

轻质复合材料及结构热膨胀调控设计研究进展

韦凯^{1,2}, 裴永茂^{2*}

1. 湖南大学机械与运载工程学院工程力学系, 长沙 410082;

2. 北京大学工学院力学系, 北京 100871

* 联系人, E-mail: peiyongmao@pku.edu.cn

2016-05-21 收稿, 2016-06-15 修回, 2016-06-15 接受, 2016-12-01 网络版发表

国家自然科学基金(11521202, 11232001, 11602081)和中国工程物理研究院重点学科项目资助

摘要 热膨胀系数是材料热物理性能的重要参数. 在温度剧烈变化服役环境下, 航空航天工程中卫星、高超声速飞行器以及精密仪器仪表, 微电子封装中大量结构的热变形需要精确的控制. 发展热膨胀可调控的材料具有重要的科学意义和工程应用价值. 轻质复合材料凭借其轻量化, 力学性能优异且热膨胀系数可设计的优点已成为热变形控制领域的重要材料. 本文首先概括了材料和结构的热变形控制在工程中的重要应用以及已有低、负膨胀均质材料的研究现状. 其次详细介绍了层合、颗粒增强及拓扑优化复合材料的热膨胀设计研究成果. 最后重点综述了轻质点阵复合材料的几何结构设计方法, 热膨胀调控机理, 制备工艺及实验表征的最新研究成果.

关键词 复合材料, 热膨胀调控, 点阵结构, 优化设计, 轻量化

热膨胀系数是材料热物理性能的重要参数, 它表征材料受到温度变化而发生的几何尺寸变化. 材料的热膨胀机理源于晶格原子的热振动. 由于晶格的热振动并非简谐振动, 其非简谐效应使晶格受热振动产生尺寸增大的膨胀, 因而绝大多数材料表现出“热胀冷缩”的正热膨胀效应. 热膨胀系数是材料在工程结构设计中的重要参数, 因而历来是科学研究中的热点. 本文首先简要介绍了材料热变形控制在工程应用中的重要意义以及低、负膨胀均质材料的研究成果. 随后详细综述了近年来兴起的复合材料, 尤其是轻质点阵复合材料的热膨胀调控机理, 结构设计方法, 制备工艺以及性能表征等方面的突出研究成果.

1 材料和结构的热变形控制在工程中的重要应用及其挑战

在精密仪器、电子、土木、航空航天等工程领域,

由于结构受到剧烈的环境温度变化和本身的高精度要求, 具有极小甚至零热膨胀系数的材料具有极高的应用价值. 此外, 结构热变形协调设计要求材料具有可调控的负热膨胀或特定的正热膨胀系数^[1,2]. 在精密仪器工程领域, 因热变形而破坏结构原有精度的现象广泛存在. 例如, 天文光学望远镜镜筒由于热胀冷缩而破坏主镜和副镜之间的位置精度, 从而使成像质量受到削弱. 钟的摆杆因热胀冷缩影响其摆动频率, 从而影响计时精度^[3]. 在土木工程中, 大型桥梁结构经历昼夜温差, 以及夏冬两季的温差会产生较大的热变形并发生热疲劳破坏^[4]. 太空运行的卫星经历的昼夜温差高达200°C, 巨大的温差可引发太阳能电池与基板发生非协调热变形而剥落. 通信卫星的天线支架过大的热变形会导致天线发生热偏移而与地面通信发生偏差^[5,6]. 卫星中空间相机支座舱必须保持极小热变形以保证空间相机的成像精度^[7]. 高超声速飞行器飞行时, 气动热在热防护系统表面

引用格式: 韦凯, 裴永茂. 轻质复合材料及结构热膨胀调控设计研究进展. 科学通报, 2017, 62: 47–60

Wei K, Pei Y M. Development of designing lightweight composites and structures for tailorable thermal expansion (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 47–60, doi: 10.1360/N972016-00630

产生的温差高达上千摄氏度,设计具有极小热膨胀的热防护系统将非常有利于降低热应力,避免热力耦合失效破坏^[8].

可以总结,工程中结构服役温度的剧烈变化会引发三类必须高度重视的热膨胀问题:(1)热膨胀过大导致结构丧失原本设计的精度;(2)非协调热膨胀的构件相互分离而破坏结构的完整性导致功能失效;(3)热应力过大导致材料发生屈服、疲劳等失效破坏.因此设计得到热膨胀系数可精确调控的材料将可以使上述热膨胀问题得到有效的控制^[9].除此之外,轻量化是许多工程的永恒追求.美国国家宇航局(NASA)更是将轻量化结构列为2010~2030年期间材料、结构、机械、制造领域最优先发展的九个技术之一.材料和结构在满足热膨胀可调控的要求下还必须满足轻量化,力学性能优异的要求.然而,目前材料热变形控制研究存在的难点在于寻求热膨胀可调控且兼具轻量化,力学性能优异的材料.发展热膨胀可调控,轻量化,力学性能优异的材料对于工程中结构的热变形控制具有基础性、先导性意义.

2 低、负热膨胀均质材料

自然界绝大部分材料在温度升高时会发生几何尺寸增大的膨胀,即具有正热膨胀系数.而少数一些陶瓷、氧化物、铁电铁磁材料、合金等由于桥连原子低能横向振动,多面体晶体结构刚性耦合转动,相变等特殊微观机理而具有反常的低、负膨胀系数^[10].Sleight研究小组^[11]发现陶瓷材料钨酸锆(ZrW_2O_8)在较宽的温度范围内具有各向同性负热膨胀系数,其负膨胀效应主要源于内部刚性多面体的耦合转动^[12].随后,Sleight研究小组^[13]进一步发现 $\text{Sc}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$ 在较宽的温度范围内具有各向异性的负热膨胀系数.Goodwin等人^[14]发现钴酸盐($\text{Ag}_3[\text{Co}(\text{CN})_6]$)具有由负到正大范围可调控的热膨胀系数,其负热膨胀系数是钨酸锆的14倍.其他陶瓷材料如一些沸石也具有负膨胀效应^[15].锂霞石具有负体积热膨胀系数,方石英具有极小热膨胀系数.但这些材料的负、低热膨胀效应只能保持在要么很低,要么很高的狭窄温度范围内,并由于明显的各向异性而难以得到实际工程应用^[16].一些铁电材料,如钙钛矿铁电体钛酸铅(PbTiO_3)在居里温度附近,随温度升高其Ti—O键长减小而具有负膨胀系数,而超过居里温度则转变为正热膨胀系数^[17].一些铁磁性合金,如因瓦合金在

居里温度以下,其本征的磁致伸缩与原子热振动加剧产生的正膨胀相互抵消,因而表现出低热膨胀特性.然而超过居里温度因瓦合金变为顺磁性,磁致伸缩效应消失而失去低膨胀特性^[18].目前因瓦合金,微晶玻璃等近零膨胀材料已在工程中得到应用.值得注意的是,由于陶瓷材料本身的脆性,较低的断裂韧性以及机械加工难度大等缺点而很难将其应用在承载结构设计中.铁电铁磁材料只在一定的温度范围内具有低膨胀特性.加之陶瓷、合金等均质材料较大的密度,因而暂时难以同时满足热膨胀可调控,轻量化,力学性能优异的要求.

3 复合材料热膨胀调控

复合材料是一类由两种或两种以上的材料相复合而成的多相材料.复合材料热膨胀调控设计的基本思路是利用不同材料相迥异的热膨胀系数进行一定的材料配比及细观微结构设计而实现热膨胀调控.复合材料种类繁多,基于其不同的热膨胀调控设计方法,本文以下将其分为层合、颗粒增强以及拓扑优化复合材料,并分别介绍其研究进展.

3.1 层合复合材料

纤维增强层合复合材料的纤维与基体的材料体系具有广泛的可选择性,以及铺层角度、纤维含量、制备工艺的多样性,具有多设计变量的优势.由于玻璃纤维具有低轴向热膨胀系数,芳纶纤维,碳纤维和石墨纤维具有负轴向热膨胀系数,因而通过合理的设计可以实现热膨胀系数调控.基本设计思路是选用低、负膨胀纤维,基于层合复合材料力学理论,通过合理的纤维和基体配比可实现单层板单方向零、负膨胀设计.进一步通过合理设计铺层方式以获得面内零、负热膨胀的层合复合材料^[19~21].

