http://pmse.scu.edu.cn

机床基础件用颗粒增强树脂基自愈复合材料研究进展

尹海鹏，李有堂，李武强，黄 华
(兰州理工大学 机电工程学院，甘肃 兰州 730050)

摘要：钢和铸铁的热稳定性和动态性能不足是影响机床精密加工的主要因素之一，同时矿物复合材料在服役过程中出现的非预期断裂、过度磨损和表面腐蚀等损伤也成为影响机床寿命和可靠性的主要问题。针对精密机床基础件对动态性能的要求和损伤的早期感知与防治问题，提出开发应用于机床基础件的颗粒增强树脂基自愈复合材料。文中首先综述了机床常用材料的发展现状，其次介绍了机床用矿物复合材料和复合结构的最新研究成果，最后重点讨论了现有智能自愈材料的自愈机理、优劣势和局限性。基于研究成果综述，总结了当前颗粒增强树脂基自愈复合材料开发面临的挑战：(1)微观-细观-宏观层面的跨尺度分析、设计理论和模拟方法；(2)微胶囊在全生命周期中抗裂性、可裂性的定向设计和特殊工况下的止裂性问题；(3)损伤竞争耦合条件下构建材料内部微裂纹应力场和位移场数学模型。

关键词：精密机床；动态性能；损伤；防治；复合材料；自愈
中图分类号：TQ315 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-7555(2023)08-0156-09

数控机床的发展关系到国家产业、经济和国防安全，开发高性能、高精度和高效机床的新型材料是提高机床加工精度重要途径之一[1]。钢和铸铁作为机床传统的制造材料，具有强度高、刚度高、耐磨性强和抗蠕变性能强等显著优点，今后依然是机床领域的主要材料，但其动态性能不足、热稳定性差、阻尼小[2]和比重大等缺点限制了在精密机床上的应用。因此，具有高阻尼和低导热系数的高硬度天然石材被用作精密设备的关键基础件[3]，但天然石材具有一定的吸水性，潮湿环境中应用时还需要薄涂环氧树脂密封层[4]。人工陶瓷用作机床床身也能获得高热和高动态稳定性[5]，但高温烧制中形成的微损伤会降低陶瓷的拉伸强度[4]。机床的热态性能和振动特性是影响精密加工的主要因素，以矿物复合材料代替传统材料制造机床基础件的研究得到国内外学者的广泛关注。

树脂基矿物复合材料以环氧树脂为基质，兼顾混合物体积稳定性、黏度、抗弯能力以及基质与集料表面的相容性，有选择地添加固化剂、稀释剂、增韧剂或偶联剂构成混合粘接剂；同时考虑复合材料的力学性能，以花岗岩集料、玻璃或钢颗粒等为主要承力结构；进一步考虑成型稳定性而添加细沙或粉煤灰，并在混合搅拌后经浇筑、振捣成型、固化、养护和脱模等程序而成。研究表明，树脂基矿物复合材料应用在机床基础件上取得了明显优于铸铁的动态特性、热稳定性、抗疲劳特性[6]，但成型、固化过程中的残余应力[7]会引起材料内部的局部微收缩，进而形成空隙、沙眼等原始微损伤，同时精密加工过程中的疲劳载荷、冲击载荷和热载荷及其交互作用也容易使原始微损伤扩展为宏观裂纹而导致结构失效[8]。虽然也有学者强调了树脂基矿物复合材料微裂纹形成、演变和危害[9]等问题，但在防治方面仍鲜有考虑。

从哲学视角分析，再先进的冶炼技术和制造工艺也很难消除材料的全部缺陷，再先进的检测和探伤手段也很难检测出全部的微观裂纹，同时已检测出的材料内部微观裂纹在未扩展到宏观裂纹前也极难修复，而且微观裂纹也是影响黏接材料安全性和耐久性的最大威胁之一，每年都要耗费大量的社会资源[10]。虽然现有研究在树脂基矿物复合材料的

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2023.0176
收稿日期：2022-10-13
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51965037，51565030)
通讯联系人：黄华，主要从事复合材料开发、复合材料加工技术与装备研究，E-mail:hh318872@126.com

静态、动态、热态性能和树脂混合物组分配比等方面积累了诸多研究成果,但对微裂纹的防治技术仍有不足。White团队[11]受生物体损伤后自愈过程的启发,提出的微胶囊自愈技术进一步拓展了机床智能材料领域。因此,针对精密机床基础件用树脂基矿物复合材料易产生微损伤的不足,借鉴微胶囊自愈技术,开发机床基础件用颗粒增强树脂基自愈复合材(Particle- reinforced resin- based self- healing composite,PRSC),通过自愈功能对材料的微损伤进行早期感知和修复,提高树脂基矿物复合材料的安全可靠性并延长设备的使用寿命。

1　树脂基矿物复合材料

国内树脂矿物复合材料的研究始于20世纪70年代,最先用于建筑领域,80年代初尝试机床领域的应用,但受诸多条件限制均未取得突破性进展。近年来,随着科研的深入,出现了多种新型机床用矿物复合材料,主要有混凝土或混凝土组合式结构、颗粒增强基树脂复合材料、纤维增强基树脂复合材料和颗粒-纤维增强树脂基复合材料等。

