2025 年　第 45 卷　　航　空　材　料　学　报　　2025, Vol. 45
第 3 期　第 105 – 116 页　　JOURNAL OF AERONAUTICAL MATERIALS　　No.3　pp.105 – 116

引用格式: 李文智, 何志平, 曹瑶琴. 梯度功能复合材料的研究进展[J]. 航空材料学报, 2025, 45(3): 105-116.
LI Wenzhi, HE Zhiping, CAO Yaoqin. Research progress in functionally gradient composite materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(3): 105-116.

梯度功能复合材料的研究进展

李文智*, 何志平, 曹瑶琴

（中国直升机设计研究所, 江西 景德镇 333001）

摘要: 随着材料技术的不断进步, 近些年各类具有特定功能的高性能材料及超材料呈现出井喷式的研究态势, 这一趋势在航空航天领域尤为显著。随着装备对性能要求的不断提升, 单一材料逐渐难以满足界面力学性能和功能一体化要求, 梯度功能复合材料成为解决该难题的重要突破口。本文从功能梯度复合材料的应用背景出发, 结合国外各类材料研究进展和应用现状, 探讨该材料的研究意义。针对国内工程领域应用存在的问题, 指出功能梯度复合材料在应用过程中面临的挑战。与国际先进水平相比, 我国功能梯度复合材料发展主要面临着 3 大挑战: 一是制备工艺相对落后, 无法实现大尺寸工程化应用; 二是性能评价方法空缺, 耦合功能评价体系亟需建立; 三是材料性能设计与模拟方法自主知识产权较少, 且尚未建立全面数据库作为设计依据, 材料设计仍依靠设计者的经验。最后对梯度功能复合材料的未来应用和发展方向提出建议。

关键词: 梯度功能; 复合材料; 研究进展
doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000046
中图分类号: V259　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1005-5053(2025)03-0105-12

Research progress in functionally gradient composite materials

LI Wenzhi*, HE Zhiping, CAO Yaoqin

（China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, Jiangxi, China）

Abstract: With advancements in material technology, a surge in research and development has been witnessed for various high-performance materials, including metamaterials, each possessing unique functionalities. However, meeting the demands of high performance has rendered the application of a single material insufficient for achieving the required interface mechanical and functional integration properties. Functionally gradient composite materials have emerged as a pivotal breakthrough to address this issue. This paper introduces the application background, as well as the research and application status of functionally gradient composite materials in foreign countries. Furthermore, based on the prevalent issues in the domestic engineering field concerning functionally gradient composite materials, the challenges faced in their utilization are highlighted. When compared to international advanced levels, the development of functionally gradient composite materials in China encounters three major hurdles. Firstly, the preparation process remains relatively underdeveloped, impeding large-scale engineering applications. Secondly, due to the scarcity of performance evaluation methods, there is an urgent necessity to establish a coupled functional evaluation system. Thirdly, there is a scarcity of proprietary intellectual property rights pertaining to material design and simulation methods, coupled with the absence of a comprehensive database. Consequently, material design still largely relies on the experience of designers. Lastly, suggestions for the future application and development of functionally gradient composite materials are proposed.

Key words: functionally gradient; composite materials; research progress

传统材料在工程应用领域的发展逐渐趋于极限, 需要不断研发新材料以应对各行各业新技术发展的需求。根据应用需求, 复合材料是目前材料最先进形式之一, 它是由两种或多种材料制成, 使材

料的物理和化学性能优于单个材料，甚至出现传统材料没有的新特性，但传统复合材料在极端机械和热载荷作用下会因多相界面而发生分层现象，特别是在航空航天工程中，许多结构部件（防热系统和发动机）承受严重的热负荷，会使结构部件产生强烈的热应力，导致结构部件发生损坏甚至失效。为解决航空航天工程材料在极端环境中出现的热应力失效问题，引入了“梯度功能复合材料”的概念。梯度功能复合材料是按照使用需求，通过先进的材料复合技术，将两种或多种材料复合，使其内部界面近乎消失，使材料的化学成分、内部结构和物化性质在特定方向上连续地呈梯度变化的一种复合材料。

20 世纪 70 年代，美国学者在研究中发现了某种功能随结构连续渐变的新材料[1]，并预测出这种新材料在工程领域中的应用。1984 年，日本学者正式将这种新材料命名为“梯度功能复合材料”[2]，同时得到日本科技厅的重视，开展了“关于缓和热应力的梯度功能复合材料开发基础技术的研究”项目，很快引起世界各国对梯度功能复合材料制备技术的研发热情，并投入大量物力与财力将其应用到国防系列关键技术项目中，例如：美国 NASP 联合计划、英国的空天飞机计划和俄罗斯的图-2000 高超音速飞机计划。同时期，我国把梯度功能复合材料的研究列入国家“863”重大项目计划。目前，梯度功能复合材料的研究已成为备受瞩目的前沿课题[3-4]。

随着航空航天、汽车船舶、新能源、电子芯片等各类国防、高端制造领域的性能需求不断提升，梯度功能复合材料因其优越的机械和物理特性，在各领域的作用越发凸显。以国外近些年梯度功能复合材料的研究进展和应用能力为出发点，同步论述国内目前梯度功能复合材料在装甲、热障、耐烧蚀等关键应用领域的现状、挑战和趋势，并为日后相关材料的研究提供一些建议。

1 梯度功能复合材料研究

1.1 材料的结构

梯度功能复合材料可以根据大小和结构分为不同类型[5]。从几何角度，梯度功能复合材料可分为薄材梯度功能复合材料和块材梯度功能复合材料。从结构上，梯度功能复合材料可以按孔隙率或晶格结构分类为一种单独类型，其梯度来源于逐渐分布的孔隙率或晶格结构，而非化学成分的变化。目前，最常见的类型是根据分级结构分类，可分为不连续（或渐变型）和连续梯度功能复合材料[6-7]，如图 1(a)和(b)所示：在非连续梯度功能复合材料中，成分和微观结构通常随界面的出现而逐步变化；相反，在连续的梯度功能复合材料中，成分和微

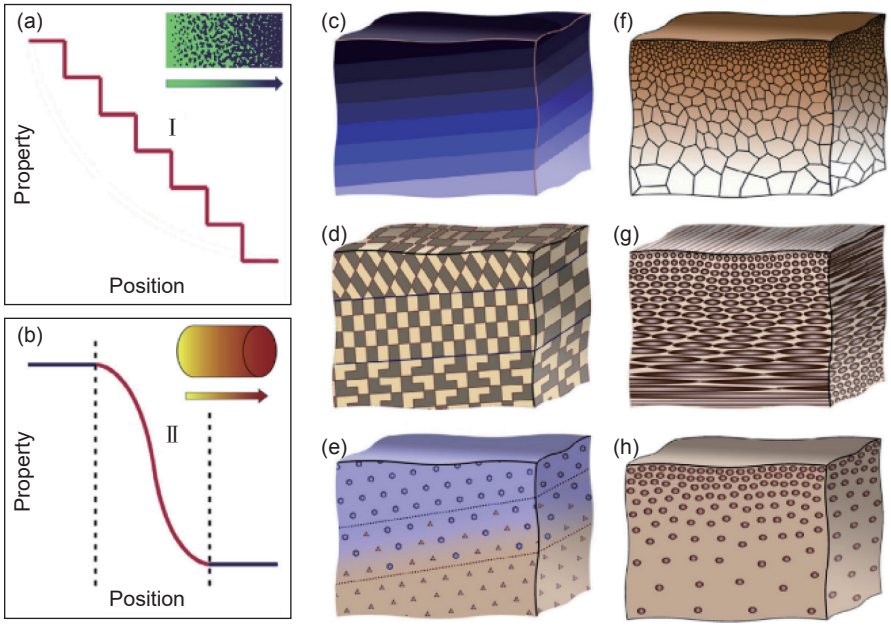

图 1 梯度功能复合材料典型结构示意图[6-7] (a)非连续梯度功能复合材料结构；(b)连续梯度功能复合材料结构；(c)成分变化；(d)排列不同；(e)分布；(f)尺寸；(g)取向；(h)界面

