

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.12.008

基于晶界强化的多晶体点阵超材料设计与 耐撞性研究*

罗耿, 肖尧之, 薛凯峰, 陈轶嵩
(长安大学汽车学院, 西安 710016)

[摘要] 点阵结构力学超材料由于其良好的力学特性及耐撞性,广泛地应用于各类防护结构。传统点阵材料多为周期性排布的规则多孔材料,受金属材料微观晶体结构启发,本文在点阵材料的设计中引入了随机的晶界结构,提出并采用3D打印技术制备了多晶体点阵材料试件,进一步地,基于经试验验证的有限元模型开展了其耐撞性研究。研究表明:与单晶体点阵材料相比,当晶格角度相同时,多晶体点阵材料的比吸能提升较大,尤其在 30° 角度下提升了143%;多晶体点阵材料的晶粒尺寸、晶粒内晶格角度、晶粒随机度均会影响其耐撞性,当晶粒变小时,材料的吸能过程会更加平稳,但由于边界效应的影响,晶粒过小反而会加剧吸能过程中的波动; 45° 晶格角度与 $30^\circ/60^\circ$ 随机晶格角度排列下的多晶体点阵材料有着平稳的吸能过程;随机度较大的多晶体点阵材料其能量吸收过程更加平稳。本文提出的新型多晶体点阵力学超材料可以有效地提高传统点阵材料的耐撞性,可为发展新型轻质点阵超材料的设计与优化提供指导。

关键词: 点阵结构; 力学超材料; 晶界强化; 变形模式; 能量吸收

Study on Design and Crashworthiness of Polycrystal Lattice Metamaterials Based on Grain Boundary Strengthening

Luo Geng, Xiao Yaozhi, Xue Kaifeng & Chen Yisong

School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710016

[Abstract] Lattice mechanical metamaterials are widely applied in various protective structures due to their excellent mechanical properties and crashworthiness. Traditional lattice structures are often composed of periodically arranged regular porous materials. Inspired by the microcrystalline structures of metals, in this paper random grain boundary structures are incorporated into the design of lattice materials, then polycrystal lattice material specimens using 3D printing technology are prepared. Furthermore, crashworthiness studies are conducted based on the finite element models validated by experiments. The results show that compared to single crystal lattice materials, polycrystal lattice materials significantly improve specific energy absorption (SEA) at the same lattice angle, especially with 143% increase at the lattice angle of 30° . The crashworthiness of polycrystal lattice materials is influenced by grain size, intragranular lattice angle, and grain randomness. When grain size decreases, the energy absorption process becomes smoother, but excessively small grains may exacerbate fluctuations in the energy absorption process due to boundary effect. Polycrystal lattice materials with a 45° lattice angle and random lattice angles of $30^\circ/60^\circ$ exhibit stable energy absorption processes, and those with higher randomness in grain orientations show an even smoother energy absorption process. The novel polycrystal lattice mechanical metamaterials proposed in this paper can effectively enhance the crashworthiness of traditional lattice materials and provide guidance for the design

* 国家重点研发计划子课题(2021YFB2501202)、国家自然科学基金(52302427)和长安大学中央高校基金(300102223101)资助。

原稿收到日期为2024年07月01日,修改稿收到日期为2024年07月25日。

通信作者:陈轶嵩,教授,工学博士,E-mail:chenyisong_1988@163.com。

and optimization of new lightweight lattice metamaterials.

Keywords: lattice structure; metamaterial; grain boundary strengthening; deformation mode; energy absorption

前言

力学超材料通常指具有周期特性的人工复合材料与结构,通过几何微结构设计获得各类特殊的力学性能,如负泊松比^[1-3]、多稳态^[4-5]、可调刚度^[6-7]等。受金属材料原子结构的启发,点阵结构力学超材料受到了研究人员的重视。点阵材料具有高轻质、高比强度、高比刚度以及良好的能量吸收能力等特点,在航空航天、国防军事、车辆机械等领域已经得到了广泛的关注与应用^[8-9]。

点阵材料包括简单立方(simple cubic, SC)、体心立方(body-centered cubic, BCC)、面心立方(face-centered cubic, FCC)等,及通过对这些单元进行空间复制排列,构成各式二维或三维的衍生拓扑周期阵列^[9-11]。早期的点阵材料,通常只由一种简单单元规则堆叠组成,这样的设计虽然能够获得较高的比强度,但在压缩时会呈现逐层压溃的变形模式,导致了应力应变曲线出现较大的振荡。近年来得益于增材制造的快速发展^[12-13],点阵材料的构型设计也逐渐复杂化,出现了一些新型拓扑构型的点阵材料,研究人员试图通过对基础单元进行设计,来提升点阵材料的耐撞性。梁鸿宇等^[14]建立了不同点阵结构内芯的汽车吸能盒有限元模型,发现正六边形点阵结构填充具有稳定且优异的能量吸收能力。Bai等^[15]提出了一种增加BCC节点圆角半径的梯度支撑设计方法,设计得到一种新型的梯度支撑体心立方(graded-strut body-centred cubic, GBCC)单元格,获得了更好的力学性能和抗冲击能力。Zhang等^[16]提出了一种具有可控变形特征和可调力学性能的几何梯度点阵结构,通过组合八位组单元(octet-truss cell, OCT)和SC单元得到的SC-OCT结构并形成了梯度点阵结构。Wang等^[17]受生物材料结构层次化的启发,提出了一种具有内部层次化结构的单胞结构设计,通过将BCC与SC单元缩放组合得到了新型点阵结构,在不同加载方向下比刚度、比吸能和冲击效率均有较大提升。Sun等^[18]通过将内八面体和其弯曲为主的互补结构相结合建立了两种混合三维点阵结构,与具有高刚度但屈服响应波动较大的OCT

单元相比,混合三维点阵结构能够在不显著牺牲刚度和强度的情况下产生相对稳定的屈服后应力平台。Xiao等^[19]从三周期极小表面结构(triply periodic minimal surface, TPMS)出发,通过对变形后的简单立方结构进行变形,并在直角交界处引入了蝴蝶型的设计从而得到了TPMS晶格单元,这种新型的TPMS材料具有较高的强度和能量吸收能力,并拥有稳定的应力平台。

