

异构金属材料的制备研究现状

Research status of the preparation of heterogeneous metal materials

陈思伧, 栾道成, 胡志华, 王正云, 赵萧, 周雨婷

Chen Siyi, Luan Daocheng, Hu Zhihua, Wang Zhengyun, Zhao Xiao, Zhou Yuting

(西华大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610039)

(School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu, Sichuan, 610039)

摘要: 通过对金属材料进行异构处理可显著提高材料的性能并得到异构金属材料, 其拥有相比均质结构材料更好的力学性能和疲劳寿命, 异构处理制备金属材料已成为现代工业领域的研究热点。随着对异构金属材料研究的逐渐深入, 异构金属材料的性能不断得到开发, 制备工艺对其性能的影响也日益显现。本文总结了异构金属材料的研究现状及其在机械变形和物理化学方面常见的几种异构方式, 介绍了异构金属材料的强化机理及其制备工艺。同时, 对制备异构金属材料的几种主要制备工艺进行了详细分析, 列出了其优缺点及适用领域, 并对异构金属材料制备研究目前存在的问题和发展方向进行了总结与展望。

关键词: 异构金属材料; 机械变形; 制备工艺; 性能

ABSTRACT: Heterogeneous treatment of metal materials can significantly improve the performance of materials and obtain heterogeneous metal materials, which have better mechanical properties and fatigue life than homogeneous structural materials. Heterogeneous treatment to prepare metal materials has become a research hotspot in modern industry. With the gradual deepening of the research on heterogeneous metal materials, the properties of heterogeneous metal materials have been continuously developed, and the influence of preparation technology on their properties has become increasingly apparent. In this paper, the research status of isomerized metal materials and several common isomerization methods in mechanical deformation and physicochemistry were summarized. At the same time, several main preparation processes for the preparation of heterogeneous metal materials were analyzed in detail, their advantages and disadvantages and application fields were listed, and the existing problems and development direction of the preparation of heterogeneous metal materials were summarized and prospected.

KEYWORDS: heterogeneous metal materials; preparation process; mechanical deformation; property

1 前言

随着航空航天、核电、新能源等国内各大工程领域的长足发展，各种极端环境对于材料的高力学性能提出了迫切需求^[1]，其中尤其以金属材料的研究应用为主流。在科学创新技术水平不断发展和市场需求日益增加的情况下，金属材料行业作为现代工业的重要组成部分得到了持续发展^[2]。如何提高金属材料的性能是当前时代的迫切要求，异构金属材料概念的提出就是对该要求的响应。

金属材料的异构是指在不改变材料的情况下，通过控制金属内部元素分布和组织结构来改善或提高材料性能的方法。异构是一种微结构，是强度和塑性这两个力学性能具有显著差异的区域而形成^[3]。这个异质区是分别在软区产生背应力，硬区产生正向应力，共同产生异质变形诱导强化^[4]，同时调控异质区的分布和范围改变性能。异构标志性特征是晶粒、晶体缺陷、相组成等组织结构在三维空间的跨尺度多层次有序构筑^[5]。异构金属的思想来源于自然界中贝壳珍珠层等综合性能优异的生物材料结构^[6]。从异构微结构的作用和变形机理来说，异构塑性变形的本质属性就是几何必需位错和林位错的共同作用^[5]。在传统金属材料中，异构金属材料主要包括钢铁、钛合金、铝合金、镁合金、高温合金、金属基复合材料和磁性材料等。由于异构化金属材料兼具高强度和高延展性的优异性能，是无法在常规材料本身上进行改变得到的特殊性能^[7]，故其已逐渐成为行业中新的研究热点和前沿。

对于异构金属材料的制备，工业上采取的方法主要分为两类^[8]：一种是通过机械变形的的方式对材料进行晶粒细化，形成多尺度的晶粒分布，在材料内部获得异质微观结构从而提高材料性能。常见代表性的方法有：表面机械研磨处理、超声表面滚压、异步轧制等。另一种是通过物理或者化学的方法将原子团簇或者不同成分的粉末进行混合后形成具有异构特征的微观组织金属材料^[8]。常见方法主要有：电沉积、粉末冶金以及增材制造。