Fig. 1 Structure diagram of typical functionally gradient composite materials[6-7] (a)structure of discontinuous gradient functional composite materials; (b)structure of continuous gradient functional composite materials; (c)composition/constituent; (d)arrangement; (e)distribution; (f)dimension; (g)orientation; (h)interface

观结构随位置的变化而不断变化。此外，梯度功能复合材料中的梯度结构可存在于整个材料中或仅存在于材料某些局部区域[8]。

1.2　材料的设计

梯度功能复合材料的设计一般使用逆向设计原理，即按照实际需求对梯度功能复合材料的成分和结构的梯度分布进行设计。以梯度功能复合材料缓和热应力为例，根据应用所处的热环境和结构部件的形状，确定热应力学边界条件，以数据库为基础选择符合合成条件的材料成分体系、成分分布函数和制备方法，然后按照材料的复合定律、微观力学理论、材料性能数据库等进行材料的性能预测，最后实施温度分布和热应力分布计算。再次改变梯度成分分布函数和材料成分组合，重复上述过程，得到确定的成分组合体系使得热应力达到最小值。最后将设计得到的成分制备成材料，合成后的材料经过表征和性能评价再反馈到材料设计数据库[6]。因此，梯度功能复合材料的设计需要 3 个主要元素：(1)确定材料的结构和形状、热-力边界条件和成分分布函数；(2)验证用于热参数模型的数据和复合材料；(3)采用适当的数学-力学模型计算方法，包括有限元法计算梯度功能复合材料的应力分布，使用通用和自发计算辅助设计软件进行优化设计。

1.3　材料的制备

根据材料类型和应用的不同，可以采用多种不同的物理和化学方法来制备梯度功能复合材料。这些方法的原理可以归纳为两大类[9-10]：结构加工和质量传输。在第一类中，从一个适当的分布开始，梯度功能复合材料是一层一层构造的，梯度实际上是在空间中逐层变化，该原理的优点是制造不受限制的梯度渐变数；在第二类原理中，组分内的梯度取决于自然传输现象，例如流体的流动，原子种类的扩散或热传导。然而，近 20 年来自动化技术的进步为梯度材料本构、级配工艺提供了技术和经济上的可行性。梯度功能复合材料主要的制备方法包括化学气相沉积、粉末冶金和离心铸造等，表 1 总结了薄膜/涂层和块状梯度功能复合材料制造技术的细节[9-14]。化学气相沉积主要用于薄膜/涂层梯度功能复合材料的制备，以热、等离子体或光为能源的化学气相沉积技术使用的典型气体包括：溴化物、氢化物和氯化物。通过仔细控制气体比、气体压力、流速、气体类型和沉积温度[9]，可以获得梯度功能复合材料所需的化学成分梯度。化学气相沉积制备梯度功能复合材料具有成分可控、连续变化、低温制备成形等优点。然而，化学气相沉积技术通常是能源密集型的，有时会产生有害气体。用于制造块状梯度功能复合材料的加工技术可分为液相法和固相法。

粉末冶金(powder metallurgy, PM)技术通过 4 个基本步骤制备梯度功能复合材料：预先设计材料的结构空间分布、粉末的制备和混合、粉末成型和烧结致密[12]。粉体的制备方法有化学反应法、电解沉积法、研磨法和雾化法等。粉末成型是将粉末压制成几何形状，通常在室温下进行，强度取决于预压致密度。该方法的制备重点是控制粉末的称量精度和混合粉末的分散性[10-11]。

在离心铸造方法中，通过模具的旋转利用重力生产梯度功能复合材料。此方法适合生产圆柱型零件[8]。将熔化的金属倒入旋转模具中，继续旋转直到金属凝固。离心铸造法的主要优点是提高了金属的密度，使铸件的实际力学性能提高了 10%～15%，并提供了均匀的冶金结构[14]。成分梯度是由熔融金属和固体颗粒之间的密度差异产生不同的离心力导致的。由于成分梯度是通过自然过程(离心力和密度差)形成的，所以产生的梯度类型比较有限。

1.4　材料的应用

梯度功能复合材料最初的目的是缓和航空航天材料在极端的温度梯度下引起的高热应力，由于

表 1　梯度功能复合材料的主要制备方法[9-14]

Table 1　Main preparation methods of functionally gradient composite materials[9-14]

Species	Vapor phase method	Liquid phase method	Solid phase method	Other methods
Preparation method	Chemical vapor deposition, physical vapor deposition, thermal spraying, surface reaction	Centrifugal casting, gel injection molding, precipitation, cast molding, slip casting, electrophoretic deposition, directional solidification	Powder metallurgy, spark plasma sintering	Self-propagating high-temperature synthesis, plasma spraying, electrodeposition
Material type	Film/Coating	Block	Block	Film/Coating

梯度功能复合材料结构/成分在空间上具有渐变特性，使其能够设计成特定性能或功能的高级工程材料，在航空航天、生物工程、能源和核工业等众多高科技应用领域获得广泛应用。梯度功能复合材料按照不同的应用标准可以分成不同的类型，具体如表 2 所示[6, 15-19]。

表 2 梯度功能复合材料的应用分类[6, 15-19]

Table 2 Application classification of functionally gradient composite materials[6, 15-19]

No.	Material type	Requirements	Application
1	SiC-SiC	Corrosion resistance and hardness	Combustion chambers
2	Al-SiC	Hardness and toughness	Combustion chambers
3	SiC_w/Al-alloy	Thermal resistance and chemical resistance	CNG storage cylinders，diesel engine pistons
4	E-glass/epoxy	Hardness and damping properties	Brake rotors，leaf springs
5	Al-C		Drive shafts，hubble space telescope metering truss assembly，turbine rotor，turbine wheels
6	Al-SiC		Flywheels，racing car brakes
7	SiC_p/Al-alloy	High melting point，low plasticity and high hardness	Motorcycle drive sprocket，pulleys，torque converter reactor，shock absorber
8	Carbon and glass fibers		Propulsion shaft
9	Glass/Epoxy		Cylindrical pressure hull，sonar domes
10	TiAl-SiC fibers		Composite piping system，scuba diving cylinders
11	Be-Al		Floats，boat hulls，wind tunnel blades，spacecraft truss structure，reflectors，solar panels，camera housing
12	Al_2O_3/Al-alloy	Good thermal and corrosive	Rocket nozzle，wings，rotary launchers，engine casing
13	Carbon/Bismaleimide		Drive shaft，propeller blades，landing gear doors，thrust reverse（heat exchanger panels，engine parts）
14	Carbon/Epoxy	Lightweight and good damping properties	Helicopter components viz.rotor drive shaft，mast mount，main rotor blades
15	SiC_w/6061	Hard and toughness	Racing bicycle frame，racing vehicle frame
16	Al-alloy/CNT	Light weight and high stiffness	Artificial ligaments，MRI scanner cryogenic tubes，wheelchairs，hip joint implants，eyeglass frames，camera tripods，musical instruments

