

用超材料给电子元器件做身“隔热衣”

◎本报记者 吴纯新 通讯员 高翔

统计资料表明,温度每升高2℃,电子元器件可靠性下降10%。降低电子元器件工作时的温度,对提高可靠性、精密性及使用寿命都具有重要意义。如何解决在高温环境下,电子元器件使用效能大打折扣的难题,成为研究焦点。

日前,华中科技大学机械科学与工程学院高亮教授团队设计了多种具有自由形状、背景温度独立、全方位功能的热隐身超材料,能屏蔽外部温度场对器件内部物体的干扰,实现主动隔热,可用于热敏元件的热防护。相关研究成果近日发表于国际期刊《先进材料》。

通过对热流的操控实现超常热功能

近年来,科研人员通过合理设计材料的结构构型,获得了具有超常物理性能的超材料。其中,热学超材料作为超材料的一种,在能源高效利用、电子功率元器件热管理等领域具有重要的应用潜力。

理论上讲,通过设计热学超材料的结构构型,可实现对热流的操纵与控制,从而获得热隐身、热集中、热伪装、热旋转等超常热功能。

目前,实现电子元器件热隐身功能,就是把热隐身超材料放在元器件四周或将元器件盖起来,以隔绝外部的大部分热。

上述研究团队成员华中科技大学机械科学与工程学院教授肖蜜表示:“用于热量屏蔽的材料主要包括以下几种:纳米复合材料、多孔陶瓷材料、碳纳米管、自然材料混合的热学超材料。”

该研究团队提出了深度学习赋能的热学超材料拓扑优化设计方法,实现了自由形状热学超材料的智能设计。

该方法采用深度生成模型,根据热学超材料的定制功能需求,可自动、实时地生成具有目标热传导张量的拓扑功能单元,进而快速生成热学超材料。

基于该思路,研究团队设计了热隐身超材料,并通过数值仿真和热学实验,验证了其具有良好的热隐身功能。

该研究团队设计的热学超材料由自然材料混合而成,但具备自然材料不具有的超常热性能,而且超材料内部的自然材料通常是不均匀分布,且各向异性的。

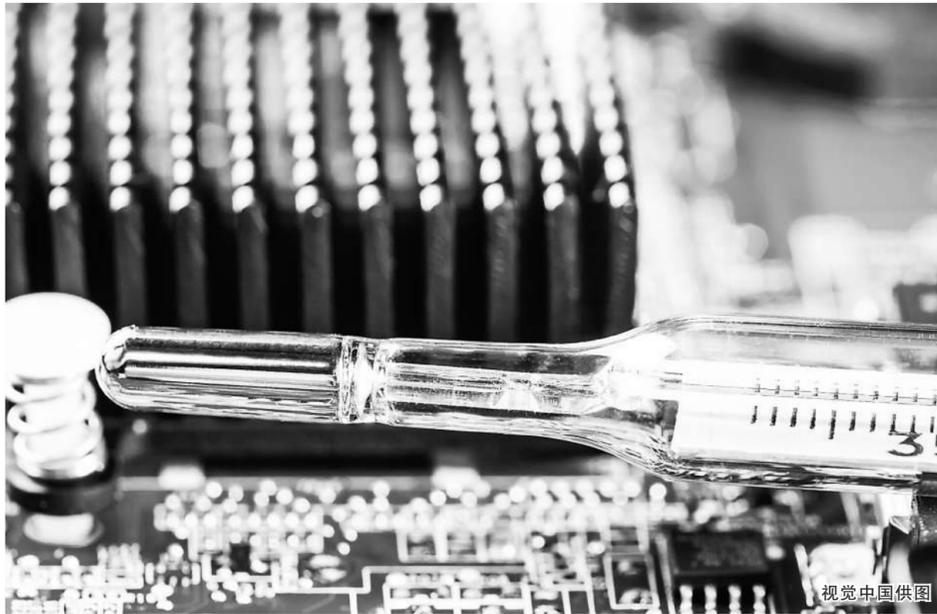
肖蜜说,这类材料屏蔽热量的原理是:通过优化设计材料的合理分布,让热量绕过特定区域从而实现热量屏蔽。