当前对于异构金属材料制造的工艺介绍较为缺乏，本综述为方便对异构金属材料制备的了解系统地总结了机械变形和物理化学方面的几种常见的异构方式及其优缺点，存在的局限性和问题，并提出未来发展的可能性和方向。

2 机械变形法制造工艺及其优缺点

2.1 表面机械研磨处理 (SMAT)

表面机械研磨处理 (Surface mechanical attrition treatment, SMAT)技术是近年来开发的一种用于增强合金机械性能的工艺。该工艺主要是通过驱动许多小球 高速冲击试样表面, 使试样发生严重的塑性变形, 表面形成一层纳米晶, 同时细化 试样的亚表面晶粒, 从而提高合金表面的硬度和耐磨损性能 [9]。该工艺是将光滑的弹丸置于真空容器内, 在震动发生器作用下冲击试样表面, 如图 1 所示。因材料不同, 弹丸直径为 1~10mm, 震动频率为 50~20 kHz, 弹丸速度可达 1~20 m/s[10]。

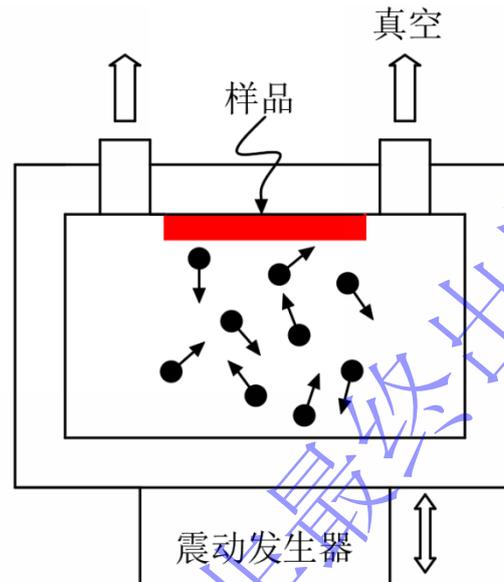


图 1 SMAT 工艺图^[10]

Fig.1. SMAT process diagram

通过 SMAT 技术使合金表面形成一层纳米晶可以显著提高合金表面的机械性能 [11], 同时 SMAT 工艺可以较为精准地调控弹丸的冲击能量、冲击角度以及冲击频率等工艺参数, 从而有利于理想微观结构的精准制备。此外, SMAT 工艺不改变合金化学成分, 且由于其工艺简单, 成本低廉, 在工业生产中应用广泛。但仍存在弹丸在使用过程中表面状态不易于控制, 材料表面粗糙度不理想等问题。

Arifvianto 等^[12]研究了通过 SMAT 处理对粗糙的 AISI 316L 不锈钢的影响。结果表明, SMAT 提高了钢的亚表面显微硬度, 且不受试样初始表面粗糙度的影响。同时在 AISI 316L 不锈钢上形成 6~40 μm 厚的表面层, 晶粒尺寸为 20~22 nm。由于这种处理, 残余应力和马氏体的形成也被报道并被认为有助于表面显微硬度的提高。此外, 也证明了表面显微硬度的提高与钢抗拉强度的提高相对应。

张晓莹^[13]借助显微组织观察、拉伸性能测试、硬度测试、摩擦磨损测试等方法, 研究了通过 SMAT 对轧制态 AZ80 镁合金板材进行研磨处理后其组织和性能的影响。结果

表明，经过 SMAT 处理的 AZ80 镁合金板材相比处理前其抗拉强度提高了 17.0%，屈服强度提高了 26.4%，伸长率降低了 47.7%，表层硬度提高了 53.2%，同时当载荷在 30N 以下时其耐磨性能也更好。

