

高熵合金材料研究进展与展望

李天昕^{1,2}, 王书道^{1,2}, 卢一平^{1,2,3*}, 曹志强¹, 王同敏^{1,2,3}, 李廷举^{1,2,3}

(1. 大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116024; 2. 辽宁省高熵合金材料工程研究中心, 辽宁大连 116024; 3. 辽宁黄海实验室, 辽宁大连 116024)

摘要: 随着世界科技水平的不断提升以及国民经济建设对高性能合金材料需求的不断增加, 传统单一主元合金越来越不能满足人们与日俱增的使役需求。高熵合金因其独特的物理、化学以及力学性能, 极大地拓展了金属材料成分设计范围, 有望在国防、航空、航天、海洋、核能、医疗、新能源等重大工程领域发挥重要作用。本文结合各领域对先进高熵合金材料的具体需求, 梳理了高熵合金材料的特征和内涵, 分析了高熵合金材料发展的整体形势与前景, 厘清了国内外高熵合金的发展现状。在此基础上, 指出了我国高熵合金领域存在的差距和不足, 高熵合金部分基础原材料依赖进口, 严重威胁产业链安全; 高熵合金“产学研用”体系尚未健全, 工业化应用方面的研发投入有待提高。研究建议, 加强高熵合金材料研发的顶层设计, 完善产业政策; 加强企业和科研机构的对接和沟通; 完善高熵合金材料标准、测试、表征、评价体系; 推进人才队伍建设; 降低材料成本, 打造高附加值产品, 促进我国先进高熵合金材料产业朝着体系化、绿色化、高端化、智能化方向发展。

关键词: 高熵合金; 新材料; 有色金属; 关键战略材料; 结构材料; 功能材料

中图分类号: TG146.8 文献标识码: A

Research Progress and Prospect of High-Entropy Alloy Materials

Li Tianxin^{1,2}, Wang Shudao^{1,2}, Lu Yiping^{1,2,3*}, Cao Zhiqiang¹,
Wang Tongmin^{1,2,3}, Li Tingju^{1,2,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 2. Engineering Research Center of High-Entropy Alloy Materials, Dalian 116024, Liaoning, China; 3. Liaoning Huanghai Laboratory, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: With the rapid development of world's technological level and the urgent demand of national economic construction for high-performance alloy materials, traditional single-component alloys gradually fail to satisfy the increasing service requirements. Owing to their unique physical, chemical, and mechanical properties, high-entropy alloys are expected to play an important role in major engineering fields such as national defense, aviation, aerospace, marine, nuclear energy, medical care, and new energy, greatly expanding the design range of metal material compositions. In this paper, based on the specific demands of advanced high-entropy alloy materials in various fields, the characteristics and connotations of high-entropy alloy materials are summarized, and the overall situation and prospects of high-entropy alloy material development are analyzed, as well as the current status of high-entropy alloy development in China and abroad. On this basis, the gaps and deficiencies in the field of high-entropy alloys in China are pointed out. First, some basic raw materials of the high-entropy alloys still rely on imports, which severely threatens the security of the industrial

收稿日期: 2023-02-22; 修回日期: 2023-04-20

通讯作者: *卢一平, 大连理工大学材料学院教授, 研究方向为高熵合金的制备工艺; E-mail: luyiping@dlut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国先进有色金属材料发展战略研究”(2022-XZ-20)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

chain. Second, the research and development investment in industrial application of high-entropy alloys needs to be increased, and the industrial-academia-research-application system of high-entropy alloys is not yet sound. Regarding the above-mentioned issues, this study proposes the following policies and measures: strengthening the top-level design of high-entropy alloy material research and development while improving industrial policies; strengthening the connection and communication between enterprises and research institutes; improving the standardization, testing, characterization, and evaluation systems of high-entropy alloy materials; advancing the construction of talent teams; and reducing material costs and creating high value-added products, to promote the systematic, green, high-end, and intelligent development of China's advanced high-entropy alloy material industry.

Keywords: high-entropy alloy; new materials; non-ferrous materials; key strategic materials; structural materials; functional materials

一、前言

在人类社会发展史上, 金属材料的发现和使用极大地提高了社会生产力, 具有里程碑的意义。长期以来, 传统金属材料如钢铁、铝合金、铜合金、钛合金以及镁合金等在制备时多是以一种或两种金属元素为主, 通过添加少量合金元素来调节其微观组织结构, 以满足特定的性能需求。然而, 这种合金设计策略始终将合金材料的成分设计空间局限在多元相图的角落位置, 限制了元素组合的总数, 禁锢了新型合金材料的开发。随着科技水平的快速发展以及国民经济建设对高性能合金材料的迫切需求, 传统单一主元的合金材料逐渐不能满足人们与日俱增的使役需求, 亟需一种全新的合金化策略, 打破传统策略的桎梏。为了解决上述问题, 高熵合金(或多主元合金)的概念于2004年被提出。相关研究发现^[1,2], 多种元素接近/等原子比例混合后得到的合金并未形成复杂的金属间化合物, 而是形成了简单的固溶体结构。高熵合金的出现打破了传统合金以混合焯为主的设计理念, 为新材料的研发打开了一个广阔的成分设计空间。目前, 高熵合金的研究范围包括材料设计、组织调控、加工制备、微观结构表征、力学性能、功能性能(如磁性、耐辐照性能、催化性能、热电性能等)、塑性变形理论、计算机仿真模拟等。

高熵合金因其革命性的设计理念以及特殊的物理、化学和力学性能, 受到了全球性的研究与关注。目前, 主要发达国家和地区(包括美国、欧洲、加拿大、澳大利亚、日本等)以及我国都在此领域积极开展相关研究工作和应用探索。2020年, 我国非晶及高熵合金相关领域的资助项目约有1757项。近年来, 高熵合金已在 *Science*、*Nature*、*Advanced Materials* 等国际权威学术期刊发表数十篇研究性论文或综述, 展现出巨大的理论研究价值和工业化应用前景。尽管高熵合金有望在多个国家重

大工程领域得到应用, 但是目前国内外针对高熵合金的研究主要聚焦于理论性的学术研究方面, 在装备领域的工业化应用方面尚处于起步阶段。因成本过高, 目前我国暂无工业化应用的高熵合金牌号。如何根据市场需求, 开发低成本的高熵合金产品是该领域未来工业化应用的关键所在。此外, 高熵合金领域尚有诸多理论性问题亟待解决, 如高熵合金具有元素种类多的特点, 大型高熵合金铸锭始终存在成分易偏析等问题难以解决。目前, 以 AlCoCrFeNi_{2.1} 为代表的共晶高熵合金得益于其优异的铸造成型性能、力学性能和耐蚀性, 是最具规模化工业应用前景的一类高熵合金。有别于我国较为缓慢的高熵合金工业化推广进程, 欧洲正在积极快速地推广共晶高熵合金作为双相不锈钢的替代品, 相关产品已处于中试阶段。

高熵合金可在国防、航空、航天等多个关键领域得到应用, 目前我国大多数高熵合金材料的研究仍停留在实验室阶段, 工业化推广进程极为缓慢。当前, 国际形势错综变化, 开发并推广具有自主知识产权的高熵合金新材料具有重大战略意义。为此, 本文在介绍高熵合金材料特征和内涵的基础上, 剖析先进高熵合金的工业应用前景, 厘清国内外高熵合金的发展现状, 指出我国高熵合金领域存在的差距和不足, 并给出相应的发展对策, 以期推动相关产业的升级和发展。