在热量屏蔽方面国内外取得一系列成果

当前,热学超材料在热量屏蔽方面的研究,国内外都取得了一些进展。

国际上,美国哈佛大学教授Narayana和Sato根据有效媒质理论,利用两种不同热导率的材料从内向外交替叠加,获得等效的各向异性热导率,首次制备了热隐身超器件,掀起了热隐身超材料的研究热潮。

此后,德国科学院院士Wegener团队通过在铜板上钻孔并填充PDMS胶水,成功验证了瞬态热隐身超器件。新加坡南洋理工大学张百乐教授团队通过精巧的三维金属加工技术,首次成功制备了三维超薄热隐身



视觉中国供图

超器件。我国南方科技大学李保文教授和新加坡国立大学仇成伟教授团队采用两种各向同性材料实现了双层热隐身超器件设计与实验验证。浙江大学何赛灵教授团队采用坐标变换方法在半导体硅上钻孔,设计了热多场隐身超器件,实现了外部热量和电流的屏蔽与防护。

尽管国外最先实现了热隐身超器件的设计与制备,不过热隐身超材料的概念最早是由我国复旦大学黄吉平教授团队提出的。在2008年,他们提出变换热学理论,首次预言了热隐身超材料,该超材料可保护内部的物体免受外界热量的干扰,且超材料本身不对外界产生任何的扰动。在此基础上,黄吉平团队又开展了大量研究:提出了非线性变换热学理论、设计了宏观热二极管和环境温差中零能耗保温超器件等。

整体而言,国内外热学超材料的研究并驾齐驱,处于并跑阶段。

高亮说,热学超材料可用于航空航天领域,减少航空航天结构的热负荷;可用于能源装备领域,提高设备的防护和热利用效率;也可用于信息电子领域,改善热敏电子器件的热稳定性,提高其使用寿命等。

大面积推广应用尚需攻克一些难题

虽然在信息电子领域,热学超材料已初步具备了应用条件,但在大面积推广应用和产业化方面还存在一些难点。

高亮介绍,当前热学超材料产业化程度相对较低。虽然一些研究所和公司在该领域进行了相关研发,但在大规模商业化和广泛应用上还面临技术成熟度、成本效益等方面的挑战。

在材料制备技术方面,热学超材料的制备需要高精度制备技术,从而精确控制材料的结构、组成,实现热学超材料设计和制备的一体化和一致化。

在材料多功能性上,热学超材料在实际应用过程中仅考虑热学性能还不够,在不同应用环境中,根据不同

需求,还需要考虑其热稳定性、机械强度、耐高温、耐腐蚀、耐磨损等特性。

此外,在材料成本方面,在推广应用,热学超材料的成本问题是关键。目前,热学超材料制备成本相对较高,限制了其应用范围。

高亮表示,总的来说,热学超材料产业化应用还有较多技术问题待解决,需要更多研究机构和人员的投入与攻关。伴随科学技术的不断发展与成熟,相信热学超材料产业化应用会很快实现。

相关链接

隐蔽热流,堵不如疏

热学伪装常规做法是平衡目标与背景之间的热辐射,最理想情况就是让目标的红外特征完全融合到背景中。从理论上讲,传统热伪装很难实现真正意义上的热隐身效果。遇到温差变化大的复杂环境,依靠热遮盖和热绝缘固化的红外特征,反而还会暴露自身位置。

相较于“堵住”热辐射的传统方法,科研人员将功夫花在“疏导”热流上,相继实验制备出热隐身衣、热聚集器和热旋转器。

热隐身衣。相较于传统隐身装置,基于热学超材料引导热流特性制备的“隐身衣”,能够实时引导背景热流避开被保护的物体,无论隐身区域温度如何变化,都不会对外界的温度分布产生丝毫影响。