1.1　混凝土或混凝土组合式结构

普通混凝土应用于机床基础件在一定程度上弥补了钢和铸铁的缺陷,但弯曲强度、抗裂强度、抗冲击韧性、抗爆强度等却不如钢和铸铁,聚合物混凝土具有较高的阻尼性能,但弹性模量较小[12]。针对这些问题,Kalthoff等[13]在普通混凝土中植入钢筋,虽然材料的承载能力和黏结行为有了显著提高,但强度不足、抗磨性和耐湿性差仍是钢筋混凝土应用于机床领域的主要问题。进一步地,为兼顾钢和混凝土的材料性能,黄华等[14]制作了外部钢板、内部填充混凝土的“三明治”式组合结构,与铸铁结构相比,钢-混凝土组合式床身结构在动态性能和热态性能方面有明显的优势。Marichelvam等[15]设计的外壳铸铁和内芯玻璃纤维增强型环氧树脂滚齿机立柱的固有频率提高了40%,显著提高了机床的动态性能。类似的,Norbert等[16]用聚合物混凝土材料填充铸铁车床外壳主体,使车床车身振幅值降低68%,阻尼比提高了近109%。Weest等[17]利用高强度纤维混凝土填充聚合物设计的复合混凝土基础结构的机床底座也表现出更高的阻尼和刚度。

1.2　颗粒/纤维增强树脂基复合材料

集料是颗粒增强基树脂复合材料的主要承力结构[7],基质则主要用于在集料间传递力并将集料黏结在一起,集料和基质是影响颗粒增强基树脂复合材料宏观力学性能的主要介质,高硬度花岗岩集料是机床基础件用颗粒增强树脂基复合材料的常用集料。Yin等[18]以花岗岩为集料、双酚A环氧树脂为基质设计的机床床身具有明显优于铸铁的阻尼特性,研究表明树脂含量还会影响颗粒增强树脂基复合材料的抗压强度和抗弯强度。Mula等[19]的同类研究进一步表明集料类型、尺寸和其他填充材料也是影响颗粒增强树脂基复合材料机床结构静态和热态性能的主要因素,而D'Mello等[20]的研究表明类似矿物成分的精密机床复合材料在阻尼上与铸铁接近,但材料比重具有明显优势。此外,纤维也被用来增强树脂基复合材料的静、动态性能。曹俊成等[21]在混凝土中植入纤维来改善机床床身的动态性能,研究表明随着植入纤维的弹性模量和含量增加,纤维混凝土床身表现出更有优势的动态性能。李放[22]设计的钢纤维树脂基复合材料机床床身的综合性能相较于铸铁具有显著的优越性,能够满足超精密加工要求。Kono等[23]设计的碳纤维增强树脂基复合材料的弯曲和扭转刚度接近钢轴的80%,且热膨胀率降低到钢轴39%,大大提高了机床主轴的使用寿命。进一步的,国内外学者也开发了用于机床基础件的混合纤维或颗粒-纤维增强树脂基复合材料。Rangasamy等[24]设计的碳-玻璃纤维树脂基复合材料使机床床身的固有频率提高37%,同时阻尼比达到铸铁床身的3倍;徐平等[25]设计的钢-玄武岩纤维树脂基复合材料也具有高阻尼和高热稳定,有效提高了机床的减振抗振性能;Ahmad等[26]在钢结构外壳中填充玄武岩集料和玄武岩纤维树脂基复合材料设计车床床身,组合式复合材料最大限度地消除谐振频率;任秀华[27]将钼纤维植入花岗岩颗粒增强树脂基复合材料,使机床床身的前八阶固有频率平均提高57.5%,平均振幅降低89.1%,表现出明显优于铸铁床身的静态和动态性能。

1.3　机床材料性能比较

机床基础件的主要任务是保证机床在静态、动态和热载荷下的床身结构的稳定和加工件的精度。目前,可用于机床领域的材料十分广泛,这为机床材料选择、特殊材料开发、复合材料结构的设计提供了更多的自由。Tab.1总结了现有机床材料的材料特性,从研究成果来看,钢和铸铁因优良的静态性能依然是工业革命以来机床领域应用最广的材料,应用范围涉及机床床身、立柱、导轨、工作台、主轴及机床外壳等几乎所有零部件,但其热态性能和稳态性能劣势明显。混凝土和天然石材虽

Tab. 1 Quantitative comparison of material properties of existing machine tools[4]

Material properties	GCI (GG25)	Steel (St25)	MC (EPUMENT 145B)	UHPC (Nanor)	Granite (Gabbro Impala)	CFRP (EP/CFK)
Density/(kg·dm^{-3})	7.15	7.85	2.4	2.45	2.9	1.4
Compr. strength/(N·mm^{-2})	840	800	140	125	300	800
Bending tensile strength/(kN·mm^{-2})	340	240	35	15	20	700
Elastic modulus/(N·mm^{-2})	115	210	45	45	90	180
Thermal expansion×10^{6}/K	9	12	15	11	6.5	0.1
Thermal conductivity/(W·mK^{-1})	47	50	2.9	2.0	3.0	2.0
Moisture absorption/%	0	0	0.03	1.0	0.3	0.1
Damping(log. decrement)	0.0045	0.0023	0.0352	0.0385	0.015	0.030

note：GCI:gray cast iron; MC: mineral casting; UHSC: ultra-high strength concrete; CFRP: carbon fiber reinforced composite