从上述文献中可以发现,目前的对点阵结构力学超材料的研究,主要是从材料的胞元的设计入手,然后对胞元进行阵列,得到规则分布的点阵结构力学超材料。事实上,一般的金属材料皆为多晶体结构,其内部包含了许多不规则的晶粒。对于多晶体金属材料,不同晶粒间晶格角度的变化可以阻碍晶粒的滑移,这种阻碍增强了多晶体的强度^[20]。因此,也有研究人员在进行点阵材料的设计时,引入了晶界的概念,例如,Pham等^[21]通过改变FCC结构胞元角度,结果表明不同胞元角度的点阵结构组合起来有着和金属晶界类似的强化作用。Bian等^[22]将不同角度的SC胞元置于4个象限中排列组合成整体,结果显示具有对称结构(即孪晶界)的试件吸能最高,且对称性越强,吸能效果越好。Song等^[23]受孪晶界强化机制的启发,将倾角变量引入了SC、BCC等单元设计,同样将设计出的各单元代入四象限结构进行组合排列,优化后的SC-BCC晶格结构的各项力学指标皆有提升。Liu等^[24]将FCC结构进行各角度旋转后设计装配至4亚晶至64亚晶中,探讨了亚晶界中剪切带活动的机制。以上有关点阵材料晶界强化机制的研究大多集中在规则的六面体晶粒。实际上,在真实的多晶体结构中,晶粒是不规则的,目前仍然没有类似不规则多晶体的点阵材料的设计与耐撞性研究。

综上,本文在点阵材料的设计中引入了随机的晶界结构,构建了其有限元模型,并通过3D打印技术制备试件,开展了准静态压缩试验验证了有限元模型。采用数值仿真的手段研究了晶界对多晶体点阵材料的强化机制,探究各项细观结构参数对多晶体点阵结构力学超材料吸能特性的影响,为力学超材料的设计与优化提供指导。

1 模型建立与验证

1.1 几何模型

多晶体结构中,各个晶粒间的界面被称为晶界,如图1(a)所示,其示意图如图1(b)所示。将图1(b)中的晶界按照直线近似处理,并提取出来,如图1(c)所示。可以发现,各个晶粒均为不规则的多边形,与Voronoi图形一致。

Voronoi图是由空间内一系列相邻点连线的垂直平分线组成的连续多边形,其特点是两个胞元公共边上的任一点到其形核点的距离相等。2D Voronoi图形形核点分布的随机度^[25]以 R 表示:

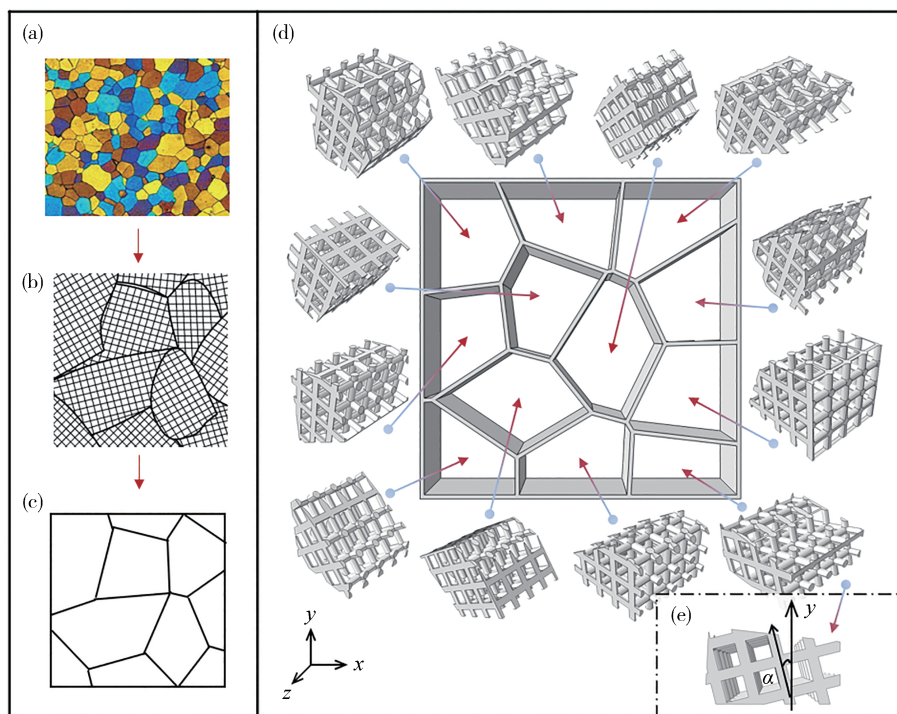
$$R = 1 - \frac{\delta}{\delta_0} \quad (1)$$

$$\delta_0 = \sqrt{2S_0/\sqrt{3}N} \quad (2)$$

式中: δ 是两形核点之间的最小距离; δ_0 表示给定面积为 S_0 的区域填充 N 个正六边形时,六边形形核点间的最小距离。

受多晶体结构启发,本文基于Voronoi图形,设计了一种新型多晶体点阵结构力学超材料,如图1(d)所示,该材料由不同晶粒间的晶界与晶粒内部的SC点阵结构组成。晶粒内的SC晶格角度 α 如图1(e)所示。

多晶体点阵材料的模型宽度(x 方向)、长度(y 方向)、厚度(z 方向)尺寸分别为61.6、61.6、20 mm,其中晶界厚度为0.8 mm;SC单元的长度为5 mm,半径为0.8 mm。本文建立了不同晶粒数量、晶格角度、随机度等细观结构参数的多晶体模型,采用N12D45R06代表晶粒数量为12、晶格角度为 45° 、随机度为0.6的多晶体点阵结构模型,其余模型的采用类似命名规则。



(a)工业纯铁在500倍显微镜下的铁素体;(b)金属多晶体结构示意图;(c)直线处理后的晶界示意图;
(d)新型多晶体点阵结构力学超材料模型;(e)晶格角度 α

图1 新型多晶体点阵结构力学超材料建模过程

1.2 有限元模型

通过有限元分析软件Abaqus/Explicit开展新型多晶体点阵材料的准静态单轴压缩仿真。有限元模型如图2所示。为研究多晶体材料中晶界的强化机制,加载方向设置为沿 y 轴垂直向下。多晶体点阵

材料的基体材料为聚乳酸(poly-lactic acid, PLA),根据准静态拉伸试验^[26]计算得到基体材料PLA的弹性模量为1.905 GPa、泊松比为0.3。加载板和支撑板均采用R3D4离散刚体,多晶体模型中的晶界采用C3D8I实体单元,SC晶格采用B21梁单元。图3给出

了不同网格尺寸下有限元模型的载荷位移曲线,根据不同网格尺寸的收敛情况,综合考虑计算时长,将网格尺寸设置为0.5 mm。单轴压缩试验中材料并未出现明显失效,故未设置失效模型。多晶体模型和加载板、固定板以及自身之间皆采用摩擦因数为0.2的通用接触^[26-27]。为防止加载过程中模型发生面外倾倒,对加载板除加载方向之外的自由度均进行约束,施加1 mm/s的恒定速度载荷,支撑板约束所有自由度。

