

高强韧异质钛合金的研究进展

梁顺星^{1,2,3} 刘凯洋¹ 尹丽霞¹ 王天一¹

(1.河北工程大学材料科学与工程学院; 2.河北省高强韧耐磨金属材料重点实验室;
3.河北省稀土永磁材料与应用工程研究中心)

摘 要 钛合金的强度和塑(韧)性的倒置规律严重限制了其进一步发展和广泛应用。异质钛合金材料能够同时提高常规钛合金材料的强度和塑(韧)性,是获得高强韧钛合金的重要研究和发展方向。对异质钛合金的微观结构和力学行为特点以及强韧化机理进行了总结和分析。针对目前异质钛合金在上述方面的研究现状和不足,展望了未来的发展趋势和方向。

关键词 异质钛合金;微观组织;力学性能;强韧化机理

中图分类号 TG146.23 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Progress in Heterogeneous Titanium Alloys with Extraordinary Strength and Ductility

Liang Shunxing^{1,2,3}, Liu Kaiyang¹, Yin Lixia¹, Wang Tianyi¹

(1.College of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering;
2.Hebei Key Laboratory of Wear-resistant Metallic Materials with High Strength and Toughness;
3.Hebei Engineering Research Centre for Rare Earth Permanent Magnetic Materials & Applications)

Abstract: The trade-off relationship between strength and plasticity (toughness) of titanium alloys seriously limits its further improvement and wide application. Heterogeneous titanium alloys can simultaneously improve the strength and plasticity(toughness) of conventional titanium alloys, which provides an important research and development direction to obtain titanium alloys with extraordinary strength and ductility. The microstructure, mechanical behavior characteristics and strengthening-toughening mechanism of heterogeneous titanium alloys were reviewed. Based on the current research status and shortcomings, future development trends and research directions of heterogeneous titanium alloys were put forward.

Key Words: Heterogeneous Titanium Alloys, Microstructure, Mechanical Properties, Strengthening-toughening Mechanism

收稿日期:2021-11-01
基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2021402002)
第一作者简介:梁顺星,男,1983 年出生,教授,河北邯郸(056038),E-mail:liang.6@139.com
引用格式:梁顺星,刘凯洋,尹丽霞,等. 高强韧异质钛合金的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):138-143.
LIANG S X, LIU K Y, YIN L X, et al. Progress in heterogeneous titanium alloys with extraordinary strength and ductility[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):138-143.

[5] XIONG D B, CAO M, GUO Q, et al. Graphene-and-copper artificial nacre fabricated by a preform impregnation process: Bioinspired strategy for strengthening-toughening of metal matrix composite[J].Acs. Nano., 2015, 9(7): 6 934-6 943.

[6] ZANDIATASHBAR A, LEEG H, ANS J, et al. Effect of defects on the intrinsic strength and stiffness of graphene[J]. Nat. Commun., 2014(5): 3 186-3 195.

[7] HAN R Q, SONG H Y, WANG J Y, et al. Strengthening mechanism of Al matrix composites reinforced by nickel-coated graphene: Insights from molecular dynamics simulation[J]. Physical, 2021, B601: 412 620-412 630.

[8] GUO B S, CHEN Y Q, WANG Z W, et al. Enhancement of strength and ductility by interfacial nano-decoration in carbon nanotube/aluminum matrix composites[J]. Carbon, 2020, 159: 201-212.

[9] ATKINSA G. Deformation-mechanism maps (the plasticity and creep of metals and ceramics[J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1984(9): 224-225.

[10] NGUYEND H, QUAN G H L, HE Q C, et al. The effective thermal conductivity of composites with interfaces oscillating in two directions around a curved surface[J]. Acta Mech., 2020, 231: 5 063-5 103.

[11] BODENA, BOERNERB, KUSCHP, et al. Nanoplatelet size to control the alignment and thermal conductivity in copper-graphite composites[J]. Nano Lett., 2014, 14: 3 640-3 644.

[12] WANG J, LI C, LI J, et al. A multiscale study of the filler-size and temperature dependence of the thermal conductivity of graphene-polymer nanocomposites[J]. Carbon, 2021, 175: 259-270.