然有较好的隔热、阻热效果，但受热后尺寸稳定性较差，同时静态性能也明显不如钢和铸铁，特别是抗弯强度和抗剪强度，因此常用于床身、立柱和工作台等部件，而且这类材料吸水率较高，对使用环境提出较高的要求。相比之下，树脂基复合材料虽然具有优良的热态性能、稳态性能和较低的吸水率，同时可在室温下设计制造，并且可定向设计复合材料的静态、动态和稳态性能，但提高材料的静态性能仍是这类复合材料开发的主要方向。尽管如此，树脂基复合材料用作机床基础件仍具有更大发展潜力。

2 智能自愈材料

智能材料集感知与响应、诊断与执行、结构与功能为一体，是现代新材料技术发展的主要方向和前瞻性领域[28]。随着White公开微胶囊自愈技术，自愈复合材料也成为继形状记忆合金、压电陶瓷、磁致伸缩材料、电和磁变流体以及传感器和执行器集成材料或结构[4]之后的新型智能材料，应用前景十分广阔，包括航空航天、机械装备、建筑结构、路面工程和防腐保护等工程领域[29]。材料在服役过程中不可避免地会出现各种损伤，如非预期断裂、过度磨损和表面腐蚀等，传统的修复技术难以修复材料内部缺陷[30]。基于仿生学启发的智能自愈材料可在早期对材料的损伤、演变进行感知并做出响应。根据基材中是否嵌入微结构，自愈体系可分为本征型自愈和外援型自愈体系[29]，虽然本征型自愈体系的触发相对简单并且有较高的自愈效率，但形成的自愈材料力学强度通常低于外援型自愈材料，且存在原料成本高昂并无法批量生产等问题[31]，因此外援型自愈体系更适合于机床基础件的服役工况。

2.1 外援型体系自愈机理

外援型自愈需要在复合材料内部嵌入微结构，在服役过程中由材料损伤触发自愈机制，通过外援结构芯材和复合材料基质之间的聚合反应实现损伤的修复，自愈机理如Fig.1所示。常用的外援型自愈有微胶囊、微脉管[32]和智能纳米容器[33]等自愈体系。

虽然外援结构形式各异但自愈机理基本相同，即：(1)植入外援结构的壁材和芯材之间具有长期稳定性，同时芯材必须保证长期活性；(2)外援结构的组份在自愈复合材料中达到一定的含量，能保证微损伤扩展时与外援结构的接触概率，且组份对基材的力学性能影响不大；(3)外援结构的壁材具有一定的力学强度，能保证微胶囊自愈复合材料在搅拌、振捣、预压成型和服役过程中不过早破裂，即外援结构具有一定的抗裂性；(4)服役期间外援结构的壁材在预设的外部载荷下能因微损伤的演变触发破裂机制，即外援结构具有可裂性；(5)外援结构破裂后能顺利释放芯材，芯材、催化剂和树脂基之间能发生聚合反应且生成物能阻碍裂纹进一步扩展，即微胶囊具有止裂性；(6)自愈复合材料触发自愈机制且经保养后具备二次服役的力学性能；(7)自愈复合材料的自愈能力可评估，自愈机制在一定服役期限内可反复触发。