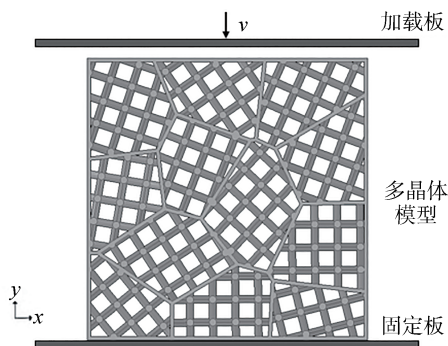


图2 准静态单轴压缩有限元模型

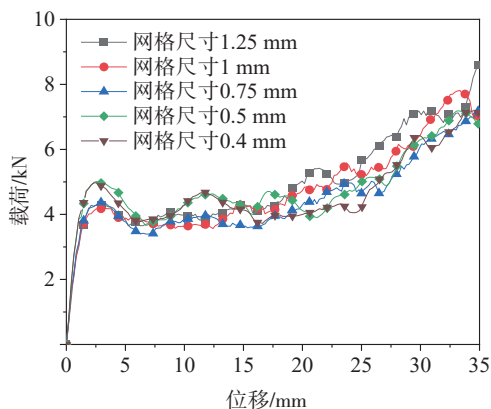
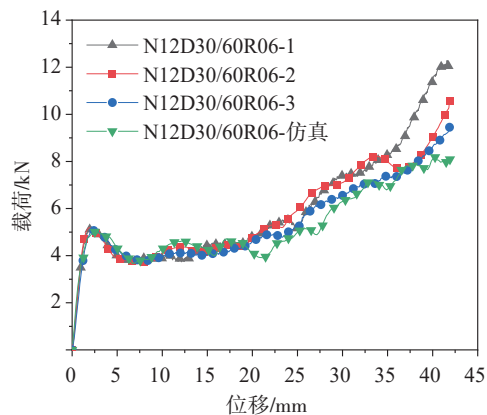


图3 不同网格尺寸下有限元模型的载荷位移曲线

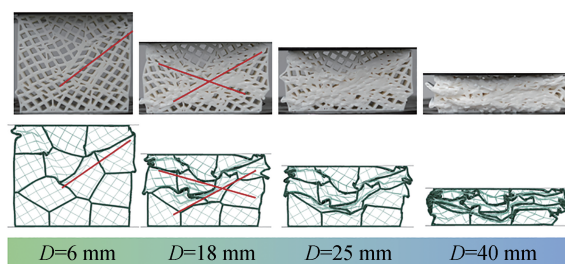
1.3 有限元模型验证

为验证有限元模型的准确性,本文采用3D打印技术制备了N12D30/60R06多晶体点阵材料试件,并开展单轴压缩试验。试验采用SANS CMT-5205万能试验机,上压头加载速度设定为3 mm/min。采用数码相机对试件的变形过程进行记录,试验数据的采集由万能试验机上的传感器记录完成。试件进行了3组重复试验以确保试验结果具有可靠性和准确性。图4给出了N12D30/60R06试件在准静态单轴压缩的仿真与重复性试验结果的对比,可以发现试验与仿真的载荷位移曲线基本一致,变形模式吻合

良好。因此认为本文所建立的有限元模型可以模拟多晶体点阵材料的真实力学响应。



(a) 载荷位移曲线对比



(b) 变形模式对比

图4 N12D30/60R06试验与仿真结果

考虑到相同随机度下,即使其余结构参数一致,生成的细观构型也会不同,本文以随机度为0.6构建了3种模型,分别标号为N12D45R06-1、N12D45R06-2、N12D45R06-3。3种模型的载荷位移曲线如图5所示。结果表明,3种模型的载荷位移曲线具有良好的 consistency。可以认为,具有相同结构参数的模型,其力学响应基本一致,在作者前期的研

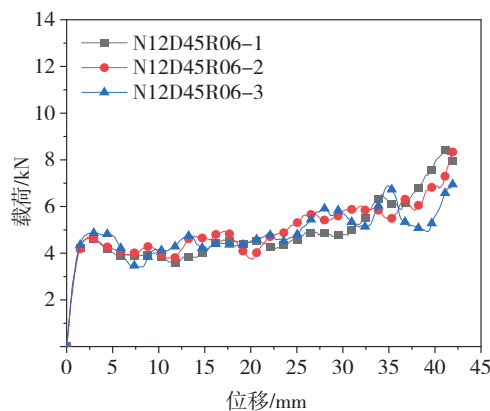


图5 同一参数下各模型的载荷位移曲线

究工作中也有类似的发现^[26]。

2 单晶体材料与多晶体材料耐撞性对比研究

2.1 耐撞性评价指标

为了较为全面地分析多晶体点阵材料的耐撞性能,采用如下指标评价新型多晶体点阵结构力学超材料的耐撞性。

(1)总吸能(energy absorption, EA)

$$EA = \int_0^{\delta} F(\delta) d\theta \quad (3)$$

式中: $F(\delta)$ 为压溃载荷; δ 为有效压溃距离。总吸能应尽可能大。根据ISO 13314—2011,压缩过程中有效压溃距离通常取0-0.5应变^[28],在本文中统一取30 mm位移作为有效压溃距离。

(2)比吸能(specific energy absorption, SEA)

$$SEA = EA/m \quad (4)$$

式中: EA 为总吸能; m 为模型总质量。

(3)初始峰值载荷(initial peak crush force, IPCF)

$$IPCF = F(\delta)_{\max} \quad (5)$$

(4)平均压溃载荷(mean crushing force, MCF)

$$MCF = EA/\delta \quad (6)$$

(5)冲击效率(crush force efficiency, CFE)

$$CFE = MCF/IPCF \quad (7)$$

(6)承载波动系数(undulation of load-carrying capacity, ULC)

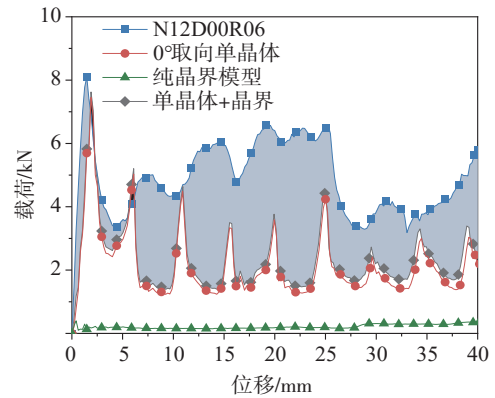
$$ULC = \frac{\int_0^{\delta} |F(\delta) - MCF| d\delta}{EA} \quad (8)$$

