

## 2019 年度广东省科学技术奖公示表

<b>项目名称</b>	地面重型燃气轮机关键高温构件状态评估与工程化技术应用研究
<b>主要完成单位</b>	广东电网有限责任公司
	上海大学
	中国科学院金属研究所
	广东惠州天然气发电有限公司
	广州珠江天然气发电有限公司
<b>主要完成人 (职称、完成单位、工作单位)</b>	1. 梁永纯（高级工程师、工作单位：广东电网有限责任公司、完成单位：广东电网有限责任公司、主要贡献：项目负责人，项目总体协调和具体测试、分析、实施，组织开展地面燃机透平叶片用先进高温合金 DZ445 与热障涂层的制备技术研究；系列开展高温合金室温及高温结构与性能关系研究；开展高温合金蠕变—疲劳与氧化行为研究；对创新点 1 至 4 均有重要贡献。支持贡献材料：专利 1、2、7、8 等）
	2. 黄丰（高级工程师、工作单位：广东电网有限责任公司、完成单位：广东电网有限责任公司、主要贡献：参与高温合金微观组织与力学性能性分析，系统开展热障涂层氧化及失效机理研究，创立符合国内燃机工况条件的高准确度热障涂层寿命预测模型；组织开展火力发电厂燃气轮机关键高温构件三维建模型、使用寿命研究等工作，为热端部件寿命损耗计算模型、使用寿命监测系统的创立均做出了重要贡献。对创新点 1、3、4 均有重要贡献。支持贡献材料：专利 1、2、6、7、8、9 等）
	3. 任维丽（研究员、工作单位：上海大学、完成单位：上海大学、主要贡献：负责透平叶片高温合金材料组织结构与使用寿命研究，系统开展 DZ445 从室温至高温的力学性能测试，参与高精度表征高温合金中强化相晶格错配度的原理和方法研发，解决了材料学中强化相与基体晶格常数过于接近无法准确表征晶格错配度的难题。对创新点 2、3 有重要贡献。支持贡献材料：论文 1、8 等）
	4. 秦学智（副研究员、工作单位：中国科学院金属研究所、完成单位：中国科学院金属研究所、主要贡献：参与定向凝固 DZ445 高温合金研发制备技术研究，系列开展定向凝固高温合金合金室温和高温的瞬时拉伸性能、持久性能、疲劳性能测试实验与分析。参与项目成果的总结分析过程。支持贡献材料：论文 2-7 等）
	5. 彭志平（高级工程师、工作单位：广东惠州天然气发电有限公司、完成单位：广东惠州天然气发电有限公司，参与方案讨论制定，协助开展热障涂层失效机理分析，协调成果具体实施应用，参与项目的技术总结过程。支持贡献材料见中国电机工程学会电力科技成果登记证书（2018-0010）。）
	6. 钟万里（教授级高级工程师、工作单位：广东电网有限责任公司、完成单位：广东电网有限责任公司、主要贡献：项目策划、实施进度管理和协调，系统开展 DZ445 微观结构、蠕变疲劳性能等研究。支持贡献材料：专利 1、2、7 等）
	7. 王伟（高级工程师、工作单位：广东电网有限责任公司、完成单位：广东电网有限责任公司、组织开展叶片用热障涂层研发制备，开展燃机叶片高温合金长期时效热稳定性分析。支持贡献材料：专利 6）
	8. 董重里（高级工程师、工作单位：广东电网有限责任公司、完成单位：广东电网有限责任公司、参与方案讨论制定，协助开展热障涂层失效机理分析，协调成果具体实施应用，参与项目的技术总结过程。支持贡献材料见专利 7。）
	9. 林志文（工程师、工作单位：广州珠江天然气发电有限公司、完成单位：广州珠江天然气发电有限公司、负责项目成果在广州珠江天然气发电有限公司的运用实施