2.2 外援型体系研究进展

在微胶囊自愈体系方面，White等[11]以环氧化物EPON 828和二亚乙基三胺混合物为环氧树脂基质

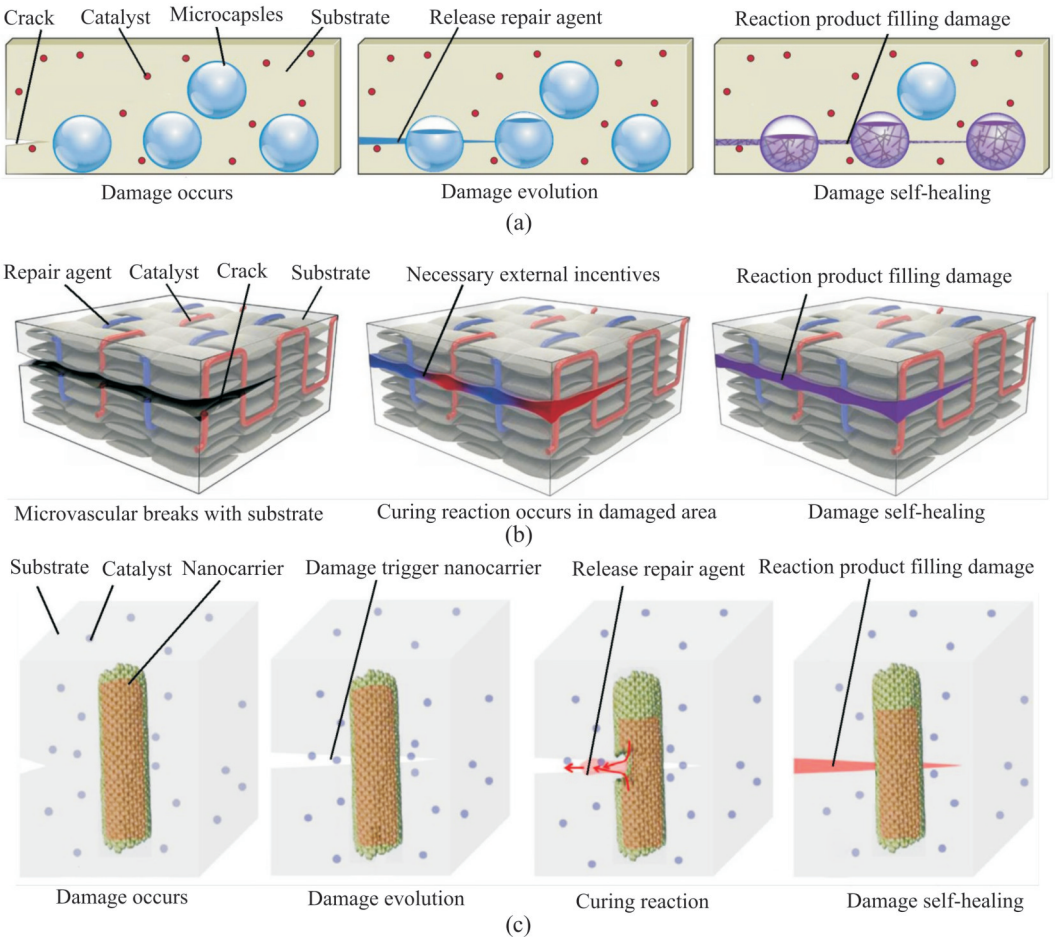


Fig. 1　External self-healing mechanism

(a): mechanism of microcapsule self-healing system; (b): mechanism of microvascular self-healing system; (c): carbon nanotube reservoir self-healing system

并植入质量分数 10%的微胶囊，在 2.5%的格拉布催化剂作用下发生双环戊二烯的开环聚合反应，样品的断裂韧性恢复率达到 75%。Brown 等[34]的研究进一步表明掺入基材微胶囊的体积分数和微胶囊直径显著影响自愈材料初始和修复后的断裂韧性，将体积分数 5%、直径 180 μm 的微胶囊掺入聚合物基体，样品的断裂韧性恢复率接近 80%。为提高微胶囊的抗裂性，Hu 等[35]利用甲基丙烯酸酯对纳米二氧化硅改性形成核壳双微胶囊，并与水性环氧树脂基结合制备的自愈环氧树脂化合物在微胶囊含量升高至 40%时，自愈效率可达到 86.5%。Ma 等[36]开发的具有良好热稳定性二甲基硫代甲苯二胺微胶囊，可使宽度低于 40 μm 的单裂纹完全愈合，自愈材料开放空隙率降低到 19.1%。目前，微胶囊自愈体系研究的重点依然是开发更优越的微胶囊自愈体系组分、微胶囊的制备和力学性能以及提升自愈材料的自愈效率和自愈功能的可重复性问题。

在微脉管自愈体系方面，Toohey 等[37]受动物肌体损伤后凝血过程的启发，构建了单体网络微脉管自愈体系，通过将 10%的格拉布催化剂注入单体微脉管网络，实现 7 个周期的损伤和自愈，并且在第 7 次愈合时仍有 70%自愈率。随后，Toohey 等[38]又构建了 4 个相互独立网络的微脉管自愈体系，依次交替注入环氧树脂和固化剂，在相同含量的催化剂浓度下可实现 16 个周期的损伤和自愈。尽管该尝试大大提高了愈合次数，但最低的自愈材料断裂韧性修复率仅约 30%。而 Hamilton 等[39]将 2 种成分的环氧树脂和脂肪族酰胺固化剂注入独立微脉管，经过多达 13 个周期的损伤和愈合，材料的断裂韧性自愈率依然达到 61%，13 次平均自愈率也高达 86%。之后，Hamilton 等[40]又将微脉管出口关闭，进口处利用主动泵不断增压以确保愈合剂充分填充断裂部位，经过多达 15 个周期的损伤和愈合，断裂韧性的自愈率几乎全部达到 100%，更重要的是，该微脉管自愈

Tab. 2 Qualitative comparison of existing self-healing systems

Comparative item	Intrinsic	Microvascular	Microcapsule	Carbon nanotube reservoir
Mechanical properties of substrate	+	++	+++	++++
Self-healing efficiency	+++	++	+	++++
Trigger condition	++++	+++	++	+
Number of self-healing	++++	+++	+	+
Repair damage range	+	++	+++	++++
Process cost	+	++++	+++	+

note: "++++" is relatively optimal, and "+" is relatively worst

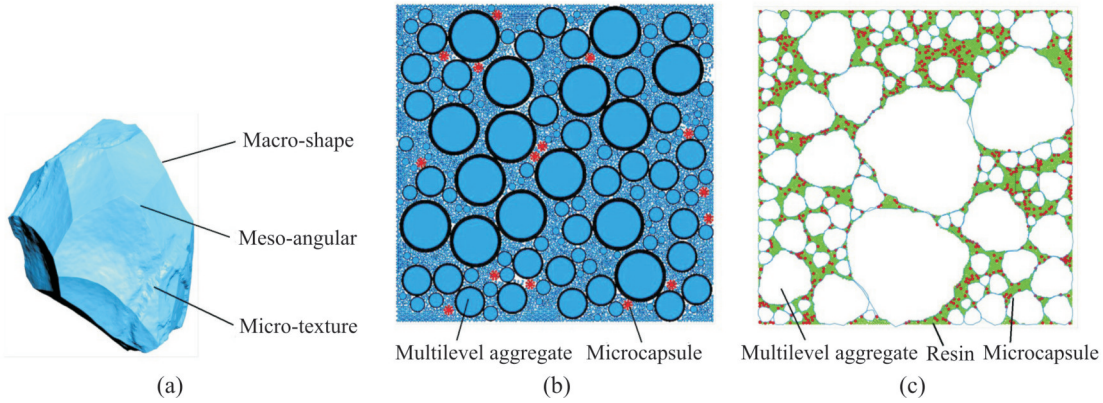


Fig. 2 Cross-scale model of aggregate and granular composites
(a): aggregate with geometrical properties; (b): AM two-phase cross-scale model; (c): ARM three-phase cross-scale model

