工业和信息化部 山东三维石化工程股份有限公司	何智灵；王春江；初宜军；杨本智；伍志毅；张迎恺	

发明专利	一种耐磨耐碱纳米防腐涂料及其制备方法	中国	CN201610670459.1	2018.3.16	1459508	陈曦	陈曦、王瑶、严冰、屈坤、闫渊	有效
发明专利	一种热质交换强化结构及其设计方法。	中国	ZL201610682012.6	2018.9.27	1459508	西安交通大学	李平, 张荻, 谢永慧。	有效

主要完成人情况表:

姓名	排名	职称/职务	工作单位	完成单位	对本项目技术创造性贡献
陈韶范	1	教授级高工	甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司	甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司	1、编制项目攻关方案, 解决攻关过程中出现的技术难题; 2、提出并编制项目方案、参与关键技术研究; 3、参与项目实施、报告编写和成果验收; 4、组织项目在普光天然气净化厂的应用和推广。
朱德华	2	教授级高工	中原油田普光分公司	中原油田普光分公司	1、编制项目攻关方案, 解决攻关过程中出现的技术难题; 2、提出并编制项目方案、参与关键技术研究; 3、参与项目设计、项目实施、报告编写和成果验收; 4、组织项目在普光天然气净化厂的应用和推广。
尹琦岭	3	教授级高工	中原油田普光分公司	中原油田普光分公司	1、提出并编制项目方案、参与关键技术研究; 2、参与项目设计、项目实施、报告编写和成果验收;

陈曦	4	教授/化工学院院长	西北大学	西北大学	1、指导、协调项目的整体运行； 2、协调解决项目研究过程中的疑难问题。
屈丹龙	5	高工	油田事业部	中国石油化工股份有限公司	1、编制项目攻关方案，解决攻关过程中出现的技术难题； 2、组织项目在天然气净化厂的应用和推广。
兰宦勤	6	高工	中原油田普光分公司	中原油田普光分公司	参与项目设计、项目实施、报告编写； 组织项目在普光天然气净化厂的应用和推广。
张杰	7	高工	中原油田普光分公司	中原油田普光分公司	参与项目设计、报告编写和成果验收； 组织项目在普光天然气净化厂的应用和推广。
马一鸣	8	高工	甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司	甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司	参与项目设计、项目实施、报告编写； 组织项目的应用和推广。
何智灵	9	教授级高工	山东三维石化工程股份有限公司	山东三维石化工程股份有限公司	参与项目实施、报告编写和成果验收； 组织项目的应用和推广。
金永灿	10	教授级高工	甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司	甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司	参与项目设计、项目实施、报告编写； 组织项目的应用和推广。
李平	11	副教授	西安交通大学	西安交通大学	参与项目设计、项目实施、报告编写； 组织项目的应用和推广。
强天鹏	12	研究员	江苏中特创业设备检测有限公司	江苏中特创业设备检测有限公司	参与项目设计、项目实施、报告编写； 组织项目的应用和推广。

赵国栋	13	高工	甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司	甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司	参与项目设计、项目实施、报告编写；组织项目的应用和推广。
王团亮	14	工程师	中原油田普光分公司	中原油田普光分公司	参与项目实施、报告编写和成果验收；
苗立民	15	高工	中原油田普光分公司	中原油田普光分公司	参与项目设计、报告编写和成果验收；组织项目在普光天然气净化厂的应用和推广。
刘 锋	16	高工	中原油田普光分公司	中原油田普光分公司	参与项目实施、报告编写和成果验收；
李伟华	17	工程师	中原油田普光分公司	中原油田普光分公司	参与项目实施、报告编写和成果验收；
金彦峰	18	高级工程师	甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司	甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司	参与项目设计、项目实施、报告编写；组织项目的应用和推广。
权培丰	19	高工	中原油田普光分公司	中原油田普光分公司	参与项目实施、报告编写和成果验收；

主要完成单位：中国石油化工股份有限公司中原油田普光分公司

创新推广贡献：普光分公司具有特高含硫天然气净化装置 6 个联合，本项目针对百万吨级硫磺回收和尾气处理装置存在反应炉壳体超温、腐蚀失效、排放超标等技术问题，积极组织多方联合开展相关技术研究。改进液硫脱气工艺、合作研发停工清洁生产工艺，开发出高效节能环保的硫磺回收反应炉、硫磺回收反应炉余热锅炉及尾气焚烧余热锅炉，并实现工业化应用，创新形成如下 3 项关键技术：

(1) 创新形成液硫脱气及停工清洁生产工艺。

优化改进液硫脱气系统工艺，降低液硫中硫化氢含量，提高产品硫磺品质；创新停工清洁生产工艺，避免了吹硫作业中系统飞温，有效降低排放尾气中的二氧化硫，满足环保排放要求。