	<p>与技术分析,参与项目的技术总结过程。支持贡献材料见中国电机工程学会电力科技成果登记证书(2018-0010)。</p> <p>10. 杨卫国(工程师、工作单位:广东惠州天然气发电有限公司、完成单位:广东惠州天然气发电有限公司,负责研发成果具体实施应用,参与燃机透平叶片及热障涂层运行工况研究与相关标准规范制定,参与项目成果技术的总结提炼。支持贡献材料见专利5。)</p> <p>11. 甄家麟(助理工程师、工作单位:广州珠江天然气发电有限公司、完成单位:广州珠江天然气发电有限公司、提供电厂运行工况关键参数,负责项目成果在广州珠江天然气发电有限公司中的实施应用,参与项目成果的总结提炼。支持贡献材料见中国电机工程学会电力科技成果登记证书(2018-0010)。</p> <p>12. 张军(高级工程师、工作单位:广东惠州天然气发电有限公司、完成单位:广东惠州天然气发电有限公司,协助项目成果在电厂的运用实施与技术分析,参与项目的技术总结过程。支持贡献材料见专利5。)</p>
<p>项目简介</p>	<p>地面重型燃气轮机由于具有排污低、效率高、起停快且兼具军事应用背景等特点受到我国的高度重视。目前9F级地面重型燃机的生产依然被GE、三菱、西门子等垄断,同时面重型燃机关键高温构件的状态评估、检修等技术被国外严格保密,国内电厂每年支付巨额的热通道构件检修费用给国外燃机制造商。另一方面,9F级重型燃机在我国频繁参与调峰运行方式完全不同于国外的基本发电,国外燃机生产商数据积累极为有限,对我国9F级燃机关键高温构件状态评估研究也尚未起步。</p> <p>有鉴于此本项目以9F级地面重型燃气轮机关键高温构件状态评估与工程化技术应用为研究方向,立足国内燃机运行工况,以透平叶片先进高温合金与热障涂层为研究对象,率先系统开展先进高温合金制备技术、合金蠕变-疲劳-氧化交互作用与寿命研究、热障涂层体系状态评估技术等系列研究,具体研究包括:1.9F级地面重型燃机透平叶片用先进定向凝固高温合金DZ445制备技术及其结构与力学性能关系研究;2.工况条件下DZ445蠕变-疲劳交互作用、氧化机理与组织稳定性研究;4.高温合金高准确度晶格错配度方法研究;5.热障涂层制备技术与失效机理研究;6.热障涂层寿命预测模型与关键高温构件使用寿命监测体系研究。创新点:1.首次系统研究定向凝固高温合金DZ445的蠕变疲劳交互作用,发现其反常蠕变疲劳寿命现象并通过稳态变形过程应变-应力迟滞回线面积阐明,率先使用传统参数关系法对合金蠕变疲劳寿命进行准确预测;2.率先研究了9F级地面重型燃机透平叶片在不同温度时的蠕变疲劳氧化行为并阐明了氧化机理;提出了一种新的表征高温合金强化相晶格错配度的方法,解决了因晶格常数过于接近无法准确表征晶格错配度的难题;3.首次结合国内燃机工况开展热障涂层细分结构与构差异化研究,准确模拟了热障涂层在带温度梯度的热机械疲劳损伤过程,建立起高准确度的热障涂层寿命预测模型;4.建立了透平叶片三维模型并开展其使用寿命研究,提出了热端部件寿命损耗计算方法,研发了异常工况下定量特征计算方法,创建了热端部件使用寿命监测系统,为燃机电厂热端部件安全使用、监督和检修工作提供科学依据。</p> <p>项目授权发明及实用新型专利十余项,发表SCI及EI论文二十余篇。2018年3月本项目通过中国工程院、沈阳黎明航空发动机等单位专家鉴定,以刘人怀院士为主任委员的鉴定委员会认为:本项目取得了多项技术突破,提出的晶格错配度表征方法达到了国际领先的水平,研究成果整体达到了国际先进水平,研究成果推广应用价值重大。</p>
<p>代表性论文 专著目录</p>	<p>论文1: The effect of magnetic field on precipitation phases of single-crystal nickel-base superalloy during directional solidification</p> <p>论文2: Long-term thermal exposure responses of the microstructure and properties of a cast Ni-base superalloy</p> <p>论文3: Primary MC decomposition and its effects on the rupture behaviors in hot-corrosion resistant Ni-based superalloy K444</p>

