申报2024年度中国有色金属工业科学技术奖公示

1. 项目名称：轻量化内燃机动力及后处理用材料与零部件关键制造技术与应用
2. 牵头单位：昆明理工大学
3. 申报等级：2024年度“中国有色金属工业科学技术奖”科技进步一等奖
4. 项目简介：

《中国制造2025》提出提升高效内燃机等核心技术的工程化和产业化能力，构建完整的工业与创新体系。本项目聚焦内燃机缸体、活塞及尾气后处理部件，以提高燃油效率和降低排放为目标，重点提升关键零部件的高温服役性能。开发了新型铝合金缸体材料与压铸技术、无缸套涂层材料与工艺、铝合金活塞材料与结构设计以及尾气后处理DPF材料。通过先进制备与检测技术，攻克核心部件设计与材料强化难题，实现持续创新与推广应用，取得显著成果。**该成果形成了以下主要技术创新：**

**（1）轻量化铝合金缸体材料开发与制备技术**

针对铝合金缸体压铸件在热处理中的技术难题，开发了一种免热处理的新型铝合金材料。该材料通过引入Mg2Si强化相，并添加稀土元素生成RESi2作为异质形核点，有效细化Mg2Si相，实现了高强韧免热处理铝合金技术。其抗拉强度提升至270 MPa，延伸率由3-4%提升至12-14%。针对铝合金缸体铸件易出现气孔和热裂的挑战，开发了高真空压铸工艺。该工艺通过在1秒内将型腔真空度降低至10 kPa以下，优化浇注系统，实现平稳充填与顺序凝固，设计加热与冷却系统以确保均匀温度场，促进液相补缩，显著降低铸件孔隙率至3%，大幅提高了铸件质量。

**（2）轻量化铝合金缸体无缸套涂层粉体材料开发与制备技术**

针对铝合金缸体与传统铸铁缸套不匹配的行业难题，项目开发了适用于热喷涂的耐磨金属基复合粉体材料，研制出Al2O3/ZrO2共晶陶瓷增强型铁基复合粉末，将单一铁基球形粉末改进为球-片混合复合粉末，陶瓷含量达35 wt.%，其中共晶陶瓷材料占5 wt.%。针对铝合金缸孔直径限制热喷涂工艺的技术难点，项目开发了内孔旋转等离子喷涂技术，采用短距离（＜80 mm）、低电压（50 V）、高电流（500 A）等工艺参数，结合内孔喷砂及特殊刀具表面处理，无缸套涂层的粘结强度达到40 MPa，孔隙率低于3%，硬度达30 HRC，摩擦系数由0.15降至0.08。实现了高粘结强度涂层沉积，制定了内孔等离子喷涂标准。

**（3）高性能铝合金活塞材料开发及其顶面热障涂层制备技术**

针对熔铸铝合金中去除Fe杂质的难题，项目通过添加Mn抑制粗大β铁相的生成，促进细小α铁相的形成。同时优化V元素的添加工艺，将其含量从0.25 wt.%降至0.1 wt.%，制备出高性能铝合金活塞，抗拉强度超过240 MPa，360℃高温下抗拉强度超过90 MPa。针对内冷油道活塞传热的难点，项目结合内冷结构、热障涂层与有限元仿真，优化了材料体系，采用氧化钇增韧氧化锆（YSZ）热障涂层，替代传统阳极氧化，解决了服役形变与隔热涂层的协同问题，提升活塞服役温度38～51℃。

1. **高性能铝合金活塞材料开发及其顶面热障涂层制备技术**

针对传统碳化硅DPF（颗粒捕集器）合成温度高的难题，创新开发新型造孔剂（竹炭和二氧化硅溶胶），成功将DPF的热膨胀系数降至4.3×10-6K-1以下，中值孔径分布达到12±2 µm，孔隙率达到40-44%。产品在C向强度超过0.7 MPa的情况下，实现了碳化硅DPF载体在1450℃的低温烧结，突破了国内碳化硅DPF载体1600-2200℃高温烧结的技术壁垒。

项目成果授权发明专利 30 余项、制定标准 6 项，出版著作 2 本，发表论文 50 余篇。相关技术在成都银河动力有限公司、湖南兆益热喷涂材料有限公司、昆明云内动力公司等公司。项目生产的国五、国六柴油机、铝合金活塞、尾气处理DPF等产品，极大促进了企业的发展，提高了企业的竞争力；2021年至2023年，项目累计销售总额达到108.2亿，实现新增利润10.03亿，经济和社会效益显著。