2.2 耐撞性对比研究

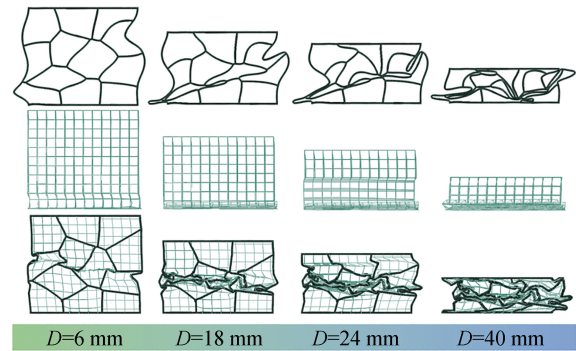
为了探究新型多晶体点阵材料的变形模式与强化机制,本文建立了不同结构参数的多晶体点阵材料有限元模型,以及相同尺寸和晶格角度的SC单晶体有限元模型,并开展了单轴压缩仿真。

图6给出了0°晶格角度下的SC单晶体模型与N12D00R06模型的载荷位移曲线和变形模式对比。0°晶格角度下单晶体模型的变形模式表现为先产生一个平行的横向坍塌带,再层层逐渐坍塌,且坍塌位置没有规律,在载荷位移曲线中可以明显观察到曲线随着每一次坍塌带的形成产生了较大的波动。N12D00R06在压缩时先是在中部形成了接近平行的坍塌带,但由于晶界作用的存在,坍塌带表现与单晶体模型并不相同,坍塌带的上下部分出现了错位,

这也导致坍塌带附近的SC单元出现了变形。由于变形产生的角度,弯曲的SC单元自身强度开始降低,并随着压缩的进行逐渐向坍塌带靠拢,整体可以看成坍塌带在逐渐纵向生长。当载荷压缩至24 mm左右时,中部晶粒基本压溃至密实,上下两层晶粒并未产生过多变形SC单元,所以此时在模型上半部分重新形成了一个新的坍塌带,导致了载荷位移曲线的大幅下降。



(a) 载荷位移曲线

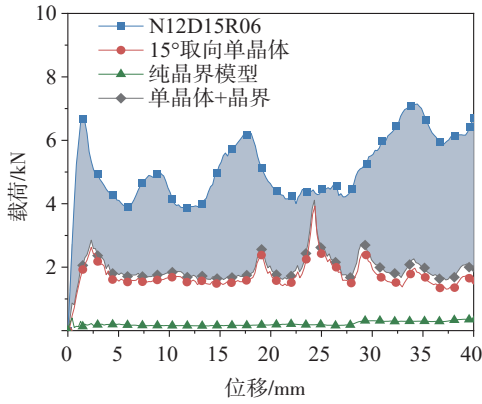


(b) 变形模式对比

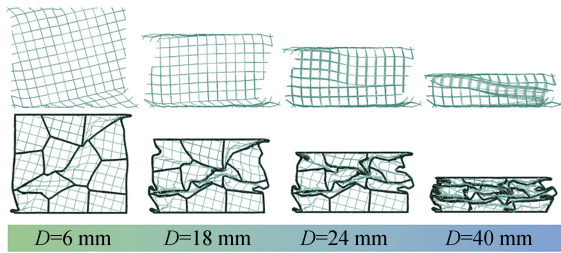
图6 0°晶格角度下单晶体与多晶体点阵材料载荷位移曲线和变形模式对比

图7为15°晶格角度下的SC单晶体模型与N12D15R06模型的载荷位移曲线和变形模式。15°晶格角度下的单晶体模型由于上下两端的SC单元不完整,承载能力较差,随着载荷的作用上下两端率先出现压溃,当不规则的单元坍塌完后,模型晶格角度接近0°,在之后的压缩中也表现出与0°晶格角度类似的逐层压溃的变形模式。N12D15R06的变形模式与N12D00R06相比产生了较大变化,由于晶界整体偏向于对角线方向生长,且内部SC单元晶格角度亦与中轴线偏离15°,所以在压缩的一开始,模型产生一条对角线方向坍塌带,模型左上角部分很快接

近密实。当模型压缩至9 mm时,模型中部产生了一条与水平线偏离15°坍塌带,这与SC单元排列方向相对应,此时模型以接近“X”形坍塌带进行压缩。当压缩至18 mm左右时,模型整体载荷接近到峰值载荷,模型右上部分尚未变形的SC单元产生新的坍塌。



(a) 载荷位移曲线

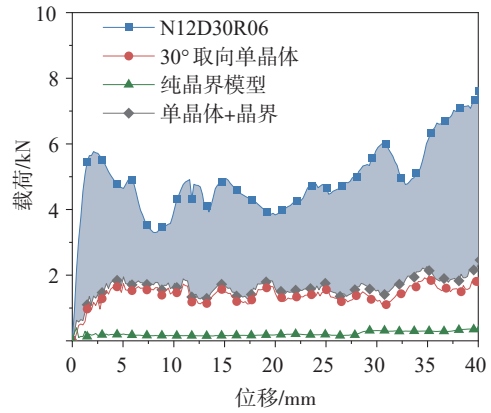


(b) 变形模式对比

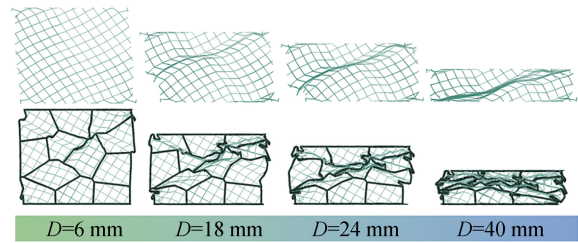
图7 15°晶格角度下单晶体与多晶体点阵材料载荷位移曲线和变形模式对比

图8为30°晶格角度下的SC单晶体模型与N12D15R06模型的载荷位移曲线和变形模式。在30°晶格角度下,随着压缩进程,单晶体模型在与水平夹角30°方向出现了坍塌带,在坍塌带逐渐密实后,模型并没有像0°排列下产生新的坍塌带,而是30°坍塌带周围的SC单元逐渐向坍塌带压缩靠拢,模型表现为整体的压缩变形,这也使得整体变形过程更加平稳。N12D30R06的变形相比前两种多晶体模型也稳定一些,模型先是在上部SC单元薄弱区域形成了一条“U”形坍塌带,压缩至12 mm时上部接近密实,此时沿着对角线方向的SC单元被压缩至接近45°,进而形成了一条新的坍塌带。之后模型沿着对角线坍塌带逐渐密实。