2.2 超声表面滚压

超声滚压表面强化 (Ultrasonic surface rolling process, USRP) 技术是一种以 18-30KHz 的超声波作为能量，通过静载滚动的工作模式，对金属零件进行往复滚动的动态冲击式压力光整加工工艺。该工艺通过滚压头垂直于零部件表面施加一定幅度的超声频机械振动，在一定进给条件下，滚压头的静压力和超声波冲击振动传递到旋转或静止的机械零部件表面，产生周期性的冲挤作用，使金属材料表面产生大幅度塑性变形 [12]。其利用的是金属材料在常温下的冷塑性特点，通过高频的冲击对金属表面的微观构造进行“削峰填谷”的作用，实现理想的表面粗糙度 [15]。超声波振动能增加试样原子动能，促进塑性变形过程中位错的产生、增殖、运动和湮灭，从而减少了位错缠结和堆积，促进塑性变形 [16]。

如图 2，USRP 装置由超声波发生器、弹簧、超声换能器、超声变幅杆、工具头等构成。

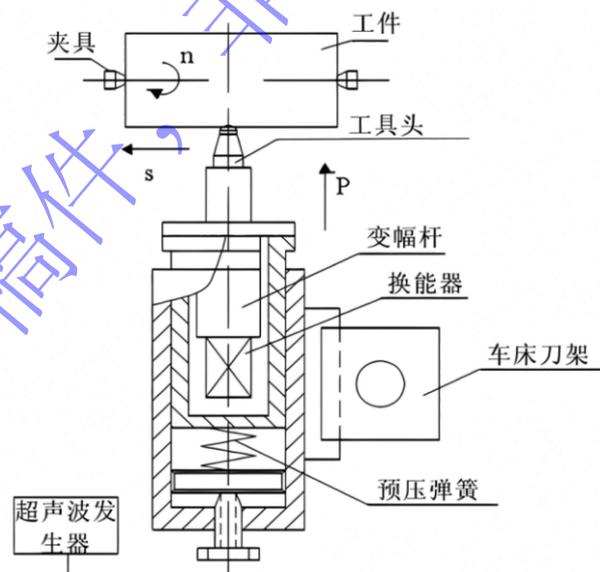


图 2 超声滚压原理示意图[17]

Fig.2. Schematic diagram of the principle of ultrasonic rolling

通过 USRP 处理后会在工作表面产生一定的压应力，同时消除材料部分有害的拉应力，让工件硬度显著提高，增加疲劳强度，能降低金属表面的摩擦因数从而大大提高了工件

的耐磨性和耐腐蚀性，延长工件的使用寿命^[18]。且其综合成本低，效率高，兼容性好。但其仍然存在缺点，当表面强化层的塑性变形程度达到一定的极限时，不仅很难进一步提高材料性能，继续加工更会导致起皱、开裂等表面缺陷的产生，最终致使材料性能恶化^[19]。

Wang 等^[20]通过超声表面滚压处理 Ti-6Al-4V 后对其微动疲劳性能分析，结果表明：经 USRP 处理后的试样表面硬度提高了 46.2%，表面粗糙度降低了 34.1%，试样在处理后的残余压缩应力在深度方向上先增加后减少，摩擦疲劳寿命方面有更好的改善。

Gao 等^[21]对 Cr4Mo4V 钢进行了超声表面滚压工艺，研究了超声表面滚压前和超声表面滚压后试件的残余应力、显微硬度、高温硬度、显微组织、滚动接触疲劳寿命和磨损表面。结果表明：通过 USRP 的处理促进了试样内部残余应力的增加和从拉伸应力到压缩应力的转变。在高温 500℃ 内处理后的试样硬度明显高于处理前，提高了在高温和使用温度下的性能。同时增强了塑性变形以及纳米级和亚微米级晶粒的形成，抑制了裂纹的形成和扩展，减小了表面分层凹坑的尺寸，进一步提高了 Cr4Mo4V 轴承钢的滚动接触疲劳寿命。

