

轻质高熵合金在车辆装备中的应用前景

柳建¹ 郭煜² 蔡志海¹ 刘建军³

(1.陆军装甲兵学院机械产品再制造国家工程研究中心; 2.安徽理工大学机械工程学院;
3.兰州理工大学材料科学与工程学院)

摘要 轻量化是装备未来发展的必然趋势,尤其对于车辆装备来说,轻量化预示着低油耗、长航程、高机动性和高有效载荷。因此,轻质高强,易加工成形合金是实现装备轻量化的基础和关键,一直备受关注。高熵合金是一种基于新型设计理念的工程材料,可以同时具有高硬度、高强度、良好的抗氧化性、耐蚀性等特性,具有广泛的潜在工业应用前景。就轻质高熵合金在车辆装备中的应用前景和应用领域等进行了分析,为促进车辆装备尤其是军用车辆装备的技术升级,满足未来作战需求提供参考。

关键词 轻质高熵合金;车辆装备;轻量化

中图分类号 G294;TG139 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application Prospect of Lightweight High Entropy Alloy in Vehicle Equipment

Liu Jian¹, Guo Yu², Cai Zhihai¹, Liu Jianjun³

(1.National Engineering Research Center for Remanufacturing of Mechanical Products, Academy of Armored Force; 2.School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology;
3.School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology)

Abstract: Lightweight is the inevitable trend of equipment development in the future, which indicates low fuel consumption, long distance, high mobility and high payload especially for vehicle equipment. Therefore, alloys with high-strength and cushy process forming are the foundation and key to realize the lightweight of equipment, which has been always concerned. High entropy alloy is a kind of engineering material based on the new design concept with high hardness, high strength, good oxidation resistance, corrosion resistance and other characteristics, which has a wide potential prospect in industrial application. The application prospect and field of lightweight high entropy alloy in vehicle equipment were analyzed in order to provide theoretical and technical support for promoting the technical upgrading of vehicle equipment, especially military vehicle equipment, and meeting the requirements of future combat.

Key Words: Lightweight High Entropy Alloy, Vehicle Equipment, Lightweight

随着社会和科技的不断发展,从日常出行用的小轿车,到城际间运行的高速列车,再到目前已列装部队的主战坦克以及各式步战车,车辆装备所扮演的角色越来越重要。同时,人们对生活舒适性追求的不断提升,地球资源的枯竭以及环保压力的不断增大使得轻量化成为未来车辆装备发展的必然趋势。

1 车辆装备轻量化

车辆装备轻量化效应主要体现在以下几个方面。

(1)节能效果显著 据统计,2019 年全国汽车保有

量达 2.6 亿辆,见图 1。如果每辆车减轻 1 kg 且运行 10 000 km 的话可以节省汽油 1.82 亿 L,节能效果非常显著。

(2)环保效益突出 有研究表明,每辆汽车质量减少 50%,CO₂ 排放将减少 13%。如果美国的汽车减重 25%,每天将节油 75 万桶,全年减少排放量 1.01 亿 t^[1]。

(3)提高装备续航里程 若汽车整车质量降低 10%,燃油经济性可提高 6%~8%。中型纯电动车整体质量降低 10%,其续航里程可以提高 13.7%^[2]。

(4)提升车辆舒适性和安全性 相关研究表明,汽

收稿日期:2021-01-04;修改稿收到日期:2021-02-08

基金项目:国防科研基金资助项目

第一作者简介:柳建,男,1982 年出生,副研究员,北京(100072),E-mail: 550123310@qq.com

引用格式:柳建,郭煜,蔡志海,等. 轻质高熵合金在车辆装备中的应用前景[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):849-852.

LIU J, GUO Y, CAI Z H, et al. Application prospect of lightweight high entropy alloy in vehicle equipment[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):849-852.