二、高熵合金的特征和内涵

高熵合金最初的定义为: 至少包括5种主要元素, 每种元素含量在5%~35%之间, 若含有次要元素, 则次要元素含量小于5%^[1]的合金。随着对高熵合金研究的不断深入, 人们逐渐发现上述定义不能准确地涵盖高熵合金的全部特点。例如, 假设一种等原子比的高熵合金由25种元素组成, 虽然其混合熵高达3.2R, 但是由于其每种主要元素的含量仅为

4%，并不满足高熵合金最初的定义。因此，将高熵合金的定义进行了修正^[3]，即以熔融状态下或高温完全互溶状态时的混合熵为标准，只有当混合熵达到 $1.5R$ 时，才有可能形成稳定固溶体相。至此，以混合熵作为界定高熵合金的标准，并规定：当合金的混合熵大于 $1.5R$ 时，将其称为高熵合金；当合金的混合熵介于 $1\sim 1.5R$ 时，则称为中熵合金；当合金的混合熵低于 $1R$ ，则称为低熵合金。

高熵合金从报道至今仅仅经历10多年，尽管目前对于“高熵合金”的定义仍存在一系列争议问题，但并不影响高熵合金因其优异性能及其广阔的多维成分空间所带来的科学和应用潜力。从这个意义上来说，高熵合金实际上是一种全新的合金设计思想。因此，本文认为，高熵合金的定义可拓展为：由多种主要元素构成的合金体系。根据这一定义标准，目前已经存在大量的高熵合金体系。在高熵合金中已使用的元素高达37个，接近元素周期表中72种候选元素的1/2（惰性气体、卤族元素和放射性元素除外）。

高熵合金作为一种多主元合金材料，其在微结构和性能等方面具有诸多独有特征和优势。高熵合金在热力学上具有“高熵效应”，可以促进高熵固溶体的形成；在动力学上具有“迟滞扩散效应”，扩散系数明显低于传统合金；在微观结构方面具有“晶格畸变效应”，可以引起固溶强化提高强度；在性能方面具有“鸡尾酒效应”，有利于优化合金的各项性能^[4]。此外，最近几年对高熵合金的化学短程有序结构、超高间隙原子固溶度等也有新的学术发现。

在力学性能方面，高熵合金不仅在室温下具有优异的强度-塑韧性组合，在超低温、超高温极端环境中也可以展现出优异的性能。例如，在低温及超低温环境，CrMnFeCoNi高熵合金具有极高的低温韧性、塑性和强度^[5]；与传统高温合金相比，CrMoNbV高熵合金在1273 K高温中表现出优异的高屈服强度和抗热软化性能，远超传统镍基高温合金^[6]。

高熵合金在弹性、高温阻尼性能、软磁性、耐辐照、耐腐蚀、耐磨性等性能方面也具有显著优势，具有作为先进结构-功能一体化材料的开发潜力。例如， $\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}(\text{HfTiZr})_{50}$ 高熵合金表现出非凡的Elinvar特性^[7]，可以随温度变化保持接近恒定的

弹性模量，优于迄今为止报道的传统弹性合金。 $(\text{Ta}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{HfZrTi})_{98}\text{O}_2$ 高温高阻尼合金可以在更高温（约747 K）和更宽温度范围（1.0 Hz，约53 K）内使用，高温阻尼性能优于现有的传统阻尼合金（包括铜、镁和铁基阻尼合金）^[8]。 $\text{Fe}_{32}\text{Co}_{28}\text{Ni}_{28}\text{Ta}_5\text{Al}_7$ 高熵合金不仅具有优异的力学性能，还表现出极低的矫顽力（低于1 Oe）以及中等饱和磁化强度（ $100\text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ），是一种高强度-高塑性的软磁材料^[9]。除结构材料外，高熵合金也可开发为性能优异的功能材料，包括电催化剂、光催化剂、热电材料等^[10]。

高熵合金目前存在两种分类方式。一类是按照其主要元素在周期表中的位置，分为3d过渡族高熵合金、难熔高熵合金、稀土高熵合金、贵金属高熵合金、非金属元素掺杂高熵合金等；一类是按照高熵合金的特点和用途，分为轻质高熵合金、耐高温难熔高熵合金、耐腐蚀高熵合金、耐辐照高熵合金、生物医用高熵合金、共晶高熵合金、耐磨高熵合金、储氢高熵合金、催化高熵合金、软磁高熵合金等。本文将采用第二种分类方法，即按照高熵合金的特点和用途对其进行分类，并逐一对其应用前景和发展现状进行阐述。

三、高熵合金的应用前景

（一）轻质高熵合金

随着汽车工业的快速变革以及节能减排对轻量化要求的进一步提升，轻质合金结构部件的需求和发展也发生了很大变化。轻质高熵合金可发挥质量轻、强度高的优势，用于替代汽车中结构板、座椅骨架，变速箱齿毂等部件，可以有效降低汽车重量，节省传统汽车石油消耗，提高新能源汽车续航能力。汽车工业使用了大量的轻质结构部件，我国每年的汽车用铝量超过 $5\times 10^6\text{ t}$ ，再加上周边配套和下游零部件制造商，相关产业链的产值超过千亿元。此外，高性能轻质金属材料还可以作为航天结构材料的重要组成部分。目前，钛合金已在航空、航天及武器装备领域获得普遍应用，我国对钛合金的需求量以每年20%~30%的速度增加。传统钛合金存在的主要问题是使用温度受限，而轻质高熵合金由于添加了大量难熔元素，有望突破这一限制。随着航空航天器飞行马赫数的不断提高，对减重的

要求越来越高, 轻质合金的使用势在必行, 而轻质高熵合金有望凭借其优异的综合力学性能满足这一需求。

(二) 耐高温难熔高熵合金

现役镍基高温合金受熔点的限制, 在大于 1000 °C 的温度范围时其屈服强度急剧下降。耐高温难熔高熵合金在 1000 °C 以上温区仍具有优异的高温力学性能, 有望弥补镍基高温合金在超高温领域的空缺, 成为下一代航空发动机涡轮叶片材料。目前, 由于大部分耐高温难熔高熵合金为非标产品, 产品类型随下游需求变化而变化, 因此, 耐高温难熔高熵合金供应链相对较短, 属于以技术为中心的领域, 生产工艺复杂、研发资金消耗大、研制时间长, 行业壁垒较高。航空、航天领域的设备更新及国产化对耐高温难熔高熵合金提供了主要的潜在市场需求, 使耐高温难熔高熵合金成为航空发动机的潜在备选材料。未来 20 年, 若航空发动机中耐高温难熔高熵合金的质量占比为 50%, 我国民用航空飞机所需要的耐高温难熔高熵合金潜在的市场规模将达到 2000 亿元。

