

高技术前沿

中国是陶瓷的故乡。陶瓷不仅是人类文明史上第一个人工制成的材料,更承载着厚重的历史。精美和易碎,曾是瓷器的代名词。不过随着时间推移,人们在传统陶瓷制作工艺基础上,通过与人工合成的高纯度无机化合物进行配比,制造出了具有高强度、高性能、耐腐蚀等特性的新型陶

瓷。耐烧蚀陶瓷,便是其中的一种。

作为前沿材料,耐烧蚀陶瓷在特种涂料、工业生产和航空航天等领域都有着广阔的应用前景。那么,耐烧蚀陶瓷究竟是什么?它有哪些独特的优势?又有着怎样的发展潜力?请看本期解读。

耐烧蚀陶瓷:未来飞行器的“防火衣”

■ 透心一 何国梅



梯度结构的优势

在了解耐烧蚀陶瓷之前,我们不妨先来了解一下陶瓷材料的分类。

陶瓷材料主要分为功能陶瓷和结构陶瓷两类。

功能陶瓷,是指在应用时主要利用其非力学性能的陶瓷材料。这类陶瓷材料通常具有电学、磁学、光学等性能,部分甚至具有耦合功能,被广泛应用于生物医药、电子信息、集成电路、移动通信、能源技术和国防军工等领域。比如我们去看牙科医生,医生为我们修补牙齿的材料,很多就是功能陶瓷。

结构陶瓷,是指主要利用其力学、热学及部分化学性能,应用于高温环境下的先进陶瓷产品。这类陶瓷材料通常具有高强度、高硬度、耐腐蚀磨损等优点,主要应用于空间技术、原子能、国防军工等领域。

我们今天介绍的耐烧蚀陶瓷材料,便属于结构陶瓷。它是一种能够在极端温度下保持性能稳定的高级陶瓷材料。那么,耐烧蚀陶瓷又有哪些独到之处呢?

首先,耐烧蚀陶瓷可以长时间在高温和氧化状态的环境中工作,如航天器的热防护系统。普通结构陶瓷虽然具备

一定的耐高温特性,但并未专门针对抗烧蚀性能进行优化。

其次,在微观结构方面,耐烧蚀陶瓷具有梯度结构,这种结构如同引火线一般,能将热负荷进行分散,有效减少局部过热,大大提升材料的耐高温性。此外,为了在提高耐热性的同时保持一定的机械强度,耐烧蚀陶瓷通常设计为具有致密表面层的多孔结构,在保证材料轻量化的同时,提供优异的耐烧蚀性能。部分耐烧蚀陶瓷表面还均匀分散着纳米级颗粒,这种结构也有助于形成连续氧化层,提高抗烧蚀性能。而普通结构陶瓷的晶粒通常较为粗大,分布可能不均匀,这使得其在材料的力学和热学性能方面具有一定的缺陷。

通过对比不难看出,耐烧蚀陶瓷相较于普通结构陶瓷而言,微观结构上更加紧密,晶界处理更为精细,这也使得它同普通结构陶瓷相比,在高温、高压、腐蚀等环境下具有更优异的性能和更好的稳定性。

高熵效应的突破

耐烧蚀陶瓷是超高温陶瓷的一种,是在对超高温陶瓷研究的基础上,根据实际需求生产出的特定材料。关于超

高温陶瓷的研究,最早可追溯到20世纪50年代。那时,二硼化铍和二硼化锆等陶瓷材料就已被作为核反应堆的防护材料。

20世纪60至80年代,随着美国高超声速飞行器技术的发展,一般的高温陶瓷已无法满足飞行器的热防护需求。因此,美国空军材料实验室开始资助ManLabs实验室开发具有耐超高温抗氧化烧蚀特性的超高温陶瓷,这也是耐烧蚀陶瓷的前身。

步入20世纪90年代,美国国家航空航天局(NASA)针对超高温陶瓷热结构件展开装机飞行试验。虽然该实验暴露了陶瓷材料固有的脆性,但也成功证明了该材料优异的抗烧蚀能力,充分展现出其在极端环境下的巨大应用潜力。此后,针对超高温陶瓷的强化设计与研究完成了新的热点。

近年来,新的材料设计理论——“高熵效应”出现。该理论最初由高熵合金发展而来,指的是在高熵合金中,由于多种元素以接近等原子比形式混合,使得混合形成的体系能够获得较大的混合熵,从而使体系更倾向于形成固溶体而非金属化合物。随着高熵合金研究的不断深入,高熵效应逐渐扩展到其他材料体系之中。

由于高熵效应的存在,高熵超高温陶瓷材料具有许多新奇的性能,特定的金属元素组合使该材料表现出优异的高强度、高塑性、高抗腐蚀性等优点,这也为耐烧蚀陶瓷的产生埋下了伏笔。