(编辑:彭瑾)

钛及钛合金由于其高强度、低密度、高比强度、高耐腐蚀性、低弹性模量及良好的生物相容性,在航空航天、路面交通、船舶及生物医学等领域受到了广泛关注。随着工业技术进步和社会发展,对钛合金综合性能的要求越来越高。因此,钛合金力学性能的突破是材料领域长期重要的研究方向。然而,传统的金属强化手段,如固溶强化、形变强化、细晶强化等很难突破钛合金强度和塑性的倒置规律,见图 1。因此,提高钛合金强度的同时保持其塑性(韧性)是其作为结构材料重要的研究方向。通过设计和调整异质材料的成分、结构和组织的周期变化,形成异质钛合金材料,有望实现提高强度的同时保持良好的塑性(韧性)^[1~3]。

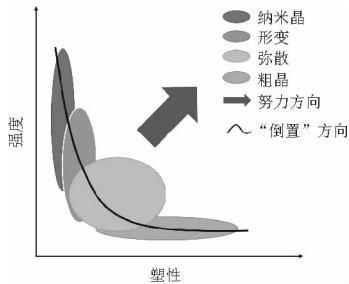


图 1 钛合金强度和塑性的倒置规律

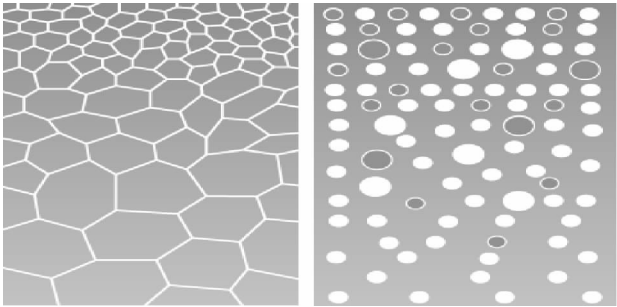
Fig.1 The trade-off relationship between strength and plasticity of titanium alloys

1 异质钛合金的结构特点

异质钛合金是一类具有特殊微观组织或结构分布的材料。其主要特征是不同的区域具有不同的微观组织,根据不同的微观组织特点,异质钛合金被分为梯度异质钛合金、层状异质钛合金、多峰结构异质钛合金和谐波异质钛合金等^[4~7]。

梯度异质钛合金的特点是成分、结构、晶粒尺寸、位错密度等随着某一维度增加而逐渐变化,见图 2^[8]。MA X K 等^[9]将 Ti-10V-2Al-3Fe(Ti-1023)亚稳 β 钛合金进行扭转试验,制备了梯度马氏体结构异质钛合金,使其强度从 726 MPa 增加到 870 MPa,同时静力韧度从 183 MJ/m³ 增加到 206 MJ/m³。AO N 等^[10]通过超声波表面轧制工艺制备出梯度纳米结构的 TC4 合金,该梯度纳米结构由厚度大于 400 μ m 的粗等轴纳米晶粒层、细长纳米片层、细长超细片层、细化晶粒层和低应变粗晶粒层组成。合金的表面硬度与基体相比增加了 48.9%。谭长生等^[11]通过将 TC21 钛合金棒材或板材施加脉冲电流,利用电阻进行局部加热处理,通过控制脉冲电压、脉冲电流、脉冲频率等参数,实现在 TC21 钛合金棒状或者板状试样中产生温度梯度,通过控制温度梯度的宽度和保温时间,最终在室温条件下获得梯度组织结构,实现了保留原始钛合金优势性能的同时,改善

了钛合金综合性能。梯度异质钛合金能够有效地突破钛合金强度-塑性的倒置规律,但是在微观组织梯度变化方向的力学性能及力学行为与垂直方向的不同,呈现出显著的各向异性^[12,13]。

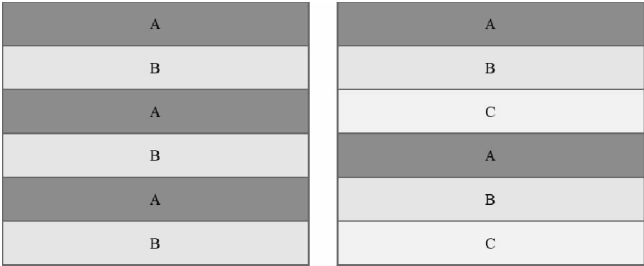


(a) 晶粒尺寸梯度变化 (b) 成分梯度变化

图 2 典型梯度异质钛合金微观组织示意图^[8]

Fig.2 Schematic diagrams of microstructure of typical gradient heterogeneous Ti alloys

