

第三届全国热应力大会会议综述

卢梦凯, 张爱兵, 王 骥, 杜建科*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 来自国内 50 多所高校近 200 名专家学者和研究生代表出席了本次会议。会议主要围绕以下主题进行研讨: 热弹性理论及广义热弹性理论、考虑热效应的多场耦合力学、高低温环境结构下的行为及其控制、微纳尺度下的热应力分析、高温下的材料力学性能、热电材料力学、热振动与热冲击及其分析方法、热接触/热断裂/热疲劳等。本次大会充分展示了热应力方面的最新研究成果, 对于倡导引领高水平的热应力研究, 促进学术交流和科研合作, 推动热应力基础研究成果和重大工程应用的紧密结合起到了积极的作用。

关键词: 热弹性理论; 多场耦合; 热电材料; 热振动; 热断裂; 国内会议

中图分类号: O31

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 04-0035-06

材料或结构在温度变化时会发生膨胀或者收缩, 当受到一定的约束时, 其内部将产生应力, 即所谓热应力。热应力研究^[1]不仅在机械、电机、土木、化工等传统工业的结构和系统设计中发挥着巨大的作用, 在航空、航天、核工程、微机电系统、生物学等新型工程设计中也是必不可少的研究内容, 与结构或器件的正常使用和疲劳寿命直接相关。特别是高速、微型化等重大应用对热应力分析提出了更高的要求, 需要建立更精确的模型, 提出更合适的理论, 发展更有效的模拟手段, 开发更好的实验技术。

第三届全国热应力大会于 2019 年 12 月 6~8 日在宁波召开。会议由中国力学学会主办, 宁波大学力学与工程科学系、中国力学学会电子电磁器件力学工作组、浙江省力学学会固体力学专业委员会、浙江省振动工程学会联合承办, 会议主席由宁波大学机械工程与力学学院王骥教授和杜建科教授共同担任。本届会议吸引了来自全国 50 多所高校近 200 名专家学者和研究生代表参会。

开幕式由宁波大学杜建科教授主持, 中国力学学会副理事长浙江大学曲绍兴教授致开幕辞, 宁波大学副校长邵千钧教授介绍了宁波大学及其

力学学科的发展近况, 中国力学学会电子电磁器件力学工作组组长南京航空航天大学高存法教授回顾了办会初衷及其发展历程, 宁波大学王骥教授介绍了本次大会的组织情况并致欢迎辞。此次会议主要围绕以下专题: 热弹性理论及广义热弹性理论、考虑热效应的多场耦合力学、高低温环境结构下的行为及其控制、微纳尺度下的热应力分析、高温下的材料力学性能、热电材料力学、热振动与热冲击及其分析方法、热接触/热断裂/热疲劳。下面围绕这些专题将会议的一些主要研究进展作一综述。

1 会议概述

1.1 热弹性理论及广义热弹性理论

基于傅里叶定律的经典热弹性理论对于热作用时间较长的稳态传热以及热传播速度较快的非稳态传播过程可以得到足够精确的解答, 但由于傅里叶定律不涉及时间项, 相当于假设了无限大的热传播速度。自 Peshkov 首次观察到热波存在并以有限速度传播的现象以来, 非傅里叶热传导模型得到了快速的发展^[2], 如 C-V 模型、单相滞后双曲型热传导模型、双相滞后模型、三相滞后模型等。

收稿日期: 2020-03-30.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

第一作者: 卢梦凯 (1987—), 男, 浙江慈溪人, 博士, 主要研究方向: 计算力学. E-mail: lumengkai@nbu.edu.cn

*通信作者: 杜建科 (1970—), 男, 陕西扶风人, 教授, 主要研究方向: 固体波动力学与器件力学. E-mail: dujianke@nbu.edu.cn

为进一步描述温度场与变形场等场间耦合效应,学者们在非傅里叶热传导的基础上发展提出了广义热弹性理论^[3]. 对于空间宏观及时间微观的热弹性问题,目前有 L-S 型、G-L 型和 G-N 型这 3 种广义热弹性理论. 而对于时空皆微观的热弹性问题,则可以采用 Boltzmann 输运方程或者分子动力学方法来进行描述.