(2) 创新形成大型硫磺回收反应炉研发及应用技术

研究设计卵榫型 3 层反应炉衬里结构与高抗热震稳定性能耐火材料，解决了炉体外壁超温的问题，提高衬里寿命。

(3) 创新形成大型硫磺反应炉余热锅炉及尾气焚烧余热锅炉研发及应用技术

针对尾气焚烧余热锅炉管头的应用场合进行需求分析，结合工艺评定、试验验证等方法，以管头拉脱强度及水平为指标，优选最终方案。

该项目在国内首次应用于高压、高含 H₂S 和 CO₂ 净化装置，具有自主知识产权，总体技术达到国内领先水平，填补了国内空白，为我国规模最大的高含硫气田-普光气田的安全开采、硫磺

回收、尾气处理及安全生产储运做出贡献，并为其他高含硫气田的开采提供应用示范案例。建议该成果在国内高含硫天然气净化装置、高含硫炼油装置等装置中进行推广应用。

主要完成单位：甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司

创新推广贡献：本项目针对百万吨级硫磺回收和尾气处理关键技术及装备研发及应用，建立大型硫磺回收反应炉燃烧反应模型，拓展了专用工艺模拟计算机软件的功能，形成硫磺回收反应炉工艺设计技术，提高了硫回收率；研制成功结构紧凑的炉体及多层复合结构耐火衬里，解决了现有材料不稳定及易失效的难题，改善了炉内温度场环向分布，本单位以下技术创新点做出了贡献：

(1) 创新形成大型硫磺回收反应炉研发及应用技术。

形成了余热锅炉高压差、负荷变化大、高含硫腐蚀环境等要求的管头制造及检测技术，开发了硫磺回收反应炉余热锅炉深坡口、全焊透管子管板连接结构，优化了高参数变柔度挠性管板的应力分布。

(2) 创新形成大型硫磺反应炉余热锅炉及尾气焚烧余热锅炉研发及应用技术

研制了尾气回收余热锅炉管头结构及相应非平面插入式射线检测技术，保证了装置长周期稳定的运行。

主要完成单位：山东三维石化工程股份有限公司

创新推广贡献：针对百万吨级硫磺回收和尾气处理关键技术及装备研发及应用项目，优化改进液硫脱气系统工艺，通过机械搅动和气体搅动相结合的方式，降低液硫中硫化氢含量，提高产

品硫磺品质；创新形成停工清洁生产工艺，采用高温惰性气体吹除的方式，避免了吹硫作业中系统飞温，烧毁设备，有效降低排放尾气中的二氧化硫浓度，满足环保排放要求，本单位以下技术创新点做出了贡献：

(1) 创新形成液硫脱气及停工清洁生产工艺

优化改进液硫脱气系统工艺，通过机械搅动和气体搅动相结合的方式，降低液硫中硫化氢含量，提高产品硫磺品质；创新形成停工清洁生产工艺，采用高温惰性气体吹除的方式，避免了吹硫作业中系统飞温，烧毁设备，有效降低排放尾气中的二氧化硫浓度，满足环保排放要求。

(2) 创新形成大型硫磺回收反应炉研发及应用技术

通过对不同长径比炉体、停留时间、花墙结构的模拟、分析、计算和试验，形成大直径、薄壁壳体改造技术，解决壳体振动，垂直变形问题，提高了硫磺回收率；通过对燃烧性能的模拟分析及改进，保证大流量酸气高温稳定燃烧，实现燃烧器关键部件国产化，攻克了净化厂长周期运行的瓶颈问题，实现了硫磺回收反应炉安全平稳长周期运行。

主要完成单位：西北大学

创新推广贡献：针对百万吨级硫磺回收和尾气处理关键技术与装备研发及应用项目，应用全新的防腐机理，研发了纳米增强重防腐涂层，该涂层具有耐高温、耐高压、耐高酸性、高耐磨等突出性能。有效避免了换热系统温度过高，腐蚀严重、降低换热效率等问题。有效提升了系统的使用寿命和安全系数，满足节能与环保排放要求，本单位以下技术创新点做出了贡献：

(1) 创新开发具有全新阻隔机理的纳米重防腐涂料

针对国内油气田高含酸（H₂S 和 CO₂ 共存）、高矿化度的腐蚀环境，依照材料“分子基因工程”原理，提出新型高性能纳米颗粒防腐涂层。该纳米颗粒防腐涂层技术通过先进的化学改性方法对纳米材料进行表面改性，促进涂层的致密性；合成新型改性树脂，通过共混技术实现分子水平互穿，与纳米增强材料产生协同作用，共同达到保护金属基体的作用。