体系中微脉管含量仅占样本体积的0.1%。进一步的，Hansen等[41]又构建出了微脉管相互独立但又交错互穿的自愈体系，经过30个周期的损伤愈合测试，接近1/3的样本自愈率达到100%，并且30次后自愈率仍高达50%。

在智能纳米容器自愈体系方面，Lanzara等[33]发现碳纳米管封装的甲烷可发生逸散，进而提出基于碳纳米容器的外援型自愈体系。之后，Gao等[42]将聚乙烯共甲基丙烯酸挤压成能承载碳纳米管的基纸设计了具有2层甲基丙烯酸和碳纳米管的基纸夹层为核心的三明治自愈体系膜，该结构不但有一定增韧能力，并且最高愈合效率高达129.4%。Asaad等[43]用油棕/银纳米颗粒包覆缓蚀剂，该结构不但在对外力引起的断裂损伤具有修复能力，而且对低碳钢腐蚀损伤提供了高达98%的自愈能力。Zhou等[44]以DA反应为自愈机理，在多壁碳纳米管表面吸附氧化锌制备的新型自愈材料不仅具有良好的热稳定性和力学性能而且具有优异的自愈和微波吸收性能，经过3个周期的损伤愈合检测，自愈效率仍然高达92%。

2.3 现有自愈技术比较

从外援型自愈材料的研究进展分析，微胶囊自愈体系只能在特定位置对单个损伤事件的修复，并且同一位置只能实现单次修复。而微脉管自愈体系通过在宿主材料中嵌入微脉管网络可处理不同程度和多尺度的损伤，并且允许几乎无限期的补充愈合剂[45]，此外微脉管自愈体系控制方法多，但微脉管内部阻塞仍然是影响微脉管自愈效率的一个主要问题。智能纳米容器自愈体系适用范围广，可修复疲劳损伤以及其他损伤，如热力学损伤、结构变形、腐蚀和磨损损伤等，同时几乎不影响基材的力学性能，但成本高、工艺复杂问题限制了其进一步应用。现有自愈体系比较如Tab.2所示。

3 PRSC开发的重点问题

颗粒增强复合材料中存在的原始微损伤具有多样性和随机性特点，同时机床基础件在复杂载荷工况下的损伤也呈现出跨尺度特点，而且微观层面的腐蚀和磨损、细观层面的空隙蠕变和宏观层面的疲劳断裂间存在着耦合竞争关系，PRSC的开发涉

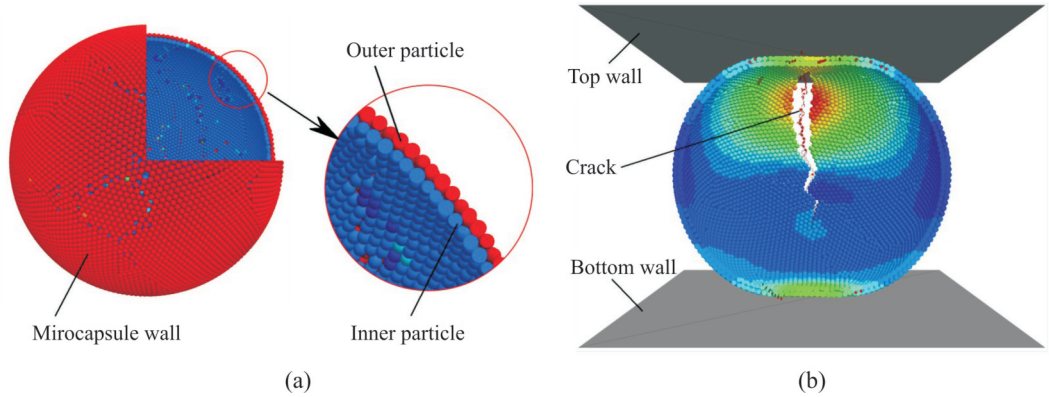


Fig. 3 Mechanical properties of microcapsule[51]
(a): DEM of single microcapsule; (b): dynamic damage of microcapsules based on DEM

及仿生学、机械、材料、化学、断裂力学和岩土力学等诸多学科领域，需要进一步深入研究的问题表现如下。

3.1 PRSC 的跨尺度模型和力学性能

集料几何学特性具有典型的跨尺度特点，建立具有几何学特性的数字化集料模型[7]是复合材料定向设计力学性能的基础，如 Fig.2(a)所示。朱月风等[46]考虑多级集料和微胶囊(Aggregate-microcapsule, AM)二相介质建立了沥青路面中自修复型体系的二相跨尺度结构，如 Fig.2(b)所示，该模型尚未考虑集料的几何学特性引起的应力集中对微胶囊力学性能的影响。因此，有必要建立 PRSC 微-细-宏观尺度下的复合材料结构件精细的数字化模型，尤其是考虑集料几何学特性的跨尺度多相介质模型(Aggregate-resin-microcapsule, ARM)如 Fig.2(c)所示。基于集料几何学特性的多相介质数字模型分析 PRSC 的静态、动态和热态力学性能，并在细-宏观层面考察 PRSC 中原始微损伤的分布、初始裂纹的萌生和宏观裂纹的演变等是颗粒增强微胶囊自愈复合材料定向设计的首要问题。