王晋宝等采用双相滞后的非傅里叶热传导模型研究了皮肤生物组织在 2 种不同激光热源作用下的传热机理,将皮肤分为表皮、真皮、脂肪、肌肉 4 个部分建模,并分别就其中的导热系数、血液灌注率、密度、比热容以及代谢热的变化进行了相关机理的分析和讨论. 李妍和田晓耕基于 L-S 型广义热弹扩散理论,考虑材料的记忆依赖效应和空间非局部效应,研究边界受非高斯激光脉冲加热和化学势冲击作用的半无限大薄板的热弹扩散响应. 由于超短激光脉冲具有功率密度高、作用区域小、持续时间短、加工精度高等优势,近年来被广泛应用于超精细加工、光学储存和微电子器件制造等领域. 李吉伟和何天虎将应变率项引入到 G-L 广义热弹性理论中,建立了考虑应变率的广义压电热弹问题的基本控制方程,并将此理论运用于研究一维压电热弹耦合问题在移动热源作用下的动态响应,得到了压电杆中的温度、位移、应力及电势等物理量的分布规律. 彭玮和何天虎将分数阶微积分与广义热弹性扩散理论相结合,利用分数阶微积分具有的记忆依赖和遗传特性,研究了球形空腔内表面同时受热冲击和化学势冲击下的动态响应问题,该方法为广义热弹性理论处理反常扩散和瞬态热弹扩散耦合问题,提供了解决思路. 张博和禹建功等针对二维波导结构中广义热弹导波问题,提出一种基于改进双正交多项式级数的解析方法,建立了基于 G-L 广义热弹性理论下耦合的波动方程和热传导方程,得到二维矩形截面杆中的热弹导波的三维频散曲线,该方法为实际结构的超声导波无损检测提供了一定理论基础.

1.2 考虑热效应的多场耦合力学

实际工程结构中,我们要解决的许多热效应问题通常都与多种物理场相互影响,如电热效应、磁热效应、压电效应等. 近些年,随着新型功能材料与先进结构的快速发展,考虑热效应的多场耦

合力学问题已经成为研究者所关注的热点领域^[4-5].

金峰等建立了计及非局部理论和表面效应的三维力-热-电-磁多场耦合模型,应用级数展开,将多物理场耦合问题转化为二维问题求解,所建立的模型适用于热环境下的纯弹性材料、压电材料、压磁材料或磁电弹材料. 张俊乾等^[6]研究植入 Z-pin 碳纤维增强复合材料的热-力-化学耦合问题,通过所建立的 Z-pin 复合材料单层板单胞细观模型,考虑固化过程中树脂体积收缩、弹性模量随温度变化和纤维因 Z-pin 进入偏转因素,运用有限元法计算了单胞结构在固化成型工艺过程中树脂和纤维应力发展和分布,并研究了 Z-pin 直径和分布密度对单层板面内残余应力的影响. 余银犬研究了高速高精微特永磁电机电磁-热-力耦合作用下的力学分析,考虑线圈能量转换损耗,转定子涡流损耗,机械和风阻损耗引起发热,对整个过程进行电磁-热-力的耦合分析,通过电机的优化设计提升电机效率和性能. 侯旭和王杰通过对铁电纳米制冷元件进行优化设计,对具有二维阿基米得晶格结构的铁电纳米材料的电热效应进行调控,以提高铁电纳米材料的电热效应. 谢鹏飞和何天虎建立记忆依赖广义热弹性理论,研究具有温度相关性的旋转无限长空心圆柱体导体在热冲击下的瞬态响应,采用拉普拉斯变换及其反变换得到柱体中无量纲温度、位移、径向和环向应力、感应磁场、感应电场的分布规律. 刘运牙等基于扫描热探针发展了高精度局域电热效应测量新方法和热力化耦合模型,并进一步研究了多层电容的电热效应,发现焦耳热对电热效应测量具有很大的影响. 苟晓凡等基于 H 方程和热传导方程,考虑随温度和磁场变化的材料参数,建立了研究超导 Bi2212 热失超过程的二维磁-热-力耦合有限元模型,并针对 Bi2212 纤维的内部复杂结构,研究了复杂微观对热失超过程中力-热行为的影响. 易敏提出设计磁热效应的集成相场模型和 Arrott-Noakes 方程的理论计算模型,解决了单纯相场模型不能处理磁热效应的温度范围跨越居里温度时的局限性,该研究有助于发展基于磁热效应的制冷技术. 胡克强等利用 Hankel 积分变换法求解了磁-电-弹性材料中的热传导及控制方程,获得了位移、电势及磁势的一般形式的封闭解. 张亮亮等利用类 Stroh 公式