(三) 耐腐蚀高熵合金

与传统耐腐蚀材料如不锈钢、铜合金、铝合金、钛合金等相比, 高熵合金具有高强韧、高耐磨、强磁性等优势, 综合性能更强。这为耐腐蚀高熵合金的应用开拓了广阔的空间, 有望成为结构-功能一体化材料。相较于陆地资源, 海洋资源开发工作还远远不足, 我国海岸线长、岛屿众多、领海面积广阔, 这为我国经济发展、能源储备和资源利用提供了重要保障。耐腐蚀高熵合金可作为海洋工程和海洋装备的主要材料应用于船舶建造、海上平台建设等方向。例如, 共晶高熵合金可用于舰船的螺旋桨, 高强耐腐蚀高熵合金可作为舰船特殊零部件材料, 耐腐蚀软磁高熵合金可用于海上风力发电设备中的磁性材料, 耐腐蚀高熵合金涂层可作用于舰船壳体。同时, 工业的发展对耐腐蚀材料的要求也越来越高, 如石油化工、航空、航天领域材料需长期接触强酸等极端环境, 高强耐腐蚀高熵合金可作为特殊的材料承受极高载荷并且避免腐蚀损伤; 耐腐蚀软磁高熵合金可用于电磁阀中的关键磁性材料; 优异耐腐蚀性能的高熵合金还可用于石油化工

领域的管道材料。

(四) 耐辐照高熵合金

我国核技术应用产业作为战略性新兴产业, 近年来发展迅速, 是当前国防建设和国民经济发展中不可或缺的重要领域。核反应堆结构材料是核技术发展的基础和保障, 但现有的结构材料难以承受先进反应堆内恶劣的工作环境, 亟需设计开发出具有良好力学性能、高温性能及耐辐照性能的材料。基于高熵合金优异的耐辐照性能, 现已提出两类面向先进核反应堆的高熵合金, 即低中子吸收截面高熵合金和低活化高熵合金。其中, 低中子吸收截面高熵合金有望替代反应堆内燃料包壳材料, 而低活化高熵合金有望应用于反应堆压力容器、第一壁材料、包层材料等。

(五) 生物医用高熵合金

生物医用金属多用于制造骨科、齿科、介入支架等医疗领域中的各类医疗器械以及外科手术工具。2021 年, 我国高值医用耗材市场超过千亿元, 其中骨科植入市场规模达 340 亿元, 同比增长 14%^[11]。因此, 提升现有医用金属材料性能, 发展新型医用金属材料, 对进一步提升金属医疗器械的性能水平并扩大其医疗功能, 提高相关产品的市场竞争力, 造福广大患者, 具有重要的现实意义。生物医用高熵合金凭借着高强度、高硬度、高耐磨耐腐蚀性、低弹性模量、良好的生物相容性等优势, 可以应用于骨科植入、血管介入等方面, 有利于提高我国金属医疗器械产品的国际竞争力。此外, 高熵合金因其优异的综合性能有望在抗菌合金市场中取得一席之地。抗菌高熵合金可广泛应用于厨具、家电、食品工业、医疗器械、啤酒、奶类、制药等企业的设备管道和储罐等设施中。

(六) 共晶高熵合金

当前, 我国特种舰艇朝大型化、高速化、静音化方向发展, 对动力系统特别是推进装置提出了更高要求。螺旋桨是舰艇推进装置的核心部件, 其制造水平直接影响舰艇的整体性能, 其生产能力是一个国家造船水平的重要体现。螺旋桨在服役过程中面临的诸多挑战使得传统的铜合金、不锈钢等螺旋桨材料已不能满足下一代舰艇的性能设计要求, 严

重制约舰船装备的未来发展。舰船螺旋桨用高性能合金领域面临的重大技术需求和关键科学问题亟需解决，如传统铜合金和不锈钢材料制备技术已经达到极限，无法满足下一代舰船对轻质、高强、耐蚀的服役要求。共晶高熵合金具有优异的铸造性能、力学性能和耐海水腐蚀性能，工业应用潜力巨大，且相关研究比较成熟，在舰船工业领域具有重要应用前景和重大理论研究价值；还适用于一些对耐蚀需求较高的复杂形体铸件，如部分欧洲企业已经将其应用于石油化工领域的耐蚀部件。

（七）耐磨高熵合金

耐磨材料在建材、火力发电和冶金矿山等工业领域的能耗和经济成本中占有较大比重；同时，在矿物、水泥、煤粉等工艺领域的生产过程中，机器设备会因零件的磨损而必须更换，因此，开发新型耐磨材料具有较大的现实意义。高熵合金的出现可以解决传统耐磨材料的性能瓶颈问题，成为高温、氧化、腐蚀等苛刻工况下服役设备的重要选材。耐磨高熵合金有望在磨球、衬板、破碎机锤头、履带板等领域得到应用。

（八）储氢高熵合金

近年来，为实现碳中和、碳达峰目标，氢能及其相关产业受到高度关注，氢能需求不断增长，储氢材料行业市场不断发展。2020年，我国储氢材料行业市场规模为7.62亿元，其中稀土储氢材料是目前唯一可以实现大规模商用化的储氢材料，市场规模为6.9亿元，占比为90.55%；其他储氢材料市场规模为0.72亿元，占比为9.45%^[12]。我国稀土资源储量丰富，为储氢材料行业的发展提供了充足的原材料市场保证，但储氢材料成本偏高成为制约其发展的主要因素。由多种非贵金属元素组成的高熵合金具有显著的晶格畸变，原子半径的不同会产生较大的空隙位置，并且高熵合金多主元的特点增加了基体与氢的结合能，因此，高熵合金是一种有潜力的储氢合金，有望成为稀土储氢合金的替代品。

（九）催化高熵合金

催化与人类生活紧密相关，现代化学工业、石油加工工业、能源、制药工业以及环境保护领域等广泛使用催化剂。随着落后产能的淘汰，我国化工

催化剂行业产能利用率逐渐提高，传统的贵金属催化材料虽然催化活性好、稳定性高，但成本高且资源稀缺；传统的过渡金属催化剂存在催化活性低且易被氧化、不易储存等问题。相较于上述传统的催化剂，高熵合金催化材料具有过电位低、热稳定性强、动力学快以及成本较低等特点，在燃油、化工、医药、能源等领域具有潜在的重大应用价值。

（十）软磁高熵合金

软磁材料是智能化时代的关键部件，主要应用于电网、光伏、储能、新能源汽车与充电桩、第五代移动通信技术（5G）、无线充电、变频空调、轨道交通、绿色照明等领域；在以高频、大功率、小型化为重要发展方向的高端消费和工业电子、云计算、物联网等新型基础设施建设领域应用前景广阔。近年来，新能源领域的快速发展，为软磁合金的应用打开了需求空间。全球磁性材料生产企业主要集中在日本和中国，其中我国的产量约占全球的70%。据磁性材料行业协会统计^[13]，2020年，我国磁性材料产业生产及销售的磁性材料约有 1.3×10^6 t，其中软磁材料为 2.9×10^5 t；预计到2025年，软磁材料的生产及销售将达到 4.89×10^5 t，市场规模为150.77亿元。

传统的软磁材料尽管具有优异的软磁性能，但其在耐蚀性、耐磨性、强塑性和高温抗氧化性能等方面仍未充分满足需求。而高熵合金由于其成分设计范围更广、微观结构灵活多变，可以使材料在具备优异的软磁性能的同时兼具耐蚀性、力学性能和高温抗氧化性中的多种性能，满足极端复杂条件下的使用。因此，高熵合金在高频低损耗、腐蚀、摩擦、高温以及高负载等条件下具有较大的应用前景。