Ito等人^[22],McCartney等人^[23]早期建立了可以预测层合复合材料热膨胀系数的细观力学和层合板理论.Nadeau等人^[24]采用细观力学的方法理论建立了预测两相复合材料线热膨胀系数的方法.Wakashima等人^[25]理论设计及实验制备了可实现负和零膨胀的玻璃纤维层合板.Karadeniz等人^[26]采用有限单元法基于纤维和基体的单胞建立了能够预测纤维增强复合材料热膨胀系数的计算方法,并详细探讨了各种基体和纤维体系下热膨胀系数.Kim等人^[27]建立了复合材料热膨胀系数的实验测试系统,可实现较低幅值

的热膨胀系数测试. Rangarajan等人^[28]对纤维的走向构型做了优化设计,发现对于对称角度铺层的层合板,当纤维走向是直线时,其有效热膨胀系数最小.多种纤维混杂复合材料可以更好地实现热膨胀系数调控. Praveen等人^[29]设计了碳纤维和玻璃纤维混杂的层合复合材料实现了零膨胀以用于低温环境.目前,一些复合材料结构包括空间相机支架,卫星天线支架等结构已在工程中得到了应用.关于层合复合材料的热膨胀设计理论已趋于成熟,并写进相关专著.值得注意的是,复合材料的纤维和基体不同的热膨胀系数常常会引发界面开裂的问题.树脂基的软化温度也限制其在高温环境下的应用.

3.2 颗粒增强复合材料

颗粒增强复合材料利用均匀非连续的增强相与基体材料复合,从而实现材料性能的调控.利用在第2节介绍的具有负膨胀效应材料作为填充相,配合以正膨胀的基体材料,通过合理配比可实现热膨胀系数的调控.其中极具代表性的是大量文献报道了以第2节介绍的钨酸锆作为负膨胀填充相,以金属基底包括铜^[30,31],因瓦合金^[32]或铝^[33,34],氧化锆陶瓷^[35,36],高分子聚合物^[37,38]等作为正膨胀基体,通过合理配比及相应的制备工艺可以得到零或负膨胀复合材料^[39].其他一些颗粒增强复合材料研究包括: Ding等人^[40], Yan等人^[41]分别制备了近零膨胀的 $\text{Mn}_3\text{Cu}_{0.5}\text{A}_{0.5}\text{N}$ ($\text{A}=\text{Ni}, \text{Sn}$)/Cu和 $\text{Mn}_3\text{Cu}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}\text{N}$ /Cu复合材料; Liu等人^[42]以 $\text{Sc}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$ 作为负膨胀增强相,以氧化锆和铜为正膨胀基体制备了近零膨胀的 $\text{Sc}_2(\text{WO}_4)_3/\text{ZrO}_2$ 和 $\text{Sc}_2(\text{WO}_4)_3/\text{Cu}$ 复合材料; Das等人^[43]制备了 $\text{Y}_2\text{W}_3\text{O}_{12}/\text{Cu}$ 可实现低热膨胀系数.

值得注意的是,上述颗粒增强复合材料的热膨胀调控强烈依赖于仅有的为数不多的负膨胀材料,因而其热膨胀调控范围有限.此外,基体与增强相迥异的热膨胀系数极易导致界面发生热失配应变/应力而从内部萌生裂纹而过早的失效.例如钨酸锆和基体之间迥异的热膨胀系数会产生不可忽略的界面热错配应力,导致钨酸锆受压发生相变而失去负膨胀效应^[44].

3.3 拓扑优化复合材料

拓扑优化设计方法的出现使复合材料的微观结构设计进一步发展成在满足特定的约束条件下可以

最大程度地变化各相材料的几何微结构形式而实现所设计的性能.基于此设计方法, Sigmund等人^[45,46]最早从三相材料的优化设计出发,以特定的模量取值和多重对称性为约束条件,通过拓扑优化算法获得可以实现高正膨胀、零和负热膨胀的多种二维复合材料拓扑微结构,如图1(a)和(b)所示.这些微结构中一相材料具有高热膨胀系数,而另一相拥有低热膨胀系数,第三相为空白无材料. Liu等人^[47]也开展了基于拓扑优化的零膨胀材料设计与模拟验证. Sigmund的研究成果使复合材料的负、零热膨胀设计可以通过两种正热膨胀材料相的合理几何结构设计而实现,从而不需要依赖于负膨胀材料相.以图1(a)所示的微结构为例,在温度增量下,由于内凹的微结构在两种材料相界面处发生弯曲变形而进一步内凹,因而呈现出负膨胀效应. Oruganti等人^[48]采用激光熔融技术以多相金属(镍和铬)制备了图1(a)所示的拓扑微结构复合材料而实现了负热膨胀.最近, Yan研究小组^[49,50]采用权重系数将热稳定性和刚度合为优化目标,利用拓扑优化算法计算得到了二维圆环状复合材料微结构,如图1(c)所示.其结果表明权重系数会明显改变二维圆环状复合材料微结构的布局及热膨胀系数和刚度的取值.该复合材料在实现某个方向的低热膨胀同时仅仅使其整体刚度稍微减小.上述经过拓扑优化得到的复合材料的优势在于可以实现

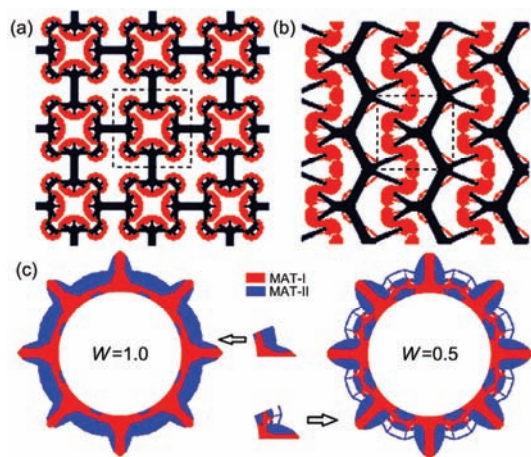


图1 (网络版彩色)经拓扑优化设计可实现热膨胀调控的二维复合材料微结构.可分别实现负膨胀(a),最大体积模量和零膨胀的复合材料微结构(b)^[46],二维圆环状复合材料微结构可实现低热膨胀(c)^[49]

Figure 1 (Color online) The two dimensional microstructures of composites with tailorable thermal expansion designed by topological optimization. Microstructures for negative thermal expansion (a) and zero thermal expansion as well as maximum bulk modulus (b)^[46], circular composites with microstructures for low thermal expansion (c)^[49]

大幅值的正、负及零热膨胀系数,同时具有较好的力学性能.但其复杂的细观微结构形式导致多相材料之间的相互连接成为实际制备工艺的难点.随着以增材技术为代表的先进加工制造技术的出现,上述拓扑优化复合材料的设计及制备有望重新受到关注和深入研究.

4 轻质点阵复合材料及结构热膨胀调控设计

轻质点阵复合材料是模拟晶体材料中晶体点阵并随加工成形技术的发展而设计提出的一类超轻材料.点阵复合材料中每个结点连接的杆件与晶体学中的晶体点阵类似,杆件形状规则,最小几何胞元严格遵守周期性排列规则.相较于第3节介绍的复合材料,轻质点阵复合材料同样具有细观几何结构可设计及组分材料可选择的优点,因而同样可以实现热膨胀调控设计.根据杆件分别发生拉伸及弯曲变形模式的不同,本文以下分别详细介绍关于拉伸主导型和弯曲主导型点阵复合材料结构热膨胀调控的研究进展.

4.1 弯曲主导型点阵复合材料

弯曲主导型的点阵复合材料主要依靠杆件发生弯曲变形从而实现热膨胀调控.如图2(b)~(d)所示,Lakes最早分别于1996^[51]和2007^[52]年设计了二维和三维点阵复合材料,可实现由负到正大幅度的热膨胀调控.这些点阵胞元中的每根杆件由具有初始曲率的双材料梁组成,其实现热膨胀调控的本质是利用了由Timoshenko^[53]于1925年提出的双材料梁在温度变化下弦长可调控的原理.如图2(a)所示,具有初始曲率的双材料梁,其上下两部分分别由不同热膨胀系数材料组成(图中以黑色和白色区分).在基于材料界面完美结合的假设下,当梁受到均匀温度变化,弦长的变化经材料力学推导得到的解析表达式是一组截面几何和材料参数的函数.因此,通过合理的截面参数设计及材料选择可以实现弦长伸长和收缩的调控.进一步将双材料梁设计成为二维和三维点阵胞元中的杆件即可得到热膨胀可调控的点阵复合材料.Lakes通过几何和材料参数分析,证明这些点阵复合材料可以实现大范围负、零及正热膨胀设计.

