



3D打印前沿技术丛书

丛书顾问◎卢秉恒 丛书主编◎史玉升

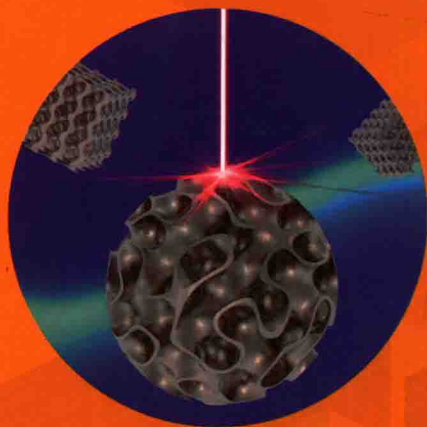
# 增材制造

## 三周期极小曲面仿生超材料

闫春泽 杨 磊 吴思琪 著  
郝 亮 李昭青 李 妍 宋 波

ZENGCAI ZHIZAO

SANZHOUQI JIXIAO QUMIAN FANGSHENG CHAOCAILIAO



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



3D 打印前沿技术丛书

丛书顾问◎卢秉恒 丛书主编◎史玉升

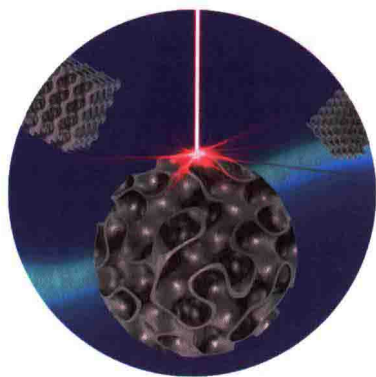
# 增材制造

## 三周期极小曲面仿生超材料

闫春泽 杨 磊 吴思琪  
郝 亮 李昭青 李 妍 宋 波 ◎ 著

ZENGCAI ZHIZAO

SANZHOUQI JIXIAO QUMIAN FANGSHENG CHAOCAILIAO



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

## 内 容 简 介

本书详细介绍了通过激光选区熔化增材制造技术制造的三周期极小曲面(TPMS)仿生超材料的设计、制造、显微组织、力学性能和应用示例。首先介绍了基于增材制造的超材料设计方法,分析了 TPMS 仿生超材料的优点;接着给出了 TPMS 仿生超材料数学建模的方法,同时介绍了不同金属材料制备的均匀 TPMS 仿生超材料的精度分析、微观组织和静态力学性能,以及 TPMS 复合材料仿生超材料的制备方法和性能分析;然后基于数值分析方法,建立预测均匀和梯度 TPMS 仿生超材料力学性能的有限元模型,并将其用于分析不同加载方向上的静态力学性能;最后讨论了均匀和梯度 TPMS 仿生超材料的动态疲劳性能,揭示了疲劳失效机制与增强机理,并对 TPMS 仿生超材料的应用进行了展望。

本书是专门针对增材制造三周期极小曲面仿生超材料的书籍,具有很强的专业性。由于三周期极小曲面仿生超材料在光学、声学、催化等领域均有潜在的应用,因此本书也可作为其他相关行业的参考书籍。

### 图书在版编目(CIP)数据

增材制造三周期极小曲面仿生超材料/闫春泽等著. —武汉:华中科技大学出版社,2022.1  
(3D 打印前沿技术丛书)  
ISBN 978-7-5680-7584-8

I. ①增… II. ①闫… III. ①仿生材料 ②快速成型技术 IV. ①TB39 ②TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 268576 号

增材制造三周期极小曲面仿生超材料

闫春泽 等著

Zengcai Zhizao Sanzhouqi Jixiao Qumian Fangsheng Chaocailiao

策划编辑:张少奇

责任编辑:戢风平

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:18.75

字 数:371千字

版 次:2022年1月第1版第1次印刷

定 价:98.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究



## 3D 打印前沿技术丛书

### 顾问委员会

- 主任委员 卢秉恒(西安交通大学)  
副主任委员 王华明(北京航空航天大学)  
              聂祚仁(北京工业大学)