2.3 异步轧制

异步轧制 (Asymmetric rolling, ASR) 技术是一种由两个表面线速度不同的工作轧辊对工件进行轧制。其通过上下轧辊的半径不同或者两个轧辊的转速不同达到上下轧辊的工作线速度不同^[22]，前者又称异径异步轧制，后者则是同径异步轧制，如图 3。近年还研究出依靠两个相同半径和转速，但两者的摩擦系数不同的轧辊来实现异步轧制。

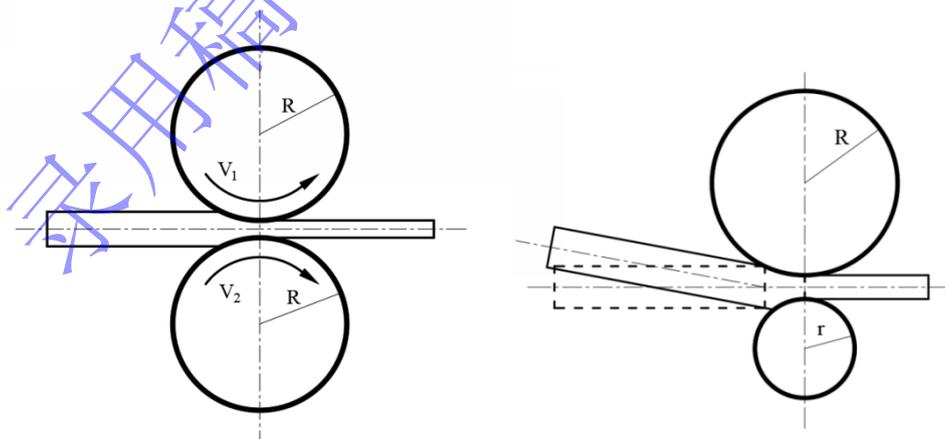


图 3 (a). 同径异步轧制^[5] (b). 异径异步轧制^[23]

Fig.3 (a). Simultaneous diameter asynchronous rolling (b). Reducing asynchronous rolling

由于上下两个工作轧辊表面线速度不同，会在变形区内会形成一个特殊的区域，即

ASR 所特有的“搓轧区”，该区域的上、下表面接触摩擦力反向，改变了变形区内的压应力状态，增加了剪切变形^[25]。在其作用下晶粒尺寸细化，取向分布变化，从而致使金属表面质量、金相组织、晶体位向和力学性能的变化^[25]。

轧制工艺可通过细化材料的晶粒，并消除显微组织的缺陷，从而使材料组织密实，力学性能得到改善。与常规轧制相比 ASR 具有显著降低轧制压力、制扭矩，降低产品能耗，减少轧制道次，降低轧制力，改善产品厚度精度和板形，提高轧制效果的优点^[26]。特别是对于轧制变形抗力高、加工硬化的极薄带材，其节能效果更加显著^[23]。且其设备重量轻，能耗低，产品精度高，生产成本低，效率高。但由于 ASR 上、下轧辊工作不同，会导致材料向一侧弯曲，影响最终产品的平直度，同时易引起轧机震颤^[27]。

Dai 等^[28]采用异步轧制的方法处理 H 型钢焊接法兰板，并对其进行金相组织分析、拉伸试验和退火试验。结果表明：异步轧制中独特的交叉剪切轧带，使较高的局部塑性变形集中在交叉剪切轧带，有利于变形能量的积累和更大的再结晶驱动力，为成核和生长提供了有利条件。在相同的变形和退火循环下，异步轧制的法兰板钢晶粒比同步轧制的更细，可以获得更高的位错密度和更多的亚晶粒来细化晶粒，从而提高法兰板钢的强度。同时异步轧制可以部分减少金属材料退火后的强度损失。

Chen 等^[29]对 HSLA 钢进行异步轧制和传统轧制进行对比，并通过光学显微镜、EBSD、拉伸试验和冲击试验对试样进行表征。结果表明：与传统轧制相比，异步轧制在轧制厚板中心层产生的平均晶粒尺寸更小，并导致 α 纤维织构的减少。在延性到脆性转变温度范围内，异步轧制板的冲击韧性增加，韧性各向异性降低。在延性到脆性转变温度范围内，不对称热轧板的冲击韧性增加，韧性各向异性降低。