层状异质钛合金的特点是成分或微观组织呈现分层的状态,各层之间形成良好的冶金结合,而微观结构又可以不同,见图 3^[14,15]。LYU S Y 等^[15]通过热压烧结将 Ti 和 Al 的薄片制备成层状 Ti/Ti-Al 异质钛合金材料,发现含有体积分数为 53% 的 α -Ti 的层状 Ti/Ti-Al 异质钛合金材料具有远超过 TiAl 合金及 Ti/Ti₃Al 复合材料的断裂韧度,同时具有高于 Ti 和 TiAl 合金的抗拉强度。MU X N 等^[16]采用放电等离子烧结和随后的热轧结合技术将石墨烯和纯钛制备成多层石墨烯/钛异质材料。结果表明,含 0.1% 石墨烯的多层异质钛合金在 1 222 K 热轧后的抗拉强度是纯钛的 1.77 倍,强塑性是纯钛的 1.2 倍。路晓波等^[17]基于陶瓷/钛合金之间的液态熔合扩散,采用离心反应熔铸工艺制备出 TiB₂基陶瓷/Ti-6Al-4V 合金层状复合材料,并在层间出现 TiB₂、TiC_{1-x} 呈空间尺度连续梯度演化的梯度纳米复合结构。经层间剪切强度、三点弯曲强度与单边切口梁 (SENB) 断裂韧度测试,该复合材料层间剪切强度、弯曲强度与断裂韧度分别为 (335 $\pm$ 35) MPa、(862 $\pm$ 45) MPa 与 (45 $\pm$ 15) MPa $\cdot$ m^{0.5}。层状异质钛



(a) 双层叠加 (b) 多层叠加

图 3 典型层状异质钛合金微观组织分层示意图^[14,15]

Fig.3 Schematic diagrams of microstructure delamination of typical multi-layer heterogeneous Ti alloys

合金能够有效地突破钛合金强度-塑性的倒置规律,但是在层状异质的垂直方向的力学性能及力学行为与平行方向的不同,也呈现出显著的各向异性^[12,13]。

多峰结构异质钛合金的特点是其晶粒尺寸分布出现两个或多个峰值,见图4^[18]。LEI Z N等^[19]通过不同的热处理方式获得了魏氏组织的TA15钛合金,以及双峰组织和三峰组织的TA15多峰结构异质钛合金。拉伸测试结果表明,双峰组织的TA15异质钛合金的强度和韧性分别是魏氏组织TA15钛合金的1.08和2.06倍,三峰组织的TA15异质钛合金的强度和韧性分别是魏氏组织TA15钛合金的1.09和1.94倍。ZHANG Y J等^[20]采用高能机械球磨TiH₂粉末、原位脱氢TiH₂和脱氢Ti粉末挤压的方法,并在700℃下真空退火6h,使氢含量从0.36%降低到0.01%,形成由平均尺寸为5.19 μm的粗等轴晶粒和平均尺寸为0.325 μm的超细晶粒组成的双峰结构。这种微观结构变化导致商业纯钛的屈服强度和抗拉强度增加至794和932 MPa,其拉伸延展性也大幅增加(伸长率达到26.2%)。KANG L M等^[21]通过调控共晶转变的相组成(或共晶液相的含量),利用半固态烧结共晶复相系非晶粉末,成功制备出高强韧新型双尺度结构Ti_{52.1}Fe_{21.7}Co_{8.2}Nb_{12.2}Al_{5.8}合金。其双尺度结构为超细晶bcc β-Ti和超细晶bcc Ti(Fe, Co)构成的层片共晶基体包围细晶等轴状fcc Ti₂(Co, Fe)第二相,与目前文献报道的双尺度结构明显不同^[18~20]。该双尺度结构合金具有超高的屈服强度(2 050 MPa)和较大的塑性应变(19.7%),综合性能优于目前文献报道的双尺度结构钛合金^[18,19,22,23]。多峰结构异质钛合金能够有效地突破钛合金强度-塑性的倒置规律,并且没有明显的力学性能各向异性。

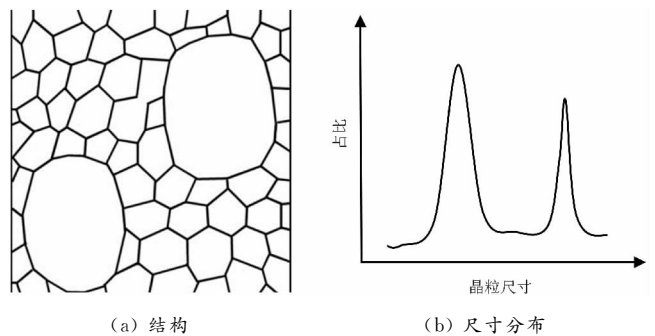


图4 双峰结构钛合金微观组织示意图^[18]
Fig.4 Schematic diagrams of microstructure of bimodal heterogeneous Ti alloys