1.4.1 航空航天

如前所述，梯度功能复合材料是一类材料的性能可以从一个表面到另一个表面不断变化的复合材料。这种材料的渐变特性降低了热应力、残余应力和应力集中。由于梯度功能复合材料性能的变化可以看作材料厚度的平滑函数，因此梯度功能复合材料可以在极高温度环境下定制材料的性能。如航天飞机的发动机燃烧气体一侧温度在 2000 ℃以上，而另一侧直接接触致冷材料液氢，巨大的温差将使材料内部产生巨大的应力。梯度功能复合材料由外表面的陶瓷和内表面的金属组成，消除了热膨胀系数之间的突变，提供了热/腐蚀保护，因此梯度功能复合材料能够承受很高的热梯度，适用于航天飞机机体、火箭发动机等结构部件[15]。

1.4.2 生物工程

梯度功能复合材料在生物医学领域的应用越来越受到重视，特别是在种植牙、膝关节替换和髋关节替换等领域。因为人类的骨头和牙齿，其外壳坚韧，内部疏松多孔，是一种典型的梯度功能复合材料[16]。所以牙科植入材料进行功能梯度分级，制定最佳机械性以此实现预期的生物相容性。

1.4.3 核能

梯度功能复合材料的高强度、耐热性和耐腐蚀性为下一代核工业的发展提供了可靠的保证。核能发电、核能和储存核武器是极其危险的。一旦发生事故，将造成严重后果。因此，必须确保其安全性。梯度功能复合材料是一种高强度、耐热、屏蔽材料，在核电炉的建材和核电炉的内壁材料上显示

出极大的优越性，极大地保护了核工业的安全[17]，同时在核聚变反应堆的应用中，显示出良好的热应力松弛效果，使核聚变反应更安全。

1.4.4　装甲材料

梯度功能复合材料最重要的特性之一是能够抑制裂纹扩展。这一特性可以应用到国防材料中的装甲板和防弹背心等抗穿透材料。

1.4.5　能源

梯度功能复合材料还具有耐热性、耐腐蚀性和耐热冲击性等特殊性能。特别是各种特殊梯度功能复合材料的开发使梯度功能复合材料在能源领域发挥了重要作用。例如，在发电系统方面，梯度热电能量转换材料使发射器在 1860 ℃ 的高温工作环境下避免破裂，大大降低了系统的热应力[18]。它们用作热障涂层，作为燃气轮机发动机涡轮叶片的保护涂层[19]。

梯度功能复合材料以其新颖的概念和优异的性能已成为现代材料研究的基石，在国防、能源、航空航天和生物等领域有着广泛的应用。随着梯度功能复合材料制备技术的不断发展，材料的制备工艺在时间还能缩短，可以对合金、金属、陶瓷和复合材料在不同几何形状下进行无限组合，在下一代高密度梯度功能复合材料的开发和更好地控制热应力分布方面还有巨大的开发潜力，故其研究和应用领域还在不断扩大。梯度功能复合材料的研究具有学科前沿性和开拓性，可以为新一代材料的开发和工程化应用提供理论支持和实验数据，这对于我国航空航天、国防科技和国民经济的发展都有重要意义。

2　国外发展现状及趋势

得益于国外航空航天、海洋化工快速发展，对隔热、耐腐蚀、耐冲蚀等技术提出的更高性能要求，梯度功能复合应运而出，实现了相关产业产品的技术革新和产品升级。

2.1　隔热梯度功能复合材料

国外隔热梯度功能复合材料发展至今已有近 50 年的历史，主要以陶瓷和金属为主。目前隔热功能材料主要用于飞行器热端部件和发动机内部材料，在保证高隔热能力的前提下，可实现高可靠性与耐久性。

基于隔热功能梯度的优异性能和在航空航天领域的重要性，国外已投入大量资源支持其发展，近年来，出现了大量关于隔热梯度材料新制备技术的报道[20]。作为较先提出梯度功能复合材料这一概念的国家[21]，日本在隔热梯度功能复合材料领域处于先进水平，日本东北大学 Takashi 等[22] 采用激光化学沉积技术（laser chemical vapor deposition, LCVD），制备出一系列氧化物薄膜梯度功能复合材料，并探究不同氧化物对 LCVD 过程温度的依赖性，并成功以 3000 μm/h 的高速率沉积出氧化钇部分稳定氧化锆（yttria-stabilized zirconia, YSZ）涂层，证明 LCVD 制备方式的优越性。华盛顿州立大学[23] 也在 2014 年通过 3D 打印技术制备出两种不同材料组成的梯度复合材料，成功制备出了 Ti6Al4V+Al_2O_3 复合材料、Ti-Al_2O_3 复合材料、镍铜-铜梯度结构复合材料等梯度功能复合材料。以镍铜-铜梯度结构为例，在 Inconel 718 合金上沉积 GRCop-84 后，能提升其耐高温性能，可大幅提高发动机的寿命和燃油效率。英国拉夫堡大学 Mumtaz 等[24] 采用激光选区熔覆技术制备了 Waspaloy 合金-YSZ 梯度复合材料，如图 2 所示，其致密度可达 99.66%，制备出的样品呈明显的梯度分布，而且由于熔覆过程中熔池内液体的流动，内部层与层之间成分渐进式变化，减少了因成分突变导致的热应力，提高材料在热循环下的寿命，具备作为新型航空发动机内部材料的潜力。

除了提出新的制备方法外，还有大批学者在新型梯度材料的设计方向进行了大量的工作。昆士兰大学 Tsukamoto[25] 通过非线性微机械法设计的 Ni-ZrO_2 梯度材料通过控制陶瓷相的蠕变能力，能有效防止陶瓷相蠕变引起的热断裂，具有更高的循环寿命。卡尔顿大学 Huang 等[26] 设计了多层抑辐射热障涂层结构，这种结构能在保持低热导率的同时，通过层间多界面的反射作用，对 90% 的热辐射进行有效的防护，其在高温下的防护能力明显高于传统热障涂层体系。此外，Esmaeilkhanian 等[27] 阐明了不同成分掺杂、纳米结构设计下的功能梯度氧化锆基热障涂层的性能，评估了不同类型功能梯度热障材料设计的优缺点，为后续工程应用提供了有力支撑。