四、高熵合金的发展现状

（一）轻质高熵合金

轻质高熵合金凭借其高比强度、高比硬度的优势，在航空、航天、能源、交通等领域具有应用潜力，被众多学者广泛研究。目前所开发的轻质高熵合金根据密度分为以下两类：一类是由Al、Be、Li、Mg、Sc、Si、Zn、Ti等轻质元素组成的超低密度轻质合金；另一类是由Ti、Zr、V、Nb、Al、Cr等元素组成的低密度轻质高熵合金。超低密度轻质高熵

合金指密度介于铝合金和钛合金之间的高熵合金，元素构成通常以Al元素为主，如 $\text{Al}_{80}\text{Li}_5\text{Mg}_5\text{Zn}_5\text{Cu}_5$ 铝基高熵合金密度为 2.88 g/cm^3 ，具有良好的综合力学性能，抗拉强度为 674 MPa ，塑性为 7.5% ^[14]。低密度轻质高熵合金一般指密度介于钛合金和钢的高熵合金。这类合金通常以Ti元素作为主要元素，与超低密度轻质高熵合金相比表现出更好的综合力学性能，如 $(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.35}\text{Nb}_{0.15})_{80}\text{Al}_{20}$ 合金密度低于 6 g/cm^3 ，屈服强度高达 1800 MPa ，具有 8% 的延伸率^[15]。

虽然轻质高熵合金具有低密度、高强度、高硬度等众多优异性能，但目前的研究主要集中于室温准静态力学性能方面。未来应进一步扩展其研究范围，如轻质高熵合金的动态力学性能、高温力学性能、断裂韧性等。此外，目前大多数轻质高熵合金普遍存在室温脆性的问题，未来如何通过成分设计获得具有拉伸塑性的轻质高熵合金，是科研工作者们需要攻克的难题。

(二) 耐高温难熔高熵合金

耐高温难熔高熵合金主要由元素周期表中IVB、VB与VIB族的Ti、Zr、Hf、V、Nb、Ta、Cr、Mo、W等高熔点的难熔元素组成，有时也添加Al、Si、Co、Ni、O、N等非难熔元素调控合金的微观组织与综合性能。耐高温难熔高熵合金最大的特点是具有优异的高温屈服强度与高温相稳定性。已有研究发现，耐高温难熔高熵合金在超过 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度区间具有远超现有的Inconel-718与Haynes-230镍基高温合金的屈服强度^[16]。VNbMoTaW合金在 $1600\text{ }^\circ\text{C}$ 的屈服强度超过 400 MPa ；同时，该合金经过 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ 、 19 h 的长时间退火，仍可以保持体心立方(BCC)无序固溶体结构，具有优异的相结构热稳定性。耐高温难熔高熵合金得益于上述优点，成为受关注程度较高的一类高熵合金。

耐高温难熔高熵合金作为高温结构材料展现出巨大的潜力，但其严重的室温脆性限制了材料的工业化应用。例如，美国开发的第一代难熔高熵合金(NbMoTaW与VNbMoTaW合金)在室温条件下仅有约 2% 的压缩应变率，断口形貌表现为典型的脆性解理断裂特征。目前仅有TiZrHfNbTa系及其衍生的难熔高熵合金可以在准静态拉伸条件下具有一定的延伸率，但仍远不能满足先进工程材料对安全性与可加工性的巨大需求。因此，如何有效提高其

室温塑性是难熔高熵合金未来发展的首要目标。此外，耐高温难熔高熵合金作为一种潜在的高温合金，其较差的抗氧化性能也是限制其进一步发展的瓶颈问题。大多数难熔元素在氧化过程中无法形成有效的保护层，如 Nb_2O_5 和 Ta_2O_5 氧化物的致密度低，容易从基体表面剥落； V_2O_5 氧化物在 $690\text{ }^\circ\text{C}$ 以上易挥发， MoO_3 氧化物在 $793\text{ }^\circ\text{C}$ 以上易挥发，从而使合金表面失去保护，发生灾难性氧化。从氧化热力学角度来看，氧化物的形成能越低越稳定，其中 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 的形成能较低，容易形成连续致密的氧化层，从而阻止合金基体被进一步氧化。因此，可以在难熔高熵合金中添加Al和Cr等抗氧化元素，形成致密的氧化层，改善合金的抗氧化性能。目前暂无兼具优异力学性能和抗氧化性能的难熔高熵合金牌号，如何通过成分/工艺调控难熔高熵合金的微观组织和性能是该领域未来亟需解决的难题。

(三) 耐腐蚀高熵合金

在特定情况下，材料在实际应用中会受到酸、碱、海水等环境的考验，这些恶劣的服役环境会对材料本身造成极大的破坏，进而降低材料的使用寿命，同时引起安全隐患。因此，耐腐蚀高熵合金的研究是一个至关重要的课题。目前的研究表明，高熵合金相较于传统耐腐蚀材料(如不锈钢、铜合金、铝合金等)具有更加优异的综合耐蚀性能，未来有望作为极端环境下服役的耐腐蚀材料。

耐腐蚀高熵合金的优势在于其不仅具有优异的耐腐蚀性能，还能在结构力学及其他功能应用方面满足工程应用对材料的要求。我国目前设计了一种单相BCC结构的耐腐蚀软磁高熵合金 $(\text{Fe}_{225}\text{Co}_{125}\text{Cr})_{94}\text{Al}_6$ ^[17]，该合金在表现出优异的软磁性能的同时，还具有优异的耐腐蚀性能，其点蚀电位是传统304不锈钢的2倍，在海水环境中能有效保护材料自身不受海水侵蚀破坏，有效解决了磁性材料在腐蚀环境中的使用难题。

高熵合金广阔的元素调整空间带来的“鸡尾酒效应”，为设计高耐腐蚀性能提供了途径。我国设计了兼具优异力学性能和耐腐蚀性能的面心立方(FCC)结构的 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{20}\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}$ 高熵合金^[18]，该合金的抗拉强度超过 600 MPa ，断裂塑性达到 70% ；在 0.1 mol/L 的 H_2SO_4 溶液环境中，多种元素产生协同

作用，形成了致密钝化膜，表现出远优于 316L 不锈钢的耐腐蚀性能，实现了力学性能和耐腐蚀性能的结构-功能一体化。多相结构同样具有良好的耐腐蚀性能，如一种成分为 FeCrNiCoNb_{0.5} 的耐腐蚀共晶高熵合金^[19]。该合金具有纳米级尺寸的超细共晶结构，在腐蚀过程中能够形成稳定的钝化膜；同时，该合金的钝化膜具有自修复能力，在 1 mol/L NaCl 溶液中表现出良好的耐腐蚀性能，其钝化膜宽度为 304 不锈钢的 3 倍，耐腐蚀能力优于不锈钢、铝合金、钛合金、镍合金等传统耐腐蚀材料。