### 编审委员会

- 主任委员 史玉升(华中科技大学)  
委 员 (按姓氏笔画排序)  
朱 胜(中国人民解放军陆军装甲兵学院)  
刘利刚(中国科学技术大学)  
闫春泽(华中科技大学)  
李涤尘(西安交通大学)  
杨永强(华南理工大学)  
杨继全(南京师范大学)  
陈继民(北京工业大学)  
林 峰(清华大学)  
单忠德(机械科学研究总院集团有限公司)  
宗学文(西安科技大学)  
赵吉宾(中国科学院沈阳自动化研究所)  
贺 永(浙江大学)  
顾冬冬(南京航空航天大学)  
黄卫东(西北工业大学)  
韩品连(南方科技大学)  
魏青松(华中科技大学)

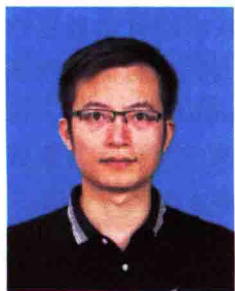


About Authors

## 作者简介



**闫春泽** 华中科技大学教授、博导,教育部“长江学者奖励计划”特聘教授、湖北省百人计划特聘教授,材料成形与模具技术国家重点实验室副主任,增材制造陶瓷材料教育部工程研究中心主任。主持国家自然科学基金面上项目、航天联合基金重点项目等多项国家、省部级项目,发表SCI论文60余篇,授权发明专利65项,出版专著、教材6部,牵头/参与制定国家标准3项。主要从事粉末床熔融激光增材制造技术的研究,研发的增材制造材料与装备已实现产业化。



**杨磊** 武汉理工大学交通与物流工程学院副教授、硕导,机械设计与制造系副主任。主要从事极小曲面点阵结构的材料-结构-性能一体化增材制造技术及仿真分析方法研究。主持国家自然科学基金青年项目、国防科技创新特区-基础前沿项目等多项国家级、省部级项目,发表SCI论文22篇,申请发明专利12项,申请软件著作权2项,撰写学术专著2部。



**吴思琪** 华中科技大学材料科学与工程学院在读博士,师从闫春泽教授和杨磊副教授。研究方向为极小曲面点阵结构的增材制造、力学性能分析及有限元仿真模拟。华中科技大学2020级创新研究院创新基金和2021级创新团队项目负责人,曾获华中科技大学知行奖学金、三好研究生荣誉称号等。



**郝亮** 中国地质大学(武汉)珠宝学院副院长,教授、博导,湖北省百人计划人才、“双创战略团队”带头人和武汉市“3551”人才,湖北省珠宝工程技术研究中心常务主任。主要研究方向为先进制造、材料工程、首饰设计、穿戴大健康。主持并参与国外超过 300 万英镑的研究项目以及国家自然科学基金面上项目等多个项目,在国内外核心期刊与重要会议发表论文 100 多篇,获批发明专利十几项,撰写学术著作多部。

---



**李昭青** 华中科技大学博士后,本硕博毕业于兰州大学,主持国家自然科学基金青年项目,作为项目骨干参与国家自然科学基金航天联合基金项目等国家、省部级项目,发表 SCI 论文 6 篇,授权发明专利 12 项、国际专利 2 项,参与出版专著 3 部。主要从事陶瓷增材制造研究,相关成果获中国产学研创新成果奖等多项奖项。

---



**李妍** 中国地质大学(武汉)副教授、硕导,中国地质大学(武汉)实验教学中心主任。主要从事增材制造复合材料相关研究,主持和作为学科骨干参与国家自然科学基金青年项目等多项科研项目。担任 *Additive Manufacturing* 等国际期刊审稿人,发表学术论文 52 篇,撰写英文专著 2 部。

---



**宋波** 华中科技大学教授、博导,湖北省楚天学子。主要从事增材制造先进材料与结构优化设计与成形的研究,主持国家自然科学基金优秀青年基金项目、美国波音公司国际合作等项目,发表 SCI 论文 70 余篇,授权国家发明专利 15 项,主编专著 2 部。担任 *Nano Materials Science* 等期刊编委,参与制定增材制造相关的国家标准 3 项。



# 总序一

“中国制造 2025”提出通过三个十年的“三步走”战略,使中国制造综合实力进入世界强国前列。近三十年来,3D 打印(增材制造)技术是欧美日等高端工业产品开发、试制、定型的重要支撑技术,也是中国制造业创新、重点行业转型升级的重大共性需求技术。新的增材原理、新材料的研发、设备创新、标准建设、工程应用,必然引起各国“产学研投”界的高度关注。