和传递矩阵方法对一维准晶功能梯度层合圆柱壳进行了热电弹性耦合分析,讨论了层合圆柱壳内外表面承受温度载荷时,功能梯度指数因子对声子场、相位子场和温度场的影响。徐凡等对于柱面液晶高聚物核壳结构,通过将热致应变引入经典DMV薄壳方程中,推导了热致液晶高聚物薄壳微分方程,并采用数值渐近法和谱配点法求解方程,从而实现定量预测,并追踪其后屈曲形貌演化。

1.3 高低温环境结构下的行为及其控制

新型功能材料由于其具有优良的功能转换能力被广泛应用于各类工程结构中,如具有热力转换功能的温敏性水凝胶、机电转换功能的压电材料等。上述功能材料材料性质往往会随温度变化而改变。当我们改变工作环境温度时,由于材料性态的改变,从而导致结构力学行为的改变,并且通过合理的力学设计,可以实现对其力学行为的调控。

张一慧对非常规热膨胀行为下的软质网状力学超材料进行设计和力学分析。利用2种材料间不同热膨胀系数引起的热应变失配设计实现了网状超材料的大范围热膨胀系数调控以及非常规热致各向异性变形,例如单向热膨胀/收缩、热致弯曲/剪切等。基于软质网状结构的力学超材料研究,不仅为仿生组织的柔性基底设计奠定了基础,同时在柔性电子、可展开天线和软体机器人的构型主动控制等方面提供了良好的应用前景^[7]。李铁风针对基于热响应的软体机器人开展力学机理研究和设计,考虑由热敏性水凝胶所制成的多层结构在温度变化时导致力学失稳,进而产生的快速响应以达到控制软体机器人的目的,并建立了相应的有限元仿真模型以研究变形并指导水凝胶的结构设计。谢明宇和李法新提出了基于压电圆环换能器的高低温环境下材料弹性模量与内耗测量方法,首先基于厚度极化的压电圆环制备出纵向振动(d_{33})与扭转振动(d_{15})2种模式的换能器,接着将其与熔融石英隔热棒以及被测圆柱试件粘接,当施加交变电场后,压电圆环换能器带动整个系统产生纵向振动或扭转振动。最后,利用阻抗分析仪快速测得系统的导纳曲线,再根据实测导纳曲线的谐振与反谐振频率即可精确获得被测试件的弹性模量与内耗。

1.4 微纳尺度下的热应力分析

微纳米技术的迅速发展也使得微纳米器件成为现实,可以在微观尺度下设计结构,这对器件来说是一个技术革命,同时也给器件的设计提出了挑战。但由于微纳尺度下材料的力学性能具有尺寸依赖效应,也就是说与宏观尺寸下的性能存在巨大差异。这导致连续介质力学理论无法准确描述微纳尺度下材料的力学性能,因此我们需要引入微观模型或者介观模型对其进行分析^[8]。研究手段方面,微纳尺度下的传统实验存在诸多困难,而理论模拟则能较好解决,以分子动力学、介观方法、多尺度方法等为主要代表的数值方法给微纳尺度下的热应力问题研究提供了途径。

杨在林等用分子动力学方法在原子级别讨论了不同纳米金属构件的热力学响应问题,包括变温度下纳米单晶构件的多轴拉伸、扭转和孔洞膨胀问题、纳米孪晶构件的多轴拉伸与疲劳问题、纳米级别金属玻璃的拉伸性能研究等。结果表明,温度升高会导致纳米金属构件中的原子动能升高,热振动加剧,加快位错形核,降低构件的屈服强度。过高的温度还会导致原子晶格混乱,构件承载能力大大降低。这些都为纳米构件的热力学研究和应用提供了理论基础。熊启林等利用分子动力学研究了飞秒激光冲击压缩下单晶铜的纳米晶化过程。结果表明,与直接机械冲击压缩方法相比,激光冲击压缩模型预测的原子结构系统具有更真实的物理特性,如原子速度分布等。根据激光冲击压缩下单晶铜的纳米晶化历程,分析了位错的形核机制、不同类型位错密度的演化过程和位错网/位错胞/亚晶界的形成。张龙对微纳尺度下多层膜结构的尺度效应、分层失效机理以及含缺陷结构的可靠性进行理论与数值研究,建立同时考虑微尺度非傅里叶热传导和尺寸效应的层间应力分析模型,分析各层中的正应力、剪应力和剥离应力。对于含缺陷结构,采用相互积分方法计算裂尖T应力,以及采用热权函数法计算热应力强度因子和能量释放率,并对层间裂纹扩展进行动态模拟。采用基于断裂力学理论的疲劳寿命评估方法对含界面裂纹的多层膜结构疲劳寿命进行分析。