热聚集器。引导热流避开中间区域可以做到热隐身,而引导热流向中间区域靠拢就能实现热聚集。这类装置可以作为一种非侵入式的热器件服务于热电效应,从而提高能量转化效率。

热旋转器。基于同样的引导热流原理,热旋转器的引导对象由背景换到了核心区域,通过材料设计实现对中心区域热流的变换引导。从外部观测中心区域红外特征,就像整个空间旋转了一个特定角度,从而出现一类海市蜃楼般的现象。

高性能金属基润滑耐磨损材料制备有了新思路

◎本报记者 颜满斌

7月30日,科技日报记者从中国科学院兰州化学物理研究所了解到,该所固体润滑国家重点实验室高温摩擦学课题组在新型润滑耐磨损高熵/中熵合金设计制备和性能调控等方面进行了系统研究,取得了系列进展。给出一种构筑多级纳米异质结构和成分波动特征来实现合金低磨损的新方法,相关研究成果近日发表于综合性学术期刊《研究》。

新型高熵/中熵合金具有诸多新奇特性,为设计制备高性能金属基润滑耐磨损材料提供了新启发,是目前材料学和摩擦学研究的热点和前沿。

在解决高温润滑与磨损方面具有重要应用价值

传统合金往往是由一种或两种主要金属元素构成,其他合金化元素的比例相对很低。高熵/中熵合金是近年来发展起来的有别于传统合金的新型合金。高熵合金和中熵合金是由多种主要金属元素构成的合金,二者只是在主要金属元素的种类和数量上有差异。一般而言,高熵合金包含5个或5个以上等原子比的金属元素,而中熵合金则包含3个金属元素。高熵/中熵合金展现出许多优异的力学和物理性能。

强度、塑性、热稳定性和耐磨性优于传统合金

中低温下,金属材料摩擦表面会发生严重的弹性变形、局部断裂和磨粒磨

损,而高温下则会发生材料黏着、软化变形和氧化磨损,这些因素导致金属材料在宽温度范围内表现出严重的摩擦磨损。针对上述问题,晶粒细化和复合润滑相/抗磨相是目前提高金属材料耐磨损性能的主要手段。

“但是,这两类方法通常会引发新的问题,如当晶粒细化至纳米尺度时,可能会在摩擦过程中引发严重的纳米晶不均匀塑性变形,增加磨损;复合润滑相/抗磨相和基体相之间的错配界面可能会使摩擦界面在磨损过程中发生脆性断裂。”程军说。

研究表明,如果在摩擦副界面之间引入一个能够逐级释放摩擦应力的界面层,可极大减小摩擦过程中不均匀塑性变形和界面错配导致的磨损问题。然而,这种特殊的界面层难以通过常规的制备或加工手段获得。

基于这个问题,研究人员考虑是否可通过调控合金的成分和结构设计制备一种新型金属材料,使其能在中低温摩擦过程中原位形成逐级释放应力的梯度界面耐磨层,高温摩擦过程中形成耐磨损粗糙层,从而在宽温度范围内保持稳定的低磨损性能。

高熵/中熵合金独特的浓缩固溶体结构使其表现出优于传统合金的强度、塑性、热稳定性和耐磨性等性能。因此,研究人员以镍元素为溶剂,引入等摩尔比的铝、钨、钛和钒4种元素作为合金化元素,

通过将合金化浓度从25 at.% (原子百分数)提高至50 at.%,制备了一种具有纳米分级结构和成分波动特征的新型镍钨钨钽钽钽合金。为了使溶质元素之间形成高熵合金的过饱和固溶体结构,元素粉末需经历32小时的机械合金化过程,形成面心立方结构和体心立方结构的混合固溶体粉末。