图9所示为45°晶格角度下的单晶体与N12D45R06模型的载荷位移曲线和变形模式对比。与前3种单晶体载荷位移曲线对比可以看到,随着

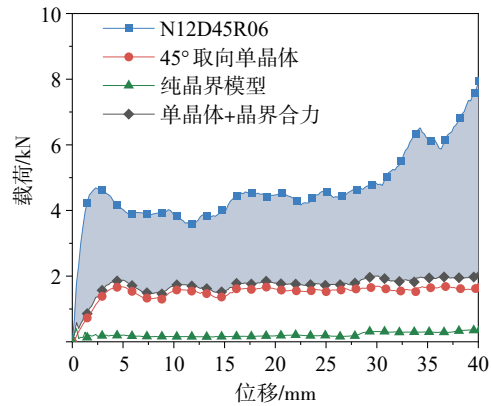


(a) 载荷位移曲线

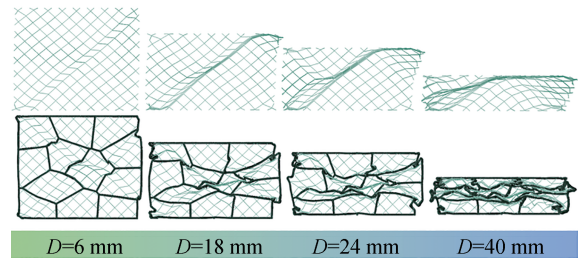


(b) 变形模式对比

图8 30°晶格角度下单晶体与多晶体点阵材料载荷位移曲线和变形模式对比



(a) 载荷位移曲线



(b) 变形模式对比

图9 45°晶格角度下单晶体与多晶体点阵材料载荷位移曲线和变形模式对比

SC 晶格角度的增大,载荷位移曲线整体趋于平滑,这也与各单晶体模型的变形模式相对应。相应的,N12D45R06 也表现出了最平稳的变形过程。在变形过程中,模型在中部偏右的位置形成了一个“X”形坍塌带,中心位于3块晶粒的交界处,之后模型沿着坍塌带平稳地整体压缩变形。在载荷位移曲线中也可以清晰地看到N12D45R06的载荷基本集中在4 000–5 000 N附近,波动较小,表现出平稳的应力平台。

从图9给出的载荷位移曲线可以发现,通过将45°晶格角度的单晶体模型和纯晶界模型的载荷位移曲线相叠加与多晶体模型相比较,引入多晶体设计后模型总体能量吸收能力有了相当程度的提升。表1也给出了不同晶格角度的单晶体与多晶体模型的耐撞性评价指标对比,多晶体设计下模型

SEA提升了近100%,尤其在30°与45°下提升尤其明显,多晶体设计极大提升了SC结构的能量吸收能力。结合N12D45R06模型和单晶体模型的变形过程,观察到在压缩过程中虽然二者都是向着坍塌带整体压溃,但是多晶体模型由于晶界的限制在切向方向只拉伸了28%,相比45°的单晶体模型的33%有了较大下降。由于晶界分割出的晶粒存在,多晶体模型在压缩初期会由几块晶粒一起形成一个较大的坍塌带,这带来了较大的初始峰值载荷,晶粒间的晶界阻碍了坍塌带的扩展,从而避免了变形过度集中;压缩进行到中后期时由于外层晶界的限制模型亦不会产生过大的切向拉伸,从而保证了模型的整体强度。从整体的压缩过程来看,多晶体点阵材料相比单晶体材料有着更加优秀的力学性能。

表1 不同晶格角度的单晶体与多晶体点阵材料的耐撞性评价指标

单晶体	EA/J	SEA/(J·g ⁻¹)	多晶体	EA/J	SEA/(J·g ⁻¹)	EA提升/%	SEA提升/%
0°单晶体	65.99	2.444	N12D00R06	153.54	4.695	132.7	92.1
15°单晶体	53.17	2.179	N12D15R06	140.14	4.273	153.6	96.1
30°单晶体	40.52	1.661	N12D30R06	134.02	4.037	230.8	143.1
45°单晶体	43.72	1.792	N12D45R06	124.96	3.798	185.8	112.0

3 多晶体材料耐撞性影响因素研究

3.1 晶粒尺寸的影响

为了探究晶粒大小对新型多晶体点阵材料耐撞性的影响,本文从减少晶粒数量出发,在相同的随机度0.6下生成不同晶粒数量的多晶体模型,并通过改变SC梁单元直径控制各模型的相对密度一致,生成得到N06D45R06、N09D45R06、N12D45R06、N15D45R06 4种模型,载荷位移曲线和压缩变形过程见图10和图11。如图10所示,即使晶粒大小产生了较大变化,4种模型的变形模式整体上依旧类似,N06D45R06和N15D45R06由于晶界的影响在初期变形生成的是类“U”型和对角线型坍塌带,但随着压缩进程逐渐向“X”型转变,N09D45R06和N12D45R06皆是典型的从中部晶界交点为中心生成类“X”型的坍塌带。从载荷位移曲线可以看到,从N06D45R06到N12D45R06,3条曲线是逐渐平缓的,但是N15D45R06模型的载荷位移曲线相比N12D45R06有了较大波动,这是因为晶粒过小后内部完整的SC单元比例过低产生了明显的边界效应。表2给出了4种模型的EA与承载波动系数ULC。综合来看,晶粒大小越小,模型的吸能过程会更加平

稳,但由于边界效应的影响,这种平稳是有限的。

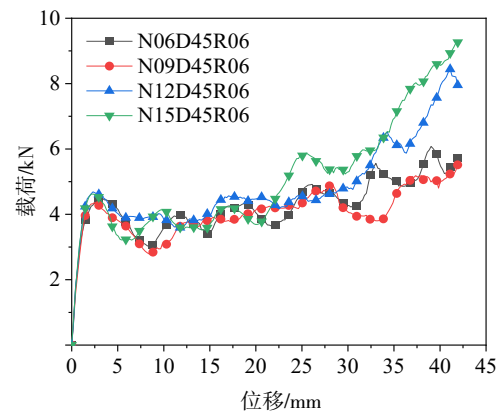


图10 不同晶粒大小模型的载荷位移曲线

表2 不同晶粒大小模型的耐撞性评价指标

多晶体	EA/J	SEA/(J·g ⁻¹)	CFE	ULC
N06D45R06	117.95	3.585	0.878	0.114
N09D45R06	115.27	3.504	0.881	0.119
N12D45R06	124.96	3.798	0.888	0.090
N15D45R06	125.96	3.829	0.908	0.161