	<p>论文 4: Microstructure evolution and mechanical properties of GH984G alloy with different TiAl ratios during long-term thermal exposure</p> <p>论文 5: 铸造镍基高温合金中初生 MC 碳化物的退化过程和机理</p> <p>论文 6: Microstructural characterization of the M23C6 carbide in a long-term aged Ni-based superalloy</p> <p>论文 7: Microstructural characterization of the Ni<sub>3</sub> Ti Al phase in a long term aged Ni based superalloy</p> <p>论文 8: Non-monotonic changes in critical solidification rates for stability of liquid-solid interfaces with static magnetic fields</p> <p>论文 9: Effect of strain ranges and phase angles on the thermomechanical fatigue properties of thermal barrier coating system</p> <p>论文 10: 异常工况下燃气轮机热端部件寿命损耗计算方法</p>
知识产权名称	<p>专利 1: &lt;一种表征镍基高温合金中 <math>\gamma/\gamma'</math> 相晶格错配度的方法&gt; (ZL 201410613035.2)</p> <p>专利 2: &lt;降低定向凝固铸件中通道偏析缺陷的方法和装置&gt; (ZL 201510088886.4)</p> <p>专利 3: &lt;一种实验测定材料固/液界面能的方法及其装置&gt; (ZL 201110083957.3)</p> <p>专利 4: &lt;基于交变磁场调制定向凝固液固界面的方法和装置&gt; (ZL 201010289587.4)</p> <p>专利 5: &lt;一种应用于燃机的密封保持环&gt; (ZL 201610654426.8)</p> <p>实用新型专利 6: &lt;一种提高喷涂粉末流动性的装置&gt; (ZL 201520588281.7)</p> <p>实用新型专利 7: &lt;一种热喷涂粉末收集回收装置&gt; (ZL 201520585546.8)</p> <p>实用新型专利 8: &lt;一种控制高温合金定向凝固组织的装置&gt; (ZL 201520009364.6)</p> <p>实用新型专利 9: &lt;一种燃气轮机叶片热障涂层喷涂装置&gt; (ZL 2014 2 0769194.7)</p> <p>实用新型专利 10: &lt;用于高温合金定向凝固的旋转下拉装置&gt; (ZL 201120414986.9)</p>
推广应用情况	<p>项目成果处于成熟应用阶段, 2015-2017 年间已在广东惠州天然气发电有限公司、广州珠江天然气发电有限公司等广东地区燃机电厂的推广应用期间, 大幅度减少了电厂热端部件检修维护费用。</p> <p>以广东惠州天然气发电有限公司为例: 广东惠州天然气发电有限公司一期 3 台机组均为 390MW 联合循环发电机组, 分别于 2006 年 9 月 21 日、2007 年 5 月 21 日、及 2007 年 6 月 16 日正式投入商业生产。2015 年惠州天然气发电有限公司 1 号机组于检修期间, 三菱公司检查发现部分透平一级静叶烧损严重, 遂对其进行扩大性检查, 按照检测标准发现总计 26 枚叶片出现了冷却空气盖板裂纹不合格、高温氧化严重等缺陷, 其主要体现在叶根冷却空气通道焊缝裂纹超过了标准值 5mm 及叶片平台热障涂层脱落深度超过了 4.0mm。项目组通过运用项目成果对该批次的透平 1 级静叶寿命判定展开了性能评估, 提出可继续使用的结论, 经过与三菱多次交流讨论, 三菱采纳了项目组的意见。同时, 依据此研究成果, 将二级静叶受损数量 46 片、三级静叶受损数量 4 片、四级静叶受损数量 8 片均改为取消维修, 一级分割环受损数量由 32 片改为 2 片。燃机一级静叶单片维修费用约为 6.8 万, 二级静叶单片维修费为 5.6 万, 三级静叶单片维修费为 7.5 万, 四级静叶单片维修费为 7.8 万, 一级分割环单片维修价格为 1.8 万元, 因此, 挽回了维修费用 580.8 万元。同时, 发现总计 54 枚一级动叶出现了涂层剥离和减肉现象, 项目组结合燃机具体的运行工况, 系统分析了燃气轮机高温部件热障涂层设计机理, 明确了由于冷却空气不足而引起的热障涂层烧损原因, 并对燃气轮机热通道部件寿命判断开展了性能评估工作, 同时对透平一级动叶提出了进一步的检查和维修建议, 及时避免了问题的进一步恶化导致叶</p>

片报废的风险，其中燃机透平一级动叶新品采购价格约为 11 万，54 枚叶片总计挽回直接经济损失 594 万元。2015 年惠州天然气发电有限公司 2 号机组燃机检修中，依据本研究成果，最终将透平一级静叶受损数量由三菱判定的 27 片减为 3 片，二级静叶受损数量 48 片、三级静叶受损数量 2 片、四级静叶受损数量 12 片均改为取消维修，一级分割环受损数量由 28 片改为 1 片，挽回了热部件维修损失费用约 589.2 万元。同时避免了 46 片透平一级动叶报废风险，挽回经济损失 506 万元。2016 年惠州天然气发电有限公司 3 号机组检修期间，依据本研究成果，将透平一级静叶受损数量由三菱判定的 22 片减为 2 片，二级静叶受损数量 8 片、一级分割环受损数量 30 片均改为取消维修，挽回了热部件维修损失费用约 234.8 万元。同时避免 48 片透平一级动叶及 64 片二级动叶报废风险，挽回经济损失 928 万元，综上所述项目成果在惠州天然气发电有限公司累计节支 3432.8 万元。

以 2012 年 7 月数据为例广东仅三菱 701F3/F4 机组就达到了 33 台。仅以单台 390MW 机组非停 5 天计算，负荷系数按 0.9 计算，利税按每千瓦时 0.1 元计算，仅利税直接损失就达  $390 \text{ MW} \times 120 \text{ h} \times 0.9 \times 0.1 \text{ (元/kWh)} = 421 \text{ (万元)}$ ，每年非停次数 10 次，就能避免利税损失达  $420 \times 10 = 4200 \text{ 万}$ ，考虑到大部分燃机电厂机组大小修 70%以上检修费用用于高温热通道部件购置更换的现状，本项目在广东全面推广每年能避免数以亿计的经济损失。

项目成果还可应用于机械行业燃机关键材料的制造，对于推动燃机关键高温部件的国产化，打破国外垄断与保障电力生产安全都具有重要的意义和广泛的影响。