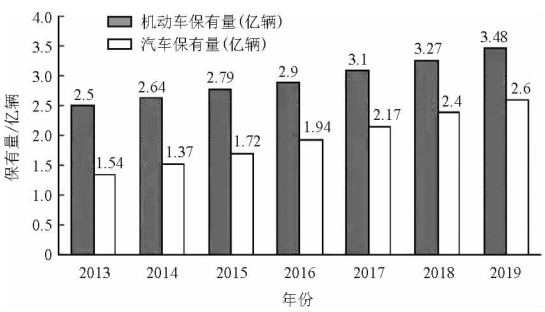


图 1 2013-2019 年中国机动车和汽车保有量变化趋势图

Fig.1 Changing trend chart of motor vehicles and automobiles ownership in China from 2013 to 2019

车质量每减少 10%，加速时间减少约 8%，制动距离减少约 5%，疲劳失效减少约 50%^[3]。美国铝业协会提出如使用铝合金车轮，车辆震动会变小，使汽车行驶更稳定。采用铝合金减重后乘客空间变大，在受冲击时铝合金结构能吸收分散更多的能量，因而更具舒适性和安全性^[4]。

对于军用车辆装备，除上述的效应外，轻量化还有如下优势。

(1)车辆装备的作战半径扩大 轻量化后，民用车辆的续航里程可以提高，对于军用车辆装备来说预示着其作战半径的增大。

(2)有效作战载荷增大 军用车辆装备轻量化后可以装载更多的弹药、更多的武器装备和有生作战力量，也预示着作战效能的增强。

(3)战场生存能力增强 主要体现在两方面，一是轻量化可以提升军用车辆装备的机动性，增强生存能力；二是轻量化可以减少车辆装备的振动噪音，降低被敌方探测装备发现的几率，提升生存能力。以汽车为例，如果质量减轻 25%，就可使汽车加速到 60 km/h 的时间由 10 s 减少到 6 s，大幅提高其机动性^[1]。此外，减轻发动机连杆质量可以减少发动机振动和惯性力。同时，连杆的轻量化允许与其相关零件(如曲轴、轴承等)减轻质量，并可省去为减少噪音和振动所加的平衡质量，这些轻量化措施可以改善发动机灵敏度的响应性。

实现车辆装备轻量化的途径主要有两种，一是进行轻量化设计；二是选用轻质材料。轻量化设计即是对车辆装备进行结构优化设计，但这种方法已经接近极限。研发和使用轻质材料是目前车辆装备轻量化的主导方向之一，大致有以下几个方面。

(1)以塑代钢 利用具有较好力学性能的塑料实现以塑代钢，达到减重目的。如目前轿车的保险杠、仪表板、顶棚、座椅、塑料覆盖件等都为塑料制品。

(2)轻质合金 大量使用铝、镁合金等轻质合金实

现减重目的。铝合金及其加工材具有密度小、比强度和比刚度高、弹性好、抗冲击性能好、耐蚀性、耐磨、高导电、高导热、良好的加工成形性和高的回收再生性等特性，是目前车辆装备轻量化的首选轻质合金。目前，铝合金材料大量用于汽车工业，如重卡发动机缸体、发动机散热器、变速箱、传动器壳体、离合器壳体、空调冷凝器、车轮、把手及罩盖壳体类零件等。军用车辆装备中，两栖装甲车、空降步战车以及导弹快艇等都使用了大量铝合金。

(3)高强度 采用高强度代替普钢、铸铁件实现减重目的。如采用高强度制成的传动轴比用普钢制成的传动轴可减重约 10%^[5]。高强度主要用在汽车车身、底盘、悬架以及转向系统零部件上。近年来，无间隙原子钢、烘焙硬化钢、相变诱发塑性钢以及双相钢在汽车底盘、车身及悬架的应用逐年增加^[6]。

上述材料的采用不但有助于实现车辆装备的轻量化，在提升车辆装备安全性、寿命、机动性等方面也发挥了重要作用。表 2 和表 3 分别为部分国家车企轻量化材料应用进展以及部分车企轻量化材料的未来布局重点。不过，社会对车辆装备性能的要求不断提升，车辆装备各项性能的提升也反过来对车辆装备各零部件性能提出更高、更严格的要求。对于军用车辆装备而言，日益严苛的战争环境对其材料性能的要求也日益提高。工程塑料虽然在很多方面都实现了以塑代钢，但其具有成本比较高，而且不耐高温和严寒等缺点，在主结构方面不能替代金属材料。铝合金虽然是目前车辆装备轻量化的首选材料，但其可焊接性差，不能满足构件对强韧性的要求，疲劳寿命也比较低。全铝发动机在比功率、刚度和高温强度方面不如铸铁发动机。因此，研发高强度的轻质合金是未来车辆装备轻量化材料的优先发展方向之一。