2.2　耐冲蚀梯度功能复合材料

实现耐冲蚀功能需要材料具有良好的热力学性能，如较强的热稳定性、断裂韧性、硬度、耐磨性等，而随着科学技术的不断发展，材料的服役环境愈发苛刻，普通陶瓷、金属及其复合材料难以满足性能需求，梯度功能复合材料的出现为解决这一问题提供了可能，因此近年来大量学者针对梯度功能复合材料的材料体系、制备工艺以及性能等进行了

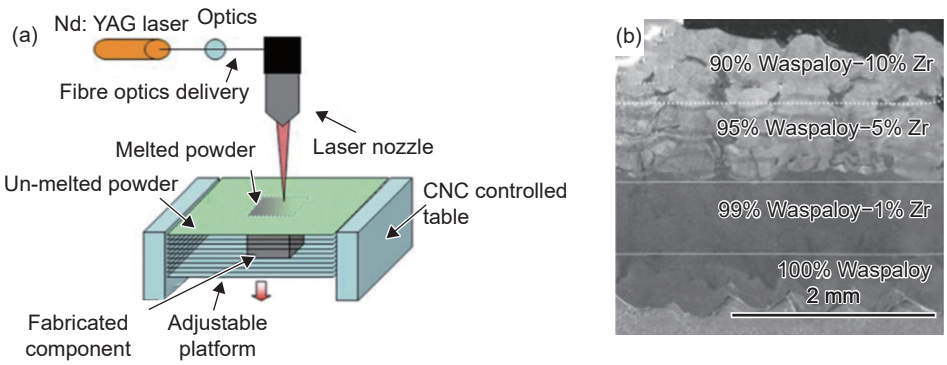

图 2 激光选区熔覆技术制备 Waspaloy 合金-YSZ 梯度复合材料[24] (a)激光选区熔覆技术示意图; (b)Waspaloy 合金-YSZ 功能梯度材料界面

Fig. 2 Preparation of Waspaloy alloy YSZ gradient composite material using laser selective melting technology[24] (a)schematic diagram laser selective melting technology; (b)cross section of waspaloy alloy YSZ gradient composite material

相关研究, 目前的研究主要集中在陶瓷和金属体系。

加泰罗尼亚理工大学 Hvizdoš等[28] 采用电泳沉积和无压烧结法制备 Al_2O_3/ZrO_2 梯度功能复合材料, 材料致密度极高, 相对于纯 Al_2O_3, 该梯度功能复合材料在硬度、断裂韧性、残余应力方面得到了优化, 抑制表面裂纹横向拓展能力大大增强, 耐热冲击能力提高。Rajasekhar 等[29] 采用粉末冶金法制备了 Al-Cu 功能梯度涂层。研究表明相对于 Al-Cu 均匀混合的非梯度功能复合材料, 梯度功能复合材料的相对密度及硬度更高, 且 10%Cu 含量的梯度功能复合材料的界面结合力最强。

相对于单纯用金属或陶瓷材料制备的梯度功能复合材料, 将二者复合来制备新型梯度功能复合材料的研究更多。日本千叶大学的 Mishina 等[30] 采用放电等离子烧结工艺制备了由 ZrO_2 和 ZrO_2/AISI316 L 复合材料组成的梯度功能复合材料, 截面宏、微观形貌如图 3 所示, 其断裂韧性、弯曲强度和耐磨性能要明显优于单层 ZrO_2, 并且与材料的整体厚度有着密切关系。Übeyli 等[31] 采用粉末冶金法制备了不同厚度的 SiC-AA7075 梯度功能复合材料, 25 mm 厚度以下的梯度功能复合材料无法抵抗弹丸冲击测试, 在轻质要求下难以用作装甲材料。

随着科学技术与制备手段的不断发展, 目前也产生了许多纳米体系材料与传统金属、陶瓷复合制备的梯度功能复合材料。Salama 等[32] 使用碳纳米管和 Al 粉经过球磨混合, 注模挤压, 烧结以及热挤压工艺制备了一种新型梯度功能复合材料, 该材料

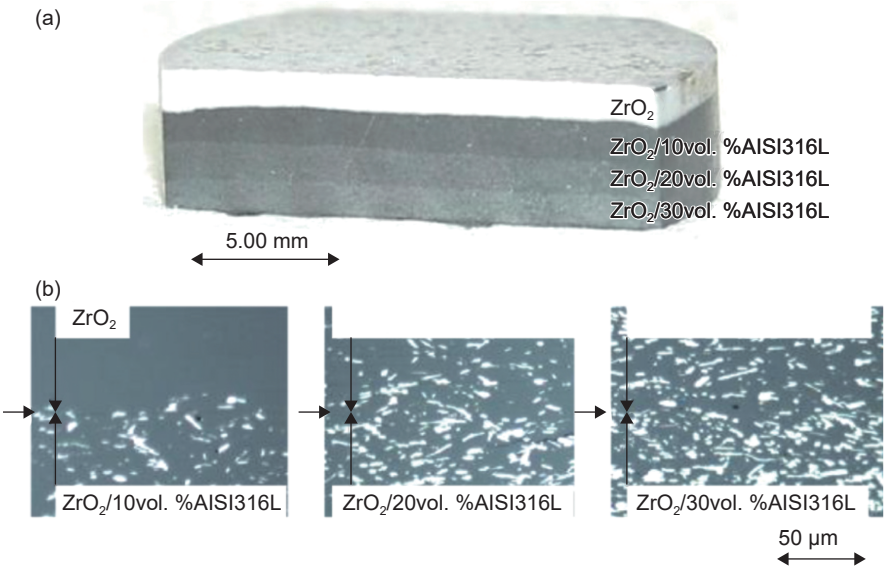

图 3 ZrO_2 和 ZrO_2/AISI316 L 复合材料组成的梯度功能复合材料的截面形貌[30] (a)梯度复合材料截面图; (b)梯度复合材料显微图像(白色为 ZrO_2 中的 AISI316L)

Fig. 3 Cross section morphology of functionally gradient composite materials composed by ZrO_2 and ZrO_2/AISI316L composite materials[30] (a)cut section of FGM; (b)micrograghs of the structure of FGM (white part is AISI316L in ZrO_2)

具有良好的拉伸与压缩强度，并且外层硬度远大于芯部，实现了强度、韧性和轻质的优化结合。

2.3　耐腐蚀梯度功能复合材料

韩国延世大学 Kim 等[33] 通过低压化学气相沉积技术在 C/C 复合材料上设计了 C/SiC 梯度材料来抑制 C/C 复合材料的高温氧化腐蚀，如图 4 所示。采用梯度功能复合材料保护的 C/C 材料在高温下的裂纹宽度明显低于普通 C/C 复合材料。巴西航空航天技术中心[34] 也采用梯度功能复合材料来对 C/C 复合材料进行抗氧化防护，其采用 ZrB_2-SiC-Al_2O_3 体系，并在其中加入 SiC 和 B_4C，形成梯度功能复合材料，能在高温下有效减少体系的质量损失，这种体系具有良好的高温耐氧化腐蚀效果。