最近,Lehman等人^[54]针对上述二维点阵复合材料中杆件的截面进行了优化设计.在给定的相对密

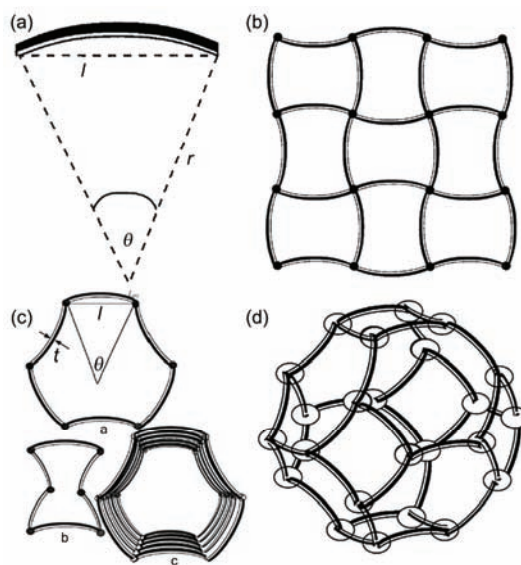


图2 基于双材料梁设计的点阵复合材料结构可实现热膨胀调控^[51,52]. (a) 双材料梁; (b) 四方胞元; (c) 内凹蜂窝胞元; (d) 三维胞元

Figure 2 Lattice composites, designed based on dual-material beams, can achieve tailorable thermal expansion^[51,52]. (a) Bi-material beam; (b) square cell; (c) re-entrant honeycomb cell; (d) 3D cell

度下,通过设计T和I字型截面以获得最大的刚度.虽然上述点阵复合材料设计较为简单,但首次提出不依赖于负热膨胀的组分材料,以常见的正热膨胀系数工程材料作为组分材料,通过点阵几何结构设计实现负、零热膨胀调控,因而为材料的热膨胀设计提供了新的思路.值得指出的是,上述设计要求双材料梁不同材料之间的界面完美结合,在实际制备中较难实现,每根梁在点阵胞元中的相互连接也是实际制备的难点.因此到目前为止,尚未有关于该点阵复合材料的制备工艺及性能表征的研究工作报告.

另一方面,Jefferson等人^[55]设计了内外嵌套二维点阵复合材料,如图3(a)所示.该点阵胞元由内部的外凸三角块与外部的曲边蜂窝两部分嵌套而成.两部分的材料各不相同,即内部三角块材料具有较大的热膨胀系数,在温度增量作用下,其较大的热变形顶动与之接触的弯曲蜂窝胞壁,使蜂窝胞壁的连接节点发生相对旋转,因而可以实现胞元宏观上的热膨胀调控.实际上Jefferson的结构设计非常类似3.2节图1(a)的拓扑微观结构形式.弯曲蜂窝胞壁相当于图1(a)胞元中的内部结构,而灰色的外凸三角块相当于图1(a)中的外部桁架.由于图3(a)中热膨胀调控依赖于蜂窝胞壁的弯曲变形,因此经推导给出的热膨胀系数表达式较为复杂,尚无解析解,需要数值求

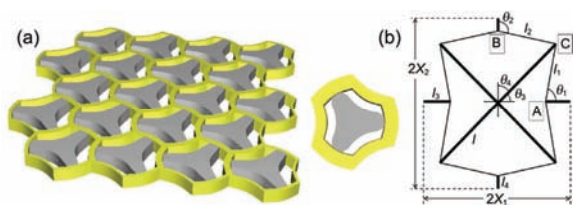


图3 (网络版彩色)内外嵌套(a)^[55]以及水平内凹^[56]的二维点阵复合材料(b)

Figure 3 (Color online) Two dimensional lattice composites with nested (a)^[55] and horizontal concave cells (b)^[56]

解。另外一方面, 由于内外两种材料需要在界面紧密连接, 因此实际制备工艺较为困难, 目前尚未有针对该胞元形式的点阵复合材料制备工艺和性能实验表征。值得注意的是, 由于图3(a)中的点阵胞元具有六重旋转对称性, 根据晶体学对称性原理, 因而具有面内各向同性热膨胀系数。与此相反, 如图3(b)所示, Lim^[56]设计了由内部交叉杆件和外部水平内凹蜂窝组成的可实现竖直单方向负膨胀的点阵复合材料。该点阵胞元内部的杆件和外部蜂窝的材料各不相同。在温度变化作用下, 该胞元利用内部热膨胀系数较大的交叉杆件热变形顶动与之相连的外部蜂窝胞壁的四个角点, 从而使蜂窝的水平内凹程度增大, 因而可以实现竖直方向的负膨胀, 其他方向的热膨胀调控却无法实现。

4.2 拉伸主导型点阵复合材料

(i) 点阵胞元设计。值得注意的是, 4.1节中介绍的点阵复合材料热膨胀调控是通过杆件的弯曲变形而实现, 显然属于弯曲主导型点阵复合材料。然而, 拉伸主导下的点阵复合材料由于每根杆件发生轴向拉压变形而相较于弯曲主导型点阵复合材料具有更优异的力学性能。因而有不少学者针对拉伸主导型点阵复合材料开展了热膨胀调控设计研究, 以期望同时获得热膨胀可调控和优异的力学性能。Miller^[57]最早提出了三角形点阵复合材料可实现高度方向热膨胀调控。如图4所示, 三角形点阵复合材料的底边和斜边分别由两种热膨胀系数不同的材料组成。其热变形机理如图4(b)所示, 胞元底边杆件的热膨胀变形会使得三角形的高度 h 减小, 而斜边杆件的热膨胀会致使高度增大, 因此三角形点阵的高度是上述两种膨胀变形竞争的结果。通过合理的几何结构设计和材料布局可以实现高度方向的热膨胀系数调控。

三角形点阵复合材料设计结构形式简单, 热变

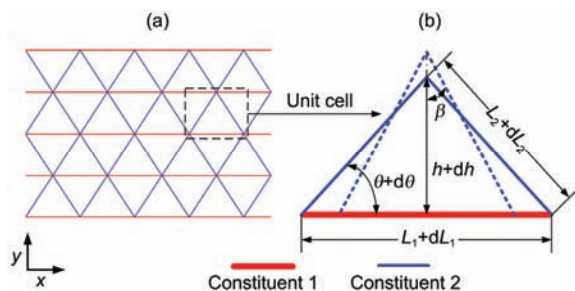


图4 (网络版彩色)三角形点阵复合材料设计(a)及其热变形机理(b)^[60]

Figure 4 (Color online) (a) Triangular lattice composite; (b) its thermal expansion mechanism^[60]

形机理清晰, 热膨胀表达式可以通过解析推导得到。进一步, Grima等人^[58]采用有限单元法, 数值计算了考虑三角形胞元节点固定连接情况下的热膨胀行为。数值结果表明底边和斜边的弹性模量相对比值对热膨胀系数有重要的影响, 但数值结果并未给出模量比值对热膨胀系数影响的一般规律。Grima等人^[59]同时还给出了由3种材料体系组成的三角形点阵复合材料, 其结构形式与图4相同, 只是两个斜边的材料也由不同的材料组成。这样的设计可以进一步拓宽三角形点阵复合材料的热膨胀调控范围。裴永茂研究小组进一步通过基于梁单元的矩阵位移法, 解析推导了考虑三角形点阵复合材料杆件节点固定连接引入的节点旋转阻力以及杆件本身弯曲刚度下的热膨胀系数表达式。以常见工程合金设计和制备了试件, 通过自主搭建的基于数字图像相关法的热膨胀测试平台, 首次从实验角度证实了三角形点阵复合材料可实现负、近零及正热膨胀系数调控。

上述三角形点阵复合材料只能实现面内单方向热膨胀调控, 因而具有明显的面内各向异性。实际上可以将三角形点阵材料作为一种基本胞元形式, 按照一定的几何排布组合规律而设计得到更多可以实现多方向热膨胀调控的平面点阵复合材料。Miller等人^[57]以此为基础胞元设计了图5中多种平面点阵复合材料胞元, 并基于杆件铰接连接假设, 给出了每种胞元的热膨胀系数表达式。Steeves等人^[60]设计了图6(a)所示的三方、四方、六方3种组合平面点阵复合材料, 称其“组合”平面点阵复合材料是由于该设计实际分别是由三、四、六个三角形胞元环向串联组合而成(四方、六方组合平面点阵胞元内部中还分别包含一根、三根杆件)。该组合平面点阵复合材料同样由两种不同热膨胀系数的材料组成。根据晶体学对

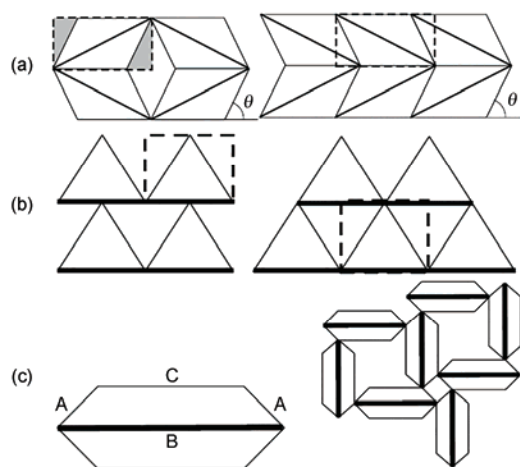


图5 基于三角形点阵设计的多种平面点阵复合材料^[57]. (a) 四边形胞元; (b) 三角形拓展胞元; (c) 梯形胞元

Figure 5 Planar lattice composites designed based on the triangular lattice^[57]. (a) Square cell; (b) tessellated triangle cell; (c) trapezoidal cell