谐波异质钛合金包含谐波成分异质钛合金和谐波结构异质钛合金。谐波结构异质钛合金的微观组织特点是粗大晶粒的“核”镶嵌在细小晶粒的“壳”当中,且粗晶“核”区和细晶“壳”区的晶粒尺寸逐渐变化,并且各个区域的分布在三维方向都比较均匀,见图5。VAJPAI S K等^[24]采用可控机械球磨和放电等离子烧结预合金Ti-6Al-4V粉末的粉末冶金方法,成功制备了具有谐波结构设计的Ti-6Al-4V压坯。与热等静压制备的均匀的细/粗晶粒Ti-6Al-4V压坯相比,具有非均匀谐波结构的Ti-6Al-4V压坯具有更好的力学性能,其抗拉强度增加了近10%,断裂变形量增加了78.9%。谐波成分异质钛合金由不同成分的组成材料复合而成,但与添加硬质增强材料(一般是塑性很差的陶瓷颗粒、纤维或者晶须)提高强度的传统复合材料有很大的区别。谐波成分异质钛合金材料(见图5b)一般是由较硬的组成材料(相)完全包裹较软的组成材料(相)形成“壳”区,而较软的组成材料(相)成为“核”区,且由于元素扩散形成一定厚度的成分梯度变化的界面区^[25~27]。

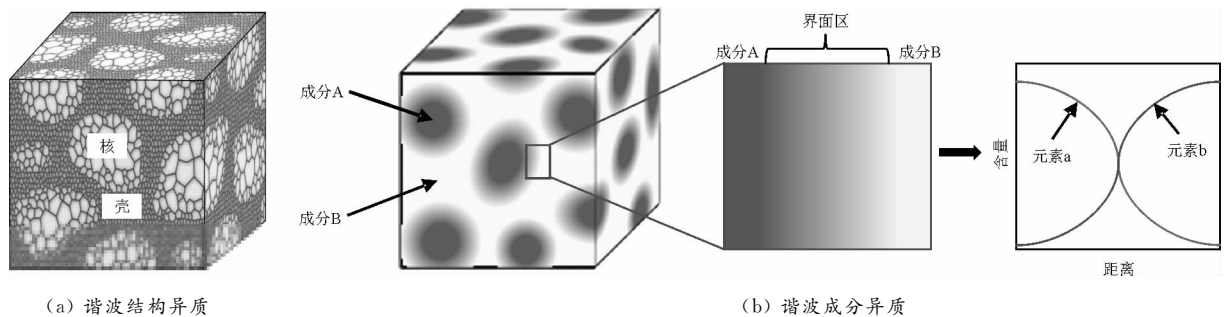


图5 谐波异质钛合金微观组织示意图^[22~25]

Fig.5 Schematic diagrams of microstructure of harmonic heterogeneous Ti alloys

因此,谐波成分异质钛合金材料常被称为新型复合材料或核-壳材料。SHEN J Y等^[28]通过粉末烧结制备了TiAl/Nb谐波成分异质钛合金,并测试了其强韧性。结果显示这种谐波成分异质钛合金具有很好的强度和韧性。因此,谐波异质钛合金同样可以突破强度和塑性的“倒置”规律^[29~31],并且没有明显的力学性能的各向

异性。

2 异质钛合金的力学行为特点

虽然异质钛合金由于其不同的微观组织特点可以分为不同类型的异质钛合金,但是在成分和结构优化后都能够同时得到比基体或者普通复合材料更高的强度

和更好的塑性(韧性)^[28~33]。这和异质钛合金在变形时的力学行为紧密相关,尤其是在应变强化阶段的行为决定了其抗拉强度的高低。图 6 为不同工艺制备的异质 Ti-23Nb-0.7Ta-2.0Zr-1.0O 钛合金及相同成分的均匀钛合金典型的应力-应变曲线和应变硬化速率曲线^[18]。为了突出异质材料的强度-塑性协同效应的增强,90%冷轧的试样(CR90)及其完全退火状态试样(CG,晶粒尺寸约 73 μm)的应力-应变曲线也纳入进来。可以看出,冷轧严重变形试样在屈服后立即出现塑性不稳定性,同时具有更高的屈服强度和抗拉强度。相比之下,异质结构试样表现出高强度和高延展性的良好结合。尤其是,HS80 试样获得了极高的抗拉强度(1 041 MPa)和塑性变形能力(总伸长率为 21.9%,均匀伸长率约为 16.1%),证明了其显著的强度-塑性协同效应。塑性变形阶段显示,异质结构试样在塑性变形开始时出现屈服下降,见图 6a。同时,应变导致应变硬化率上升,见图 6b。整体来看,应变硬化率首先快速下降(区域 I),然后再增加,最终达到最大值(区域 II)。然而,粗晶均质试样的第二阶段非常短甚至可以忽略(其应变范围差值不到 0.003)。与粗粒均质试样(CG)相比,异质结构试样的第二阶段具有很宽的应变范围(其应变范围差值约为 0.025),约为 CG 试样的 10 倍。此外,HS80 试样在宽应变范围内(区域 III)表现出显著的应变硬化率保持特性,从而获得优异的拉伸延性。因此,高应变硬化能力对于突破典型的强度-塑(韧)性的倒置关系至关重要。相关的研究结果也表明,异质钛合金实现高强度和高塑性的关键是较宽的应变硬化速率增加的应变范围(图 6b 的第 II 区域)和稳定的塑性流动(图 6b 的第 III 区域)^[34~37]。