3.2 微胶囊的力学性能

微胶囊是 PRSC 构建自愈体系的核心介质，因此微胶囊的力学性能是设计微胶囊抗裂性和可裂性以及 PRSC 止裂性问题的关键。经典的 Reissner 理论[47]认为微胶囊的力学性能主要受微胶囊直径和壁厚的影响，Sagis[48]的研究表明微胶囊内部修复剂的释放也取决于微胶囊直径和壁厚。因此，基于 PFC 创建微胶囊的离散元模型(Discrete element model, DEM)从亚细观层面分析单一微胶囊的物理参数，有助于定向设计微胶囊直径、壁厚和芯壁比，如 Fig.3(a)所示。夏宇等[49]基于有限元技术预测了微胶囊的破裂位置，认为微胶囊在囊壁内侧且中间部位偏上开始破裂，但朱月风等[50]的研究表明微胶囊从囊壁外侧开始破裂。Yin[51]的研究则表明，微胶囊最先在极地区的囊壁内侧形成损伤并逐渐演变成裂纹向另一极地区扩展，破裂后在近极区形成最大裂口。因此，进一步基于单一微胶囊 DEM 的动态损伤精准分析微胶囊的破裂位置和破坏模式，使其满足抗裂性要求的同时还满足预设载荷下的可裂性要求，并保证微胶囊能顺利触发自愈机制尤为必要，如 Fig.3(b)所示。最后基于 PRSC 和微胶囊的力学性能，构建颗粒增强矿物复合材料的微胶囊自愈体系，讨论复合材料的止裂性问题。

3.3 PRSC 损伤竞争耦合机制

PRSC 内部裂纹尖端应力强度因子是判断微胶囊能否破裂的依据，但 PRSC 内部广泛且随机分布着原始微损伤和破碎集料，尤其 PRSC 在复杂载荷交互作用下，明确微胶囊在集料几何学特性和原始微损伤演变过程引起的损伤耦合竞争机制，研究跨尺度损伤的应力场、位移场，寻找 PRSC 自愈体系触发的物理量，建立 PRSC 微裂纹应力强度因子和损伤愈合动力学理论模型是 PRSC 开发的核心问题。

4 结语与展望

国内外对应用于精密机床基础件复合材料和复合结构的热态性能和动态性能的研究已经取得了很大成就，智能自愈材料经过 20 余年的发展也积累相当丰富的科研成果。智能自愈材料在提高材料服役寿命和设备安全可靠性方面有着广阔的应用前景。针对机床基础件在服役过程中因力、热载荷及其交互作用引起的疲劳损伤而提出的 PRSC 开发是一个全新的应用对象，定向设计满足精密机床

基础件服役时的静态性能，同时继承树脂矿物复合材料的动态和热态性能，进一步考虑颗粒复合材料原始损伤和损伤演变的早期防治，提出的PRSC可在一定程度上统筹上述问题，以促进我国机床精密加工技术的发展。

参考文献：

[1] 沈佳兴, 徐平, 于英华, 等. BFPC机床龙门框架组件优化设计及综合性能分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 127-135.
Shen J X, Xu P, Yu Y H, *et al*. Optimization design and comprehensive performance analysis of BFPC gantry machine framework components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9): 127-135.

[2] 尹纪财. 机床用树脂矿物复合材料力学性能及其湿热老化机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
Yin J C. Study on the mechanical properties and hygrothermal aging mechanism of resin mineral composite for machine tool[D]. Jinan: Shandong University, 2016.

[3] Brecher C, Utsch P, Klar R, *et al*. Compact design for high precision machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50: 328-334.

[4] Mohring H C, Brecher C, Abele E, *et al*. Materials in machine tool structures[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64: 725-748.

[5] Shinno H, Yoshioka H, Gokan T, *et al*. A newly developed three-dimensional profile scanner with nanometer spatial resolution[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2010, 59: 525-528.

[6] Brown E N, White S R, Sottos N R. Retardation and repair of fatigue cracks in a microcapsule toughened epoxy composite – part I: manual infiltration, composites science and technology[J]. Composites Science and Technology, 2005, 65: 2466-2473.

[7] 尹海鹏, 李有堂, 黄华. 基于几何形态学影响的集料建模及评价方法[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(6): 1184-1192.
Yin H P, Li Y T, Huang H. Modeling and evaluation of aggregate based on influence of geometry morphology[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(6): 1184-1192.

[8] Trask R S, Williams H R, Bond I P. Self-healing polymer composites: mimicking nature to enhance performance [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2007, 2: 1-9.

[9] 尹海鹏, 李有堂, 李武强, 等. 集料几何学特性对PRMC抗压强度和损伤过程的影响[J]. 工程力学,2022. doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.04.0296.
Yin H P, Li Y T, Li W Q, *et al*. Influence of aggregate geometric characteristics on compressive strength and damage process of particle- reinforced resin matrix composite[J]. Engineering Mechanics,2022. doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.04.0296.

[10] Lv L Y, Schlangen E, Yang Z X, *et al*. Micromechanical properties of a new polymeric microcapsule for self-healing cementitious materials[J]. Materials, 2016, 9: 1025.

[11] White S R, Sottos N R, Geubelle P H, *et al*. Autonomic healing of polymer composites[J]. Nature, 2001, 409: 794-817.

[12] Venugopal P R, Dhanabal P, Thyla P R, *et al*. Design and analysis of epoxy granite vertical machining centre base for improved static and dynamic characteristics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2020, 234: 481-495.