称性原理, 由于它们分别具有三、四、六重旋转对称性, 因而具有面内各向同性的热膨胀系数. Steeves以图6(b)中的三方平面点阵复合材料为主要研究对象, 详细给出了其热膨胀系数, 单轴和双轴刚度解析表达式及其变化规律. 由于材料无论被加工成何种形状, 其热膨胀系数不发生改变, 因而三方点阵中的内

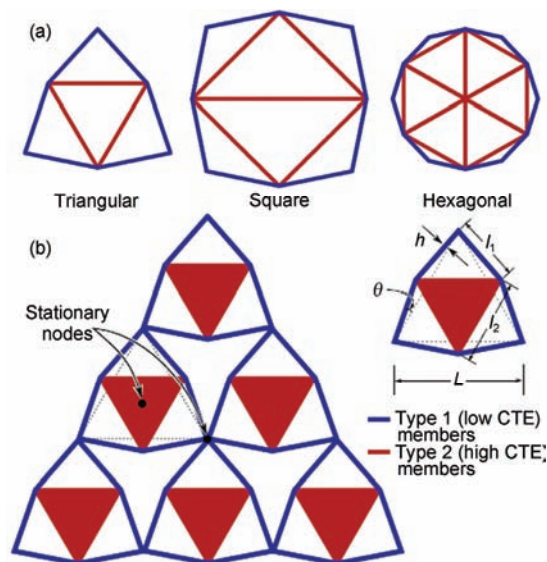


图6 (网络版彩色)平面点阵复合材料. (a) 三方、四方、六方平面点阵胞元; (b) 三方平面点阵复合材料及其几何设计参数^[60,62]

Figure 6 (Color online) The planar lattice composites. (a) Triangular, square and hexagonal lattice cells; (b) triangular planar lattice composite and its geometrical parameters^[60,62]

部三角形可由整体的三角块替代. 这样在温度变化时, 胞元内部三角块发生热膨胀, 顶动与之相连的外部杆件, 两者相连角点发生相对旋转, 从而实现热膨胀系数调控. 胞元存在两种不动点(stationary nodes), 即内部三角块的中心以及外部杆件互连点, 如图6(b)所示. 这样从宏观整体来看, 平面点阵复合材料是由这些不动点连接, 因而整体可以实现零膨胀.

另一方面, Pei研究小组^[61]基于晶体学中的对称性原理进一步设计了两类6种平面点阵复合材料, 如图7所示. 其中第一类平面点阵胞元是分别将三、四、六个三角形基本胞元共用顶点组成. 而第二类平面点阵胞元则是分别将三、四、六个三角形基本胞元底边顺次连接而成, 且与Steeves设计的平面点阵胞元较为类似. 由于借鉴了晶体学对称性原理, 这些平面点阵胞元分别具有三、四、六重旋转对称性, 因而具有面内各向同性的热膨胀系数. 通过解析的推导其热膨胀及双轴力学性能, 发现第一类平面点阵复合材料的热膨胀调控范围更大, 双轴刚度较大, 初始屈服及弹性屈服极限具有几何稳定性的优点.

除了以上平面点阵复合材料以外, 一些学者给出了三维点阵复合材料设计以实现某些方向以及体积热膨胀调控. Miller等人^[57]给出了如图8(a)和(b)所示的双材料三棱锥和四棱锥点阵复合材料胞元. 这些胞元的底边和斜边分别由热膨胀系数不同的材料组成(图中以黑色和灰色区分), 其热膨胀调控机理与图4中的平面三角形点阵相同. 因此上述三维点阵胞元可以实现其高度方向的热膨胀调控. 进一步将其作为基本胞元, 在三维空间排列组合可以设计实现三维各向同性热膨胀调控的点阵复合材料, 如图8(c)和(d)所示^[57,60].

(ii) 制备工艺及实验表征. 上述点阵复合材料的热膨胀系数设计具有尺度无关性. 因此既可以将点阵胞元制备成宏观尺度, 也可以将其制备成微细观尺度, 则成为宏观均匀而具有微细观周期结构的零或负膨胀复合材料. Steeves等人^[62]采用铝合金, 钛合金制备了平面点阵复合材料, 如图9(a)所示, 通过基于数字图像相关法的测试平台开展了50~220℃温度变化、循环温度变化下以及热冲击载荷下的热变形行为实验测试, 证实其热膨胀系数的可设计性. Gdoutos等人^[63]采用激光点焊的方法制备了如图9(b)所示面外厚度极薄的平面点阵复合材料. 并通过实验测试证明其可以实现2.6 ppm/℃(1 ppm/℃=1×10⁻⁶/℃)

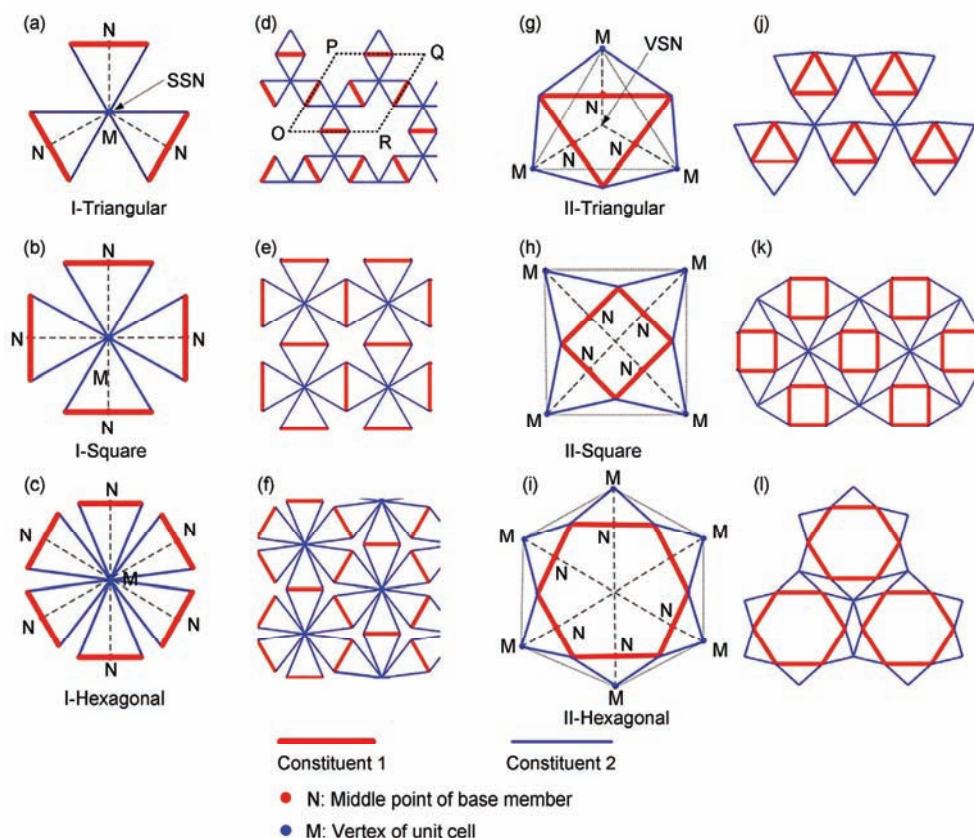


图7 (网络版彩色)二维平面点阵复合材料设计^[61]。(a)~(c) 第一类平面点阵胞元设计; (d)~(f) 第一类平面点阵复合材料; (g)~(i) 第二类平面点阵胞元设计; (j)~(l) 第二类平面点阵复合材料

Figure 7 (Color online) Two dimensional planar lattice composites^[61]. (a)~(c) Planar lattice cells in first category; (d)~(f) planar lattice composites in first category; (g)~(i) planar lattice cells in second category; (j)~(l) planar lattice composites in second category

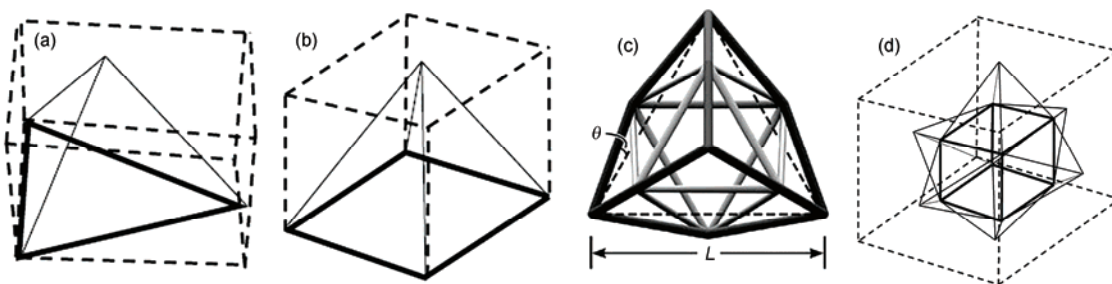


图8 三维点阵复合材料设计^[57]。(a) 三棱锥点阵胞元; (b) 四棱锥点阵胞元; (c) 基于三棱锥的三维组合点阵复合材料^[60]; (d) 基于四棱锥的三维组合点阵复合材料^[57]