1.5 高温下的材料力学性能

随着我国航空航天、自动化设备、微电子等高

新技术领域快速发展,拓展材料服役温域的需求愈发强烈。材料的强度问题一直都是固体力学界的一个核心课题,特别是在高温环境下,受晶界、孔洞、杂质等影响,强度的温度相关性和材料的失效机理十分复杂^[9]。

李卫国基于力热能量密度等效原理,建立了无拟合参数的纯聚合物材料温度相关性拉伸断裂强度模型,研究了单向长纤维、随机短纤维、颗粒增强聚合物复合材料的强化机理及其随温度演化的影响,构建了可计及温度、界面结合性能、残余热应力、增强相尺寸、增强相含量、基体强度随温度演化影响的系列理论表征模型。上述模型的建立为聚合物及其复合材料温度相关性力学性能的评估与优化提供了有益建议。李振环采用多尺度模拟方法研究了镍基单晶高温合金力学行为,所提出模型分别采用分子动力学、离散位错动力学和代表性胞元模型来描述原子尺度、介观尺度和宏观尺度,建立了以位错密度为主要内变量的晶体塑性本构模型。通过对镍基单晶高温合金在不同方向、温度下的塑性、蠕变和循环变形的模拟并与现有实验结果对比,初步表明该晶体塑性本构模型具有“统一”描述镍基单晶高温合金塑性、蠕变及循环变形的能力。成天宝等基于能量观点成功预测了固体材料从绝对零度到熔点的理想拉伸强度、理想剪切强度、表面能、晶界能、堆垛层错能、脆性参数等,解决了这些参量在高温条件下难预测的问题。寇海波等针对固溶强化二元和多元合金建立了温度相关性屈服强度理论计算模型,考虑了不同温度下基体、固溶强化和晶界强化对屈服强度的贡献,发现固溶强化合金的屈服强度对材料的尺寸错配十分敏感,揭示了镍基合金中各项机制对屈服强度的贡献随温度变化的衍化规律。王树彬等采用温度相关性的弹塑性本构关系,基于有限元方法研究了 Al5052 蜂窝温度相关性的面外压缩力学性能,建立了金属蜂窝温度相关性平台应力和比吸能模型。贺屹等和邵家兴等建立了不锈钢温度相关性屈服强度理论模型,给出了不锈钢屈服强度与温度的定量关系,考虑了屈服前的非线性行为与相变的影响。

1.6 热电材料力学

热电材料又称温差电材料,是利用热电效应

直接实现电能和热能相互转化的一种新能源材料。由于热电材料是以载流子输运的方式转换能量,以热电材料为核心技术制造的器件具有结构简单、可靠性高、寿命长、不排放污染物质等特点,具有广阔的应用前景和商业价值^[10]。

崔有江等研究了考虑温度相关性的热电材料热振动问题,通过摄动法求解了强非线性温度场微分控制方程,给出了热电材料振动时的轴向力和冷端位移数值解。发现轴向力和位移的最大值随阻尼比的增大而减小,轴向力与热荷载近似成线性关系。随着热电材料与边界间接接触刚度的增大,轴向力从零逐渐增大并最终趋于稳定值,临界失效温度随接触刚度的增加而减小。闻振菲等研究了分段环形热电发电器的热电偶臂构型尺寸对其输出性能的影响,热电偶臂由高温、中温和低温热电材料串联构成。研究发现器件热电偶臂的分段设计可显著提高其输出功率和能量转换效率,理论分析指出器件的输出性能可高于每段热电材料的性能。牛薇等研究了均质和功能梯度环状热电发生器的温度场分布和热电效率,研究发现对于给定结构尺寸,梯度参数变化规律会影响最大热电效率,选择合适的梯度参数可以一定程度上提高材料的最大热电效率。余传斌等研究了任意几何形状夹杂对热电材料的电场、温度场和应力场的影响。

1.7 热振动与热冲击及其分析方法

热冲击是指物体受到局部热辐射快速加热时,由于各部分温度升高速度和热膨胀程度不同,物体内部随之产生热应力的现象^[11]。随着国内各行各业创新技术呈井喷式发展,特别是很多高新技术行业也在不断抢占高点,现代工程材料和结构也面临越来越多的挑战,极端条件下的热传导、热振动和热冲击问题就是急需解决的一个关键问题。