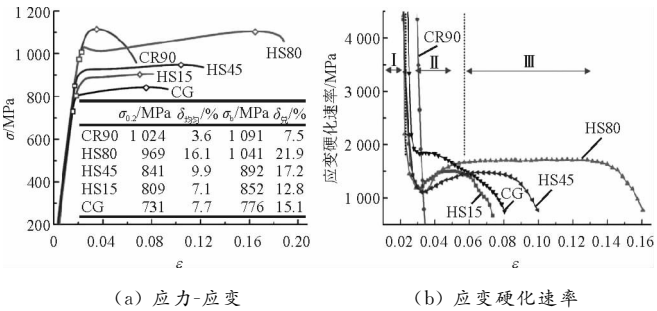


图 6 典型异质和均质钛合金的应力-应变和应变硬化曲线^[18]

Fig.6 Stress-strain curves of typical heterogeneous and homogeneous Ti alloys

3 异质钛合金强韧化机理

异质钛合金由于其成分或结构在不同区域存在差异,导致不同区域的力学性能也有所不同,存在性能较低的区域(即软区)和性能较高的区域(即硬区)。软硬

区的同时存在,导致异质钛合金不同区域的变形难易程度不同,也呈现不同的力学性能。异质材料的强韧化机理见图 7^[35],由于软区完全被硬区隔离且软硬区的变形难易程度不同,变形时会在软硬区形成应变梯度。在硬区还没有变形时,软区的形状被限制而不能发生变化,导致很多几何位错从位错源“F-R”处出发,在靠近界面的区域堆积,但又不能穿过硬区,从而在软区产生很大的背应力抵消外加加载荷,产生加工硬化,使软区越来越强。同时,在硬区产生正向应力,使硬区表现越来越弱。背应力和正向应力被合称为异质变形诱发(HDI)应力^[35]。在 HDI 应力的作用下塑性变形变得更稳定也更均匀^[8,38,39]。稳定均匀的塑性变形能够消除应力集中、延迟颈缩、增加应变硬化,以及延缓裂纹的形成与扩展,最终实现提高强度的同时增加/保持塑性(韧性)^[40~44]。ZHANG X Z 等^[37]采用烧结法制备了 Ti/A356 谐波成分异质钛合金,并分析了强韧化机制。结果表明,由于元素扩散在 Ti“核”周围形成了内外两层“壳”,其中内壳是析出的纳米晶,外壳是纳米颗粒与 (Al,Si)₃Ti 基体形成的复相组织,见图 8。这两层“壳”对提高强韧性起到了关键作用,内壳增加应力和应变的承受能力,外壳延缓裂纹的扩展,再加上 Ti“核”的 TRIP 效应,使谐波成分异质钛合金的强度与传统复合材料相当,但伸长率是传统复合材料的 3 倍。

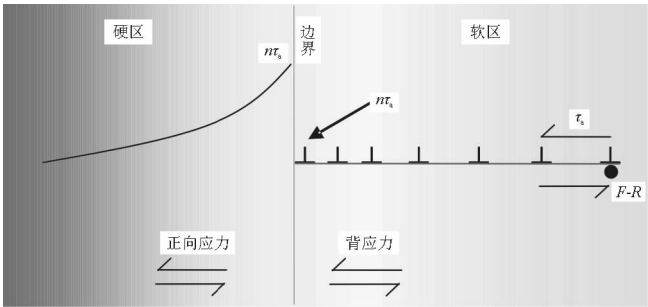


图 7 异质钛合金的 HDI 应力形成示意图^[35]