Figure 8 Three dimensional lattice composites^[57]. (a) Triangular and (b) square based pyramids cell; (c) three dimensional lattice composite designed based on triangular based pyramids cell^[60]; (d) three dimensional lattice composite designed based on square based pyramids cell^[57]

的近零膨胀. 通过数值模拟的方法探讨了杆件的面内厚度对热膨胀系数的影响, 发现面内厚度越大, 数值模拟的结果与基于铰接假设的理论预测结果相差越大. Rhein等人^[64]采用铌与钴合金制备了平面点阵复合材料, 如图9(d)和(e)所示, 并测试了室温至

1000℃以内的热变形, 发现其设计和制备的平面点阵复合材料可以分别实现6.0和1.0 ppm/℃热膨胀系数. Yamamoto等人^[65]采用微细加工技术制备了图9(c)所示的微型点阵复合材料. 该点阵复合材料胞元仅有数十微米, 因此具有该细观结构的材料在宏

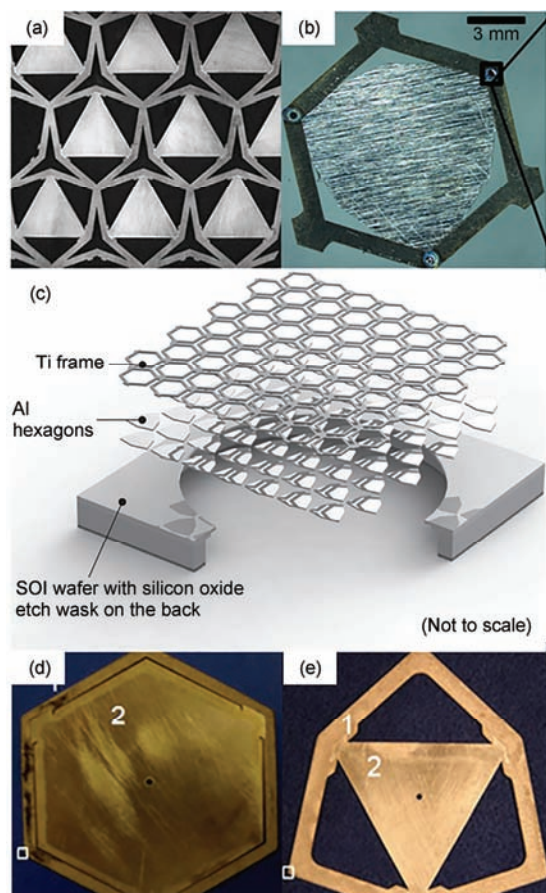


图9 (网络版彩色)Steeves (a)^[62], Gdoutos (b)^[63], Yamamoto (c)^[65]采用钛与铝合金以及Rhein (d), (e)^[64]采用铌与钴合金制备的平面点阵复合材料

Figure 9 (Color online) The fabricated planar lattice composites by Steeves (a)^[62]; Gdoutos (b)^[63], Yamamoto (c)^[65] through titanium and aluminum alloys and by Rhein (d), (e)^[64] through niobium and cobalt alloys

观上具备连续材料的特征,并能够实现特定设计的热膨胀系数. Berger等人^[66]针对图6(b)中的点阵构型,为外部杆件的连接设计了圆形连接块,以使其杆件热变形通过连接块能更好地发生协调旋转. 其系统的关于该点阵复合材料热膨胀和力学性能的理论,实验表征和数值仿真结果为工程应用提供了较好的参考.

Pei研究小组^[61]采用铝合金、不锈钢、因瓦合金制备了如图10所示的平面点阵复合材料. 不同组分材料采用嵌锁连接,避免了焊接引入的初始缺陷. 通过自主搭建的数字图像相关法测试平台进行热变形测试,证明该平面点阵复合材料可以很好地实现负、近零及正热膨胀调控.

多相材料的连接是上述平面点阵复合材料制备工艺的核心问题. 上述研究分别采用嵌锁连接或焊接,不可避免地引入初始缺陷,因而无法实现初始结构设计中的理想连接界面. 由于热膨胀变形本身属于细微的几何尺寸变化,上述初始缺陷往往导致热膨胀性能与理论预测存在一定的偏差. 此外,三维点阵复合材料几何结构的复杂性致使其制备工艺以及热变形实验测试具有一定的难度,因而尚未有相关的研究报道. 随着增材制造加工技术的出现,上述点阵复合材料多相材料的连接问题有望通过3D打印工艺实现,从而推进其制备工艺的进一步发展,使热膨胀可调控的点阵复合材料更接近于实际工程结构应用.

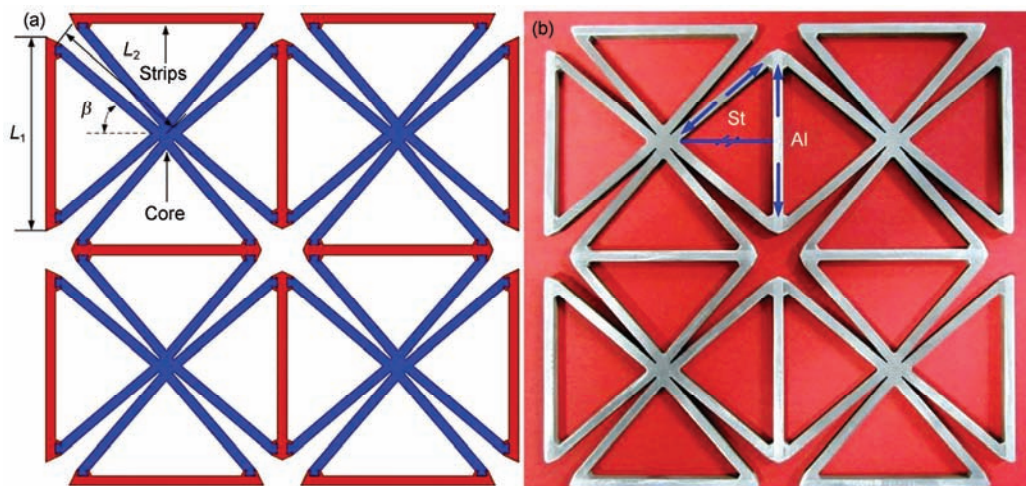


图10 (网络版彩色)制备的平面点阵复合材料^[61]. (a) 试件的几何尺寸; (b) 制备的试件

Figure 10 (Color online) The fabricated planar lattice composite^[61]. (a) Geometrical parameters of the specimen; (b) as fabricated specimen

4.3 轻质点阵复合材料结构设计方法

(i) 点阵结构设计. 由于点阵复合材料的可设计性, 一些学者进一步开展了点阵复合材料结构设计以利于实际工程应用. Palumbo等人^[67]利用4.2节中的三角形点阵复合材料胞元设计了如图11(a)所示平面点阵复合材料桁架结构以达到热稳定的设计目的. 该设计的本质仍然是利用了双材料三角形点阵复合材料的热膨胀调控机理. Palumbo通过基于梁单元的矩阵位移法获得了该结构的热膨胀理论表达式. 进一步利用常见的金属制备和实验测试了该结构的热膨胀. 其结果表明结构的热膨胀系数可以通过合理的结构设计而小于其组分材料, 因而该结构有望应用到卫星天线支架上.

由于高超声速飞行器的高马赫数, 其外表面的热防护系统面临高达上千摄氏度的剧烈温差. 热防护系统过大的热膨胀变形会使得各个零部件发生非协调变形而产生缝隙, 气动热穿过缝隙而最终导致

内部结构过热而破坏失效. Steeves等人^[68,69]基于其设计的平面点阵复合材料设计了如图11(b)所示的热稳定热防护系统, 针对气动及热流载荷, 通过结构优化设计方法给出了该热防护系统的结构尺寸设计范围. Toropova等人^[70,71]同样利用图6(a)所示的二维点阵复合材料胞元设计了具有各向异性的热膨胀自适应平面和圆柱壳连接结构如图11(c)和(d)所示. 以图11(c)中的结构为例, 它由多个胞元在平面堆积而成, 通过内部三角形杆件的不等边设计, 可以调节竖直方向的热膨胀系数. 这样整个结构分别与上下热膨胀系数不相同的基底连接, 使得不同热膨胀系数的基底可以很好地过渡而不会产生过大的热失配. 图11(d)中的圆柱壳结构的机理类似. 裴永茂研究小组将平面三角形点阵复合材料分别沿其高度方向和水平方向卷曲获得了径向和轴向热膨胀可调控的点阵复合材料圆柱壳结构, 并建立了点阵圆柱壳结构的热膨胀系数表达式. 该点阵圆柱壳结构有望满足卫星天线支架结构和天文望远镜镜筒对高热稳定性的苛刻要求.