3D 打印是一项集机械、计算机、数控、材料等多学科于一体的,新的数字化先进制造技术,应用该技术可以成形任意复杂结构。其制造材料涵盖了金属、非金属、陶瓷、复合材料和超材料等,并正在从 3D 打印向 4D、5D 打印方向发展,尺度上已实现 8 m 构件制造并向微纳制造发展,制造地点也由地表制造向星际、太空制造发展。这些进展促进了现代设计理念的变革,而智能技术的融入又会促成新的发展。3D 打印应用领域非常广泛,在航空航天、航海、潜海、交通装备、生物医药、康复产业、文化创意、创新教育等领域都有非常诱人的前景。中国高度重视 3D 打印技术及其产业的发展,通过国家基金项目、科技攻关项目、研发计划项目支持 3D 打印技术的研发推广,经过二十多年培养了一批老中青结合、具有国际化视野的科研人才,国际合作广泛深入,国际交流硕果累累。作为“中国制造 2025”的发展重点,3D 打印在近几年取得了蓬勃发展,围绕重大需求形成了不同行业的示范应用。通过政策引导,在社会各界共同努力下,3D 打印关键技术不断突破,装备性能显著提升,应用领域日益拓展,技术生态和产业体系初步形成;涌现出一批具有一定竞争力的骨干企业,形成了若干产业集聚区,整个产业呈现快速发展局面。

华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准 3D 打印科学技术前沿,组织策划了本套“3D 打印前沿技术丛书”,并且,其中多部将与爱思唯尔(Elsevier)出版社一起,向全球联合出版发行英文版。本套丛书内容聚焦前沿、关注应用、涉猎广泛,不同领域专家、学者从不同视野展示学术观点,实现了多学科交叉融合。本套丛书采用开放选题模式,聚焦 3D 打印技术前沿及其应用的多个领域,如航空航天、

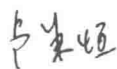
工艺装备、生物医疗、创新设计等领域。本套丛书不仅可以成为我国有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,也是我国科技人员展示研究成果的国际平台。

近年来,中国高校设立了3D打印专业,高校师生、设备制造与应用的相关工程技术人员、科研工作者对3D打印的热情与日俱增。由于3D打印技术仅有三十多年的发展历程,该技术还有待于进一步提高。希望这套丛书能成为有关领域专家、学者、高校师生与工程技术人员之间的纽带,增强作者、编者与读者之间的联系,促进作者、读者在应用中凝练关键技术问题和科学问题,在解决问题的过程中,共同推动3D打印技术的发展。

我乐于为本套丛书作序,感谢为本套丛书做出贡献的作者和读者,感谢他们对本套丛书长期的支持与关注。

西安交通大学教授

中国工程院院士



2018年11月



## 总序二

3D 打印是一种采用数字驱动方式将材料逐层堆积成形的先进制造技术。它将传统的多维制造降为二维制造,突破了传统制造方法的约束和限制,能将不同材料自由制造成空心结构、多孔结构、网格结构及梯度功能结构等,从根本上改变了设计思路,即将面向工艺制造的传统设计变为面向性能最优的设计。3D 打印突破了传统制造技术对零部件材料、形状、尺度、功能等的制约,几乎可制造任意复杂的结构,可覆盖全彩色、异质、梯度功能材料,可跨越宏观、介观、微观、原子等多尺度,可整体成形甚至取消装配。

3D 打印正在各行业中发挥作用,极大地拓展了产品的创意与创新空间,优化了产品的性能,大幅降低了产品的研发成本,缩短了研发周期,极大地增强了工艺实现能力。因此,3D 打印未来将对各行业产生深远的影响。为此,“中国制造 2025”、德国“工业 4.0”、美国“增材制造路线图”,以及“欧洲增材制造战略”等都视 3D 打印为未来制造业发展战略的核心。

基于上述背景,华中科技大学出版社希望由我组织全国相关单位撰写“3D 打印前沿技术丛书”。由于 3D 打印是一种集机械、计算机、数控和材料等于一体的新型先进制造技术,涉及学科众多,因此,为了确保丛书的质量和前沿性,特聘请卢秉恒、王华明、聂祚仁等院士作为顾问,聘请 3D 打印领域的著名专家作为编审委员会委员。