(2) 创新形成大型硫磺回收反应炉高温耐热耐磨涂层

通过开发系列耐温、耐压、耐磨蚀涂层产品及其涂覆工艺，应用的系列防腐产品不仅可以应用常规施工工艺（包括刷涂、辊涂、空气喷涂和无气喷涂等），也可以适用于特殊的管道施工工艺（包括管道内挤涂及旋杯式离心喷涂等）。根据不同的工况条件，选取适当的配套方式，满足了净化厂长周期运行的重大防腐问题，实现了硫磺回收装置的平稳长周期运行。

主要完成单位：西安交通大学

创新推广贡献：针对百万吨级硫磺回收和尾气处理关键技术与装备研发及应用项目，进行了换热器内微通道热沉内球窝/球凸和非牛顿流体/纳米流体的组合强化换热研究，为发展适用于微通道热沉应用的流动控制结构和新型工质奠定了基础。通过对通道内分离流动结构（包括焦点结构等）、壁面温度梯度和平均温度、壁面极限流线、（非牛顿流体分析中还有流向和展向中分面流线、动力粘性系数分布）、近壁面流动分离模式、阻力系数和努塞尔数、热性能参数等进行的全面分析，获得了流体流动结

构演变和换热规律，揭示了功能流体在复杂结构表面微通道中的组合强化换热机理。本单位以下技术创新点做出了贡献：

(1) 创新形成高效微尺度强换热设计

与普通尺度换热通道效率相比，非牛顿流体部分，相对努塞尔数均大于 1.2，部分工况下相对努塞尔数范围则为 1.7-3.1。除部分微通道浅球窝和高浓度溶液工况外，通道综合热性能参数均位于 1.2-2.4；纳米流体部分，相对努塞尔数最大可达 3.7，通道综合热性能参数则可达 2.8，均实现了在强化换热同时，更获得了良好的节能效果的目标。

(2) 创新形成大型硫磺回收反应炉强换热技术

针对大型硫磺回收余热锅炉管接头结构尺寸限制下的局部易失效的技术难点，常规设计方法与结构形式难以保证，通过有限元分析，优化设计管头结构提高换热效率，显著降低应力水平和泄漏率。形成了一系列局部微尺度换热设计准则，提高了设备运行可靠性与安全性，延长了平稳运行周期。

主要完成单位：江苏中特创业设备检测有限公司

创新推广贡献：普光净化厂余热锅炉操作温度高和压力高，设备直径大（内径达到3米以上），多台为固定管板换热器，对管壳程温差承受能力低，对开停工的温度控制要求高；从泄漏设备失效分析来看，部分换热设备管子和管板焊接质量较差，焊接接头存在裂纹缺陷，管子和管板贴胀不紧密，存在缝隙腐蚀可能性；本项目开展了管子管板射线检测技术研究，形成了相应的检测技术及规范，本单位对以下技术创新点做出了贡献：

(1) 形成管子管板强度焊焊接接头射线检测、缺陷评定和验收要求。

针对硫磺回收装置余热锅炉管子管板焊接接头易受高温硫化物腐蚀，引发设备失效的情况，开展管头射线检测技术研究，创新形成管子管板强度焊焊接接头射线检测技术，规定了在用换热器管头缺陷评定及验收要求。

(2) 创新形成曲面插入式换热管接头射线检测技术

余热锅炉换热管接头角焊缝处于曲面空间，为保证设备制造质量，创新形成曲面插入式管接头射线检测技术，设计曲面补偿器，进行工艺试验，并针对工件特点制定了缺陷评定及验收要求，填补了国内该类型管接头检测技术的空白。

完成人合作关系说明：该项目主要完成人工作单位为中国石油化工股份有限公司中原油田普光分公司、甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司、山东三维石化工程股份有限公司、西北大学、西安交通大学，长期合作，共同承担了多项中石化集团公司重点科研项目。其中第一完成人为项目单位项目负责人，全面组织、策划、实施该项目的研究与开发工作。第二完成人为项目单位项目实施负责人之一，协助第一完成人组织项目实施、报告编写和成果验收，制定工艺设计和实施方案，指导关键技术。第三完成人为项目单位技术协调人，协助第一二完成人，负责协调项目设计、项目实施、报告编写和成果验收，并组织在普光净化厂的应用和推广工作。第四完成人为项目单位技术协调人，协助第一三完成人，负责协调项目设计、项目实施、报告编写和成果验收，并组织在普光净化厂的应用和推广工作。第五完成人为项目单位

技术协调人，协助第一三完成人，负责协调项目设计、项目实施、报告编写和成果验收工作。