[13] Kalthoff M, Raupach M. Pull-out behaviour of threaded anchors in fibre reinforced ordinary concrete and UHPC for machine tool constructions[J]. Journal of Building Engineering, 2021,33: 101842.

[14] 黄华, 李典伦, 邓文强, 等. 混凝土数控机床支承件组合结构设计与优化研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(3): 394-402.
Huang H, Li D L, Deng W Q, *et al*. Design and optimization of concrete supporting components for cnc machine tools[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(3): 394-402.

[15] Marichelvam M K, Kandakodeeswaran K, Geetha M. Development of hybrid composite materials for machine tool structures[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 47: 6746-6751.

[16] Kępczak N, Witkowski B. Modal assurance criterion as an iron cast and hybrid machine tool's body comparison tool[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 79: 881-886.

[17] Weest J L, Betters E D, Schmitz T L, *et al*. Rethinking production of machine tool bases: polymer additive manufacturing and concrete[J]. Manufacturing Letters, 2021, 31: 33-35.

[18] Yin J C, Zhang J H, Wang W Q. Effective resin content and its effect on the overall performance of polymer concrete for precision machine tools[J]. Construction and Building Materials, 2019, 222: 203-212.

[19] Mula V R, Thyla P R, Mahendrakumar N, *et al*. Selection of resin and aggregates for particulate polymer concrete machine tool structures-a review[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 8621-8628.

[20] D'Mello J, D'Souza A G, Gowda S H, *et al*. Experimental investigation of compression, flexural strength and damping behaviour of granite particulate epoxy matrix composite[C]// Emerging Trends in Mechanical Engineering 2018. Karnataka, India: AIP Conference Proceedings,2019, 2080: 020012.

[21] 曹俊成, 黄华, 郭润兰, 等. 基于均匀化理论的掺杂纤维对混凝土床身动力学性能的影响分析[J]. 机械设计, 2019, 36(11): 84-90.
Cao J C, Huang H, Guo R L, *et al*. Analysis on the influence of doped fiber exerted on the dynamic performance of concrete bed based on the homogenization theory[J].Journal of Machine

Design, 2019, 36(11): 84-90.

[22] 李放. 精密机床用钢纤维增强树脂混凝土材料的制备与性能研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2022.
Li F. Preparation and properties of steel fiber reinforced resin concrete materials for precision machine tools[D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2022.

[23] Kono D, Mizuno S, Muraki T, *et al*. A machine tool motorized spindle with hybrid structure of steel and carbon fiber composite [J]. CIRP Annals, 2019, 68: 389-392.

[24] Rangasamy S, Loganathan K, Natesan A. Experimental investigation and numerical analysis of the dynamic characteristics of a laminated hybrid composite bed[J]. Polymer Composites, 2017, 38: 20-37.

[25] 徐平, 徐成廷, 沈佳兴, 等. 钢-玄武岩纤维树脂混凝土结合面法向接触刚度数值计算研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(7): 818-824.
Xu P, Xu S T, Shen J X, *et al*. Research on numerical calculation of normal contact stiffness of steel-BFPC joint surfaces[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(7): 818-824.

[26] Ahmad S F, Jagadeesha T. Modelling and dynamic simulation of polymer concrete material for machine tool structure of a lathe [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 5732-5738.

[27] 任秀华. 机床用钼纤维增强人造花岗石复合材料力学性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
Ren X H. Mechanical properties of Mo-fiber reinforced granitoid composite for machine tool[D]. Jinan: Shandong University, 2015.

[28] 吴雪莲, 杨建, 屈阳, 等. 形状记忆聚合物智能材料在生物医学领域的应用[J]. 材料导报, 2021, 35(S2): 492-500.
Wu X L, Yang J, Qu Y, *et al*. Application of shape memory polymer smart materials in biomedical field[J]. Materials Reports, 2021, 35(S2): 492-500.

[29] 谢婵, 贾宇, 薛名山, 等. 自修复防腐蚀涂层技术及研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(5): 171-181.
Xie C, Jia Y, Xue M S, *et al*. Progress in research of self-healing anti- corrosion coatings[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(5): 171-181.

[30] Kostopoulos V, Kotrotsos A, Sousanis A, *et al*. Fatigue behaviour of open- hole carbon fibre/epoxy composites containing bis-maleimide based polymer blend interleaves as self-healing agent [J]. Composites Science and Technology, 2019, 171: 86-93.

[31] 杜逸纯, 赵博文, 温妍,等. 本征型自修复高分子材料的研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(3): 509-517.
Du Y C, Zhao B W, Wen Y, *et al*. Research progress of intrinsic self- healing polymer materials[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2020, 38(3): 509-517.

[32] 马場浩, 杜晓渊, 胡仁伟,等. 微脉管型自修复复合材料研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(1): 166-172.
Ma Y H, Du X Y, Hu R W, *et al*. Development of self-healing composite materials with microvascular networks[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(1): 166-172.

[33] Lanzara G, Yoon Y, Liu H, *et al*. Carbon nanotube reservoirs for self-healing materials[J]. Nanotechnology, 2009, 20: 335704.

[34] Brown E N, White S R, Sottos N R. Microcapsule induced toughening in a self- healing polymer composite[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39: 1703-1710.

[35] Hu X L, Wang H, Zhou Z X, *et al*. Novel core- shell double microcapsules synthesize via inverse pickering emulsion polymerization for self- healing of epoxy resin compounds[J]. Reactive and Functional Polymers, 2022, 177: 105317.