高熵合金耐腐蚀涂层也受到了广泛的关注。我国的研究人员利用激光熔覆技术在 304 不锈钢基体表面制备了 FeCoCrAlNi 高熵合金涂层^[20]，涂层的硬度是原基体合金的 3 倍。在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的腐蚀试验结果表明，FeCoCrAlNi 高熵合金涂层能有效提高合金的耐腐蚀性能和抗点蚀性能。利用激光熔覆技术在 Ti-6Al-4V 表面制备 TiZrAlNbCo 涂层^[21]，结果表明，该涂层不仅能够有效提高合金的硬度，还使该合金在 3.5 wt.% NaCl 溶液的腐蚀电流密度降低为 3.66×10^{-9} A/cm²。利用磁控溅射技术制备的一种成分均匀的单相 FCC 高熵合金涂层 FeAlCuCrCoMn^[22]，其电化学实验结果表明，该涂层材料在 3.5 wt.% NaCl 和 5 wt.% NaOH、10 wt.% H₂SO₄ 溶液中的耐腐蚀性能均优于 201 不锈钢。涂层技术的应用为耐腐蚀高熵合金的发展提供了新的方向。因此，耐腐蚀高熵合金涂层材料表现出广阔的应用前景。

(四) 生物医用高熵合金

高熵合金可以根据生物医用的需求，选择特定的合金化元素，从而赋予其特殊的生物医用功能特性。此外，高熵效应和晶格畸变效应也赋予了生物医用高熵合金良好的强度、硬度、耐腐蚀性能、耐磨性、生物相容性以及抗菌性能。目前，对生物医用高熵合金已经有了一定的研究。根据功能不同，生物医用高熵合金可以分为植入型高熵合金和抗菌型高熵合金两类。植入型高熵合金如 Ti_{21.67}Zr_{21.67}Hf_{21.66}Ta₃₅ 具有良好的生物相容性，杨氏模量为 93 GPa，屈服强度达到 1050 MPa，断裂延伸率为 12.7%，具有较好的综合力学性能^[23]。具体来看，土耳其研究人员研究了 Ti_{77.11}Ta_{6.54}Hf_{6.63}Nb_{12.73} 植入型高熵合金的冲击断裂行为，冲击能量达到了 14.8 J^[24]；我国研究团队开发的

TiZrNbTaMo 植入型高熵合金具有高达 1390 MPa 的屈服强度，同时耐腐蚀能力可以媲美 Ti6Al4V 合金，优于 316L 不锈钢与 CoCrMo 合金^[25]。抗菌型高熵合金通常会添加具有广谱抗菌性的 Cu、Ag 等元素。我国研究人员研发了具有良好力学性能的 Al_{0.4}CoCrCuFeNi 抗菌型高熵合金，其屈服强度 (318 MPa) 几乎是 304 含铜不锈钢 (Cu-SS) 的两倍，更重要的是其抗菌率高达 99.9%^[26]。此外，我国研发的 Co_{0.4}FeCr_{0.9}Cu_x (x=0.3、0.5) 抗菌型高熵合金具有优异的综合性能，包括抗菌性能优秀 (抗菌率高于 99.95%)，耐蚀性和力学性能优异^[27]。

尽管生物医用高熵合金已经做了很多研究工作并取得了一些开创性的研究成果，但目前还存在如下问题有待解决：设计的生物医用高熵合金主要是铸态的，后续应该进一步进行热加工处理以确保其组织成分均质化；生物医用高熵合金的性能研究还不全面，未来应针对特定的需求，进行全方位的生物学评估。

(五) 耐辐照高熵合金

高熵合金因其突出的力学性能、高温性能以及耐辐照性能，成为了有竞争力的核反应堆关键部件候选材料。在燃料包壳材料、反应堆压力容器、第一壁材料、反应堆管道材料领域等具有广阔的应用前景，目前国内外很多知名科研机构开展了耐辐照高熵合金方面的研究。高熵合金在耐辐照性能的表现优于传统合金。美国研究人员发现，NiCoFeCrMn 等多主元高熵合金经过离子辐照后，仅形成小尺寸的孔洞，相比单质 Ni 和二元 NiCo 合金具有更好的耐辐照性能^[28]。我国研究人员研制的 Ti₂ZrHfV_{0.5}Mo_{0.2} 高熵合金经过氦离子辐照后几乎不发生辐照硬化，并出现了反常的晶格常数减小的现象^[29]。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室设计的 W₃₈Ta₃₆Cr₁₅V₁₁ 高熵合金经氦离子辐照后，合金内无辐照位错环的出现，并且合金硬度几乎不发生变化^[30]。已有研究发现，在高熵合金中添加间隙元素可以增强高熵合金的化学短程有序，进而提高其耐辐照能力^[31]。CoCrFeNiMn 系高熵合金相对于纯金属镍具有更强的抗氦泡生长特性，并且随着主元数的增加，氦泡尺寸逐渐减小^[32]。

尽管对于高熵合金辐照性能的研究展现出了其在核反应堆领域良好的工业应用前景，但是目前该研究仍处于初级阶段，针对反应堆内不同工作环境

下的特种高熵合金研究依然非常有限；同时，耐辐照高熵合金领域尚有诸多理论性问题需要解决。例如，TiVNbTa等高熵合金经过辐照后存在较为严重的元素偏析现象^[33]。总而言之，目前高熵合金辐照行为的数据库较为匮乏，尚不能为反应堆结构材料的设计提供可靠依据。

(六) 共晶高熵合金

大连理工大学首次提出用共晶合金的概念设计高熵合金，以期得到由双相共晶结构构成的高熵合金，从而获得铸造性能良好、综合力学性能优异的共晶高熵合金^[34]。AlCoCrFeNi_{2.1}共晶高熵合金在铸态下展现了均匀细小的层片形貌，抗拉强度超过1 GPa，塑性高达17%，这种在铸态下即获得的高强度高塑性，使其成为最具工业应用价值的高熵合金之一。随后，许多具有优异力学性能和特殊功能的共晶高熵合金得以开发和报道，研究最为广泛的是AlCoCrFeNi体系和CoCrFeNi-M (M=Nb, Ta, Zr, Hf, Mo等)合金体系。

AlCoCrFeNi系的共晶高熵合金通常由较软的FCC相和较硬的B2相构成，软硬两相在变形过程中相互作用使得此类合金表现出优异的综合力学性能。为了进一步提高这类共晶高熵合金的强塑性，研究人员对该类合金进行了不同的加工热处理和不同的制备方法以优化合金。例如，经过轧制和热处理，AlCoCrFeNi_{2.1}合金在小幅度损失塑性的情况下，屈服强度可大幅度提高至1.4 GPa，比铸态条件下的650 MPa的屈服强度提高了约1.85倍^[35]；采用定向凝固工艺处理的Al₁₉Fe₂₀Co₂₀Ni₄₁在不牺牲屈服强度的前提下，塑性由铸态的16%提高至50%^[36]；通过增材制造制备方法可以显著改善AlCoCrFeNi_{2.1}合金的力学性能，打印态合金的屈服强度和拉伸塑性分别高达1040 MPa和24%，较铸态合金分别提高了1.6倍和1.4倍^[37]。此外，由于AlCoCrFeNi系共晶高熵合金含有较多的Al和Cr元素，因此该类合金通常具有良好的耐蚀性及抗氧化性，有利于合金在海水和高温环境中应用。CoCrFeNi-M系共晶高熵合金通常由较软的FCC相和脆硬的拓扑密排相构成。拓扑密排相是一种适宜于高温应用的晶体结构，从而赋予了共晶高熵合金优异的高温力学性能。除了上述的结构性能外，共晶高熵合金得益于不同元素的加入，使合金在功能性能方面也展现出