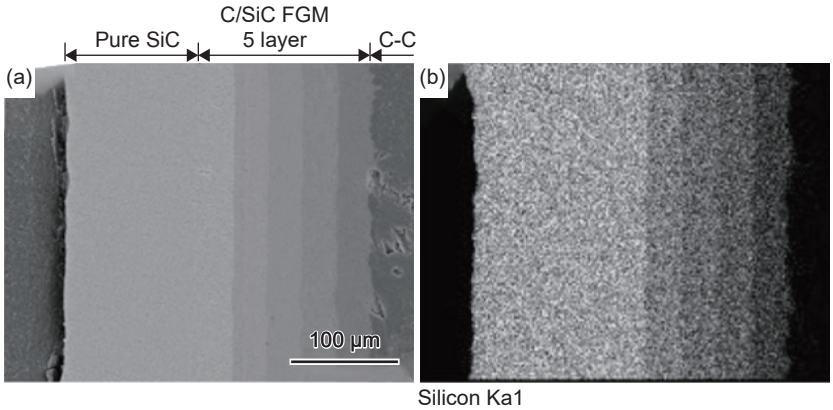

图 4　C/SiC、C/C 梯度材料截面图[33]　（a）C/SiC-C/C 梯度材料截面图；（b）Si 成分分布

Fig. 4　Cross section morphology of C/SiC, C/C functionally gradient composite materials[33]
（a）cross section of C/C-C/SiC FGM；（b）distribution of silicon

伊斯坦布尔理工大学 Gok 等[35] 制备 $Gd_2Zr_2O_7$/Ce-Y 共稳定 ZrO_2（GZ/CYSZ）梯度涂层，在保证其低热导的情况下，有效抑制发动机内部熔盐对 YSZ 的腐蚀。从熔盐腐蚀后的微观截面图中可以观察到 YSZ 层在腐蚀后出现明显纵向裂纹，而 GZ/CYSZ 梯度涂层则无明显裂纹出现，呈现良好的耐腐蚀性。此外，在高温热烧蚀防护研究领域方面，Naik 等[36] 采用火花等离子体烧结方法设计出不含缺陷的 ZrB_2-B_4C 功能梯度复合材料结构，显著降低密度同时保证高温抗烧蚀能力。意大利学者 Silvestroni 等根据数值模拟和复合材料的有效微观结构特征，建立了同时具有失效容限和抗烧蚀性能的陶瓷的主要准则，实现了抗烧蚀材料力学性能的进一步提升[37]。

目前梯度功能复合材料仍有超高温防护、激光防护等很多新的方向值得研究，随着纳米技术的发展，梯度功能复合材料的应用领域将会越来越广，在国防应用需求的背景下，更多功能耦合的梯度功能复合材料将会应运而生。

3　国内发展现状

国内梯度功能复合材料的概念由武汉工业大学（现武汉理工大学）袁润章教授提出，并在金属/陶瓷复合刀具的研究中率先开展相应工作。随后，武汉工业大学和北京科技大学分别承担了我国梯度功能复合材料在核技术和军工应用的研究工作。此外，上海硅酸盐研究所、沈阳金属所、天津大学以及哈尔滨工业大学等单位在材料设计、制备工艺和评估等方面做了大量工作，取得了一定的研究成果。针对国防装备所需的高性能材料，国内研究人员针对装甲材料、热障梯度功能复合材料、超音速飞行器所需材料等方向展开了研究。

3.1　功能梯度复合装甲材料

现阶段国内对于陶瓷装甲梯度功能复合材料的研究主要集中在材料设计、界面变化及穿透机理和性能模拟预测方面，主要涉及金属/金属与金属/陶瓷复合梯度材料，研究较为广泛。近几年目前用于装甲防护的陶瓷金属梯度复合材料体系主要集中在这几类：一种是 TiB（或 TiB_2）-Ti 系；一种是 SiC（或 B_4C, Al_2O_3）-Al 系；还有一种是陶瓷-金属化合物体系和陶瓷/高分子材料。梯度复合装甲材料可以在提升抗弹能力的同时，提升装甲的比强度、比刚度、抗腐蚀和耐磨性[38]。

在材料体系与性能研究方面，北京理工大学王富耻团队相关研究开展较早，并获得了较好的成果。该团队针对梯度陶瓷-金属装甲复合材料开展了系统性的研究，并制备出了高陶瓷体积分数、抗

弹性能接近碳化硅陶瓷同时具备良好的抗多发性能的 SiC_{3D}/Al 梯度复合材料。该材料体系中所形成的三维互穿结构，有效提升了复合材料的防护性能。基于该材料制备的针对小口径枪弹威胁的复合装甲结构抗弹性能达到先进水平[39-40]。同时，近年来对于石墨烯分散和增韧机理研究的不断深入，相应装甲技术也获得了发展，中国航发北京航空材料研究院联合多家单位开展了石墨烯改性 B_4C 复合陶瓷装甲的研究，形成了包含复合材料、陶瓷、纤维等复合梯度装甲材料设计方法，在装甲密度降低的情况下，防护能力仍满足要求[41]。宋亚林等[42]研究了 TiB_2/Ti-6Al-4V 梯度复合装甲的防护机制和防护能力，发现相比于 TiB_2 基陶瓷，复合界面有效缓和了声阻抗失配状况，提高了剪切强度，使防弹性能得以显著提升。此外，近些年陶瓷-金属功能梯度复合装甲材料的研究及发展热度迅速升温，哈尔滨工业大学 Zhong 等[43] 研究了 TiB/Ti 系功能梯度复合装甲不同配比下不同声阻抗的抗侵彻能力，为梯度装甲防护能力的声阻抗设计提供了可借鉴的数据及方法。

同时，国内对梯度复合装甲材料的毁伤防护机制及弹道也开展了较为深入的研究。哈尔滨工业大学 Wang 等[44] 利用 LS-DYNA 软件模拟研究了陶瓷颗粒增强金属基体的轻质功能梯度装甲在受到 12.7 mm 弹体不同角度袭击的穿透机理。西北工业大学刘国玺[45] 以 TiB_2/Ti 轻质陶瓷梯度复合装甲为依托，揭示了反射波和入射波叠加后在界面形成的拉伸应力随界面组分梯度和层间厚度的变化规律，提出了陶瓷/金属梯度复合装甲的冲击侵彻分析模型。Li 等[46-49] 对陶瓷-金属功能梯度复合材料的弹道性能和防弹能力进行了模拟，为装甲结构设计和抗弹侵彻能力提升奠定了理论基础，逐步提升了复合装甲设计能力，向工程化能力提升又迈进一步。

3.2 功能梯度热障材料

针对在航空航天领域蒙皮、喷管等位置所处高温状态与基体低温工作要求矛盾的问题，为实现基体热防护目的同时降低材料界面因热应力而损伤的可能，热障梯度功能复合材料应运而生。国内此方面的研究相对广泛，主要为应用在热防护部件表面的热障涂层形式。

北京理工大学王富耻团队在 20 世纪末着手开展相关研究，形成了具有良好界面结合和热防护能力的 Ni/Al-YSZ 体系，并不断完善机理研究，取得了良好的应用前景[50-51]。同时华中科技大学刘德健团队利用激光熔注技术实现了 ZrO_{2p}/Ti-6Al-4V 梯度热障复合材料层的制备及组织性能研究，形成具有良好的隔热性能的制备工艺方法和材料体系，热导率最低降至 3.4 W/(m·K)[52]。