各单位相关专家经过近三年的辛勤努力,即将完成 20 余部 3D 打印相关学术著作的撰写工作,其中已有 2 部获得国家科学技术学术著作出版基金资助,多部将与爱思唯尔(Elsevier)联合出版英文版。

本丛书内容覆盖了 3D 打印的设计、软件、材料、工艺、装备及应用等全流程,集中反映了 3D 打印领域的最新研究和应用成果,可作为学校、科研院所、企业等



单位有关人员的参考书,也可作为研究生、本科生、高职高专生等的参考教材。

由于本丛书的撰写单位多、涉及学科广,是一个新尝试,因此疏漏和缺陷在所难免,殷切期望同行专家和读者批评与指正!

华中科技大学教授

2018年11月

# 前 言

增材制造(AM)是一项集机械、计算机、数控、材料等不同学科于一体的新型数字化先进制造技术,它采用分层制造、逐层叠加原理,理论上可成形任意复杂结构。这种新的先进制造技术可将传统面向工艺的零部件设计转变为面向性能的全新设计,被称为当今制造业的一场革命。激光选区熔化(SLM)是一种粉末床熔融增材制造工艺,通过选择性地熔化金属粉末层,能够制造出接近完全致密、几何形状复杂的金属构件。因此,与传统制造技术相比,SLM技术在成形具有可控的单元拓扑、尺寸和孔隙度的金属周期性点阵结构方面具有明显优势。

近年来,人们利用增材制造工艺设计和成形了各种类型的点阵结构。三周期极小曲面(TPMS)是一种光滑的无限曲面,其在没有自交叉的情况下将空间划分为两个区域,并且在三个坐标轴方向上是周期性的。TPMS结构在自然界生物系统中广泛存在,如蝴蝶翅膀、甲壳虫外骨骼等生物有机体中均存在类似极小曲面的相关结构。由于TPMS结构具有复杂而高度对称的拓扑结构以及优异的物理、化学、机械和光学性质,因此其引起了各个领域的广泛关注并得到应用。如TPMS结构具有比强度高、能量吸收能力强等特点,利用其曲面特性,可以获得非凡的手性光学性能、较高的催化效率和能量转换效率。

为系统地介绍专业知识,培养相关科技研究人员,华中科技大学快速制造中心(RMC)团队和中国地质大学珠宝先进制造团队总结了TPMS点阵结构增材制造方面的研究成果,形成了这本专著《增材制造三周期极小曲面仿生超材料》。本书详细介绍了激光选区熔化增材制造的TPMS点阵结构的设计、制造、显微组织、力学性能和应用示例设计。全书分为9章:第1章概述了基于增材制造的点阵结构设计方法,并分析了TPMS点阵结构的优点;第2章介绍了用于生成均匀和梯度TPMS点阵结构的软件工具和设计过程;第3章分析了基于SLM技术制备的不同金属材料的TPMS点阵结构的可制造性,并讨论了均匀TPMS点阵结构的制造精度、微观组织和静态力学性能;第4章介绍了TPMS点阵结构复合材料的制备方法和性能分析;第5章建立了一种基于SLM技术制备的TPMS点阵结构的材料本构模型,用于有限元模拟;第6章基于数值分析方法,建立了一种用于预测梯度点阵结构力学性能的数学模型,用于分析功能梯度TPMS点阵结构的制造精度和力学响应;第7章对均匀TPMS点阵结构进行了疲劳试验和分析,揭示了裂纹形核、扩展和表面拉应力的机理;第8章分析测试了梯度TPMS点阵结构,揭示了梯度结构对TPMS点阵结构疲劳性能的影响规律;第9章对TPMS点阵结



构的应用进行展望。

本书集中反映了华中科技大学快速制造中心团队和中国地质大学珠宝先进制造团队的相关研究成果。团队的主要研究成员除了本书的作者以外,还包括史玉升教授、魏青松教授、韩昌俊博士、陈鹏博士、伍宏志博士。衷心地感谢团队内的各位教师、工程技术人员和历届研究生长期不懈的辛勤工作!