3 物理化学法制造工艺及其优缺点

3.1 粉末冶金

粉末冶金 (Powder metallurgy, PM) 技术是通过以金属粉末 (或金属粉末与非金属粉末的混合物) 为原料进行成形和烧结，从而制造出金属材料、复合材料以及各类制品^[30]。制取粉末后混合将其压制成型，在相应条件下进行烧结，再进行后处理得到成品。PM 技术可通过筛选粉末原料、烧结的温度时间等参数有效地调控粉末冶金材料的微观结构和晶粒尺寸，做到晶粒细化，提高强度和硬度，同时有助于提高位错密度，从而提高材料的塑性变形能力和断裂韧性，实现异构金属材料性能强化的调控^[8]。

PM 技术可最大限度地减少合金成分偏聚，消除粗大、不均匀的铸造组织^[31]。易实现

多种类型的复合，可生产具有特殊结构和性能的材料和制品，实现近净形成和自动化批量生产^[32]。但其模具设备昂贵，成本较高，生产周期长，制品孔隙率较高^[33]。

Gökce 等^[34]用标准的粉末冶金工艺在宏观和微观层面上与铜和镁粉末混合,以生产轻而强的铝基 PM 合金,研制出具有良好组织结构的高强度 PM 合金。在三点弯曲试验中,以硬度为~50 和 60(HV 25)的 Al5Cu 和 Al5Cu0.5Mg 合金组成的单质粉末混合物分别烧结后 TRS 值分别为 294 MPa 和 466 MPa。结果表明, Al5Cu0.5 Mg 微合金化体系的铝的 TRS 从基材的 84 MPa 提高到 466 MPa,提高了近 6 倍。Al5Cu0.5Mg 合金的硬度值比 Al 基材高 2 倍。

Yu 等^[35]总结了粉末冶金技术制造刹车片的摩擦磨损性能及磨损机理。通过测试总结出得到的粉末冶金刹车片在不同制动条件下具有导热性好、耐磨性和摩擦系数稳定的优点。

3.2 电沉积

电沉积(Electrodeposition, ED)技术的原理即是离子的电迁移,其全部机理是对流作用、扩散作用和电极反应的综合,是电解液中的金属阳离子在电流作用下从其化合物水溶液、非水溶液或熔盐中被还原并沉积在阴极表面形成金属沉积层的过程^[36]。ED 技术关键在于新晶核的形成和晶体的生长,故其能通过调控电解液、电解液温度、浓度等参数以及电流密度等参数调控沉积层的均匀性和晶粒的大小,从而改变沉积镀层的成分、组织结构等得到想要的效果镀层,大幅度提高金属材料的整体性能。

ED 具有可控性和高效性,能有效通过控制影响因素提高电沉积极限扩散电流密度和沉积速率,并能有效提高镀层的硬度等。其工艺成本低,工艺简单^[37]。但是其镀层内存在高内应力易使镀层发生翘曲、开裂^[38]。

Chen 等^[39]通过一步电沉积的方法在 Cu 衬底上成功制备了纯 SnO₂ 薄膜,无需对电解质进行预处理。通过仔细控制 HNO₃ 的浓度、电解质的老化、沉积电压和温度这些加工条件,制备出的 SnO₂ 薄膜。研究发现,随着 HNO₃ 浓度增加,沉积物的相从 Sn 变为 Sn 和 SnO₂ 的混合物,最终变为纯 SnO₂。随着电解质的老化时间增加,当时间超过 1 小时后溶液中开始出现白色沉淀,沉积物从纯 SnO₂ 逐渐变为 Sn 和 SnO₂ 的混合物。当温度为 60 °C 或以下时,沉积物仅获得 Sn,而当温度达到 65 °C 及以上时,SnO₂ 成为主导相。当电压增加时,不仅沉积速率如预期地增加,而且粉末沉积的形态也发生了剧烈变化。同时沉积物中 Sn 逐渐成为主导相。最后将 HNO₃ 的浓度控制为 80mM,电解质的老化在 1 小时内,沉积电压和温度控制在 0.2-0.4V、65-85 之间得到了致密且具有良好黏附的 SnO₂ 薄膜。