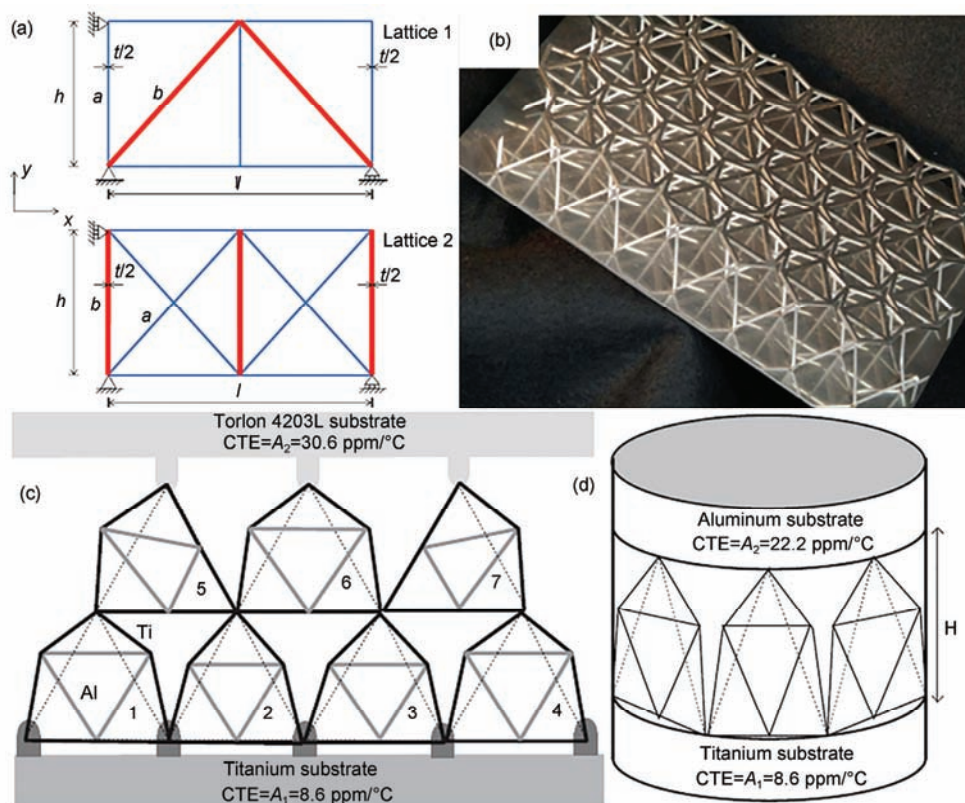


图 11 (网络版彩色)可实现热膨胀调控的点阵复合材料结构设计^[67]. (a) 二维平面桁架系统; (b) 热稳定的热防护系统^[68]; (c) 热膨胀自适应平面连接结构^[71]; (d) 热膨胀自适应圆柱壳连接结构^[71]

Figure 11 (Color online) Lattice composite structures with tailorable thermal expansion^[67]. (a) Planar lattice truss; (b) thermal protection system with high thermal stability^[68]; (c) planar lattice structures for adaptive connection^[71]; (d) lattice cylindrical shell for adaptive connection^[71]

(ii) 不动点设计方法. 上述关于点阵材料复合材料及结构设计的研究成果都只给出了某些几何胞元或结构设计的例子, 而没有给出设计这些结构的一般化方法. Pei研究小组^[61]总结了已有的结构设计规律, 提出了基于双三角形子单元的不动点设计方法如图12所示. 该方法将两个三角形胞元共用底边形成双三角形子单元(dual-triangle cell), 并建立将点阵复合材料结构中的杆件用子单元替换的重构方法, 最终可以将任意周期甚至非周期的点阵复合材料或结构用子单元重构形成新的材料或结构, 从而可以实现热膨胀系数的调控. 例如图13所示的非周期准晶胞元, 利用上述不动点设计方法进行重构可以实现不动点及零膨胀设计.

5 结语

材料的热膨胀系数研究历经了几十年发展, 从最初具有特殊微观机理, 只能在某些特定温度范围

内实现一定的零、负膨胀系数的单相均质材料, 发展到可以实现宽温度内的大范围热膨胀系数调控的多相复合材料设计. 随后, 从多相复合材料必须依赖于负膨胀增强相与正膨胀基体复合才能实现热膨胀调控, 发展到可以不依赖负膨胀材料相, 仅利用正热膨胀系数材料相, 通过新颖合理的细观几何结构设计可以实现大范围由负到正的热膨胀系数调控, 从而为工程所需的热膨胀系数提供了更大的设计空间. 近年来, 轻质点阵复合材料汇集了轻量化兼具热膨胀可调控, 力学性能优异以及其他功能可设计的优点, 最有希望满足当前工程结构对材料必须具备轻质且多功能复合的强烈需求. 随着先进设计方法及制造加工技术的发展, 热膨胀可调控的轻质复合材料将必有更广阔和深入的发展.

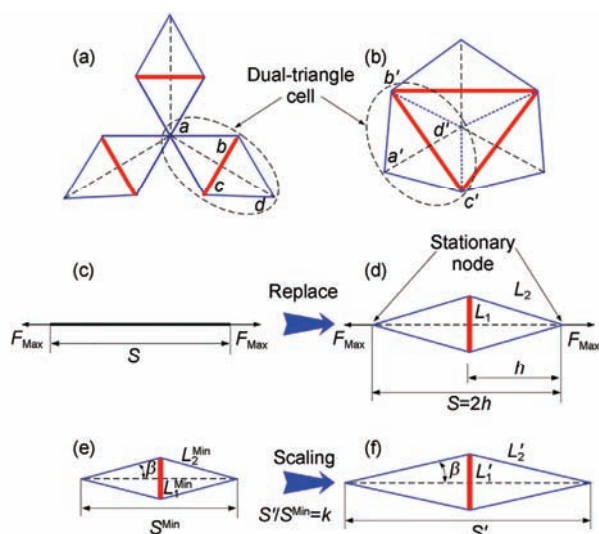


图 12 (网络版彩色)基于双三角形子单元的点阵复合材料结构不动点设计方法^[62]. (a) 平面三方胞元; (b) 平面三方胞元可被分解为 3 个双三角胞元; (c), (d) 一根杆件被双三角胞元替代; (e), (f) 双三角胞元缩放

Figure 12 (Color online) Stationary node method for lattice composite structures based on dual-triangular cells. (a) Planar triangular lattice; (b) planar triangular lattice can be decomposed into three dual-triangle cells; (c), (d) a strut is replaced by a dual-triangle cell; (e), (f) scaling of the dual-triangle cell

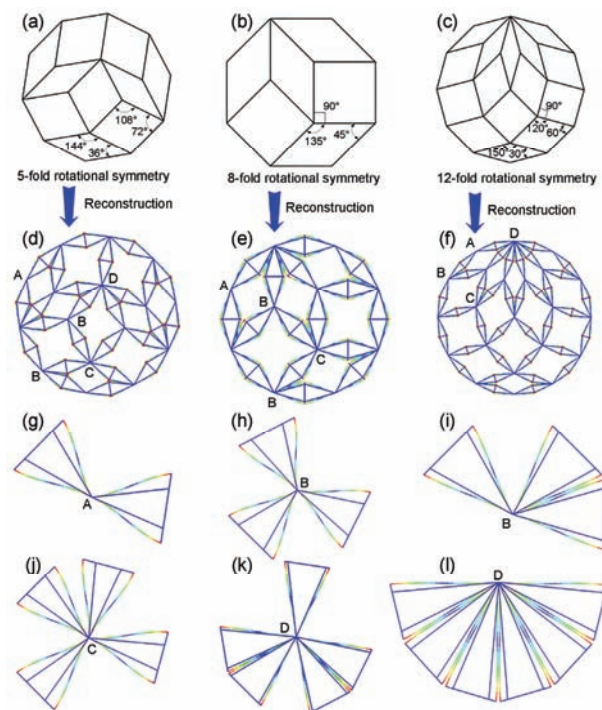


图 13 (网络版彩色)采用不动点法设计的非周期准晶结构可实现零膨胀^[61]. (a) 5 重旋转对称彭罗斯点阵; (b) 8 重旋转对称彭罗斯点阵; (c) 12 重旋转对称彭罗斯点阵; (d)~(f) 重构后新点阵的热膨胀; (g)~(l) 不同的不动点

Figure 13 (Color online) Zero thermal expansion of the aperiodic quasicrystal lattices reconstructed by the stationary node method^[61]. (a) Penrose 5; (b) penrose 8; (c) penrose 12; (d)~(f) thermal expansion of the new lattices after reconstruction; (g)~(l) different kinds of stationary nodes