由于本书首次以激光选区熔化增材制造三周期极小曲面点阵结构作为一条主线撰写而成,且有些研究工作还在进行之中,我们对该技术的认识还在不断深化之中,加之作者的学术水平和知识面有限,对一些问题的理解还不够深入,因此书中的错误和缺陷在所难免,殷切地期望同行专家和读者提出建议和意见,以便进一步改进。

闫春泽

2021年8月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	(1)
1.1 引言 .....	(1)
1.2 激光选区熔化技术的原理及发展现状 .....	(4)
1.3 三周期极小曲面概述 .....	(6)
1.4 三周期极小曲面点阵结构的力学性能及研究现状 .....	(12)
1.5 本书大纲 .....	(16)
本章参考文献 .....	(18)
第 2 章 TPMS 点阵结构的设计 .....	(27)
2.1 引言 .....	(27)
2.2 MATLAB 软件介绍 .....	(28)
2.3 均匀孔隙 TPMS 点阵结构的生成方法 .....	(30)
2.4 梯度孔隙 TPMS 点阵结构的生成方法 .....	(31)
2.5 本章小结 .....	(32)
本章参考文献 .....	(32)
第 3 章 金属合金均匀 TPMS 点阵结构 .....	(33)
3.1 引言 .....	(33)
3.2 采用 SLM 技术制备 TPMS 点阵结构的工艺性研究 .....	(34)
3.3 TPMS 点阵结构的显微结构研究 .....	(52)
3.4 TPMS 点阵结构的力学行为评价 .....	(65)
3.5 表面改性和羟基磷灰石涂层 .....	(76)
本章参考文献 .....	(86)
第 4 章 TPMS 点阵结构复合材料 .....	(92)
4.1 引言 .....	(92)
4.2 应用于电磁干扰的 Cu 合金/石墨烯复合材料 .....	(92)
4.3 Ni-Cu 合金/石墨烯支架的热应用 .....	(97)
4.4 316L 复合材料的轻量化应用 .....	(103)
本章参考文献 .....	(116)

<b>第 5 章 均匀 TPMS 点阵结构力学性能的有限元分析</b> .....	(123)
5.1 引言 .....	(123)
5.2 有限元法分析 .....	(124)
5.3 解析法分析 .....	(132)
5.4 本章小结 .....	(146)
本章参考文献 .....	(147)
<b>第 6 章 功能梯度 TPMS 点阵结构</b> .....	(154)
6.1 引言 .....	(154)
6.2 316L 梯度 Gyroid 点阵结构 .....	(155)
6.3 纯 Ti 梯度 TPMS 点阵结构 .....	(175)
6.4 梯度 TPMS 中的单胞大小效应 .....	(183)
6.5 梯度 Gyroid TPMS 点阵结构的力学响应 .....	(195)
本章参考文献 .....	(202)
<b>第 7 章 均匀 TPMS 点阵结构的疲劳性能</b> .....	(213)
7.1 引言 .....	(213)
7.2 方法与步骤 .....	(214)
7.3 实验结果 .....	(216)
7.4 点阵结构疲劳失效机理及强化机制 .....	(228)
7.5 本章小结 .....	(234)
本章参考文献 .....	(235)
<b>第 8 章 梯度 Gyroid 点阵结构的压缩疲劳强化机制研究</b> .....	(244)
8.1 引言 .....	(244)
8.2 本章方法与实验 .....	(245)
8.3 点阵结构的制造精度分析 .....	(246)
8.4 静态压缩性能的影响 .....	(252)
8.5 疲劳性能 .....	(254)
8.6 本章小结 .....	(271)
本章参考文献 .....	(272)
<b>第 9 章 应用与展望</b> .....	(276)
9.1 潜在应用 .....	(276)
9.2 研究展望 .....	(280)
本章参考文献 .....	(281)

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

在航空航天装备高速发展过程中,结构轻量化始终是科研工作者和工程师不断努力追求的重要目标之一。在民用飞机领域,飞机结构重量每降低 1%,飞机总重可降低 3%~5%,油耗可减少 3%~4%;飞机结构质量每减轻 1 kg,其经济收益将增加 7000 多美元;另外由于碳排放量的减少将进一步节约环境成本,因此增加的收益总额将远超过 8000 美元。在航天领域,飞行器的减重已经进入“克克时代”,飞行器的质量每减轻 1 kg,其发射成本可以减少 1.5 万美元。因此,“轻量化技术”对我国发展航空航天装备事业至关重要,是符合国家重大战略发展方向的一项重要核心技术。