表 2 部分国家轻量化材料应用占比^[7]

Tab.2 Application proportion of lightweight materials in some countries			
国别	2015 年占比/%	2020 年占比/%	代表性企业
德国	25	34	宝马、奥迪
美国	15	20	特斯拉、通用、福特
日本	7	20	丰田、本田

表 3 全球主要车企的轻量化材料专利布局重点^[7]

Tab.3 Key points of lightweight material patent layout of major global auto companies	
企业名称	专利布局重点
本田	高强度钢、空心铝、镁等轻量化材料
奔驰	钢铝混合材料
通用	高强度钢、铝、镁、钛合金及复合材料
丰田	纤维增强铝基合金、铝镁合金
大众	碳纤维、铝合金

2 轻质高熵合金及其研究现状

2.1 高熵合金及其性能特点

20 世纪初 YE H J W 等^[8]和 CANTOR B 等^[9]分别发现了一种新型的合金,分别命名高熵合金(High Entropy Alloys, HEAs)和多组元合金(Multi-component alloys, MCAs)。根据高熵合金的定义,高熵合金需要满足如下两个条件:①合金含有 5 个及以上的主要元素;②每个主要元素的含量在 5%~35% 之间。高熵合金突破了传统的基于“焯”的合金设计理念,混合熵远高于传统合金,具有 4 大效应:热力学上的高熵效应、动力学上的迟滞扩散效应、结构上的晶格畸变效应和性能上的“鸡尾酒”效应。这使得 HEAs 易形成简单的面心立方(FCC)或体心立方(BCC)固溶体、易形成纳米级析出物,具有高强度、高硬度以及优异的热稳定性、耐腐蚀性和耐磨性等特性。目前一般认为,混合熵大于 1.5R,具有 3 种以上主要元素即可称为高熵合金。

2.2 轻质高熵合金及其研究现状

轻质高熵合金(LWHEA)是以 Al、Mg、Li、Ti、B、V、Be 等为主元的一类高熵合金。目前,关于轻质高熵合金的划分主要有 3 种观点:一是密度低于 3 g/cm³ 的高熵合金被认为是轻质高熵合金^[10~12];二是密度低于钛合金^[13];三是合金密度低于 7 g/cm³ 即可被认为是轻质高熵合金^[14~16]。由于根据高熵合金定义特点,满足密度低于 3 g/cm³ 的高熵合金比较稀少,支持第 3 种观点的研究者相对较多。由于轻质高熵合金具有高强度、高耐磨性、耐蚀性、耐高温等优异的综合性能,同时兼具密度低的特点,非常契合未来车辆装备轻量化对材料的需求,因此倍受关注,许多研究者对不同系列的轻质高熵合金进行了研究,如 CHUANG M H 等^[17]研究了 Al_xCo_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_y 系列高熵合金的耐磨性能,发现合金的硬度与传统的耐磨钢 SUJ2 和 SKH51 相当,耐磨性至少两倍于耐磨钢 SUJ2 和 SKH51。LI R 等^[18]采用感应熔炼法制备的 Mg_x(MnAlZnCu)_{100-x} (x 为摩尔分数/%,分别为 20、33、43、45.6 和 50)新型轻质高熵合金,根据镁的组成比例,密度在 2.20~4.29 g/cm³ 范围内,室温下具有高硬度(HV 178~429),高抗压强度(400~500 MPa)特点。YOUSSEF K M 等^[19]用机械合金化法制备了一种新型 Al₂₀Li₂₀Mg₁₀Sc₂₀Ti₃₀ 高熵合金,密度为 2.67 g/cm³,晶粒尺寸为 12 nm,硬度为 6.1 GPa,强度为纳米 Al 晶体的 2~3 倍,甚至比金属玻璃 VIT1 的强度还要高。STEPANOV N D 等^[20]研究了 Al_xNbTiVZr($x=0, 0.5, 1, 1.5$)合金的力学性能,发现 Al 含量增加导致合金密度从 NbTiVZr 的 6.49 g/cm³