[36] Ma W X, Sun D W, Ma X Y, *et al*. Preparation and investigation of self-healing cementitious composite based on DMTDA-epoxy binary microcapsules system[J]. Journal of Building Engineering. 2022, 56: 104779.

[37] Toohey K S, Sottos N R, Lewis J A, *et al*. Self-healing materials with microvascular networks[J]. Nature Materials, 2007, 6: 581-585.

[38] Toohey K S, Hansen C J, Lewis J A, *et al*. Delivery of two-part self- healing chemistry via microvascular networks[J]. Advanced Functional Materials, 2009, 19: 1399-1405.

[39] Hamilton A R, Sottos N R, White S R. Self-healing of internal damage in synthetic vascular materials[J]. Advanced Materials, 2010, 22: 5159-5163.

[40] Hamilton A R, Sottos N R, White S R. Pressurized vascular systems for self- healing materials[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2012, 9: 1020-1028.

[41] Hansen C J, Wu W, Toohey K S, *et al*. Self- healing materials with interpenetrating microvascular networks[J]. Advanced Materials, 2009, 21: 4143-4147.

[42] Gao Y, Liu L, Wu Z J, *et al*. Toughening and self-healing fiber-reinforced polymer composites using carbon nanotube modified (ethylene- co- methacrylic acid) sandwich membrane[J]. Composites Part A, 2019, 124: 105510.

[43] Ali Asaad M, Bothi Raja P, Fahim Huseien G, *et al*. Self-healing epoxy coating doped with Elaesis guineensis/silver nanoparticles: a robust corrosion inhibitor[J]. Construction and Building Materials, 2021, 312: 125396.

[44] Zhou M, Yan Q M, Fu Q, *et al*. Self-healing ZnO@ multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs)/DA- PDMS nanocomposite via Diels- Alder chemistry as microwave:a novel multifunctional material[J]. Carbon, 2020, 169: 235-247.

[45] 李淑昱, 闫新秀, 麻寿江, 等. 自修复高分子材料在皮革涂层中的应用研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(3): 166-173.
Li S Y, Yan X X, Ma S J, *et al*. Progress in the application of self-healing polymers in leather coatings[J]. Polymer Materials

Science & Engineering, 2022, 38(3): 166-173.

[46] 朱月风, 赵向臻, 司春棣, 等. 自修复型微胶囊在沥青路面中的受力分析及破裂机制[J]. 材料导报, 2022, 36(10): 44-49.
Zhu Y F, Zhao X Z, Si C D, *et al*. Mechanical analysis and fracture mechanism of self-healing microcapsules in asphalt pavement[J].Materials Reports, 2022, 36(10): 44-49.

[47] Ghaemi A A, Philipp A, Bauer A, *et al*. Mechanical behaviour of micro-capsules and their rupture under compression[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 142: 236-243.

[48] Sagis L M C. Microencapsulation and microspheres for food applications- chapter 11: theoretical modeling of mechanical behavior and release properties of microcapsules[M]. [S.l.]: Academic Press, 2015.

[49] 夏宇, 李伯男, 李熙, 等. 自修复型微胶囊内部微裂纹损伤特性的仿真分析[J]. 绝缘材料, 2020, 53(10): 75-81.
Xia Y, Li B N, Li X, *et al.* Simulation analysis on damage characteristics of microcracks in self repairing microcapsules[J]. Insulating Materials, 2020, 53(10): 75-81.

[50] 朱月风, 司春棣, 张洪亮, 等. 多尺度模型下自修复沥青路面中微胶囊力学分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(6): 2582-2590.
Zhu Y F, Si C D, Zhang H L, *et al*. Mechanical analysis of microcapsules in self-healing asphalt pavement based on multi-scale model[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37 (6): 2582-2590.

[51] Yin H P, Li Y T, Hua H. Mesoscopic study on mechanical properties and dynamic damage characteristics of self-healing microcapsule[J].Computational Particle Mechanics,2023. https://doi.org/10.1007/s40571-023-00617-7.

Progress of Particle-Reinforced Resin-Based Self-Healing Composite for Machine Tool Base Parts

Haipeng Yin, Youtang Li, Wuqiang Li, Hua Huang

(*School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China*)

ABSTRACT: The insufficient thermal stability and dynamic performance of steel and cast iron are one of the main factors affecting the precision machining of machine tools. At the same time, unintended fractures, excessive wear and surface corrosion of mineral composites during service have also become the main problems affecting the life and reliability of machine tools. Aiming at the requirements for dynamic performance and the early perception and prevention and control of damage of precision machine tool basic parts, the development of particle-reinforced resin-based self-healing composite for machine tool foundations was proposed. Firstly, the development status of common materials for machine tools was summarized. and then, the latest research results of mineral composite materials and composite structures for machine tools were introduced. Finally, the self-healing mechanism, advantages, disadvantages and limitations of existing intelligent self-healing materials were mainly discussed. Based on the review of the research results, the challenges faced in the development of particle-reinforced resin-based self-healing composite for machine tool basic parts were summarized: (1) cross-scale analysis, design theory and simulation methods at the micro-meso-macro level; (2) the directional design of microcapsules for non-anticipated rupture, anticipated release of repair agents throughout the life cycle, as well as the anti-cracking problem under special working conditions; (3) the mathematical model for constructing the stress field and displacement field of microcracks in materials under the condition of damage competitive coupling.

Keywords: precision machine tools; dynamic properties; damage; prevention and control; composite materials; self-healing