传统的飞机零部件制造工艺思路是:首先通过铸造、锻压或轧制等热加工工艺结合车削、钻削、铣削、镗削、磨削等冷加工工艺制备零件,然后通过铆接、螺纹连接和焊接等连接工艺进行装配得到一个零部件。传统工艺解决轻量化的第一种方法是开发轻质材料或复合材料,如铝合金、钛合金、镁合金等比强度高的轻质金属材料和碳纤维增强的高分子复合材料;另一种方法是采用轻量化的结构优化设计,如中空夹层结构、薄壁加筋结构等。然而由于受制于传统制备工艺,轻量化结构设计需要迁就工艺的要求,无法真正实现自由设计。

随着增材制造(additive manufacturing, AM)工艺的日渐成熟,特别是金属增材制造技术的不断突破,通过增材技术一体化成形多孔点阵结构为轻量化设计提供了一种全新的方法和思路,即可以通过增材制造工艺一体化成形功能齐备且结构复杂的零部件,来代替传统组装的零部件。该方法相较于传统工艺有三大优势:第一,极大地减少了零件数量,简化了后续复杂装配调试的流程;第二,节省了零部件的设计空间,通过增材制造工艺一体化成形可以节省传统零件的装配空间;第三,提高了结构设计的自由度,增材制造工艺在理论上可以成形任意复杂结构,如传统工艺难于实现的点阵多孔结构。以上三大优势均可以极大地减轻飞机机身结构件的质量,实现轻量化设计的目标。如图 1-1 所示,GE 公司利用增材制造技术为 LEAP 喷气发动机打印燃油喷嘴,将原先设计的 20 个零件一体化成形,简化了焊接和组装修序,降低了 25%的重量,并且寿命可以提高 5 倍。

随着基于增材制造技术的轻量化设计的发展,利用仿生设计或拓扑优化方法

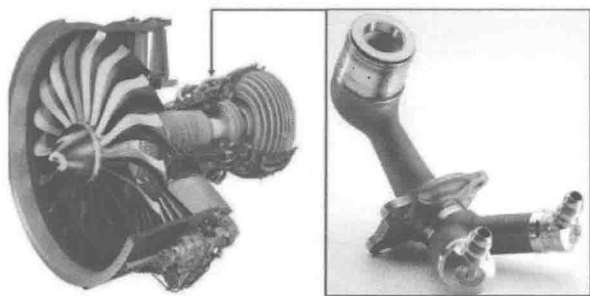


图 1-1 GE 公司利用增材制造技术一体化成形 LEAP 喷气发动机的燃油喷嘴

得到的多孔材料可以实现结构-性能的双重调控。点阵结构材料是多孔材料的一种,由空间节点及节点间的连接杆组成的单胞进行周期性排布而成。改变点阵结构节点间的拓扑关系可以调控其力学性能。点阵结构材料具有优异的综合力学性能,而且在变形的过程中可以吸收机械冲击的能量,因此应用于航空航天结构件时可以起到良好的减振和防冲击的作用。如图 1-2 所示,利用增材制造工艺制备的点阵结构可以在匹配飞机形状的基础上实现材料/成分的梯度变化,从而满足特定严酷环境的特殊材料、力学和性能要求,实现材料-结构-性能一体化设计。