王现辉等基于 LS 理论研究分数阶热弹板中的导波传播特性,采用 Legendre 多项式方法求解无应力绝热边界条件下的耦合波方程和分数阶热传导方程,提出了 Legendre 多项式方法的绝热边界条件。结果表明热模态随分数阶的变化而变化,而弹性模态随分数阶的变化不大。程昊等为了揭示热载荷下结构动力学特性的演化过程,采用数字图像相关的全场测试技术,针对典型壁板结构开展了

热环境下的模态试验研究. 利用石英灯辐射加热器模拟高温环境, 通过力锤敲击对试验件施加脉冲激励, 采用 VIC-3D 高速相机测试系统获得结构在不同温度下的时域振动响应, 进而基于时频分析方法获得结构的热模态参数. 郭松林等应用多项式和指数函数构造了一个可以无限逼近阶跃函数的光滑边界温升函数, 系统地分析了边界温升速率对热波行为和热应力的影响, 解释了圆柱表面的热波到达圆柱中心后波前温度不收敛的原因. 邵颖峰通过对半透明陶瓷的水淬处理和高速成像, 进行了预制裂纹对热震裂纹扩展影响的实时研究. 结果表明在有预制裂纹的情况下, 当热震裂纹尚未与预制裂纹相交时, 热震裂纹的扩展速度并不受影响; 当热震裂纹与 0.5 mm 长的预制裂纹相交后, 大概率会在预制裂纹下端出现翼裂纹, 翼裂纹的扩展角度大致为 90° , 但随着预制裂纹角度的减小, 翼裂纹的扩展速度会逐渐降低, 即裂纹总垂直长度会逐渐减小; 当热震裂纹与 1 mm 长的预制裂纹相交后, 热震裂纹大概率会被捕获. 刘正山利用热分析模型信息及温度场数据、结构有限元模型信息, 通过自研程序和商用软件功能二次开发手段给出了一种基于空间瞬时温度的航天器结构热变形的分析方法, 并制定了仿真分析流程.

1.8 热接触、热断裂和热疲劳

热接触、热断裂和热疲劳研究方面内容主要涉及热载荷作用下多场耦合的接触稳定性和断裂力学问题^[12], 包括复合材料热弹性接触失稳、界面脱层屈曲、多孔材料断裂、微纳尺度多层膜结构分层失效、热力耦合破坏新型数值方法等, 均属于前沿问题.

柯燎亮研究了功能梯度材料热弹性接触及失稳行为, 考查了梯度指数和梯度变化的不同形式对摩擦热接触及稳定性的影响, 研究如何利用梯度涂层来调节接触应力分布、表面温度分布、临界滑动速度和临界热流密度, 改善热接触损伤, 提高热接触稳定性, 实现材料表面抗热接触损伤和热失稳的优化设计, 为功能梯度材料在高速列车制动系统上的应用提供理论依据. 倪勇对层状材料薄膜基底结构热应力失效的研究表明, 在热应力等残余应力作用下, 薄膜经常发生的多重应力不稳定性是由于长程弹性相互作用而呈现出复杂的

竞争、协同和关联模态. 如在压应力下, 脆性薄膜基底结构会出现屈曲、界面脱层和薄膜裂纹不稳定性竞争发展的现象, 这些应力不稳定性先后发生和同时发生会出现迥异的动力学失效形貌. 在拉应力下, 薄膜软基底结构中会出现多级裂纹斑图结构, 也有些薄膜基底结构中会出现局域化有序的褶皱, 这类褶皱的产生与通道裂纹伴随裂尖塑性区发展进而诱发屈曲有着密切关系. 这些结果显示了薄膜基底结构中热应力失效会呈现出多重应力不稳定性下的复杂耦合特性. 李翔宇等在磁-电-热-弹性力学框架下研究了横观各向同性无限体中的椭圆平面裂纹问题, 根据裂纹的电磁特性, 将裂纹分为电磁不可导通、电磁可导通、电可导通磁不可导通以及电不可导通磁可导通 4 种情况, 可利用势理论方法求取此 4 种边值问题的解析解. 马玉娥等基于近场动力学理论发展了离散型键基 PD 热力耦合模型算法, 研究了热冲击荷载作用下材料特性和结构初始温度对非均匀热致裂纹扩展行为的影响, 为热载荷影响下的断裂问题提供算法理论支持. 李圆等研究了热声子相位子多场耦合下二维六方准晶介质的三维平片裂纹问题. 李定玉等基于力热能量密度等效原理推导了陶瓷材料三维情况下的温度相关性临界失效能密度判据, 采用有限元方法模拟了陶瓷材料试件的热震损伤行为, 解释了裂纹起始位置并非最大主应力处的根本原因. 王洁等研究了热流载荷作用下复合材料中界面热阻对界面附近裂纹的断裂行为的影响, 结果表明裂纹上下表面的温度差、II 型裂纹的应力强度因子均随界面热阻的增大而增大, I 型裂纹的应力强度因子的大小不仅受到界面热阻的影响, 还与裂纹到界面的距离相关, 裂纹的张开位移随界面热阻的增大而减小. 李正等基于 Voronoi 随机模型及 B 样条曲线建立了可计及热、力及其耦合性能的多孔材料细观模型, 给出了等效弹性模量、等效热导率与相对密度的函数关系, 并探讨了泡沫陶瓷板厚度方向存在的胞元尺寸效应.