Fig.7 Schematic diagrams of HDI stress formation of heterogeneous Ti alloys

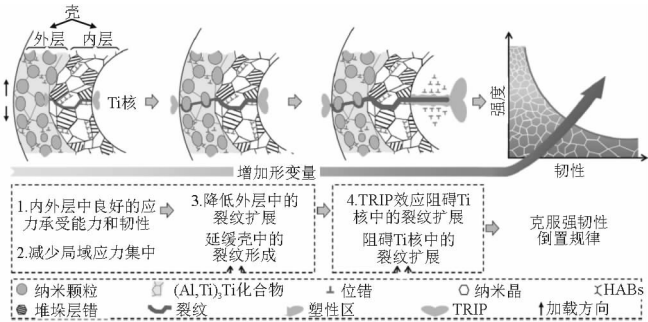


图 8 Ti/A356 异质钛合金强韧化示意图^[37]

Fig.8 Schematic diagrams of strength-ductility synergy of Ti/A256 heterogeneous alloy

4 异质钛合金存在的不足与发展方向

梯度异质钛合金和层状异质钛合金虽然可以同时提高钛合金的强度和塑性(韧性),突破强度-塑性的倒置规律,但是这两种异质钛合金都具有明显的各向异性。因此,在某些领域的实际应用会受到限制。多峰结构异质钛合金和谐波结构钛合金虽然能够突破强度-塑性倒置规律,且没有显著的各向异性,但是这两种异质钛合金仅仅是微观组织形貌(主要是晶粒尺寸)发生变化,不涉及成分和相结构的变化,其结构和性能的可设计性并不强,使应用和发展也存在一定的限制。谐波成分异质钛合金在性能上能够突破强度-塑性倒置规律,且不存在上述异质钛合金的不足,是今后异质钛合金的重要发展方向。然而,由于可以制备谐波成分异质钛合金的组成材料多种多样,谐波成分异质钛合金各区域微观组织和结构,尤其是界面区的体积分数、相结构及其分布、微观组织形貌及其分布、相变、析出产物及其分布等微观特征存在很大的差别,使得界面区对谐波成分异质钛合金强韧性的影响机制和规律比较复杂。此外,针对界面区对谐波成分异质钛合金的异质变形诱发应力和应变非局域化的研究还比较少。因此,界面区对谐波成分异质钛合金的异质变形诱发应力、应变非局域化和强韧性的影响机制和规律需要进一步系统深入的研究。此外,目前高强韧异质钛合金的制备技术及成本控制也需要进一步研究。

5 结 语

高强韧异质钛合金可在以下几方面进行重点研究和突破:①进一步深入系统研究谐波异质钛合金的制备技术及强韧化机理;②开发低成本的谐波异质钛合金体系及近净成形技术和工艺;③开发谐波异质钛合金的高通量设计及制备技术和工艺;④试验研究与理论计算结合设计和开发具有高强韧的谐波异质钛合金体系的数据库。