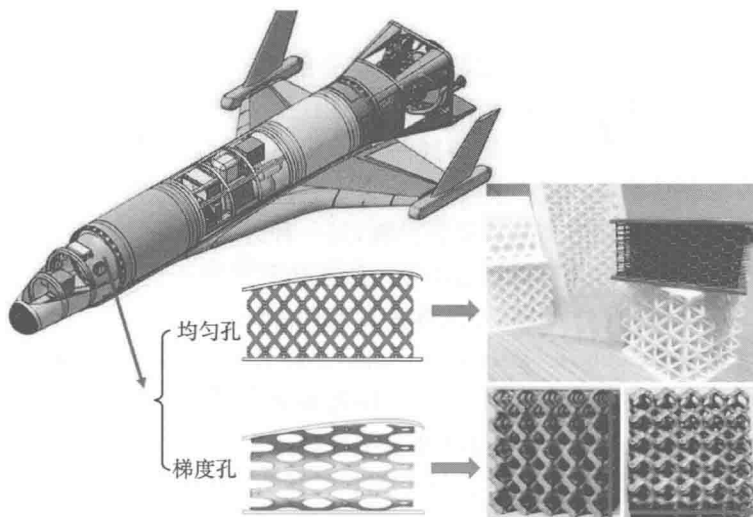


图 1-2 金属多孔材料在航空航天工业中的应用

目前制备高精度金属点阵结构材料的主要方法是以粉末床激光熔融技术为代表的金属增材制造技术。激光选区熔化(selective laser melting, SLM)是一种典型的粉末床熔融激光增材制造工艺,该技术通过逐层连续地选择性熔化金属粉末层以制备具有复杂几何形状的近乎完全致密的金属部件。SLM 用于制造具有可控单元晶胞(以下简称单胞)结构、尺寸和孔隙率的金属点阵结构的潜力巨大,而这些结构难以或不可能通过常规制造技术实现。

然而,目前由 SLM 制备的大部分点阵结构都是由简单几何单元(截面为圆形或多边形的柱、球形、方块等)经布尔运算生成的。这些由布尔运算生成的几何模型在几何单元连接处是非均匀过渡的,存在急转弯或尖角,因此在结构受力时极易在连接处产生应力集中,从而在长期服役中过早失效。另外,在增材制造过程中,结构中的直杆(特别是细长的水平杆)由于缺乏支承很容易坍塌而使成形失败。鉴于这些点阵多孔结构在力学和制造方面的不足,一些研究者开始开发一些新型的点阵多孔结构,如三周期极小曲面点阵结构。

极小曲面是满足特定约束条件的面积最小且平均曲率为零的曲面,其在没有自交叉的情况下将空间划分为两个区域,并且在三个坐标轴方向上是周期性的。由极小曲面在空间上周期性的排列构成的点阵结构称为三周期极小曲面(triply periodic minimal surface, TPMS)点阵结构。目前已知并通过数学公式还原的极小曲面已不少于 17 种,其中研究较多的是 Schoen Gyroid、Schwarz Diamond 和 Schwarz Primitive 三种极小曲面。Schoen Gyroid 极小曲面由 Luzzati 等人在镉皂表面活性剂和纯脂质水系统中以立方相的形式发现,随后 Schoen 基于构造算法确定了 Gyroid 的方程,因此这种极小曲面被命名为 Schoen Gyroid(以下简称 Gyroid,中文名为螺旋二十四面体)。

现有文献表明,TPMS 点阵结构不仅表现出与桁架类点阵结构相当的高性能,如质量轻、比强度高、能量吸收能力强等性能,而且继承了 TPMS 光滑的表面和均匀的曲率半径等特征,因此结构承载时应力分布均匀,具有更强的疲劳服役性能和更广阔的应用前景。由于 TPMS 点阵结构本身的高复杂性,传统工艺难于加工,其零件与样品的制备主要由增材制造技术来实现。如 Hao 等人使用隐式建模方法设计了一系列不同孔隙和单胞大小的 TPMS 点阵结构,并测试其 SLM 制备精度。Montazerian 等人利用 AM 技术制备 TPMS 点阵结构的硫酸钙支架并进行压缩测试,实验结果表明 TPMS 梯度多孔结构具有优异的性能和巨大的应用潜力。Hussein 等人利用 TPMS 点阵结构来设计 SLM 零件的支承结构,相比于其他支承结构,TPMS 多孔支承结构拥有材料利用效率高和打印时间短的优点。此外,TPMS 点阵结构被认为是生物形态支架设计的最佳方案,TPMS 点阵结构继承了 TPMS 的光滑表面和均匀曲率半径,实验证明具有特定设计的 Gyroid 点阵结构的弹性特性与小梁骨和皮质骨的弹性特性非常接近,因此其是最有前景的生物材料结构之一。

总体而言,TPMS 点阵结构由于其优异的综合力学性能和良好的 AM 可制造性,在航空航天、生物医学、拓扑优化等领域有很大的应用前景。本书以 Gyroid 点阵结构(Gyroid lattice structure, GLS)为例,从 TPMS 点阵结构的设计出发,提出利用隐函数方程进行数学建模的方法,并设计不同孔隙、不同单元大小、不同结构梯度的 TPMS 点阵结构;通过数值仿真分析点阵结构的压缩变形行为和力学性能,结合解析计算和实验分析,探讨 Gyroid 点阵结构体积分数、梯度变化、加载方