研究人员通过放电等离子烧结使粉末在1050℃发生固相分离,并在冷却后固结成型,最终形成高体积分数的纳米耦合晶粒相和分级纳米沉淀相,其呈现纳米分级结构和成分波动特征。纳米分级结构异质相的形成将使合金可在磨损诱导的变形过程中沿深度方向原位形成梯度界面层,选用高浓度的易氧化的铝和钨会促进合金在高温摩擦过程中快速形成保护性氧化釉质层。

此外,高浓度的钨可显著提升合金体系的晶格畸变效应,从而提高摩擦界面层的屈服强度。

“与传统合金相比,该合金的结构由分级纳米耦合晶粒组成,表现出纳米尺度的成分波动特征,这种独特的异质结构使合金在室温至800℃宽温度范围内的磨损过程中自发激活自适应摩擦界面保护行为,形成耐磨损纳米梯度摩擦层或釉质层。该材料作为高温抗磨材料具有重要的应用价值。”程军说。他认为该合金成分可调,可采用热压、喷涂等多种工艺固化成型,有望实现产业化应用。

寻材问料

光热发电用347H不锈钢

耐高温熔盐腐蚀性能大幅提升

科技日报讯(记者颜满斌 通讯员张燕)7月30日,科技日报记者从酒钢集团了解到,酒钢集团自主研发的光热发电用耐高温熔盐347H不锈钢耐熔盐腐蚀性能大幅提升,市场应用反馈良好。

347H不锈钢属于高碳含钨Cr-Ni奥氏体不锈钢,由于含稳定化元素钨,其耐晶间腐蚀性能良好,具有较高的高温强度和良好的抗高温氧化性能,被广泛应用于太阳能光热电站熔盐储罐制造等领域。

“光热发电主要是将太阳能收集起来转化为热能,存储于高温熔盐中,从而实现无光照或夜间连续发电,达到减少供需矛盾以及提高能源系统可靠性的目的。347H不锈钢在太阳能光热电站中主要用于制作高温熔盐储罐和高温介质传输管道。”酒钢宏兴股份公司钢铁研究院不锈钢研究所冷轧技术开发工程师刘天增介绍。

目前,国内市场“光热+光伏”项目方兴未艾,347H不锈钢市场需求不断增大,成为国内外制造企业追捧的“香饽饽”。酒钢集团迅速捕捉市场信息,于2019年开始与兰州理工大学、北京科技大学、兰石集团等高校和企业合作成立创新联合体,集中优势力量研发347H不锈钢。

研发过程中,项目组主动与国外储罐制造相关企业对标对表,利用专业软件对工艺难点进行模拟分析,重点开展中试和现场小批量试验。通过实施一系列行之有效的攻关举措,项目组自主研发出光热发电用高温熔盐储罐用347H不锈钢,其耐晶间腐蚀性能、耐高温及熔盐腐蚀性能达到国外同类产品同等水平。

药物提纯无需蒸馏

一张薄膜即可实现常温过滤

◎洪恒飞 本报记者 江耘

近年来,有机溶剂纳滤技术逐渐兴起。利用该技术常温环境下,通过压力作用,就能对工业物料在分子级别进行分离,相比传统的热法分离,其可以显著降低能耗。然而,在其中起关键作用的聚合物膜材料,存在易被有机溶剂侵蚀、孔径不稳定等问题。

针对这些问题,浙江大学高分子科学与工程学系、浙江大学绍兴研究院朱利平教授研究团队运用分子层沉积法,制备出可用于有机溶剂纳滤的超薄聚酰胺纳米微孔膜,令药物提纯不再依赖于加热蒸馏过程。主要的纳滤分离层,厚度可在数十纳米范围调节。相关研究论文近日在线发表于国际学术期刊《美国化学会·应用材料与界面》。