参 考 文 献

- [1] ZHU Y T, AMEYAMA K, ANDERSEN P M, et al. Heterostructured materials: Superior properties from hetero-zone interaction[J]. *Materials Research Letters*, 2021, 9(1): 1-31.
- [2] HASAN M N, LIU Y F, AN X H, et al. Simultaneously enhancing strength and ductility of a high-entropy alloy via gradient hierarchical microstructures[J]. *International Journal of Plasticity*, 2019, 123: 178-195.
- [3] WU X L, ZHU Y T. Heterogeneous materials: A new class of materials with unprecedented mechanical properties[J]. *Materials Research Letters*, 2017, 5(8): 527-532.
- [4] HOFMANN D C, ROBERTS S, OTIS R, et al. Developing gradient metal alloys through radial deposition additive manufacturing[J]. *Scientific Reports*, 2014(4): 5 357-5 361.
- [5] SHARMA B, DIRRAS G, AMEYAMA K. Harmonic structure design: A strategy for outstanding mechanical properties in structural materials[J]. *Metals*, 2020, 10(12): 1 615-1 619.
- [6] LIU Z Q, MEYERS M A, ZHANG Z F, et al. Functional gradients and heterogeneities in biological materials: Design principles, functions, and bioinspired applications[J]. *Progress in Materials Science*, 2017, 88: 467-498.
- [7] LIU Y F, CAO Y, MAO Q Z, et al. Critical microstructures and defects in heterostructured materials and their effects on mechanical properties[J]. *Acta Materialia*, 2020, 189: 129-144.
- [8] LI X Y, LU L, LI J G, et al. Mechanical properties and deformation mechanisms of gradient nanostructured metals and alloys[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(9): 706-723.
- [9] MA X K, LI F G, SUN Z K, et al. Achieving gradient martensite structure and enhanced mechanical properties in a metastable β titanium alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2019, A50(5): 2 126-2 138.
- [10] AO N, LIU D X, XU X C, et al. Gradient nanostructure evolution and phase transformation of α phase in Ti-6Al-4V alloy induced by ultrasonic surface rolling process[J]. *Materials Science and Engineering*, 2019, A742: 820-834.
- [11] 谭长生, 张国君, 任帅. 一种制备高强韧 TC21 钛合金梯度组织的方法. 中国专利: 202010018801[P]. 2020-01-08.
- [12] AZIS M I, ABBASZADEH M, DEHGHAN M, et al. A boundary-only integral equation method for parabolic problems of another class of anisotropic functionally graded materials[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 26: 101 956.
- [13] WU L, SKET F, MOLINA-ALDAREGUIA J M, et al. A study of composite laminates failure using an anisotropic gradient-enhanced damage mean-field homogenization model[J]. *Composite Structures*, 2015, 126: 246-264.
- [14] NAEBE M, SHIRVANIMOGHADDAM K. Functionally graded materials: A review of fabrication and properties[J]. *Applied Materials Today*, 2016(5): 223-245.
- [15] LYU S Y, SUN Y B, REN L, et al. Simultaneously achieving high tensile strength and fracture toughness of Ti/Ti-Al multilayered composites[J]. *Intermetallics*, 2017, 90: 16-22.
- [16] MU X N, CAI H N, ZHANG H M, et al. Interface evolution and superior tensile properties of multi-layer graphene reinforced pure Ti matrix composite[J]. *Materials & Design*, 2018, 140: 431-441.
- [17] 路晓波, 刘宏波, 刘锋, 等. TiB₂基陶瓷/Ti-6Al-4V 合金梯度纳米复合材料组织演化与力学性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47 (S1): 118-122.
- [18] SHIN S M, ZHU C Y, ZHANG C, et al. Extraordinary strength-ductility synergy in a heterogeneous-structured β -Ti alloy through microstructural optimization[J]. *Materials Research Letters*, 2019, 7(11): 467-473.
- [19] LEI Z N, GAO P F, LI H W, et al. Comparative analyses of the tensile and damage tolerance properties of tri-modal microstructure to widmanstätten and bimodal microstructures of TA15 titanium alloy[J]. *Materials Research Letters*, 2019, 19: 101 956.