Fujita 等^[40]采用脉冲电沉积法获得 Co-Pt 厚膜磁体, 研究发现脉冲电沉积法能通过脉冲关断时间对电流效率、内应力和薄膜成分进行调控影响。在 0 至 30 ms 的脉冲关断时间范围内, 电流效率随时间的增加而增加。随着脉冲关断时间的增加, 应力急剧下降。随着脉冲关断时间增加到 8ms, Co 含量增加。当脉冲开启和关闭时间分别设置为 4 和 8ms, 能有效得到含有 55 at% Co 的 43 μ m 厚 Co-Pt 膜。

3.3 增材制造

增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术又称 3D 打印, 是一种可以实现三维结构快速定制的工艺方法。该技术依托计算机技术利用数字化三维模型, 利用离散-堆积的原理, 通过打印设备将材料从点到面, 从面到体的方式累积成实体^[41]。借助金属增材在逐层逐道熔敷堆积时所展现出的过程特性, 在三维空间不同位置逐层逐道地熔敷不同的金属, 由于其特殊的加热冷却过程, 可以在金属材料内部形成与传统制造方式不同的细小微结构, 进而形成微观非均质的材料与构件, 实现其具备高性能、超性能以及多性能的设计理念和技術方法^[42]。

AM 技术不仅灵活便捷, 而且高效高精密, 可适用于制造复杂的零件, 可实现快速制样等特点^[43]。但其可选择使用的材料有限, 制品后处理较为麻烦, 无法避免试样内部存在气孔、裂纹、未融合等缺陷^[44]。故金属 3D 打印材料在诸如航空航天、生物医学、模具等领域应用广泛。

Zhao 等^[45]选择日产智能巡航控制系统的前雷达安装支架进行分析, 以证明金属增材制造在汽车行业的有效性。研究中用山特维克鱼鹰® ~38 μ m + 5 μ m 不锈钢 316L 的金属粉末打印了支架并对其分析, 得到的支架相较于模压成型的满足并超越了所有必需的性能规格和安全要求, 重量减轻了 42%, 工艺简化了 42%。

Shang 等^[46]从钢基合金增材制造出发, 总结了不同组分和工艺的金属增材制造产生的一些典型特征。相较于传统的制造钢基合金方法, 有效的节省了加工时间, 提高了材料的利用率。同时可以有效地加速梯度打印对高性能钢基材料的成分和工艺优化设计。

4 总结与展望

金属材料的异构不仅能强化提高屈服强度, 提高了拉伸均匀塑形, 同时还能提升断裂韧性、抗疲劳裂纹扩展、热稳定性和抗摩擦磨损性能等。经过多年的发展, 异构金属材料领域已经逐渐发展壮大。尤其是在我国化工、航空航天、交通运输和海洋装备等重大的工程领域, 异构金属材料的综合性能得到了高度认可及应用, 各种形式对材料进行异构化的

方法运用也趋于成熟。其制备技术是多种多样的，不同的制备方法和工艺条件都会对材料的性能产生影响。本文所介绍的工艺优缺点总结如下表 1 所示。

表 1 工艺总结

Table 1 Process summary

总结	优点	缺点	
机械变形法	表面机械研磨	可显著提高材料表面机械性能，不改变合金成分，工艺简单，成本低廉。	弹丸工作状态不易控制，材料表面粗糙度不理想。
	超声表面滚压	可提高材料硬度，增加疲劳强度，降低表面摩擦因数，成本低效率高，	易导致起皱、开裂等表面缺陷。
	异步轧制	可细化晶粒，消除显微组织的缺陷，从而使材料组织密实，改善力学性能。设备重量轻，能耗低，产品精度高，生产成本低，效率高。	影响产品的平直度，易引起轧机震颤。
物理化学法		可最大限度地减少合金成分偏聚，消除粗大、不均匀的铸造组织。易	模具设备昂贵，成本较高，生产周期长，制品的孔隙率较高。
	粉末冶金	实现多种类型的复合，可生产具有特殊结构和性能的制品，实现近净形成和自动化批量生产。	