生物制药、化学合成等过程会使用大量有机溶剂,传统生产工艺普遍采用蒸馏、精馏等方法纯化药物、回收溶剂,依赖物料相变过程,能耗多且成本高。

“传统的热法分离可理解为烧水熬制,相变过程即气态液态之间的转换,能耗之高不难想象。”朱利平介绍,根据业内统计,工业分离过程能耗约占全球总能耗的10%—15%,占所有工业过程能耗的45%—55%。如果用膜分离技术替代热法分离,可以节约能耗80%—90%。

朱利平说,在用于药物纯化与精制等时,有机溶剂纳滤技术所采用的聚酰胺纳滤膜就像筛子一样,把有效成分过滤分离,过程温和,可避免热敏性成分失活,且不发生相变、能耗低,对助力“双碳”战略具有重要意义。但现有的水处理用聚酰胺纳滤膜材料难适用于有机溶剂体系,目前仅少数国家实现了有机溶剂纳滤技术的工业应用。

朱利平研究团队历时三年,就提升纳滤膜稳定性、过滤精度等问题开展攻关。

“最终成品就是那么一张‘纸’,虽然看起来很薄,但实际上有三层结构。”论文通讯作者之一、浙江大学高分子科学与工程学系副研究员方传杰介绍,涤纶材质的无纺布作为支撑层,厚度为0.1—0.2毫米;聚酰胺材质的多孔分离支撑层,厚度约为250微米;交联聚酰胺结构的纳滤分离层,对分离效果起决定性作用。

在实验室内,科技日报记者看到,科研人员将维生素B₁₂与乙醇的混合溶液倒入过滤池,启动磁力搅拌器确保溶液浓度均匀,操作调节阀向过滤池内稳定供压,片刻之后,顺着过滤池的导管,乙醇就从溶液中被逐渐分离出来了……

“过滤池底部铺垫的就是我们研制的超薄聚酰胺纳米微孔膜,其他与维生素B₁₂药物分子大小类似的药物分子均可通过此技术与溶剂分离,实现浓缩和提纯。”论文作者之一、浙江大学高分子科学与工程学系硕士生李付鹏说。

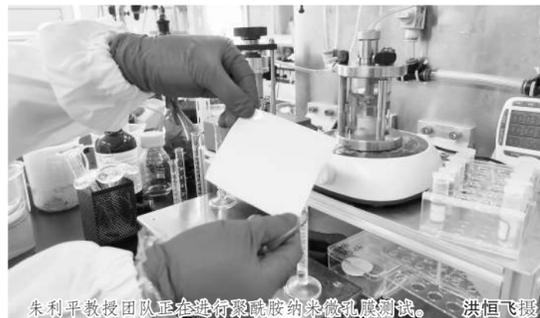
整张薄膜中,有机溶剂先后和纳滤分离层、超滤支撑层、无纺布接触。方传杰解释道,中间的超滤支撑层就像在无纺布上刮一层腻子,然后浸入水中凝固成膜。这层“腻子”表面还能生成凸起的化学连接点,参与生成纳滤分离层。

方传杰告诉记者,有机溶剂中要分离的溶质直径约0.5—2纳米,兼顾渗透效果和耐用性等,纳滤膜分离层需要具有孔径小、厚度薄、化学耐受性强等特点。

朱利平介绍,此次研究中,团队采用不同于常规界面聚合的分子层沉积法,利用“腻子”表面的化学连接点进行表面化学吸附并发生反应而形成分子尺度的沉积薄膜,还能通过控制分子层沉积周期数精确控制薄膜的厚度,一层层“编织”出精密筛网。

经过多次实验验证,研究团队制备的聚酰胺膜表面光滑,厚度在10—35纳米范围内,线性可控、结构均一完整且应用稳定,对有机溶剂中目标物的过滤效率在90%以上。

“团队这项成果处于实验室阶段,成果转化计划正有序进行。”朱利平表示,全球范围内,相关产业总体处于起步阶段,未来的市场前景值得期待。



朱利平教授团队正在进行聚酰胺纳米微孔膜测试。 洪恒飞摄