此外，针对各类传统陶瓷材料如 Al_2O_3、YSZ 等如何形成热障梯度功能复合材料[53-55]，以及相关的材料模拟设计和失效分析也有较多的报道，多局限于现有材料体系的进一步掺杂表征及模拟分析，新工艺、新机理、新模型等新颖性高的研究报道仍有待深化。

3.3 超音速飞行器耐烧蚀材料

目前国内对于超音速飞行器的研究也逐渐开展，应用于超高速飞行器热防护梯度功能复合材料的研究主要集中于 Al-SiC、SiC-SiC、C/SiC-超高温陶瓷等体系，以实现飞行器在不同位置实现轻质、抗氧化热防护的目的。国内现从材料体系研究制备和模拟性能研究等方面逐渐缩短与国外的差距。

肖淳[56] 研究了梯度功能复合材料的多尺度建模的问题，利用异质多尺度法(HMM)对系数剧烈震荡的热弹性方程进行宏观建模，并估计模型误差，形成一套较为准确的性能模拟方法。曾涛等[57]针对高速飞行器的防热需求，设计了 C/SiC 陶瓷基梯度点阵热防护结构。基于离散坐标辐射模型和层流模型，建立了传导、辐射、对流换热耦合条件下梯度点阵结构的三维传热模型，获得了梯度点阵结构传热系数的计算方法，提出了 C/SiC 陶瓷基梯度点阵结构设计和使用过程中需要重点考虑的因素。此外，西北工业大学、中南大学等高校在应用于超高速飞行器的超高温防护材料方面也开展了广泛研究。Wang 等[58] 设计了一种将晶格玻尔兹曼方法和有限体积方法相结合的综合方法，提出了一种具有定向传热功能的三维高导热碳/碳复合热防护系统，以实现驻点区的高效热防护设计。Dai 等[59] 建立了用于高超音速飞行器(HFV)的中空圆柱结构多层热防护系统(TPS)的模型，并对其热机械响应进行了研究，提出一种数值方法来求解完整的非线性控制方程，综合提升了材料性能模拟及预计能力，为国内超高温防护材料性能模拟打下了一定基础。

3.4 其他梯度功能复合材料

梯度功能复合材料在其他军工领域也有着广泛的研究与应用。高初速、高射速火炮由于使用频繁往往容易磨损和疲劳，在内膛表面利用物理气相沉积(PVD)方法制备梯度耐烧蚀涂层，是解决上述

问题的有效途径之一。第五二研究所宁波分所和哈尔滨工业大学共同采用核控溅射方法，通过控制功率的变化来达到控制成分的目的，制备出的 Ta-10W/钢梯度涂层材料呈现出优异的耐烧蚀性能[60]。唐新峰等[61] 采用真空烧结与热压烧结技术分别制得了 ϕ24 mm× 516 mm PSZ-Mo 系无宏观缺陷的梯度功能复合材料试样、ϕ30 mm × 5 mm PSZ-Mo 系无宏观缺陷的梯度功能复合材料试样和 MgO/Ni 系梯度功能复合材料。葛昌纯团队[62] 成功研制出了新一代开发聚变能的关键材料——耐高温等离子体冲刷梯度功能复合材料。该材料在物理、化学溅射、热解吸特性和高热负荷性能等方面都达到了预期的研究目标。凌云汉等[63] 用超高压梯度烧结法，成功制备出密度达 96% 的 W-Cu 梯度功能复合材料，有望成为航空航天用高温结构梯度功能复合材料。Cheng 等[64] 研究了功能梯度硬质合金（FGCC）的腐蚀行为，为 WC-CoNiCrFe 的耐蚀机理提供了理论指导，而且为制备高耐蚀性硬质合金提供了新的途径。

4　主要任务及挑战

通过对比国内外的研究现状，可以看出我国在高性能梯度功能复合材料虽已经取得了一定的成果，但与国际先进水平仍有较大差距，针对该差距，结合目前国内已有的研究基础，我国目前的主要任务与挑战可归为以下三个方面。

4.1　梯度功能复合材料制备工艺

国内高性能梯度功能复合材料制备工艺成熟度相对较低，制备大尺寸复杂形状及工程化能力不足。高性能梯度功能复合材料对设备的要求较高，且当前制备方法相对繁琐，制备成本较高，快速有效地制备出大尺寸、不受形状限制的梯度功能复合材料是该类材料走向成熟应用必须攻克的难关。

4.2　梯度功能复合材料性能评价

国内目前缺乏对于功能梯度复合材料成熟有效的性能评价体系或标准。当前的材料性能评价大多针对均质材料，对于梯度功能复合材料这种材料成分与性能都呈梯度变化的新型材料，常规的监测手段难以进行准确反映，且目前国内普遍没有建立统一的梯度功能复合材料性能标准或体系，该问题已经成为制约该类材料发展的因素之一。如何针对梯度功能复合材料建立热性能、耐磨性能、耐腐蚀性能、耐辐射性能等评价体系，成为该类材料未来发展必须解决的问题之一。

4.3　梯度功能复合材料性能模拟

梯度功能复合材料模型建立、性能模拟及分析较为薄弱，数据量零散且不具备拓展分析能力。梯度功能复合材料的设计需要综合考虑材料成分类型、成分比例以及成分变化趋势等因素，仅依靠实验与分析会造成大量的财力和人力资源的浪费。结合大数据分析计算机模拟，有望高效寻找合适的梯度材料体系并确定成分梯度。但当前梯度功能复合材料性能模型建立以及数据库的建立还无法实现材料设计的目标，仍需通过对材料组织成分的演变以及成分与性能之间关系的研究，完善材料性能模拟模型，并建立更加全面的数据库为大数据分析提供基础。

5　结束语

梯度功能复合材料在国防装备领域有着巨大的应用潜力，但实际的工程应用很少，还主要处于应用研究阶段，这主要是由于相关材料的制备工艺、性能评价以及材料性能模拟等方面与实际的工程应用还有一定的脱节，一些高性能梯度功能复合材料在实际的批量化工程应用过程中难以实施。未来梯度功能复合材料的研究方向应聚焦以下 3 个方面：

（1）当前材料制备方法只能制备尺寸小、形状简单的梯度功能复合材料，需要开发研究新型的材料制备技术，如微波合成与烧结法、分子自组装法、快速成型法等，深入研究电、磁、热等因素对制备工艺的影响，能够对梯度功能复合材料的制备和应用提供更广阔的途径。

（2）基于梯度功能复合材料成分与性能呈梯度变化的特点，建立统一的梯度功能复合材料性能标准，针对该类材料的热性能、耐磨性能、耐腐蚀性能、耐辐射性能等，逐一开展相关研究工作，探究材料在高温、强腐蚀、强辐射条件下的响应规律，制定出合理可靠且稳定的性能测试方案以及统一的评价标准。

（3）建立梯度功能复合材料成分设计模型，在深入研究复合材料成分梯度与材料性能之间关系的基础上，建立并优化材料成分与性能之间的数学模型，实现通过计算机对梯度功能复合材料性能的预测。同时，结合大数据分析，借助于现有梯度功能复合材料体系以及现有材料数据库，建立大数据预测模型，实现材料设计过程中的高效选材。

参考文献:

[1] BEVER M B , DUWEZ P E. Gradients in composite materials[J]. Material Science and Engineering, 1972, 10: 1-8.