可观的应用前景，如软磁性能、巨磁电阻效应等。

虽然共晶高熵在多个工程领域展现了巨大的应用潜力，但是目前对该类合金的研究主要集中在成分的开发、力学性能的优化以及变形机制等方面。由于共晶高熵合金良好的铸造流动性，面向工程尺寸铸锭的制备及实际工程的研究应进行更深入的探索。

(七) 耐磨高熵合金

相比于传统合金，高熵合金具有更大的成分设计空间，能够形成更丰富的微观组织结构，因此，高熵合金展现出了许多传统合金难以比拟的优异性能，如高强度、高硬度、耐腐蚀、耐磨损、抗氧化和抗高温软化等。在耐磨、润滑方面^[38]，目前报道的Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti高熵合金的硬度小于SUJ2轴承钢和SKH51模具钢，耐磨性至少2倍于传统的耐磨钢^[39]；Al_{0.2}Co_{1.5}FeNi_{1.5}Ti_{0.55}Si_{0.1}高熵合金的耐磨性优于经典的Stellite 6耐磨合金^[40]；AlCoCrFeNi-M高熵合金在90% H₂O₂溶液中，兼具优良的耐腐蚀性和耐磨性，具有工程应用潜力^[41]。我国基于高熵合金的概念创制了系列高熵合金基高温自润滑材料，如CoCrFeNi-Gr-MoS₂和CoCrFeNi-Ag-BaF₂/CaF₂，其中高熵合金基体保证了复合材料良好的力学性能，而润滑相及氧化产物的协同作用使其实现了从室温至高温的连续润滑^[42]。

虽然耐磨高熵合金展现出较大理论研究价值，但是该领域仍有诸多理论性问题尚未厘清。例如，配副和温度对高熵合金摩擦、磨损行为的影响机制仍然缺乏相关报道。更重要的是，有关高熵合金的磨损行为的性能数据库较为匮乏，尚不能为耐磨材料设计提供可靠依据。

(八) 催化高熵合金

高熵合金因其广泛的元素组成和固有的复杂表面，可提供大量的结合位点，能够获得近连续分布的吸附能曲线^[43]。美国报道了一种高度均匀球形颗粒形式的高熵磷酸盐催化剂材料^[44]，其在析氧反应中具有优越的催化活性（10 mA/cm²下的过电位为270 mV），远高于传统催化剂的催化活性。来自印度的研究人员制备了纳米晶等原子AuAgPtPdCu高熵催化剂^[45]，在还原反应中具有高的催化活性，在低电压（-0.3 V）下完成了CO₂到气体产品的100%

转换。虽然催化剂中存在许多元素，但电催化活性主要由氧化还原活性铜金属的存在来描述，而其他金属仅提供协同作用。高熵合金催化剂在氧还原、水电解、氨氧化^[46,47]等反应中也具有广阔的应用潜力。相对于传统催化剂，高熵催化剂具有过电位低、热稳定性强、动力学快等特点，使其在燃料电池的生产、化学原料制备以及新能源发电等领域具有潜在的应用价值。在光热转换方面，利用电弧放电等离子体合成制备了一种由21种元素组成的高熵合金纳米颗粒^[48]，表现出了高效的光热转换性能。

(九) 储氢高熵合金

高熵合金因其显著的晶格畸变、不同的原子半径会产生较大的空隙位置，并且高熵合金多主元的特点增加了基体与氢的结合能，有利于储氢性能的提高。早期的高熵合金储氢性能研究主要集中在储氢能力上，如高熵合金 $Mg_{12}Al_{11}Ti_{33}Mn_{11}Nb_{33}$ ^[49] 和 $TiZrCrMnFeNi$ ^[50] 的最大吸氢量为 1.7 wt.%。随后，高熵合金的吸收/解吸循环特性得到广泛关注。我国报道了通过电弧熔炼与机械研磨的方法制备 $TiZrFeMnCrV$ 合金^[51]，该合金具有超快的吸氢动力学，在 30 °C 下的吸氢量可达 1.80 wt.%；同时该合金具有优异的吸附/解吸循环性能，在 50 次循环中容量仍稳定在 1.76 wt.%，表现出良好的可逆储氢性能。高熵合金作为一种不含稀土金属的新型储氢合金，可作为新能源汽车、能源发电等领域的候选材料。

(十) 软磁高熵合金

软磁材料是具有低矫顽力和高磁导率的磁性材料，易于磁化，也易于退磁，其主要功能是转换与传输电磁能量，被广泛用于各种电能变换设备中。高熵合金多主元合金的设计理念显著拓宽了材料的成分设计范围，可以同时包含多个磁性和非磁性元素，各元素间的相互作用可以产生意想不到的效果，为此，可以在较大的范围内对材料的磁性、耐腐蚀性、力学性能和高温抗氧化性等进行调整，使材料具有更高的综合性能以满足极端复杂条件下的使用需求。例如，我国研究人员设计制备的一种相干有序纳米沉淀物增强的超强韧性软磁高熵合金 $Fe_{32.6}Ni_{27.7}Co_{27.7}Ta_{5.0}Al_{7.0}$ ，该合金的饱和磁化强度、矫顽力、居里温度、电阻率、屈服强度、抗拉强度和

断裂延伸率分别为 $100.2 A \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$ 、78 A/m、693.8 K、 $103 \mu\Omega \cdot cm$ 、904 MPa、1336 MPa 和 54%，这一优异的综合性能是空前的，展现出软磁高熵合金在高力学载荷下的广阔工业应用前景^[9]。

五、我国高熵合金领域存在的不足及发展建议

(一) 我国高熵合金领域存在的不足

1. 我国高熵合金高纯原材料依赖进口，威胁产业链安全

我国短缺的高纯原材料有 9 种：U、Fe、Mn、Al、Sn、Pb、Ni、Sb、Au；严重短缺的高纯原材料有 8 种：Cr、Cu、Zn、Co、Sr、K、B 以及 Pt 族元素等。此类原材料的储量较低，新增产量不足，与迅速增长的市场需求形成了极大的差距，致使高熵合金使用成本增加，限制了其进一步的发展。以 Co 为例，全球的资源总量约为 $7.6 \times 10^6 t$ ，然而资源分布极度不均，主要分布于刚果（金）、澳大利亚等国家和地区，我国占比仅为 1%，严重依赖进口。Co 作为高熵合金中最常用的元素之一，国内严重短缺的高纯原材料将威胁相关产业链的安全。

2. 国内企业重视程度不够，“产学研用”合作不紧密

目前，我国企业对高熵合金材料的重视程度不够，没有跟上国外企业相关的研发进度。企业和研究机构缺少健全的科研合作体系，以企业为主导的研发机制仍需要进一步完善，“产学研用”合作不紧密。相关科研单位的研发投入经费少，人才队伍建设不完善，缺乏激励政策和研发平台，科技人员创新动力不足。另外，由于缺少用于原始创新和基础研究“产学研用”合作平台，大量创新成果仅停留在实验室研究阶段，缺少高效的研发平台将基础性研究成果进行验证和中试放大，推动科研成果的快速转化和产业应用。