2017年,中南大学黄伯云院士团队历经15年攻关,通过大量实验,开发出一种新型耐烧蚀陶瓷涂层及其复合材料。它具有稳定的碳化物晶体结构,由锆、铪、碳和硼4种元素组成。这种材料可以为高超声速飞行器关键部位提供可靠的保护,在高达3000℃的热气流冲击下安然无恙。

这一研究成果一经发表便备受瞩目。业内人士称:“上述研究成果将会点燃学术界对四元体系材料在高超声速领域应用的研究热情和兴趣,因为这代表着一种极有应用前景的材料体系。”如果该成果进入实际应用,将使人类乘坐高超声速飞行器2小时从北京飞到纽约成为可能。

发展机遇的涌现

随着科技的不断发展,许多领域对材料的硬度、熔点、化学稳定性提出了更高的要求,抗烧蚀性能和抗热震性能突出的耐烧蚀陶瓷,也因此获得了更多的

发展机遇。

在航天领域,耐烧蚀陶瓷因能够承受高温燃气的冲刷和烧蚀,常被用于航空发动机的热端部件,如火焰稳定器和喷管材料等。航天器在从宇宙重返大气层时,外部温度会因气动加热效应而急剧上升。对于近地轨道飞行的飞船、探测器等,外部温度通常可达1000℃。从月球、火星等更遥远轨道返回的航天器速度更快,外部温度可能更高。美国的猎户座飞船首次完成绕月飞行任务返回地球时,外部温度一度超过2700℃。耐烧蚀陶瓷则是在此种环境下,保护航天器不受高温烧蚀的关键材料。它能够充分吸收并分散热量,让航天器内部处在安全的温度区间,防止航天器内部结构遭到损坏。中国的神舟载人飞船返回舱外部就涂有耐烧蚀陶瓷和隔热材料,即使经受接近2000℃的高温灼烧,也不会被烧毁,返回舱内部依旧保持适宜温度。

在化工领域,耐烧蚀陶瓷也能大展身手。燃气轮机因长期处于高温环境下,内部部件的工作寿命和维护周期都受到影响。将耐烧蚀陶瓷作为涂层,涂在燃气轮机元件表面,可有效降低金属部件的热应力,提高使用寿命,延长维护周期,降低维护成本。耐烧蚀陶瓷优异的隔热特性,也能有效减少热量损失,提高燃气轮机的热效率。

耐烧蚀陶瓷的应用,也为破解高超声速飞行器的发展难题提供了方案。当前,许多国家已在高超声速飞行器上实现了突破,但是一些关键技术难题仍需解决,如材料、气动等。“新热障”问题是目前面临的重大难题之一。高超声速飞行器在大气层执行飞行任务时,受到气动加热,表面温度可达1800℃以上,这就要求其外壁以及内层构件具有良好的高温热防护能力。一般的超高温陶瓷材料因其各组分间热膨胀系数差异较大,并不适用于制作关键抗热部件。为改善这一情况,科研人员通过在超高温陶瓷基材料中加入碳化硅、石墨等,制作出符合条件的耐烧蚀陶瓷材料,断裂韧性、抗热冲击性能明显改善。这样不仅提升了其本身的机械强度和抗氧化烧蚀性能,还因具有较小的密度,大大减轻了质量,节省了高超声速飞行器在执行任务飞行时的燃料消耗,提高了燃料的利用率。

如今,耐烧蚀陶瓷凭借其在高温、烧蚀等极端环境下的优异性能,在航空航天、石油化工、汽车制造等领域展现出广阔的应用前景。随着技术的不断发展进步和市场需求的持续增长,未来耐烧蚀陶瓷或将迎来新的发展风口。

上图:形形色色的陶瓷材料。

左图:带有高温陶瓷涂层的飞行器鼻锥。

资料图片

热点追踪



生物混合机器人。

AI制图

前不久,一个长达18厘米的人类肌肉驱动的机械手,登上《科学·机器人》封面。这款机械手尺寸超过此前厘米级的生物混合机器人,可成功完成“剪刀手”等多关节复杂动作,标志着生物混合机器人从实验室概念验证向实际应用又迈出了

一步。

生物混合机器人是什么?有什么优势?在哪些领域可能发挥作用?