[2] 新野正之, 平井敏雄, 渡边龙三. 倾斜机能材料—宇宙机用超耐热材料应用[J]. 日本复合材料学会志, 1987, 13(6): 257.
SHINO M, HIRAI T, WATANABE R. Tilting functional materials-application of ultra heat resistant materials for cosmos [J] Journal of the Japan Composite Materials Society, 1987, 13(6): 257.

[3] BHAVAR V, KATTIRE P, THAKARE S, et al. A review on functionally gradient materials (FGMs) and their applications[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 229: 012021.

[4] SALEH B, JIANG J, FATHI R, et al. 30 years of functionally graded materials: an overview of manufacturing methods, applications and future challenges[J]. Composites Part B, 2020, 201: 108376.

[5] NAEBE M, SHIRVANIMOGHADDAM K. Functionally graded materials: a review of fabrication and properties[J]. Applied Materials Today, 2016, 5: 223-245.

[6] UDUPA G , RAO S S, GANGADHARAN K V. Functionally graded composite materials: an overview [J]. Procedia Materials Science, 2014, 5: 1291-1299.

[7] MAHMOND D, ELBESTAWI M A. Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2017, 1(2): 13.

[8] LIU Z, MEYERS M A, ZHANG Z, et al. Functional gradients and heterogeneities in biological materials: design principles, functions, and bioinspired applications[J]. Progress in Materials Science, 2017, 88(6): 467-498.

[9] MAHAMOOD R M, AKINLABI E T, SHUKLA M, et al. Functionally graded material: an overview[C]// Proceedings of the World Congress on Engineering(WCE 2012). London: International Association of Engineers, 2012: 1593-1597.

[10] GROVES, J F, WADLEY H N G. The control of particle size in fluidized bed classifiers[J]. Composites Part B, 1997, 28(1/2): 57-69.

[11] LI W, HAN B. Research and application of functionally gradient materials[C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018: 022065.

[12] STEWART S, AHMED R, ITSUKAICHI T. Contact fatigue failure evaluation of post-treated WC-NiCrBSi functionally graded thermal spray coatings[J]. Wear, 2004, 257(9/10): 962-983.

[13] KHOR K A, GU Y W. Effects of residual stress on the performance of plasma sprayed functionally graded ZrO_2/NiCoCrAlY coatings[J]. Materials Science & Engineering A, 2000, 277(1/2): 64-76.

[14] ZHU J, LAI Z, YIN Z, et al. Fabrication of ZrO_2-NiCr functionally graded material by powder metallurgy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2001, 68(1/3): 130-135.

[15] FUKUI Y. Vibration, control engineering, engineering for industry[J]. Japan Society of Mechanical Engineer, 1991, 34(1): 144-148.

[16] MARIN L. Numerical solution of the Cauchy problem for steady-state heat transfer in two-dimensional functionally graded materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(15): 4338-4351.

[17] POMPE W, WORCH H, EPPLE M, et al. Functionally graded materials for biomedical applications[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 362(1/2): 40-60.

[18] ZHAO P, GUO S B, LIU G H, et al. ast fabrication of W-Cu functionally graded material by high-gravity combustion synthesis and melt-infiltration[J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 445(1/3): 26-29.

[19] HUANG R. Optimization design and research progress of functionally graded thermoelectric materials[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2016, 32(24): 33-34.

[20] MONDAL K, NUNEZ L, DOWNEY C M, et al. Thermal barrier coatings overview: design, manufacturing, and applications in high-temperature industries[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, 60(17): 6061-6077.

[21] MUELLER E, DRASAR Č, SCHILZ J, et al. Functionally graded materials for sensor and energy applications[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 362(1/2): 17-39.

[22] TAKASHI G, TEIICHI K. Laser chemical vapor deposition of thick oxide coatings[J]. Key Engineering Materials, 2006, 317/318: 495-500.

[23] 佚名. 美国首次实现梯度复合材料构件一步成形[J]. 锻压装备与制造技术, 2018, 53(3): 4.
Anon. The United States has achieved one-step forming of gradient composite components at the first time[J]. China Metal Forming Equipment Manufacturing Technology, 2018, 53 (3): 4.

[24] MUMTAZ K A, HOPKINSON N. Laser melting functionally graded composition of Waspaloy® and zirconia powders[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(18): 7647-7656.

[25] TSUKAMOTO H. Design of functionally graded thermal barrier coatings based on a nonlinear micromechanical approach[J]. Computational Materials Science, 2010, 50(2): 429-436.

[26] HUANG X, WANG D, PATNAIK P, et al. Structural materials: properties, microstructure and processing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, A460/461: 101-110.

[27] ESMAEILKHANIAN A, SHARIFIANJAZI F, AHMADI E, et al. Thermal barrier coating with improved durability: an overview of doped, nanostructured, multilayered, and gradient-structured zirconia-based thermal barrier coatings[J]. Materials Today Communications, 2023: 107514.

[28] HVIZDOŠ P, JONSSON D, ANGLADA M, et al. Mechanical properties and thermal shock behaviour of an alumina/zirconia functionally graded material prepared by electrophoretic deposition[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007, 27(2/3): 1365-1371.

[29] RAJASEKHAR K, BABU V S, DAVIDSON M J. Interfacial microstructure and properties of Al-Cu functionally graded materials fabricated by powder metallurgy method[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 9212-9216.

[30] MISHINA H, INUMARU Y, KAITOKU K. Fabrication of ZrO_2/AISI316L functionally graded materials for joint prostheses[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 475(1/2): 141-147.

[31] ÜBEYLI M , BALCI E , SARIKAN B, et al. The ballistic performance of SiC-AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy[J]. Materials & Design, 2014, 56: 31-36.

[32] SALAMA E I, MORAD S S, ESAWI A M. Fabrication and mechanical properties of aluminum-carbon nanotube functionally-graded cylinders[J]. Materialia, 2019, 7: 100351.

[33] KIM J I, KIM W J, CHOI D J, et al. Design of a C/SiC functionally graded coating for the oxidation protection of C/C composites[J]. Carbon, 2005, 43(8): 1749-1757.

[34] CAIRO C A A, GRA A M L A, SILVA C R M, et al. Functionally gradient ceramic coating for carbon-carbon antioxidation protection[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001, 21(3): 325-329.

[35] GOK M G, GOLLER G. Microstructural characterization of GZ/CYSZ thermal barrier coatings after thermal shock and CMAS+ hot corrosion test[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37(6): 2501-2508.

[36] NAIK A K, NAZEER M, PRASAD D, et al. Development of functionally graded ZrB_2-B_4C composites for lightweight ultrahigh-temperature aerospace applications[J]. Ceramics International, 2022, 48(22): 33332-33339.

[37] SILVESTRONI L, PAVAN D, MELANDRI C, et al. Functionally graded ultra-high temperature ceramics: From thermo-elastic numerical analysis to damage tolerant composites[J]. Materials & Design, 2022, 224: 111379.