电沉积	具有可控性和高效性，能有效通过控制影响因素提高电沉积极限扩散电流密度和沉积速率，能有效提高镀层的硬度。其工艺成本低，工艺简单。	镀层内存在高内应力易使镀层发生翘曲、开裂。
增材制造	灵活便捷，高效高精密，可适用于制造复杂的零件，可实现快速制样。	可选择使用的材料有限，制品后处理较为麻烦，无法避免试样内部存在气孔、裂纹、未融合。

在新时代工业制造中，除了探究新型制备异构金属材料技术，更要在原有的制备基础上不断改进和完善。制备异构金属材料的方式仍有许多困难和挑战需要克服，其以后的发展方向可以从三个方面出发：

(1) 将可控制的参数更加丰富化：尽可能与现阶段更多高精度高效率的辅助设备相结合，激发更多元的工艺参数，从而达到对材料结构性能更有效精准的调控^{[47]-[48]}。

(2) 降低精准工艺成本：多数异构金属制造的精准设计工艺存在高成本，过程繁琐的问题。应深化研究发展工艺尽可能降低其工艺成本，简化过程同时不降低其工艺精准的科学性制造方法^[8]。

(3) 提高复杂艰辛条件下的应用：随着异构金属材料的应用广泛，更需服役于严苛的环境条件，应用于更复杂、更难强化的工件上^[5]。

参考文献

- [1] 范根莲,郭峙岐,谭占秋,等.金属材料的构型化复合与强韧化[J].金属学报,2022,58(11):1416-1426.
(Fan G L, Guo Z Q, Tan Z Q, et al. Configurational recombination and strengthening and toughening of Metal Materials [J]. Acta Metallica Sinica,2022,58(11):1416-1426.)
- [2] 张炯.阐述金属材料组织和性能之间的关系[J].科技创新与应用,2016,(03):81.
(Zhang J. The relationship between microstructure and properties of metal materials [J]. Science and Technology Innovation and Application,2016,(03):81.)
- [3] 武晓雷,朱运田.异构金属材料及其塑性变形与应变硬化[J].金属学报,2022,58(11):1349-1359.
(Wu X L, Zhu Y T. Heterogeneous metallic materials and their Plastic deformation and strain hardening [J]. Acta Metallica Sinica,2022,58(11):1349-1359.)
- [4] Zhu Y, Ameyama K, Anderson P M, Beyerlein I J, Gao H, Kim H S, Wu X. (2020). Heterostructured materials: superior properties from hetero-zone interaction. Materials Research Letters, 9(1), 1 – 31. <https://doi.org/10.1080/21663831.2020.1796836>
- [5] 武晓雷,朱运田.异构金属材料专刊前言[J].金属学报,2022,58(11):1347-1348.
(Wu X L, Zhu Y T. Preface to Special Issue on Heterogeneous Metal Materials [J]. Acta Metallica Sinica,2022,58(11):1347-1348.)
- [6] 赵甫,史金飞,许有熊,等.异质异构仿生贝壳复合材料[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2022,41(03):253-259.
(Zhao F, Shi J F, Xu Y X, et al. Heterogeneous biomimetic shell composites [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition),2022,41(03):253-259.)
- [7] 袁钰轩,马爱斌,吴浩然,等.异构金属材料优异力学性能及其机理的研究进展[J].材料导报,2023,37(18):156-162.

(Yuan Y X, Ma A B, Wu H R, et al. Research progress on excellent mechanical properties and mechanisms of heterogeneous metallic materials [J]. *Materials Review*,2023,37(18):156-162.)

