**一、推荐类别：自然奖**

**二、项目名称：力-热能量密度等效原理及其拓展应用**

**三、推荐单位：重庆大学**

**四、项目简介**

超常服役条件下材料力学行为与强度理论是各领域关注的核心问题。目前，材料高温力学性能测试极其困难、非唯象的理论表征模型缺乏，制约了超高温材料的研制和应用，急需在高温强度理论及温度相关性强度表征方法等方面取得突破。本成果在国家自然科学基金重大科研仪器研制专项、重大研究计划、面上，国防973等10余项国家级项目的支持下，历时十余年研究，原创性提出了材料力学性能温度相关性建模思想——力-热能量密度等效原理，创建了高温强度理论，并在不同领域得到了推广应用与验证，具有重要的科学意义与应用价值。主要发现点如下：

一、创造性提出了材料力学性能温度相关性建模思想——力-热能量密度等效原理，创建了材料高温强度理论，建立了非唯象的温度相关性断裂强度和屈服强度系列理论表征模型，为材料高温强度理论表征开辟了新途径；该建模思想在航空航天、高端装备等领域关键材料的温度相关性物理性能表征上得到应用和验证。相关工作被2013年爱思唯尔出版的《先进陶瓷手册》作为近十年来先进陶瓷领域唯一的高温断裂强度理论表征工作收录。

二、针对超高温陶瓷基复合材料，构建了系列温度相关性断裂强度模型，解决了其高温强度表征难题；明确了将NASA间接表征高温断裂强度的方法普适化存在的风险；发现了陶瓷领域顶级期刊美陶主编W.G.对温度相关性临界缺陷尺寸定义的不足，并给出了更合理定义。加拿大女王大学Krstic教授认为该工作有助于形成统一的脆性材料断裂建模方法，对航空航天和能源领域陶瓷的强韧化做出了重要贡献。

三、建立了多样性复杂使役环境下抗热冲击性能理论与实验表征方法，自主研制了高通量试验仪器，为高超声速飞行器试飞强度考核提供了新的评价方法及手段。长江学者孟松鹤教授和美国Nina教授均指出目前相关理论模型缺乏，他们引用的4篇文献均出自本成果。澳大利亚王保林教授指出本团队在相关领域取得了重大研究成果。

项目核心成果在包括国际固体力学领域旗舰期刊JMPS，陶瓷领域顶级期刊美陶，复合材料领域顶级期刊CST，航空航天领域重要期刊AIAA J. 在内的国际期刊上发表SCI论文100余篇，8篇代表性论文SCI他引74次，得到杜善义、魏悦广、韩杰才、张传增等国内外院士及来自美、俄、德、英等国知名教授的正面引用与高度评价。在爱思唯尔旗下SciVal数据库中，关于温度相关性强度理论方面，本团队发表SCI论文数在世界范围内排名第一，推动了高温固体力学的发展。

**五、主要完成人情况表**

李卫国：第一完成人，教授，工作单位：重庆大学，完成单位：重庆大学。负责整个项目的组织和实施工作。对项目发现点1、2、3做出了创造性贡献。提出了本项目的主要学术思想，创造性提出了材料力学性能温度相关性建模思想——力-热能量密度等效原理，创建了温度相关性强度理论建模方法，构建了系列温度相关性断裂强度模型，自主研制了高通量试验仪器。

方岱宁：第二完成人，教授，工作单位：北京理工大学，完成单位：北京大学。在项目中负责协助研究总体方案与技术路线的制定与实施，主要负责超高温陶瓷及其复合材料温度相关性断裂强度和金属材料屈服强度理论与实验表征工作，与第一完成人李卫国教授合作建立了一系列温度相关性材料断裂强度、屈服强度理论表征模型。曾获2007年高等学校技术发明奖一等奖、2008年高等学校自然科学奖一等奖、2010年国家自然科学奖二等奖、2011年高等学校自然科学一等奖、2011年“徐芝纶力学奖”一等奖、2016年何梁何利基金科学与技术进步奖。

成天宝：第三完成人，副研究员，工作单位：重庆大学，完成单位：重庆大学。在项目中主要负责陶瓷材料温度相关性理论表征和陶瓷材料抗热冲击性能实验方案与技术路线的制定与实施。对本项目主要创造性贡献包括：建立了陶瓷材料温度相关性理想拉伸强度理论表征模型，提出了陶瓷材料单轴拉伸强度实验测试方法，建立了多样性复杂使役环境下材料抗热冲击性能理论表征模型与方法。

王如转：第四完成人，副教授，工作单位：重庆科技学院，完成单位：重庆大学。在项目中主要负责陶瓷材料强韧化理论表征与实验方案设计与实施。对本项目主要创造性贡献包括：基于理论分析与实验研究，建立了可计及温度、残余热应力、晶粒尺寸及缺陷尺寸等共同影响的超高温陶瓷基复合材料温度相关性断裂强度模型，提出了一种合理的预测材料断裂强度、温度、材料微结构及其演化之间的定量关系的理论方法。

麻建坐：第五完成人，副教授，工作单位：重庆大学，完成单位：重庆大学。在项目中主要负责材料温度相关力学性能实验方案与技术路线的制定与实施性和温度相关性性能理论表征。对本项目主要创造性贡献包括：建立了材料温度相关性断裂强度和屈服强度测试方法，向国家专利局申请并获权了脆性材料温度相关性断裂强度和塑性材料温度相关性屈服强度的测试方法相关发明专利。

**六、代表性论文专著目录**

1. **Weiguo Li**, Fan Yang, **Daining Fang**\*, The temperature-dependent strength model for ultra-high temperature ceramics, Acta Mechanica Sinica, 26(2), 235-239, 2010.
2. **Weiguo Li**\*, Dengjian Li, Chuanzeng Zhang, **Daining Fang**, Modelling the effect of temperature and damage on the fracture strength of ultra-high temperature ceramics, International Journal of Fracture, 176(2), 181-188, 2012.
3. **Tianbao Cheng**, **Weiguo Li**\*, **Daining Fang**, Thermal shock resistance of ultra-high-temperature ceramics under aerodynamic thermal environments, AIAA Journal, 51(4), 840-848, 2013.
4. **Tianbao Cheng**, **Weiguo Li**\*, Wei Lu, Yushan Shi, **Daining Fang**, Thermal shock resistance of ultra-high-temperature ceramic thermal protection system, Journal of Spacecraft and Rockets, 51(3), 986-990, 2014.
5. **Tianbao Cheng**, **Weiguo Li**\*, The temperature-dependent ideal tensile strength of ZrB2, HfB2, and TiB2, Journal of the American Ceramic Society, 98(1), 190-196, 2015.
6. **Ruzhuan Wang**, **Weiguo Li**\*, Dingyu Li, **Daining Fang**, A new temperature dependent fracture strength model for the ZrB2-SiC composites, Journal of the European Ceramic Society, 35(10), 2957-2962, 2015.
7. **Weiguo Li**\*, Xianhe Zhang, Haibo Kou, **Ruzhuan Wang**, **Daining Fang**, Theoretical prediction of temperature dependent yield strength for metallic materials, International Journal of Mechanical Sciences, 105, 273-278, 2016.
8. Yong Deng, **Weiguo Li**\*, **Ruzhuan Wang**, Jiaxing Shao, Peiji Geng, **Jianzuo Ma**, The temperature-dependent fracture models for fiber-reinforced ceramic matrix composites, Composite Structures,140, 534-539, 2016.