逐渐降低到 Al_{1.5}NbTiVZr 的 5.55 g/cm³。随着 Al 含量增加,Al_xNbTiVZr 合金的显微硬度也相应增加,Nb-TiVZr 合金的显微硬度(HV)为 379,Al_{1.5}NbTiVZr 合金的显微硬度(HV)为 619。TSENG K 等^[21]研究了一种轻质高熵合金 Al₂₀Be₂₀Fe₂₀Si₁₅Ti₃₅,合金主要由与 Fe₂Ti 相和 MgZn₂ 相类似的六方晶型 Laves 相和两个小晶型的 Al₂(Ti,Fe)、Si₃Ti₅ 型结构相组成,合金硬度(HV)高达 911,高于石英。合金的密度为 3.91 g/cm³,且在 700、900 °C 时,合金均表现出良好的抗高温氧化性能,性能优于 Ti-6Al-4V 合金,因此,该合金满足轻质、耐磨及耐高温的需求

HEMPHILL M A 等^[22]研究了 Al_{0.5}CoCrCuFeNi 高熵合金的抗疲劳性能。对比其他合金,高熵合金具有较好的疲劳性能,合金在较高的应力状态下都具有较长的疲劳寿命。高熵合金的条件疲劳极限在 540~945 MPa 之间,并且条件疲劳极限与拉伸断裂强度的比值在 0.402~0.703,与钢铁、钛合金及非晶合金的疲劳性能相当。因此,高熵合金具有潜在的应用前景。

3 轻质高熵合金在车辆装备中的应用前景

未来,随着轻质高熵合金研究的不断深入,以及工程化制备技术的不断成熟,轻质高熵合金可以作为车辆装备轻量化的重要支撑材料在以下几个方面具有广泛的应用前景。

(1)作为新型高端金属结构材料 替代目前的轿车结构板、动力系统及轴承用钢材,座椅骨架高强度钢,以及作为凸轮轴、曲轴、变速箱齿毂等零部件材料,发挥其质量轻、强度高的优势,在实现车辆装备轻量化的同时,提高车辆装备整体强度和安全性。

(2)作为新型轻合金材料 替代目前的铝合金材料、涡轮增压发动机叶轮材料,以及铝镁硅(铜)合金车身板材料。目前,许多研发的轻质高熵合金虽然密度比铝合金大,但各方面性能都比铝合金高,可以充分发挥其综合性能优势,替代铝合金,实现车辆装备的轻量化目标。

(3)作为发动机缸体材料 发动机是车辆装备的心脏,其性能的高低对车辆装备性能,包括军用车辆装备的作战效能以及生存能力都有至关重要的影响。目前发动机缸体主要有铸铁缸体和铝合金缸体两种。铸铁缸体太重,而铝合金缸体发动机的比功率比较小,刚度和高温强度方面也不如铸铁缸体发动机。未来,以轻质高熵合金为发动机缸体材料可以弥补其缺陷,在实现发动机轻量化的同时,提升发动机比功率,进而提升车辆装备的机动性能和复杂环境下的生存能力。

(4)作为车辆装备部件再制造材料 车辆装备的再

制造延寿是有效发挥其效能的重要保障和活动内容,具有重要的经济价值和环保效益。尤其是军用车辆装备,再制造延寿是保障和恢复其战斗力的重要手段。未来,可以采用轻质高熵合金对老旧车辆装备进行再制造修复,提升其性能,达到延寿目的。

4 结 语

轻质高熵合金作为一种新型工程化材料,具有传统合金材料不可比拟的优势。大力推进轻质高熵合金材料工程化开发及其在车辆装备行业中的应用,不但可以大力提升我国车辆装备制造水平,也可以提升我国先进材料研发和生产水平。

参 考 文 献

[1] 刘静安,盛春磊,刘志国,等. 铝材在汽车上的开发应用及重点新材料研发方向[J]. 铝加工, 2012(5): 4-16.

[2] JOOST W J.Reducing vehicle weight and improving U.S. energy efficiency using integrated computational materials engineering[J]. JOM, 2012, 64: 1 032-1 038.

[3] 胡群林,温秀梅,陈晓峰. 汽车车身轻量化发展方向探讨[J].成组技术与生产现代化, 2014, 31(4):38-45.

[4] 刘静安.大力发展铝合金零部件产业促进汽车工业的现代化进程[J]. 铝加工, 2005(7):8-17.

[5] 史莎莎,刘晋利. 新材料在汽车轻量化技术中的应用[J].汽车实用技术, 2014(7): 77-78.

[6] 王利. 汽车轻量化及其材料的经济选用[J].汽车工艺与材料, 2013(1): 1-3.