**5.代表性论文：**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 论文名称 | 刊名 | 作者 |
| 1 | Based on energy dissipation investigation of preparation and toughening mechanism of continuous transition coating | Surface & Coatings Technology | Chen Hua，Taihong Huang，Tao Ma，Guanwen Yin，Rongfeng Zhou，Chao Li，Xiaofeng Sun，Bin Wang，Ruixiong Zhai，Peng Song |
| 2 | Breakaway oxidation behavior of Fe-based cylinder coating with eutectic ceramics in water vapor at 650 ◦C | Surface & Coatings Technology | Xianbing Tan，Taihong Huang，Xiaofeng Sun, Wenlang Huang，Ke Ren，Liuqing Li，Xianchao Hu，Qiang Ji，Peng Song |
| 3 | Interface stress calculation and failure behavior of TBCs on the surface of aluminum alloy with anodic oxidation | Surface & Coatings Technology | Xianchao Hu，Xingdong Zhu，Taihong Huang，Bin Wang，Xiaofeng Sun，Xianbing Tan，Fayang Wan，Yan Huang，Ke Ren，Jin Yang |
| 4 | Effects of the metal-ceramic continuous transition region on the tensile strength and crack propagation behavior of 8YSZ/CoNiCrAlY coatin | Surface & Coatings Technology | Guanwen Yin, Chen Hua, Taihong Huang, Tao Ma, xiaofeng Sun, Yantong Man, Rongfeng Zhou, Yuhang Cheng, Biju Zheng, Peng Song |
| 5 | Effect of in-situ oxidation on the nanomechanical evolution of Fe-base coating with ceramic particles produced by internal rotating plasma spraying | Ceramics International | Taihong Huang，Peng Song，Qiang Ji，Ruixiong Zhai，Yong Huang，Biju Zheng，Jianhong Yi |
| 6 | Phase transition and interface evolution of Al2O3/ZrO2 particles in plasmasprayed coatings | Ceramics International | Taihong Huang，Peng Song，Chao Li，Yongchun Shu，Benshuang Sun，Qiang Ji，Muhammad Arif，Jianhong Yi |
| 7 | Effect of the interface morphology and initial nanocrack on the fracture property of a ceramic reinforced plasma-sprayed coating | Ceramics International | Taihong Huang，Chunming Deng，Peng Song，Jianguo Lü，Chao Li，Yongchun Shu，Benshuang Sun，Syed Awais，Qiang Ji，Jianhong Yi |
| 8 | Oxidation mechanism of molten Al–5Mg–2Si–Mn alloy | J Mater Sci | Bo Hu, Dejiang Li, Tao Ying, Ning Yu, and Xiaoqin Zeng |
| 9 | Solid solution strengthening mechanism in high pressure die casting Al–Ce–Mg alloys | Materials Science & Engineering A | Bo Hu, Beibei Quan, Dejiang Li, Xueyang Wang, Zixin Li, Xiaoqin Zeng |
| 10 | 基于热喷涂界面微纳结构设计的涂层力学性能研究进展 | 表面技术 | 李乔磊，宋鹏，黄太红，邓春明，孙晓峰 |

**6.代表性专利：**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 专利名称 | 专利号 | 发明人 | 法律状况 |
| 1 | 一种可磨耗陶瓷复合封严涂层及其制备方法 | ZL 2021 1 1133168.6 | 黄太红;邢权;宋鹏;何玄;雷基林;邓伟;易健宏 | 授权 |
| 2 | 一种超厚渗铝涂层制备工艺 | ZL 2021 1 0824155.7 | 黄太红;谭贤兵;宋鹏;雷基林;李青 | 授权 |
| 3 | 一种释放采用热喷涂制备涂层的内应力的方法 | ZL201610257986.X | 宋鹏 李乔磊 罗恒 彭俊铭 | 授权 |
| 4 | 一种采用热喷涂法制备多层涂层的方法 | ZL201610446917.3 | 宋鹏 罗恒 陆建生 刘光亮 | 授权 |
| 5 | 一种高韧性高导热压铸铝合金及其制备方法 | ZL202010129226.7 | 李德江;权北北;曾小勤;应韬 | 授权 |
| 6 | 一种热喷涂多孔陶瓷涂层的制备方法 | ZL201811004640.4 | 宋鹏 李乔磊 黄太红 陆建生 | 授权 |
| 7 | 一种高温耐磨氧化铝陶瓷基复合涂层的制备方法 | ZL201811003786.7 | 宋鹏 李乔磊 黄太红 陆建生 | 授权 |
| 8 | 一种原位纳米金属\_陶瓷复合涂层及其制备方法 | ZL201910398271.X | 宋鹏 李乔磊 黄太红 陆建生 | 授权 |
| 9 | 一种热喷涂高温摩阻制动涂层材料及其制备方法 | ZL202010954839.4 | 宋鹏 李青 黄太红 易健宏，李才巨 | 授权 |
| 10 | 一种原位反应生成的梯度耐磨涂层及其制备方法 | ZL202010963327.4 | 宋鹏 李德民 郑必举 陈榕 吕建国 | 授权 |

7.主要完成人（完成人单位）：

易健宏（昆明理工大学）、宋鹏（昆明理工大学）、黄太红（昆明理工大学）、李德江（上海交通大学）、季强（成都正恒动力股份有限公司）、彭益源（云南菲尔特环保科技股份有限公司）、莫瑞（昆明云内动力股份有限公司）、宋健（昆明理工大学）、孔德昊（昆明理工大学）、李青（昆明理工大学）、胡波（上海交通大学）、文均（成都银河动力有限公司）、陈思静（航天林泉电机有限公司）、潘红建（无锡恒和环保科技有限公司）、郭吉平（湖南兆益热喷涂材料有限公司）