3. 理论仿真能力不足

高熵合金可选择的元素种类众多，因此高熵合金体系数量也非常庞大，为此，通过模拟仿真对高熵合金成分进行筛选是一个重要的研究方向。然而，国内对于高熵合金数据库搭建的重视程度不够，如开发新型高熵合金所使用到的热力学数据库与相图计算软件大多来源于美国、瑞典等国家，在

一定程度上使高熵合金材料的研发受制于人。目前,我国高熵合金领域尚缺少行之有效的模拟计算能力,难以精确预测其结构和性能,高熵合金的理论数据库搭建和仿真能力有待进一步完善。

4. 高熵合金的应用与评价体系有待完善

目前国内所研究的高熵合金多是在实验室条件下进行的成分探索和性能研究,科研成果的工程化和推广应用较慢,新兴高熵合金制造技术与国家优先发展领域目标匹配有待进一步提高。虽然我国现已发现的高熵合金成分体系数量众多,但是没有进行系统梳理以及分类。同时,我国在新材料性能评定、生产技术、标准规范等方面的建设相对滞后;大量性能优异的高熵合金体系的自主知识产权掌握在国外,我国高熵合金领域在知识产权方面存在欠缺。

(二) 发展建议

1. 加强高熵合金材料的顶层设计,完善产业政策

结合国家材料产业战略布局和高质量发展目标,构建以企业为主体的自主创新体系,推进高熵合金领域国家重点实验室的资源整合和规划布局势在必行。与世界高水平研发机构接轨,加强高熵合金核心技术研发,建立自主知识产权。加速高熵合金领域成果产业化,建立高校与科研、产业化之间的衔接机制。鼓励标准化机构面向国家科研及产业化项目提供标准化咨询和支撑服务,覆盖项目立项、实施、推广应用、试点示范等全链条。激励骨干企业带动创新企业,加大研发投入,弥补技术短板,积极应对国际市场的竞争。

2. 加强企业和科研机构的对接和沟通

依托国内外高校和科研院所的专家学者开展咨询,构建集研发、生产、应用于一体的健康绿色发展格局。实施创新人才发展战略,构建高熵合金相关产业的精尖人才体系;同时,鼓励本领域创新团队积极开展国际合作与交流,在经济上给予大力扶持。鼓励企业构建规范高效的人才管理制度,培养适应企业生产又高度自主创新的人才团队。加强行业协会、科研机构和高校的联系,组建与企业对口的精尖人才后备团队,定期对国内外高熵合金研发和应用需求进行调研和评估。加强科研-生产-消费-再科研循环体系建设,实现科研在前、生产随

后,相辅相成从而稳步向前的发展目标。

3. 完善高熵合金材料标准、测试、表征、评价体系

建立支撑高熵合金产业高质量发展的标准体系,开展高熵合金材料标准领航行动,加大先进金属材料基础研究、关键战略合金材料及前沿新型高熵合金材料标准的有效供给,进一步发挥标准化对整体高熵合金产业的发展和变革的引领作用。完善新材料测试、表征、评价体系,建立国家级高熵合金测试评价平台,构建新型高熵合金材料测试评价体系,解决其测试评价的瓶颈和短板问题。大力发展自主认证和品牌检测能力,不断提升国际竞争力。

4. 推进人才队伍建设

实施创新人才发展战略,加强中青年创新人才和团队培养,采用柔性引进等灵活政策,建立国家级高熵合金协同创新中心,培养自主创新人才队伍,培养一批学科、专业技术带头人,有效提高人才要素在产业科技创新中的活跃度和推动作用,提升自主创新能力,实现高熵合金材料的快速工业化应用。

5. 降低材料成本,打造高附加值产品

高熵合金目前工业化进度缓慢,其主要原因在于过高的原料成本和生成成本。未来应在政策上鼓励科研院校和相关企业进行科技研发、产品创新和品牌建设,进一步提高从业人员的科技创新能力和水平,全力打造高附加值产品,促进产品融入全球高端制造业供应链。建议通过“产学研用”合作,从降低材料的生产成本方面着手,打造低成本高熵合金牌号,优化品种结构,提高国际竞争力。应积极拓展高熵合金应用领域,通过开展合作研发和示范应用项目,推动高熵合金在实际应用中取得更多突破。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: February 22, 2023; Revised date: April 20, 2023

Corresponding author: Lu Yiping is a professor from the School of Materials Science and Engineering of Dalian University of Technology. His major research field is the preparation of high entropy alloys. E-mail: luyiping@dlut.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of China’s Advanced Non-ferrous Materials” (2022-XZ-20)