参考文献

- 1 Grima J N, Oliveri L, Ellul B, et al. Adjustable and negative thermal expansion from multilayered systems. *Phys Status Solidi-Rapid Res Lett*, 2010, 4: 133–135
- 2 Monroe J A, Gehring D, Karaman I, et al. Tailored thermal expansion alloys. *Acta Mater*, 2016, 102: 333–341
- 3 Chen Y X, Yang D H, Cui X Q. Theoretical and experimental study on the triangular structures with zero thermal expansion coefficient (in Chinese). *Mach Des Res*, 2007, 23: 51–54 [陈应秀, 杨德华, 崔向群. 零热膨胀系数三角形结构的理论与实验研究. *机械设计与研究*, 2007, 23: 51–54]
- 4 Takenaka K. Negative thermal expansion materials: Technological key for control of thermal expansion. *Sci Technol Adv Mater*, 2012, 13: 013001
- 5 Morena L, James K, Beck J. An introduction to the RADARSAT-2 mission. *Canadian J Remote Sens*, 2004, 30: 221–234
- 6 Ma J, Zhang H Y, Yan L, et al. Thermal-mechanical optimizing analysis on multi-scale numerical model for composite structure of satellite (in Chinese). *Chin Space Sci Technol*, 2015, 35: 30–36 [马健, 张宏宇, 闫亮, 等. 卫星桁架结构跨尺度热-力耦合优化设计与分析. *中国空间科学技术*, 2015, 35: 30–36]
- 7 Lutz J, Allen D, Haisler W. Finite-element model for the thermoelastic analysis of large composite space structures. *J Spacecraft Rockets*, 1987, 24: 430–436
- 8 Cui E J. Research statutes, development trends and key technical problems of near space flying vehicles (in Chinese). *Adv Mech*, 2009, 39: 658–673 [崔尔杰. 近空间飞行器研究发展现状及关键技术问题. *力学进展*, 2009, 39: 658–673]
- 9 Song X, Sun Z, Huang Q, et al. Adjustable zero thermal expansion in antiperovskite manganese nitride. *Adv Mater*, 2011, 23: 4690–4694
- 10 Chen J, Hu L, Deng J, et al. Negative thermal expansion in functional materials: controllable thermal expansion by chemical modifications. *Chem Soc Rev*, 2015, 44: 3522–3567
- 11 Mary T, Evans J, Vogt T, et al. Negative thermal expansion from 0.3 to 1050 Kelvin in ZrW_2O_8 . *Science*, 1996, 272: 90
- 12 Heine V, Welche P R, Dove M T. Geometrical origin and theory of negative thermal expansion in framework structures. *J Am Ceram Soc*, 1999, 82: 1793–1802
- 13 Evans J, Mary T, Sleight A. Negative thermal expansion in $\text{Sc}_2(\text{WO}_4)_3$. *J Solid State Chem*, 1998, 137: 148–160
- 14 Goodwin A L, Calleja M, Conterio M J, et al. Colossal positive and negative thermal expansion in the framework material $\text{Ag}_3[\text{Co}(\text{CN})_6]$. *Science*, 2008, 319: 794–797
- 15 Lightfoot P, Woodcock D A, Maple M J, et al. The widespread occurrence of negative thermal expansion in zeolites Basis of a presentation given at Materials Discussion. *J Mater Chem*, 2001, 11: 212–216
- 16 Miller W, Smith C W, Mackenzie D S, et al. Negative thermal expansion: A review. *J Mater Sci*, 2009, 44: 5441–5451
- 17 Mueller V, Jäger L, Beige H, et al. Thermal expansion in the Burns-phase of barium titanate stannate. *Solid State Commun*, 2004, 129: 757–760
- 18 Entel P, Hoffmann E, Mohn P, et al. First-principles calculations of the instability leading to the Invar effect. *Phys Rev B*, 1993, 47: 8706
- 19 Kelly A. Controlling thermal expansion to obtain negative expansivity using laminated composites. *Compos Sci Technol*, 2005, 65: 47–59
- 20 Kelly A, Stearn R, McCartney L. Composite materials of controlled thermal expansion. *Compos Sci Technol*, 2006, 66: 154–159
- 21 Landert M, Kelly A, Stearn R J. Negative thermal expansion of laminates. *J Mater Sci*, 2004, 39: 3563–3567
- 22 Ito T, Suganuma T, Wakashima K. A micromechanics-based analysis for tailoring glass-fiber-reinforced thermoplastic laminates with near-zero coefficients of thermal expansion. *Compos Sci Technol*, 2000, 60: 1851–1861
- 23 McCartney L N, Kelly A. Effective thermal and elastic properties of plus theta-/theta (s) laminates. *Compos Sci Technol*, 2007, 67: 646–661
- 24 Nadeau J C, Ferrari M. Effective thermal expansion of heterogeneous materials with application to low temperature environments. *Mech Mater*, 2004, 36: 201–214
- 25 Wakashima K, Suganuma T, Ito T. Use of glass fibers in tailoring laminated composites with directionally negative and near-zero coefficients of thermal expansion. *Adv Compos Mater*, 2001, 10: 329–338
- 26 Karadeniz Z H, Kumlutas D. A numerical study on the coefficients of thermal expansion of fiber reinforced composite materials. *Compos Struct*, 2007, 78: 1–10
- 27 Kim R Y, Crasto A S, Schoeppner G A. Dimensional stability of composite in a space thermal environment. *Compos Sci Technol*, 2000, 60: 2601–2608

- 28 Rangarajan A, D'Mello R J, Sundararaghayan V, et al. Minimization of thermal expansion of symmetric, balanced, angle ply laminates by optimization of fiber path configurations. *Compos Sci Technol*, 2011, 71: 1105–1109
- 29 Praveen R S, Jacob S, Murthy C R L, et al. Hybridization of carbon-glass epoxy composites: An approach to achieve low coefficient of thermal expansion at cryogenic temperatures. *Cryogenics*, 2011, 51: 95–104
- 30 Verdon C, Dunand D. High-temperature reactivity in the ZrW_2O_8 -Cu system. *Scr Mater*, 1997, 36: 1075–1080
- 31 Holzer H, Dunand D C. Phase transformation and thermal expansion of Cu/ ZrW_2O_8 metal matrix composites. *J Mater Res*, 1999, 14: 780–789
- 32 Wang X, Zhang J, Zhang Y, et al. Synthesis and thermal expansion of 4J36/ ZrW_2O_8 composites. *Rare Metal*, 2010, 29: 371–375
- 33 Liu X S, Cheng F X, Wang J Q, et al. The control of thermal expansion and impedance of $\text{Al-Zr}_2(\text{WO}_4)(\text{PO}_4)_2$ nano-cermets for near-zero-strain Al alloy and fine electrical components. *J Alloy Comp*, 2013, 553: 1–7
- 34 Wu Y, Wang M, Chen Z, et al. The effect of phase transformation on the thermal expansion property in Al/ ZrW_2O_8 composites. *J Mater Sci*, 2013, 48: 2928–2933
- 35 Sun L, Kwon P. $\text{ZrW}_2\text{O}_8/\text{ZrO}_2$ composites by *in situ* synthesis of ZrO_2+WO_3 : Processing, coefficient of thermal expansion, and theoretical model prediction. *Mater Sci Eng A*, 2009, 527: 93–97
- 36 Lommens P, Meyer C D, Bruneel E, et al. Synthesis and thermal expansion of $\text{ZrO}_2/\text{ZrW}_2\text{O}_8$ composites. *J Eur Ceram Soc*, 2005, 25: 3605–3610
- 37 Sullivan L M, Lukehart C M. Zirconium tungstate (ZrW_2O_8)/polyimide nanocomposites exhibiting reduced coefficient of thermal expansion. *Chem Mater*, 2005, 17: 2136–2141
- 38 Tani J I, Kimura H, Hirota K, et al. Thermal expansion and mechanical properties of phenolic resin/ ZrW_2O_8 composites. *J Appl Polym Sci*, 2007, 106: 3343–3347
- 39 Lind C, Coleman M R, Kozy L C, et al. Zirconium tungstate/polymer nanocomposites: Challenges and opportunities. *Phys Status Solid B-Basic Solid State Phys*, 2011, 248: 123–129
- 40 Ding L, Wang C, Na Y, et al. Preparation and near zero thermal expansion property of $\text{Mn}_3\text{Cu}_{0.5}\text{A}_{0.5}\text{N}$ (A = Ni, Sn)/Cu composites. *Scr Mater*, 2011, 65: 687–690
- 41 Yan J, Sun Y, Wang C, et al. Study of structure of $\text{Mn}_3\text{Cu}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}\text{N}$ /Cu composite with nearly zero thermal expansion behavior around room temperature. *Scr Mater*, 2014, 84-85: 19–22
- 42 Liu Q Q, Cheng X N, Yang J. Development of low thermal expansion $\text{Sc}_2(\text{WO}_4)_3$ containing composites. *Mater Technol*, 2012, 27: 388–392
- 43 Das S, Das S, Das K. Synthesis and thermal behavior of Cu/ $\text{Y}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$ composite. *Ceram Int*, 2014, 40: 6465–6472
- 44 Wu Y, Wang M L, Chen Z, et al. The effect of phase transformation on the thermal expansion property in Al/ ZrW_2O_8 composites. *J Mater Sci*, 2013, 48: 2928–2933
- 45 Sigmund O, Torquato S. Design of materials with extreme thermal expansion using a three-phase topology optimization method. *J Mech Phy Solid*, 1997, 45: 1037–1067
- 46 Sigmund O, Torquato S. Composites with extremal thermal expansion coefficients. *Appl Phys Lett*, 1996, 69: 3203
- 47 Liu S T, Cao X F. Design optimization of material with zero thermal expansion coefficients and design verification with numerically simulated experiments (in Chinese). *Acta Mater Compos Sin*, 2005, 22: 126–132 [刘书田, 曹先凡. 零膨胀材料设计与模拟验证. *复合材料学报*, 2005, 22: 126–132]
- 48 Oruganti R K, Ghosh A K, Mazumder J. Thermal expansion behavior in fabricated cellular structures. *Mater Sci Eng A*, 2004, 371: 24–34
- 49 Wang B, Yan J, Cheng G D. Optimal structure design with low thermal directional expansion and high stiffness. *Eng Optimiz*, 2011, 43: 581–595
- 50 Yan J, Deng J D, Cheng G D. Multi geometrical scale optimization for porous structure and material with multi-objective of structural compliance and thermal deformation (in Chinese). *Chin J Solid Mech*, 2011, 32: 119–132 [阎军, 邓佳东, 程耿东. 基于柔顺性与热变形双目标的多孔材料与结构几何多尺度优化设计. *固体力学学报*, 2011, 32: 119–132]
- 51 Lakes R. Cellular solid structures with unbounded thermal expansion. *J Mater Sci Lett*, 1996, 15: 475–477
- 52 Lakes R. Cellular solids with tunable positive or negative thermal expansion of unbounded magnitude. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 221905
- 53 Timoshenko S. Analysis of bi-metal thermostats. *J Opt Soc Am Rev Sci Instrum*, 1925, 11: 233–255
- 54 Lehman J, Lakes R. Stiff lattices with zero thermal expansion and enhanced stiffness via rib cross section optimization. *Int J Mech Mater Des*, 2013, 9: 213–225
- 55 Jefferson G, Parthasarathy T A, Kerans R J. Tailorable thermal expansion hybrid structures. *Int J Solid Struct*, 2009, 46: 2372–2387
- 56 Lim T C. Anisotropic and negative thermal expansion behavior in a cellular microstructure. *J Mater Sci*, 2005, 40: 3275–3277
- 57 Miller W, Mackenzie D, Smith C, et al. A generalised scale-independent mechanism for tailoring of thermal expansivity: Positive and negative. *Mech Mater*, 2008, 40: 351–361