2 会议总结

从上述总结可以看出, 近些年来热应力研究无论是从基础理论、数值模拟方法、实验手段等方面都得到了全面发展. 结合当前新型材料与先进

结构的研究需要,热应力场与其他物理场的耦合分析趋势也日趋重要。此次会议的成功召开为热弹性理论、热应力多场耦合分析、高温材料性能、新型材料与先进结构设计、热冲击、热断裂等热应力相关问题提供了具有重要参考价值的研究成果。

致谢 本次会议得到了中国力学学会电子电磁器件力学工作组、浙江省力学学会固体力学专业委员会、浙江省振动工程学会、宁波市压电器件技术重点实验室、宁波大学科学技术处和宁波大学学报(理工版)的支持。

参考文献:

- [1] Eslami M R, Hetnarski R B, Ignaczak J, et al. Theory of Elasticity and Thermal Stresses, Explanations, Problems and Solutions[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.
- [2] 蒋方明, 刘登瀛. 非傅立叶导热的最新研究进展[J]. 力学进展, 2002, 32(1):128-140.
- [3] 田晓耕, 沈亚鹏. 广义热弹性问题研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(1):18-28.
- [4] 仲政, 张晓龙. 固体热-化-力耦合连续介质理论的研究现状与展望[J]. 力学季刊, 2017, 38(4):593-618.
- [5] 顾鑫, 章青, Madenci E. 多物理场耦合作用分析的近

- 场动力学理论与方法[J]. 力学进展, 2019, 49(1):576-598.
- [6] 田芳, 张俊乾. Z-pin 复合材料细观模型固化残余应力研究[J]. 力学季刊, 2019, 40(3):437-446.
- [7] Fu H R, Nan K W, Bai W B, et al. Morphable 3D mesostructures and microelectronic devices by multi-stable buckling mechanics[J]. Nature Materials, 2018, 17(3):268-276.
- [8] Wang K F, Wang B L, Kitamura T. A review on the application of modified continuum models in modeling and simulation of nanostructures[J]. Acta Mechanica Sinica, 2016, 32(1):83-100.
- [9] 李卫国, 邵家兴, 冠海波, 等. 材料高温力学性能理论表征方法研究进展[J]. 固体力学学报, 2017, 38(2):93-123.
- [10] He J, Tritt T M. Advances in thermoelectric materials research: Looking back and moving forward[J]. Science, 2017, 357(6358):9997.
- [11] Wang L, Li D C, Yang J S, et al. Modeling of thermal properties and failure of thermal barrier coatings with the use of finite element methods: A review[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(6):1313-1331.
- [12] 方岱宁, 刘金喜. 压电与铁电体的断裂力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

Review of the third national congress on thermal stresses

LU Mengkai, ZHANG Aibing, WANG Ji, DU Jianke *

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Nearly 200 experts, scholars and graduate students from more than 50 universities attended the conference. The conference was mainly focused on the following topics: thermoelastic theory and generalized thermoelastic theory, multi-field coupling mechanics considering thermal effects, behavior and control of structures under high and low temperature environment, thermal stress analysis at micro and nano-scales, mechanical properties of materials at high temperature, thermoelectric material mechanics, thermal vibration and thermal shock and their analysis methods, thermal contact/thermal fracture/thermal fatigue, etc. This conference fully presents the latest research results on thermal stress, advocating and leading high-level thermal stress research, promoting academic exchanges and scientific research cooperation. It will play a positive role in promoting the close combination of basic research results of thermal stress and major engineering applications.

Key words: thermoelastic theory; multi-field coupling; thermoelectric materials; thermal vibration; thermal fracture; national congress

(责任编辑 章踐立)