参考文献

- [1] Yeh J W, Chen S K, Lin S J, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6: 299–303.
- [2] Cantor B, Chang I T H, Knight P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 375: 213–218.
- [3] Yeh J W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys [J]. *JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2013, 65(12): 1759–1771.
- [4] Li W, Xie D, Li D, et al. Mechanical behavior of high-entropy alloys [J]. *Progress in Materials Science*, 2021, 118: 100777.
- [5] Liu D, Yu Q, Kabra S, et al. Exceptional fracture toughness of CrCoNi-based medium- and high-entropy alloys at 20 kelvin [J]. *Science*, 2022, 378(6623): 978–983.
- [6] Lee C, Maresca F, Feng R, et al. Strength can be controlled by edge dislocations in refractory high-entropy alloys [J]. *Nature Communication*, 2021, 12(1): 5474.
- [7] He Q F, Wang J G, Chen H A, et al. A highly distorted ultraelastic chemically complex Elinvar alloy [J]. *Nature* 2022, 602(7896): 251–257.
- [8] Lei Z, Wu Y, He J, et al. Snoek-type damping performance in strong and ductile high-entropy alloys [J]. *Science Advances*, 2021, 6(25): eaba7802.
- [9] Han L L, Maccari F, Souza Filho I R, et al. A mechanically strong and ductile soft magnet with extremely low coercivity [J]. *Nature*, 2022, 608(7922): 310–316.
- [10] Li R, Liu X, Liu W, et al. Design of hierarchical porosity via manipulating chemical and microstructural complexities in high-entropy alloys for efficient water electrolysis [J]. *Advanced Science*, 2022, 9: e2105808.
- [11] 王宝亭, 耿鸿武. 中国医疗器械行业发展报告(2022) [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2022.
- Wang B T, Geng H W. Annual report on the development of medical device industry in China (2022) [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press (China), 2022.
- [12] 中经产业研究所. 2020年中国储氢材料行业发展现状分析 [R]. 北京: 中经产业研究所, 2020.
- China Economic and Technological Industry Research Institute. Analysis of the development status of China's hydrogen storage materials industry in 2020 [R]. Beijing: China Economic and Technological Industry Research Institute, 2020.
- [13] 翁兴园. 我国磁性材料及器件行业发展现状和趋势(上) [J]. *新材料产业*, 2021 (4): 4.
- Weng X Y. Development status and trends of magnetic materials and devices industry in China (part 1) [J]. *Advanced Materials Industry*, 2021 (4): 4.
- [14] Xie Y M, Meng X C, Zang R Z L, et al. Deformation-driven modification towards strength-ductility enhancement in AlLiMgZnCu lightweight high-entropy alloys [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2022, 830: 142332.
- [15] Yan X H, Liaw P K, Zhang Y. Ultrastrong and ductile BCC high-entropy alloys with low-density via dislocation regulation and nanoprecipitates [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 110: 109–116.
- [16] Senkov O N, Miracle D B, Chaput K J, et al. Development and exploration of refractory high-entropy alloys—A review [J]. *Journal of Materials Research*, 2018, 33(19): 3092–3128.
- [17] Duan J, Wang M, Huang R, et al. A novel high-entropy alloy with an exceptional combination of soft magnetic properties and corrosion resistance [J]. *Science China Materials*, 2023, 66(2): 772–779.
- [18] Wu P, Gan K, Yan D, et al. A non-equiatomic FeNiCoCr high-entropy alloy with excellent anti-corrosion performance and strength-ductility synergy [J]. *Corrosion Science*, 2021, 183: 109341.
- [19] Shuang S, Ding Z Y, Chung D, et al. Corrosion resistant nanostructured eutectic high-entropy alloy [J]. *Corrosion Science*, 2020, 164: 108315.
- [20] Zhang S, Wu C L, Zhang C H, et al. Laser surface alloying of Fe-CoCrAlNi high-entropy alloy on 304 stainless steel to enhance corrosion and cavitation erosion resistance [J]. *Optics & Laser Technology*. 2016, 84: 23–31.
- [21] Jiang X J, Wang S Z, Fu H, et al. A novel high-entropy alloy coating on Ti-6Al-4V substrate by laser cladding [J]. *Materials Letters*, 2022, 308: 131131.
- [22] Li X, Zheng Z, Dou D, et al. Microstructure and properties of coating of FeAlCuCrCoMn high-entropy alloy deposited by direct current magnetron sputtering [J]. *Materials Research*, 2016, 19(4): 802–806.
- [23] Yuan Y, Wu Y, Yang Z, et al. Formation, structure and properties of biocompatible TiZrHfNbTa high-entropy alloys [J]. *Materials Research Letters*, 2019, 7: 225–231.
- [24] Gurel S, Yagci M, Canadinc D, et al. Fracture behavior of novel biomedical Ti-based high-entropy alloys under impact loading [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 803: 140456.
- [25] Wang S P, Xu J. TiZrNbTaMo high-entropy alloy designed for orthopedic implants: As-cast microstructure and mechanical properties [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, 93: 80–89.
- [26] Zhou E, Qiao D, Yang Y, et al. A novel Cu-bearing high-entropy alloy with significant antibacterial behavior against corrosive marine biofilms [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 46(11): 201–210.
- [27] Ren G, Huang L, Hu K, et al. Enhanced antibacterial behavior of a novel Cu-bearing high-entropy alloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 117: 158–166.
- [28] Lu C Y, Niu L L, Chen N J, et al. Enhancing radiation tolerance by controlling defect mobility and migration pathways in multi-component single-phase alloys [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13564
- [29] Lu Y P, Huang H F, Gao X X, et al. A promising new class of irradiation tolerant materials: $Ti_2ZrHfV_{0.5}Mo_{0.2}$ high-entropy alloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(3): 369–373.
- [30] El-Atwani O, Li N, Li M, et al. Outstanding radiation resistance of tungsten-based high-entropy alloys [J]. *Science Advances*, 2019, 5(3): eaav2002.
- [31] Su Z X, Ding J, Song M, et al. Enhancing the radiation tolerance of high-entropy alloys via solute-promoted chemical heterogeneities [J]. *Acta Materialia*, 2023, 245: 118662.

- [32] Liu S, Lin W, Chen D, et al. Effects of temperature on helium cavity evolution in single-phase concentrated solid-solution alloys [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2021, 557: 153261.
- [33] Jia N, Li Y, Huang H, et al. Helium bubble formation in refractory single-phase concentrated solid solution alloys under MeV He ion irradiation [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2021, 550: 152937.
- [34] Lu Y, Dong Y, Guo S, et al. A promising new class of high-temperature alloys: Eutectic high-entropy alloys [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 1–5.
- [35] Shi P, Ren W, Zheng T, et al. Enhanced strength–ductility synergy in ultrafine-grained eutectic high-entropy alloys by inheriting microstructural lamellae [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1–8.
- [36] Shi P, Li R, Li Y, et al. Hierarchical crack buffering triples ductility in eutectic herringbone high-entropy alloys [J]. *Science*, 2021, 373(6557): 912–918.
- [37] Lu Y, Wu X, Fu Z, et al. Ductile and ultrahigh-strength eutectic high-entropy alloys by large-volume 3D printing [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 126: 15–21.
- [38] Cheng Z, Wang S, Wu G, et al. Tribological properties of high-entropy alloys: A review [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2022, 29: 389–403.
- [39] Chuang M H, Tsai M H, Wang W R, et al. Microstructure and wear behavior of $Al_xCo_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_y$ high-entropy alloys [J]. *Acta Materialia*, 2011, 59: 6308–6317.
- [40] Xin B, Zhang A, Han J, et al. The tribological properties of carbon doped $Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.5}$ high entropy alloys [J]. *Wear*, 2021, 484–485: 204045.
- [41] Yu Y, Wang J, Yang J, et al. Corrosive and tribological behaviors of AlCoCrFeNi-M high entropy alloys under 90 wt.% H_2O_2 solution [J]. *Tribology International*, 2019, 131: 24–32.
- [42] Zhang A, Han J, Su B, et al. Microstructure, mechanical properties and tribological performance of CoCrFeNi high entropy alloy matrix self-lubricating composite [J]. *Materials & Design*, 2017, 114: 253–263.
- [43] Xin Y, Li S H, Qian Y Y, et al. High-entropy alloys as a platform for catalysis: Progress, challenges, and opportunities [J]. *ACS Catalysis*, 2020, 10: 11280–11306.
- [44] Qiao H, Wang X Z, Dong Q, et al. A high-entropy phosphate catalyst for oxygen evolution reaction [J]. *Nano Energy*, 2021, 86: 106029.
- [45] Pedersen J, Batchelor T, Bagger A, et al. High-entropy alloys as catalysts for the CO_2 and CO reduction reactions: Experimental realization [J]. *ACS Catalysis*, 2020, 10: 3658–3663.
- [46] Loeffler T, Meyer H, Savan A, et al. Discovery of a multinary noble metal-free oxygen reduction catalyst [J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(34): 1802269.
- [47] Yao Y G, Huang Z N, Xie P F, et al. Carbothermal shock synthesis of high-entropy-alloy nanoparticles [J]. *Science*, 2018, 359(6383): 1489–1494.
- [48] Liao Y J, Li Y X, Zhao R Z, et al. High-entropy-alloy nanoparticles with 21 ultra-mixed elements for efficient photothermal conversion [J]. *National Science Review*, 2022, 9(6): nwac041.
- [49] Strozi R B, Leiva D R, Huot J, et al. An approach to design single BCC Mg-containing high-entropy alloys for hydrogen storage applications [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(50): 25555–25561.
- [50] Edalati P, Floriano R, Mohammadi A, et al. Reversible room temperature hydrogen storage in high-entropy alloy TiZrCrMnFeNi [J]. *Scripta Materialia*, 2020, 178: 387–390.
- [51] Chen J, Li Z, Huang H, et al. Superior cycle life of TiZrFeMnCrV high-entropy alloy for hydrogen storage [J]. *Scripta Materialia*, 2022, 212: 114548.