- 58 Grima J N, Gatt R, Ellul B. A finite element analysis on the potential for negative thermal expansion and negative compressibility of triangular building blocks. *J Chin Ceram Soc*, 2009, 37: 743–748
- 59 Grima J N, Farrugia P S, Gatt R, et al. A system with adjustable positive or negative thermal expansion. *Proc R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 2007, 463: 1585–1596
- 60 Steeves C A, Santos S L, He M, et al. Concepts for structurally robust materials that combine low thermal expansion with high stiffness. *J Mech Phys Solid*, 2007, 55: 1803–1822
- 61 Wei K, Chen H, Pei Y, et al. Planar lattices with tailorable coefficient of thermal expansion and high stiffness based on dual-material triangle unit. *J Mech Phys Solid*, 2016, 86: 173–191
- 62 Steeves C A, Mercer C, Antinucci E, et al. Experimental investigation of the thermal properties of tailored expansion lattices. *Int J Mech Mater Des*, 2009, 5: 195–202
- 63 Gdoutos E, Shapiro A A, Daraio C. Thin and thermally stable periodic metastructures. *Exp Mech*, 2013, 53: 1735–1742
- 64 Rhein R K, Novak M D, Levi C G, et al. Bimetallic low thermal-expansion panels of Co-base and suicide-coated Nb-base alloys for high-temperature structural applications. *Mater Sci Eng A*, 2011, 528: 3973–3980
- 65 Yamamoto N, Gdoutos E, Toda R, et al. Thin films with ultra-low thermal expansion. *Adv Mater*, 2014, 26: 3076–3080
- 66 Berger J, Mercer C, McMeeking R M, et al. The design of bonded bimaterial lattices that combine low thermal expansion with high stiffness. *J Am Ceram Soc*, 2011, 94: 42–54
- 67 Palumbo N M A, Smith C W, Miller W, et al. Near-zero thermal expansivity 2-D lattice structures: Performance in terms of mass and mechanical properties. *Acta Mater*, 2011, 59: 2392–2403
- 68 Steeves C A, Evans A G. Optimization of thermal protection systems utilizing sandwich structures with low coefficient of thermal expansion lattice hot faces. *J Am Ceram Soc*, 2011, 94: 55–61
- 69 Steeves C A, He M, Maxwell P T, et al. Design of a robust, multifunctional thermal protection system incorporating zero expansion lattices. *Am Soc Mech Eng, New York*, 2008, doi: 10.1115/IMECE2007-42435
- 70 Toropova M M, Steeves C A. Bimaterial lattices with anisotropic thermal expansion. *J Mech Mater Struct*, 2014, 9: 227–244
- 71 Toropova M M, Steeves C A. Adaptive bimaterial lattices to mitigate thermal expansion mismatch stresses in satellite structures. *Acta Astron*, 2015, 113: 132–141

Summary for “轻质复合材料及结构热膨胀调控设计研究进展”

Development of designing lightweight composites and structures for tailorable thermal expansion

WEI Kai^{1,2} & PEI YongMao^{2*}

¹ Department of Engineering Mechanics, School of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

² Department of Mechanics, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding author, E-mail: peiym@pku.edu.cn

Thermal expansion coefficient is an important parameter of thermal physical properties. Materials with zero thermal expansion (ZTE) are urgently needed in engineering applications, particularly in aerospace, precision instruments, and civil engineering, where the control of thermally induced expansion and stress over a wide range of temperatures is of significance. On the other hand, thermal expansion compensation requires materials to possess negative thermal expansion (NTE) and even a desirable positive thermal expansion (PTE). For example, thermal expansion modulation can be achieved via composites with an appropriate ratio of NTE inclusions and PTE substrates. In general, engineering applications have a serious need for materials and structures with tailorable CTEs. Hence, development of material with tailorable thermal expansion is of important scientific significance and engineering applications.

At present, the available range of CTE in engineering materials is quite narrow. To obtain wide range of CTE, most of current researches are mainly concentrated on bulk materials and composites. Specifically, few bulk materials with low and negative CTEs have been reported. FeNi-based Invar alloysexhibit low CTEs because of the magneto-volume effect which, however, only exists under the Curie temperature (about 100°C). A family of ceramics with isotropic NTE and metal oxides with anisotropic NTEs, has been widely studied. Unfortunately, the inherent brittleness and low fracture toughness of the NTE ceramics restrict their usage in load-bearing applications. Fiber-reinforced composites are capable of providing tailorable CTEs because some fibers, such as carbon and graphite fibers, possess negative axial CTEs. However, largely different CTEs between the fiber and the matrix always result in matrix cracking under large temperature variation. Besides, through topology optimization of the three-phase composites, ZTE and the maximum uniaxial/biaxial stiffness characteristics can be obtained. However, the optimized geometries are still too complex for practical manufacture and engineering applications.

It is important to integrate tailorable CTE with lightweight and robust mechanical properties for the materials. Lightweight composites attract intensive studies by virtue of their low density, excellent mechanical properties as well as tailorable thermal expansion coefficient. This paper firstly summarizes the significant engineering applications of thermal expansion controlling as well as the bulk materials with low and negative thermal expansion. Moreover, research achievements of the laminate, particle reinforced and topologically optimal composites with tailorable thermal expansion are detailly introduced. Finally, we present the latest research progress including geometry design methods, mechanisms, fabrication process and experimental characterization of tailorable thermal expansion for lightweight lattice composites. The design of lattice materials which are assembled through dual-material members, and honeycomb-like hybrid lattices which are composed of inner triangle and outside honeycomb initiates the macro scale lightweight lattice composites for tailorable CTE. However, the lattice composites with bending-dominated members display less stiffness compared with stretch-dominated lattices. Moreover, the complicated geometrical connections of the members lead to manufacture complexity. Triangle lattice composite exhibits tailorable CTE and are used as the basic unit to construct other lattice configurations such as the near zero thermal expansion lattice structures. Thus, numerous studies find the planar lattices and structures design based on this unit. With the development of advanced manufacturing technology, the study of the lightweight lattice composites will be promoted more deeply.

composite, tailorable thermal expansion, lattice structure, optimal design, lightweight

doi: 10.1360/N972016-00630