3.2 晶粒内晶格角度的影响

结合第2节分析中各模型的载荷位移曲线,发现当晶粒内部为30°和45°时压缩过程中曲线较平

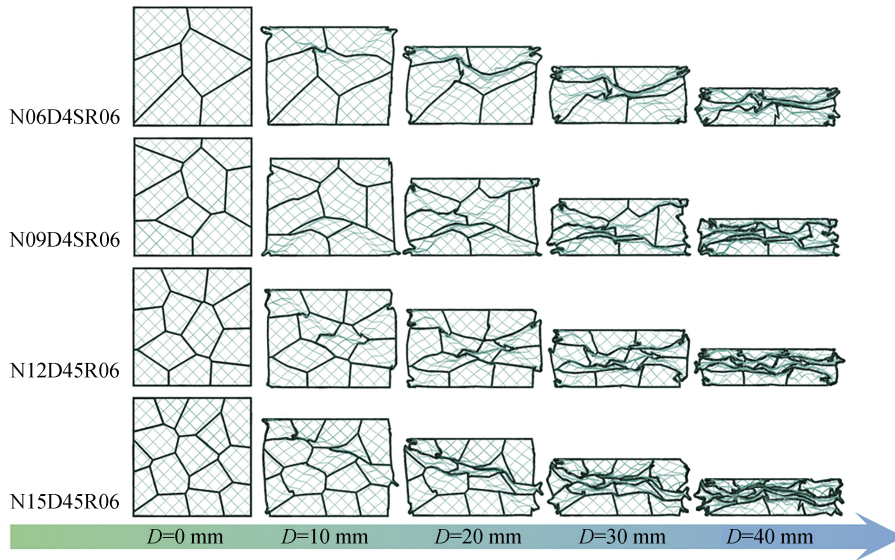


图11 不同晶粒大小模型的变形模式对比

稳。Bian等^[22]发现SC结构在二象限与四象限分布中以30°与60°交错排列时会拥有最好的力学性能。因此,本文提出设计以下几种模型:N12D30/60R06-1(各晶粒内30°与60°随机晶格角度排列)、N12D30/60R06-2(30°与60°左右对称排列)、N12D30/60R06-3(30°与60°四象限对称排列)、N12D30/60R06-4(30°与60°交错排列)。

4种晶格角度排列类型的多晶体模型的载荷位移曲线和变形模式如图12和图13所示。表3给出了各模型的耐撞性指标。在模型质量接近的条件下,交错排列表现出了相对良好的承载能力,随机排列方式下的多晶体模型拥有更低的ULC。更进一步

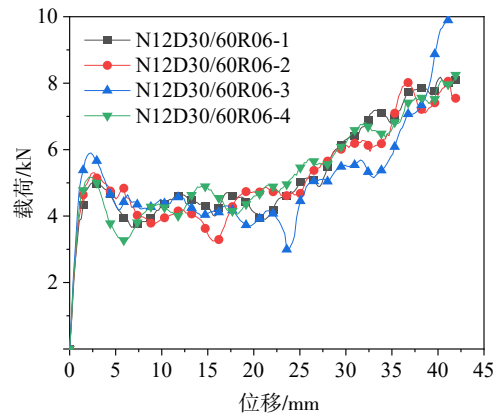


图12 不同晶格角度排列的N12D30/60R06模型的载荷位移曲线

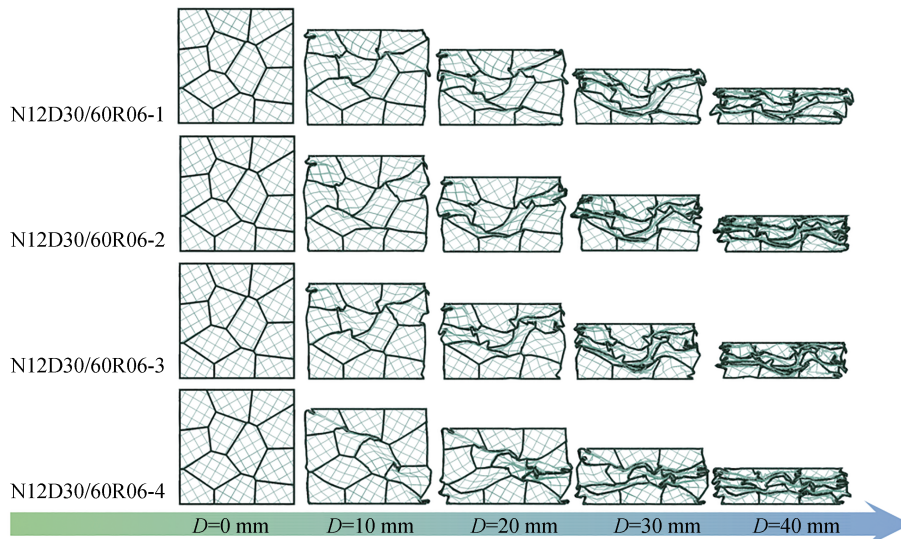


图13 不同晶格角度排列的N12D30/60R06模型的变形模式对比

地,本文设计了3种随机角度排列的多晶体模型,标号为N12DrandR06,晶粒内部的晶格排列角度完全随机。

表3 不同晶格角度排列的N12D30/60R06模型的耐撞性评价指标

多晶体	EA/J	SEA/(J·g ⁻¹)	CFE	ULC
N12D30/60R06-1	133.37	4.029	0.887	0.107
N12D30/60R06-2	133.72	4.004	0.841	0.135
N12D30/60R06-3	131.02	3.935	0.740	0.116
N12D30/60R06-4	136.20	4.140	0.877	0.134

图14给出了3种N12DrandR06与N12D30/60R06-1的载荷位移曲线对比,表4给出了各模型的耐撞性指标。所有晶粒皆选择随机角度后,虽然模型承载能力有提升,但是部分模型出现了压缩过程中应力平台。

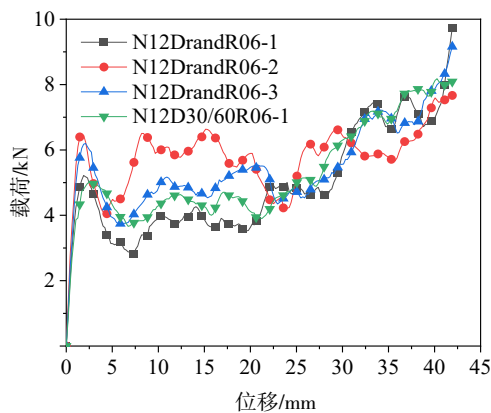


图14 随机晶格角度模型的载荷位移曲线对比

表4 随机晶格角度模型的耐撞性评价指标

多晶体	EA/J	SEA/(J·g ⁻¹)	CFE	ULC
N12DrandR06-1	120.49	3.719	0.770	0.146
N12DrandR06-2	164.85	5.057	0.853	0.133
N12DrandR06-3	143.54	4.403	0.772	0.102
N12D30/60R06-1	133.37	4.029	0.887	0.107