[7] 马琳,耿雷.国外汽车轻量化材料应用经验借鉴[J]. 新材料产业, 2019(6): 28-31.

[8] 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.

[9] CANTOR B, CHANG I T H, KNIGHT P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys[J]. Mater. Sci. Eng., 2004, A(375-377): 213-218.

[10] AMIT K, MANOJ G. An insight into evolution of light weight high entropy alloys: A review[J]. Metals, 2016(6): 199-205.

[11] AMIT K, MANOJ G. An insight into the development of light weight high entropy alloys[J]. Res. Dev. Material Sci., 2017, 2(2):534.

[12] YOUSSEF K M, ZADDACH A J, NIU C, et al. A novel low-density, high-hardness, high-entropy alloy with close-packed single-phase nanocrystalline structures[J]. Materials Research Letters, 2015, 3(2):95-99.

[13] SANCHEZ J K, VICARIO I, ALBIZURI J, et al. Compound formation and microstructure of as-cast high entropy aluminums[J]. Metals, 2018, 167(8):1-11.

[14] SENKOV O N, SENKOVA S V, WOODWARD C, et al. Low-density, refractory multi-principal element alloys of the Cr-Nb-Ti-V-Zr system: Microstructure and phase analysis[J]. Acta Materialia, 2013, 61(5):1 545-1 557.

[15] FENG R, GAO M C, LEE C, et al. Design of lightweight high-entropy alloys[J]. Entropy, 2016, 18:333-337.

[16] 赵海潮,梁秀兵,乔玉林,等. 低密度高熵合金的研究进展[J]. 航空材料学报, 2019, 39(5):61-81.

[17] CHUANG M H, TSAI M, 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: 6 308-6 317.

[18] LI R, GAO J C, FAN K. Study to microstructure and mechanical properties of Mg containing high entropy alloys[J]. Materials Science Forum, 2010, 650: 265-271.

[19] YOUSSEF K M, ZADDACH A J, NIU C, et al. A novel low density, high hardness, high entropy alloy with close packed single phase nanocrystalline structures[J]. Materials Research Letters, 2015, 3(2): 95-99.

[20] STEPANOV N D, YURCHENKO N Y, SHAYSULTANOV D G, et al. Effect of Al on structure and mechanical properties of $Al_xNbTiVZr$ ($x=0, 0.5, 1, 1.5$) high entropy alloys[J]. Materials Science and Technology, 2015, 31(10): 1 184-1 193.

[21] TSENG K, YANG Y, JUAN C, et al. Synthesis and characterization of nanocrystalline $AlFeTiCrZnCu$ high entropy solid solution by mechanical alloying[J]. Science China-Technological Sciences, 2018, 61(2): 184-188.

[22] HEMPHILL M A, YUAN T, WANG G Y, et al. Fatigue behavior of $Al_{0.5}CoCrCuFeNi$ high entropy alloys[J]. Acta Materialia, 2012, 60: 5 723-5 734.

(编辑:栗万仲)

长安等 13 家单位开发出新能源车 减重方案

近日,重庆长安汽车联合中国汽车工程研究院股份有限公司、中复神鹰碳纤维有限责任公司、中国科学院宁波材料所等国内 13 家科研院所、供应商联合开发,从材料、分析、设计、制造、整车集成到试验验证等 6 个方面进行攻关,开发出了一款具有国际一流技术水平的多种轻质材料车身纯电动轿车,为新能源汽车能跑得更远更快减去“体重”之忧。

镁合金比铝合金轻,针对此材料工艺特点,研发团队在座椅骨架和转向支撑方面采用镁合金压铸工艺,不仅零件集成化程度高,尺寸稳定,安装精度高,各项性能均满足要求,而且相比钢制件减重 30% 以上。为了让铝合金减重,研发团队在铝合金后连接件采用多腔体复杂截面设计方案,代替铝合金压铸成型,大幅降低成本,并实现减重 40%。

同时,团队研发了铝合金高真空压铸技术,实现铝合金减震塔一模两件模具设计、生产及装车性能验证,减震塔零件可焊接可铆接。此外,开展了碳纤维、铝合金、镁合金等 14 种轻质零部件成型技术研究,通过多种异质轻质材料连接技术研究,项目实现了多种异质材料间的高效连接。

(摘自压铸周刊)