- niium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 788: 831-841.
- [20] ZHANG Y J, FANG S M, WANG Y M, et al. Enhancement of tensile strength and ductility of titanium with a bimodal structure [J]. Materials Science and Engineering, 2021, A803: 140-701.
- [21] KANG L M, YANG C, LI Y Y. Fabrication of novel bimodal titanium alloy with high-strength and large-ductility by semi-solid sintering[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(4): 440-446.
- [22] WU D, LIU L B, ZHANG L G, et al. Tensile deformation mechanism and micro-void nucleation of Ti-55531 alloy with bimodal microstructure[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6): 15 442-15 453.
- [23] CHONG Y, DENG G Y, GAO S, et al. Yielding nature and Hall-Petch relationships in Ti-6Al-4V alloy with fully equiaxed and bimodal microstructures[J]. Scripta Materialia, 2019, 172: 77-82.
- [24] VAJPAI S K, OTA M, WATANABE T, et al. The development of high performance Ti-6Al-4V alloy via a unique microstructural design with bimodal grain size distribution [J]. Metall. Mater. Trans., 2015, A46: 903-914.
- [25] LI X J, HU P, WANG J S, et al. In situ synthesis of core-shell W-Cu nanopowders for fabricating full-densified and fine-grained alloys with dramatically improved performance[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 853: 156 958-156 965.
- [26] ZHANG Y S, ZHANG W, HUO W T, et al. Microstructure, mechanical and wear properties of core-shell structural particle reinforced Ti-O alloys[J]. Vacuum, 2017, 139: 44-50.
- [27] OLMOS L, CABEZAS-VILLA J L, BOUVARD D, et al. Synthesis and characterisation of Ti-6Al-4V/xTa alloy processed by solid state sintering[J]. Powder Metallurgy, 2020, 63(1): 64-74.
- [28] SHEN J Y, HU L X, ZHANG L Y, et al. Synthesis of TiAl/Nb composites with concurrently enhanced strength and plasticity by powder metallurgy[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A795: 139 997.
- [29] ZHANG Y S, ZHANG W, WANG X, et al. Formation of core-shell network structural titanium-nitrogen alloys with different nitrogen contents[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(13): 7 824-7 830.
- [30] ZHANG Y S, ZHAO Y H, ZHANG W, et al. Core-shell structured titanium-nitrogen alloys with high strength, high thermal stability and good plasticity [J]. Scientific Reports, 2017 (7): 40 039.
- [31] ZHANG L, TAN J, MENG Z D, et al. Low elastic modulus Ti-Ag/Ti radial gradient porous composite with high strength and large plasticity prepared by spark plasma sintering[J]. Materials Science and Engineering, 2017, A688: 330-337.
- [32] ZHANG Y S, ZHANG W, WANG X, et al. Microstructure and mechanical property evolutions of bulk core-shell structured Ti-N alloys during annealing [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 710: 418-423.
- [33] MA T F, ZHOU X, DU Y, et al. High temperature deformation and microstructural evolution of core-shell structured titanium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 775: 316-321.
- [34] FU Z Q, MACDONALD B E, ZHANG D L, et al. FCC nanostructured TiFeCoNi alloy with multi-scale grains and enhanced plasticity[J]. Scripta Materialia, 2018, 143: 108-112.
- [35] ZHU Y T, WU X L. Perspective on hetero-deformation induced (HDI) hardening and back stress[J]. Materials Research Letters, 2019, 7(10): 393-398.
- [36] WEI Y J, LI Y Q, ZHU L C, et al. Evading the strength-ductility trade-off dilemma in steel through gradient hierarchical nanotwins [J]. Nature Communications, 2014(5): 3 580-3 588.
- [37] ZHANG X Z, CHEN T J, MA S M, et al. Overcoming the strength-ductility trade-off of an aluminum matrix composite by novel core-shell structured reinforcing particulates[J]. Composites, 2021, B206: 108 541.
- [38] LU K. Making strong nanomaterials ductile with gradients[J]. Science, 2014, 345(6 203): 1 455-1 466.
- [39] WU X L, ZHU Y T, LU K. Ductility and strain hardening in gradient and lamellar structured materials [J]. Scripta Materialia, 2020, 186: 321-325.
- [40] MOMPIOU F, TINGAUD D, CHANG Y, et al. Conventional vs harmonic- structured β -Ti-25Nb-25Zr alloys: A comparative study of deformation mechanisms[J]. Acta Materialia, 2018, 161: 420-430.
- [41] FANG X T, HE G Z, ZHENG C, et al. Effect of heterostructure and hetero-deformation induced hardening on the strength and ductility of brass[J]. Acta Materialia, 2020, 186: 644-655.
- [42] NIE J F, CHEN Y Y, CHEN X, et al. Stiff, strong and ductile heterostructured aluminum composites reinforced with oriented nanoplatelets[J]. Scripta Materialia, 2020, 189: 140-144.
- [43] YANG M X, PAN Y, YUAN F P, et al. Back stress strengthening and strain hardening in gradient structure[J]. Materials Research Letters, 2016, 4(3): 145-151.
- [44] FAN L, YANG T, ZHAO Y L, et al. Ultrahigh strength and ductility in newly developed materials with coherent nanolamellar architectures[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-8.

(编辑:彭瑾)

万丰奥威深入布局镁合金压铸业务

万丰奥威在接受调研时表示,公司的汽车金属部件轻量化产业已形成“镁合金、铝合金、高强度钢”等金属材料轻量化应用为主线的汽车部件细分龙头领先地位。万丰奥威于2015年收购了镁·瑞丁,后者是全球汽车市场的镁合金压铸零部件龙头供应商。镁·瑞丁的压铸设备以高压压铸为主,涵盖大、中、小吨位,其中大吨位设备占比60%以上。

在镁合金应用开发方面,镁·瑞丁率先在北美区实现变速箱分动器及分动箱壳体和壳盖的镁合金压铸;率先完成小吨位和中吨位镁合金应用产品向大吨位和薄壁压铸件的技术方案转型。产品包括仪表盘支架、前端模块产品、后掀背门内板等。镁·瑞丁主要销售区域在北美,市场占有率65%,其次是中国、欧洲市场。

此外,镁·瑞丁还拥有先进的镁合金技术研发中心,同时掌握镁合金铸造、模具设计、金属连接等领先技术。在材料、铸造、仿真、连接和耐腐蚀技术等镁合金加工核心技术领域都有不俗的实力。尤其在压铸技术方面,开发的大型薄壁压铸关键技术及异种金属连接技术(SPR等),保证了在大型薄壁压铸件的设计和生產上领先优势。

(摘自压铸周刊)