3.3 晶粒随机度的影响

为了探究随机度对新型多晶体点阵材料的影响,本文设计了3种不同随机度的多晶体模型,分别为N15D45R03、N15D45R06和N15D45R09。图15和图16给出了3种模型的载荷位移曲线和变形模式,可以发现随着随机度的降低,载荷位移曲线表现出了较大的波动。模型随机度越低,整体形状越规则,相应的在压缩过程中也会产生更多的不稳定情况,相似的现象也在随机蜂窝材料的研究中出现^[26]。

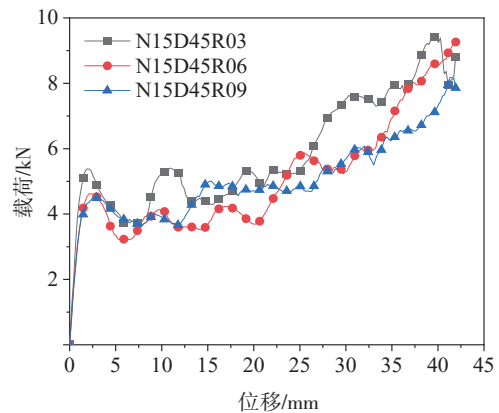


图15 不同随机度下多晶体点阵材料模型的载荷位移曲线对比

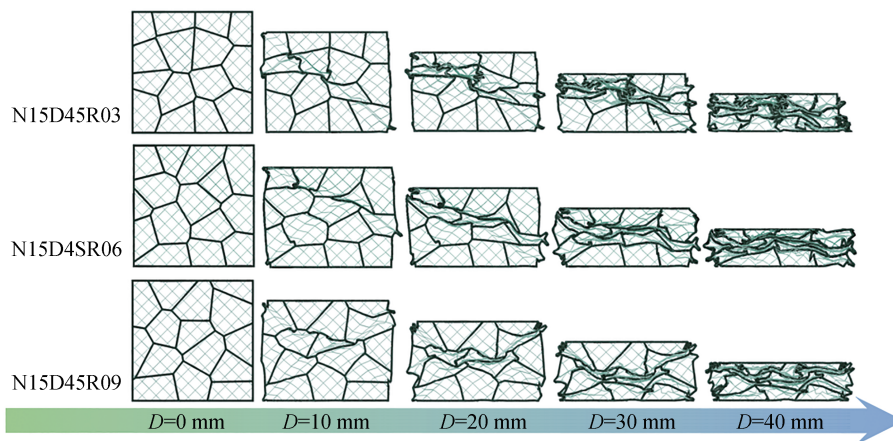


图16 不同随机度下多晶体点阵材料的变形模式对比

4 结论

本文设计并制备了一种新型多晶体点阵结构力学超材料,采用数值仿真的手段研究了晶界对多晶体点阵材料的强化机制,探究各项细观结构参数对多晶体点阵材料吸能特性的影响,具体的研究结论如下:

(1)与单晶体点阵结构相比,相同晶格角度下多晶体点阵材料的SEA有了大幅提升,尤其当晶格角度为 30° 时,SEA提升了近143%,晶界的引入有效地提高了点阵结构的耐撞性。

(2)随机度与相对密度一致时,不同构型的多晶体点阵材料表现出基本一致的力学性能;当晶粒大小缩小时,多晶体点阵材料的吸能过程会更加平稳,但由于边界效应的影响,晶粒过小反而会加剧吸能过程中的波动。

(3)晶格角度为 45° 时,以及晶格角度为 $30^\circ/60^\circ$ 随机排列时,多晶体点阵材料有着平稳的吸能过程;晶格角度完全随机排列,可以带来更大的承载能力,但也会造成吸能过程的波动变大。当随机度较大时,其吸能过程更加平稳。

参考文献

- [1] 任鑫,张相玉,谢亿民. 负泊松比材料和结构的研究进展[J]. 力学学报, 2019, 51(3): 656-689.
REN Xin, ZHANG Xiangyu, XIE Yimin. Research progress in auxetic materials and structures[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(3): 656-689.
- [2] 马芳武,王强,梁鸿宇,等. 梯度负泊松比结构填充吸能盒多工况优化设计[J]. 汽车工程, 2021, 43(5): 754-761.
MA Fangwu, WANG Qiang, LIANG Hongyu, et al. Multi-objective optimization of crash box filled with gradient negative poisson's ratio structure under multiple conditions[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(5): 754-761.
- [3] LIANG H, ZHAO Y, CHEN S, et al. Review of crashworthiness studies on cellular structures[J]. Automotive Innovation, 2023, 6(3): 379-403.
- [4] ZHANG H, WU J, ZHANG Y H, et al. Multistable mechanical metamaterials: a brief review[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 38(1): 1-17.
- [5] 靳明珠,侯秀慧,赵文皓,等. 多层次曲梁多稳态超材料的可重用性研究[J/OL]. 力学学报, 1-18[2024-06-24].
JIN M Z, HOU X H, ZHAO W H, et al. Research on reusable properties of multistable metamaterial of hierarchical curved beams[J/OL]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1-18[2024-06-24].
- [6] WANG Y, CHEN Y, QIN C, et al. Manufacturing and mechanical properties of adjustable stiffness hierarchical orthogrid stiffened cylinders[J]. Polymer Composites, 2024, 45(7): 5305-6317.
- [7] WEI Y, FAN Y, SHEN X, et al. A novel cylindrical mechanical metamaterial: design, fabrication, and compressive properties[C]//Structures. Elsevier, 2024, 63: 106336.
- [8] 任毅,冉威,蒲林,等. SLM成形Ti-6Al-4V层状混合点阵结构的力学性能和吸能特性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(6):118-126.
REN Y, RAN W, PU L, et al. Mechanical properties and energy absorption characteristics of SLM-formed Ti-6Al-4V layered hybrid lattice structure[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2024, 43(6):118-126.
- [9] 黄安坤,温耀杰,张百成,等. 增材制造金属点阵结构性能研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(11):90-101.
HUANG Ankun, WEN Yaojie, ZHANG Baicheng, et al. Research progress on properties of metal lattice structure by additive manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(11):90-101.
- [10] 段晟昱,王潘丁,刘畅,等. 增材制造三维点阵结构设计、优化与性能表征方法研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(14):36-48,57.
DUAN Shengyu, WANG Panding, LIU Chang, et al. Research progress on design, optimization and performance characterization of additive manufactured 3D lattice structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(14):36-48,57.
- [11] 易长炎,柏龙,陈晓红,等. 金属三维点阵结构拓扑构型研究及应用现状综述[J]. 功能材料, 2017, 48(10): 10055-10065.
YI Changyan, BAI Long, CHEN Xiaohong, et al. Review on the metal three-dimensional lattice topology configurations research and application status[J]. Journal of Functional Materials, 2017, 48(10): 10055-10065.
- [12] DAEHN G S, DAEHN K E, KUTTNE O. Environmentally responsible lightweight passenger vehicle design and manufacturing[J]. Automotive Innovation, 2023, 6(3): 300-310.
- [13] HAMED J D, RAMONA J H, ANNA K, et al. Hybrid additive manufacturing of forming tools[J]. Automotive Innovation, 2023, 6(3): 311-323.
- [14] 梁鸿宇,刘百川,马芳武,等. 多工况碰撞载荷下点阵结构填充吸能盒设计策略研究[J]. 汽车工程, 2023, 45(2):293-303.
LIANG Hongyu, LIU Baichuan, MA Fangwu, et al. Research on design strategy of lattice structure filled crash box under multi-angle impact loading[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(2): 293-303.
- [15] BAI L, YI C, CHEN X, et al. Effective design of the graded strut of BCC lattice structure for improving mechanical properties[J]. Materials, 2019, 12(13): 2192.
- [16] ZHANG P, QI D, XUE R, et al. Mechanical design and energy absorption performances of rational gradient lattice metamaterials[J]. Composite Structures, 2021, 277: 114606.