生物混合机器人,简单来说,就是将活体生物组件与人工机械、电子器件等合成组件相结合,形成的自主或半自主智能系统。其中生物组件来源广泛,可以是单个心肌细胞、骨骼肌细胞,也可以是神经组织,甚至是完整的生物器官或完整的生物体。

其核心原理是基于生物组织的独特生理机制,如肌肉的自主收缩、神经组织的信号传导、昆虫触角的嗅觉感知、真菌对光的电响应等,通过电刺激、光遗传学调控、磁场控制或化学物质诱导等多种方式,精准激活生物—机械耦合系统的动态协同响应,从而实现超越传统机电系统的仿生运动性能。

这种深度融合架构,催生出生物混合机器人的多项核心技术优势。

——微观尺度上的操控能力。生物混合机器人在微型化方面具有优势,可以实现微米级甚至纳米级的精准操控,并保持结构稳定性和功能完整性。这对于在狭小空间执行任务至关重要。无论是在医疗领域进行精准的微创手术,还是在危险环境中执行救援任务,甚至于在隐蔽的战场边缘执行侦察任务,生物混合机器人都能发挥独特优势。例如,新加坡南洋理工大学将马达加斯加发声蟑螂进行改造后,让其可以钻进废墟缝隙,搜寻伤员。

——低能耗与高效能量转换。生物混合机器人可利用心肌细胞、菌丝体等生物组织将化学能转化为机械能,构建自给自足的能量循环系统,避免传统电机与电池组复杂能量转换过程中的损耗。实验数据

『生物混合机器人』来了

■ 华娟 刘雪涛

表明,心肌细胞驱动的生物混合机器人通过周期性收缩实现运动,其能量转换效率显著高于传统齿轮驱动系统。

——环境感知与动态响应能力。由于生物混合机器人融入了生物元素,可以更好地适应复杂多变的外界环境,还具有生物降解特性,对环境更友好。例如,杏鲍菇菌丝体与电极结合的机器人能够实时感知光照、温度变化,在极端盐度或低温环境中自主调整运动形态。

此外,生物混合机器人还可能具有自修复特性,在机器人受损时能自我修复部分功能,大大提高使用寿命。

这些优势为生物混合机器人多元化应用场景的拓展提供了坚实基础。

生物混合机器人是一种融合了多种学科的前沿科技。它代表的不只是一项新技术,更是一种全新的思维方式——将生命的一部分赋予予机器人。在生物混合技术治理体系的规范下,这种新技术将会带来怎样的可能?让我们共同期待。

分子磁体技术实现新突破——

为军用海量信息存储提供新方案

■ 董浩 卫怡博

新看点

在信息化战争时代,数据存储与处理能力已成为决定战场胜负的关键因素之一。近日,英国曼彻斯特大学与澳大利亚国立大学联合研发出一种新型分子磁体技术。该技术使得邮票大小的存储介质可以存储传统硬盘百倍以上的数据容量。这为未来战场上的微型化、高密度信息存储系统提供了创新的解决方案。不过,一些新的问题也随之浮出水面。

现代军事行动对数据存储的需求呈指数级增长。一架先进的侦察机单次任务可产生数TB的高清影像数据。智能化作战系统、卫星通信和无人装备的普及,更使得战场数据量远超传统存储技术的承载能力。目前,军用级固态硬盘虽具有较高可靠性,但存储密度已接近物理瓶颈,难以满足未来战争对海量数据实时存取的需求。

此次研发的单分子磁体技术,利用单个碱基分子的磁性特性存储数据,理论存储密度可达每平方厘米3TB。如果应用于军事领域,指甲盖大小的芯片就可以存储数百万页加密军事文件,或数万小时的高清战场监控视频。可以想象,未来单兵作战系统的存储模块会大幅缩小体积,战略级数据中心的存储容量将提升百倍以上。

该技术的另一潜在军事价值,在于与量子计算的兼容性。传统硬盘

依赖宏观磁性材料存储数据,而分子磁体则基于量子自旋效应,这使得它可能成为未来量子加密存储的核心载体。“存储设备即便被缴获,也难以在分子层面破解数据,这比现有的硬件加密技术更可靠。”一位专家称。

在军事科技竞争日益激烈的今天,存储技术的突破往往被低估,但它却是信息化作战的基石。未来,分子磁体技术在军事方面可能有三大应用方向。

一是微型化战术数据终端。单兵作战系统、无人机和微型侦察机器人可搭载分子存储芯片,在极小体积内存海量战场情报,提升战场态势感知能力。

二是高密度战略级数据中心。军事指挥中心、卫星地面站和舰载信息系统可借助该技术,在有限空间内存海量数据,提升战时持续作战能力。

三是抗干扰战场信息存储。由于分子磁体不受电磁脉冲等传统电子战手段的直接影响,未来或可用于构建抗干扰的战场黑匣子,确保关键任务数据在极端环境下不丢失。

不过,低温依赖始终是分子磁体技术面临的巨大挑战。此前,大多数类似材料需要在接近绝对零度(-273℃)的环境下运行,难以投入实际应用。而此次研发的新型分子磁体可在-173℃的环境下稳定工作,虽然突破了之前的温度纪录,但想要真正实现实际应用,还有很长一段路要走。