[38] 周亮, 肖精华, 黄叶萍. 复合装甲材料新动向[J]. 国防技术基础, 2017(1): 29-33.
ZHOU L, XIAO J H, HUANG Y P. New research trends of composite armor materials[J]. Fundamental of National Defense Technology, 2017(1): 29-33.

[39] LI B, MA Z, WANG Y, et al. The influencing mechanism of modification layer on the performance of SiC_{3D}/Al multi-function gradient composite[J]. Journal of Physics Conference, 2013, 419(1): 2016.

[40] YUAN C, WANG Y, LI G, et al. Stress wave attenuation in SiC_{3D}/Al composite[C]. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 419: 012055.

[41] 武岳, 王旭东, 刘迪, 等. 直升机陶瓷复合装甲发展现状及新型材料应用前景[J]. 航空材料学报, 2019, 39(5): 34-44.
WU Y, WANG X D, LIU D, et al. Development and application analysis of ceramic composites armor for helicopter[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(5): 34-44.

[42] 宋亚林, 张龙, 赵忠民, 等. TiB_2/Ti-6Al-4V 梯度装甲复合材料界面结构与防弹机理[J]. 兵工学报, 2015, 36(10): 1955-1961.
SONG Y L, ZHANG L, ZHAO Z M, et al. Interface structure and anti-ballistic mechanism of TiB_2/Ti-6Al-4V graded armor composites[J]. Acta Armamentarii. 2015, 36(10): 1955-1961.

[43] ZHONG Z X, ZHANG B, JIN Y C, et al. Design and anti-penetration performance of TiB/Ti system functionally graded material armor fabricated by SPS combined with tape casting[J]. Ceramics International, 2020, 46(18): 28244-28249.

[44] WANG Z Q, TANG X J, WANG X T, et al. Numerical simulation on the oblique penetration of ceramic particles reinforced metal matrix functional gradient armor[J]. Key Engineering Materials, 2014, 577: 585-588.

[45] 刘国玺. TiB_2/Ti 功能梯度材料装甲结构的设计与优化研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
LIU G X. Design and optimization for structure of TiB_2/Ti FGM armor[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.

[46] NAN L, SHEN Z W, TAO Z G. Design theory and anti-ballistic effect simulation of dual phase hybrid functionally graded ceramic composite armor[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2478(5): 052003.

[47] WANG Y, LIU Q, ZHANG B, et al. Ballistic performance of functionally graded B_4C/Al composites without abrupt interfaces: experiments and simulations[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 1011-1029.

[48] CHOUHAN M, THAKUR L, KUMAR P, et al. Fabrica-

tion and ballistic performance evaluation of B_4C/AA7075 functionally graded materials for armor applications[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, 34: 4689-4705.

[49] WANG Y, LIU Q, ZHANG B, et al. Improved ballistic performance of a continuous-gradient B_4C/Al composite inspired by nacre[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 874: 145071.

[50] WANG Q S, WANG J B, WANG F C, et al. Thermal shock of gradient thermal barrier coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 1999, 11: 19-21.

[51] CHENG Z, LU G, WANG F, et al. Crack formation and development in thermal barrier coatings made up of functionally gradient materials[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003, 1: 30-33.

[52] 刘德健, 唐峰, 郭溪溪, 等. ZrO_{2p}/Ti-6Al-4V 梯度热障复合材料层制备及组织性能[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(12): 112-117.
LIU D J, TANG F, GUO X X, et al. Preparation method microstructure and properties of ZrO_{2p}/Ti-6Al-4V functionally graded thermal barrier composites layers[l]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2017, 45(12): 112-117.

[53] 罗伟, 邬震泰. 火焰喷涂 Al_2O_3/TiO_2-NiCrBSi 梯度热障涂层的微观组织[J]. 材料工程, 2001(2): 22-25.
LUO W , WU Z T . The Microstructure of Al_2O_3/TiO_2-NiCrBSi graded thermal barrier coatings produced by flame spraying [J]. Journal of Materials Engineering, 2001, 2: 22-25.

[54] 沈意斌, 汤玉斐, 李大玉, 等. 流延法制备管状 ZrO_2/SUS316L 功能梯度材料[J]. 功能材料, 2014, 45(17): 17130-17135.
SHEN Y B, TANG Y F, LI D Y, et al. Fabrication of tubular ZrO_2/SUS316L gradient materials by tape casting[J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(17): 17130-17135.

[55] PANG M, ZHANG X H, LIU Q X, et al. Effect of preheating temperature of the substrate on residual stress of Mo/8YSZ functionally gradient thermal barrier coatings prepared by plasma spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 385: 125377.

[56] 肖淳. 梯度功能材料的多尺度建模[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
XIAO C. Multiscale modeling of functionally graded materials [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.

[57] 曾涛, 杜长龙, 成夙, 等. C/SiC 陶瓷基梯度点阵复合材料结构传热性能[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22(4): 129-134.
ZENG T, DU C L, CHENG S, et al. Heat transfer performance of C/SiC sandwich composites with graded lattice cores[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(4): 129-134.

[58] DAI T, LI B, TAO C, et al. Thermo-mechanical analysis of a multilayer hollow cylindrical thermal protection structure with functionally graded ultrahigh-temperature ceramic to be heat resistant layer[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 124: 107532.

[59] WANG H, JI R, QU F, et al. Three-dimensional pore-scale study of the directional heat transfer in a high thermal conductivity carbon/carbon composite protection system[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 112: 106609.

[60] 王永康, 王伟民, 顾晓红, 等. 耐烧蚀梯度涂层材料的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 1994, 17(4): 7-11.
WANG Y K, WANG W M, GU X H, et al. Erosion resistance gradient coating[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1994, 17(4): 7-11.

[61] 唐新峰, 张联盟, 袁润章. PSZ-Mo 系梯度功能材料的热应力缓和设计与制备[J]. 硅酸盐学报, 1994(1): 44-49.
TANG X F, ZHANG L M, YUAN R Z. Thermal stress relaxation design and fabrication of PSZ-Mo functional gradient materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1994(1): 44-49.

[62] 高晓菊, 王伯芊, 贾平斌, 等. 功能梯度材料的制备技术及其研发现状[J]. 材料导报, 2014, 28(1): 31-36.
GAO X J, WANG B Q, JIA P B, et al. Preparation technology and latest development of functionally gradient materials[J]. Materials Review, 2014, 28(1): 31-36.

[63] 凌云汉, 周张键, 李江涛, 等. 超高压梯度烧结法制备 W/Cu 功能梯度材料[J]. 中国有色金属学报, 2001(4): 576-581.
LING Y H, ZHOU Z J, LI J T, et al. Fabrication of W/Cu functionally gradient material by graded sintering under ultra - high pressure [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001(4): 576-581.

[64] QIAN C, CHENG H, LI K, et al. Corrosion behavior of functionally graded cemented carbides with CoNiCrFe binder[J]. Corrosion Science, 2023, 222: 111383.

收稿日期: 2024-03-15; 录用日期: 2024-05-15
通讯作者: 李文智(1991—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为非金属与复合材料研究与应用, 联系地址: 天津市东丽区空港经济区东三道 35 号(300000), E-mail: liwenzhi0418@163.com

(本文责编: 张 琴)