- [17] WANG M, ZHANG J, WANG W, et al. Compression behaviors of the bio-inspired hierarchical lattice structure with improved mechanical properties and energy absorption capacity[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 17: 2755–2771.
- [18] SUN Z P, GUO Y B, SHIM V P W. Characterisation and modeling of additively-manufactured polymeric hybrid lattice structures for energy absorption[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 191: 106101.
- [19] XIAO L, SHI G, FENG G, et al. Large deformation response of a novel triply periodic minimal surface skeletal-based lattice metamaterial with high stiffness and energy absorption[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2024, 296: 112830.
- [20] LI Z, YANG F. Grain rotations during uniaxial deformation of gradient nano-grained metals using crystal plasticity finite element simulations[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2017, 16: 41–48.
- [21] PHAM M S, LIU C, TODD I, et al. Damage-tolerant architected materials inspired by crystal microstructure [J]. *Nature*, 2019, 565(7739): 305–311.
- [22] BIAN Y, LI P, YANG F, et al. Deformation mode and energy absorption of polycrystal-inspired square-cell lattice structures[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2020, 41: 1561–1582.
- [23] SONG K, LI D, LIU T, et al. Crystal-twinning inspired lattice metamaterial for high stiffness, strength, and toughness[J]. *Materials & Design*, 2022, 221: 110916.
- [24] LIU C, LERTTHANASARN J, PHAM M S. The origin of the boundary strengthening in polycrystal-inspired architected materials[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4600.
- [25] LI K, GAO X L, WANG J. Dynamic crushing behavior of honeycomb structures with irregular cell shapes and non-uniform cell wall thickness[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44(14–15): 5003–5026.
- [26] LUO G, CHAI C, CHEN Y, et al. Investigations on the quasi-static/dynamic mechanical properties of 3D printed random honeycombs under in-plane compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 190: 110931.
- [27] FENG G, LI S, XIAO L, et al. Energy absorption performance of honeycombs with curved cell walls under quasi-static compression [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 210: 106746.
- [28] JIANG R, GU Z, ZHANG T, et al. Energy absorption characteristics of a CFRP-Al hybrid thin-walled circular tube under axial crushing[J]. *Aerospace*, 2021, 8(10): 279.

(上接第2153页)

- [10] 刘莹,祝振林,王登峰.基于隐式全参数化技术的动力电池仓轻量化设计[J].*汽车安全与节能学报*,2020,11(2):236–242.
LIU Ying, ZHU Zhenlin, WANG Dengfeng. Lightweight design of power battery compartment based on implicit full parameterization technology [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy Conservation*, 2020, 11 (2): 236–242.
- [11] 谷先广,陈红林,俞陆新,等.精密铸铝件一体化设计及在车身轻量化中的应用[J].*汽车工程*,2024,46(1):179–186.
GU Xianguang, CHEN Honglin, YU Luxin, et al. Integrated design of precision casting aluminum parts and its application in lightweight vehicle body [J]. *Automotive Engineering*, 2024, 46 (1): 179–186.
- [12] 廉玉波,衣本钢,崔营营,等.基于扭转刚度的电池包与车身集成设计研究[J].*汽车工程*,2023,45(4):647–653.
LIAN Yubo, YI Bengang, CUI Yingying, et al. Research on integrated design of battery pack and vehicle body based on torsional stiffness [J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45 (4): 647–653.
- [13] 段利斌,张雨,杜展鹏,等.基于VRB/OW-CFRP混合结构的CTB电池包上盖总成轻量化设计研究[J].*汽车工程*,2024,46(2):290–299.
DUAN Libin, ZHANG Yu, DU Zhanpeng, et al. Research on lightweight design of CTB battery pack cover assembly based on VRB/OW-GGRP hybrid structure [J]. *Automotive Engineering*, 2024, 46 (2): 290–299.
- [14] ZHANG X, WANG D, KONG D, et al. The anti-fatigue light-weight design of heavy tractor frame based on a modified decision method [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022, 65(10).
- [15] 张宗阳,谢双双,王凯,等.基于复杂边界的牵引车架疲劳研究[J].*汽车工程*,2023,45(5):873–879,894.
ZHANG Zongyang, XIE Shuangshuang, WANG Kai, et al. Fatigue study of tractor frame based on complex boundaries [J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45 (5): 873–879, 894.
- [16] MI C, YUAN S, MING R, et al. An energy-based fatigue life estimation and optimization of an electric mining dump truck welded frame [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023, 45(2).
- [17] GU Z, MI C, WANG Y, et al. A-type frame fatigue life estimation of a mining dump truck based on modal stress recovery method [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2012, 26: 89–99.
- [18] 机械产品结构有限元力学分析通用规则:GB/T 33582—2017 [S].2017.
General rules for finite element mechanical analysis of mechanical product structures: GB/T 33582—2017 [S].2017.
- [19] 陈俊男.铝合金前副车架结构轻量化设计与优化[D].广州:华南理工大学,2020.
CHEN Junnan. Lightweight design and optimization of aluminum alloy front subframe structure [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.