[8] 张昱程,张勇,李晓,等.异构金属材料的设计与制造[J].*金属学报*,2022,58(11):1399-1415.

(Zhang X C, Zhang Y, Li X, et al. Design and Manufacture of heterogeneous Metal Materials [J]. *Acta Metallica Sinica*,2022,58(11):1399-1415.)

[9] 张辉,宫梦莹.金属材料表面机械研磨技术机理及研究现状[J].*鞍钢技术*,2018,(06):1-6.

(Zhang H, Gong M Y. Technical Mechanism and Research status of Mechanical Grinding of Metal Surface [J]. *Angang Steel Technology*,2018,(06):1-6.)

[10] 张子鹏,宋旭,李小强,等.金属超细晶表面机械处理技术研究进展[J].*精密成形工程*,2021,13(04):159-171.

(Zhang Z P, Song X, Li X Q, et al. Research progress of Surface Mechanical treatment of metal ultrafine crystals [J]. *Precision Forming Engineering*,2021,13(04):159-171.)

[11] Tao N, Wang Z, Tong W, et. al. An investigation of surface nanocrystallization mechanism in Fe induced by surface mechanical attrition treatment[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(18):4603-4616.

[12] Arifvianto B, Suyitno, Mahardika M, et al. Effects of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on a rough surface of AISI 316L stainless steel[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(10):4538-4543.

[13] 张晓莹.表面机械研磨处理对镁合金 AZ80 组织和性能的影响[J].*热加工工艺*,2018,47(08):111-113.DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.08.029.

(Zhang X Y. Mechanical polishing surface treatment on the microstructure and mechanical properties of magnesium alloy AZ80 [J]. *The influence of hot working process*, 2018,47 (8) : 111-113. The DOI: 10.14158 / j.carol carroll nki. 1001-3814.2018.08.029.)

[14] 梁浩,潘永智,孙玉涵,等.超声滚压表面复合强化研究综述[J].*表面技术*,2024,53(10):41-55+109.

(Liang H, Pan Y Z, Sun Y H, et al. Research review on ultrasonic rolling surface composite strengthening [J]. *Surface Technology*, 2019,53(10):41-55+109.)

[15] 郑建新,罗傲梅,刘传绍.超声表面强化技术的研究进展[J].*制造技术与机床*,2012,(10):32-36.

(Zheng J X, Luo A M, Liu C S. Research progress of Ultrasonic Surface Strengthening Technology [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*,2012,(10):32-36.)

[16] Zhao Y, Zhai J, Guan Y, et al. Molecular Dynamics Study of Acoustic Softening Effect in Ultrasonic Vibration Assisted Tension of Monocrystalline/Polycrystalline Coppers[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 307:117666.

[17] 饶楚楚,兰叶深.表面超声滚压参数对轴承套圈表面性能的影响[J].*内燃机与配件*,2022,(24):103-105.

(Rao C C, Lan Y S. Influence of Surface Ultrasonic Rolling Parameters on Surface Properties of Bearing Rings [J]. Internal Combustion Engine and Accessories,2022,(24):103-105.)

[18] 王婷,王东坡,刘刚,等.40Cr 超声表面滚压加工纳米化[J].机械工程学报,2009,45(05):177-183.

(Wang T, Wang D P, Liu G, et al.40Cr ultrasonic surface rolling for nanization [J]. Journal of Mechanical Engineering,2009,45(05):177-183.)

[19] 陶冠羽,骆小双,孙清云,等.超声表面滚压技术及其组合工艺现状[J].表面技术,2023,52(02):122-134.

(Tao G Y, Luo X S, Sun Q Y, et al. Ultrasonic Surface rolling Technology and its Combination Technology [J]. Surface Technology,2023,52(02):122-134.)

[20] Wang N,Zhu J L,Liu B,Zhang X C,Zhang J M,Tu S T.Influence of Ultrasonic Surface Rolling Process and Shot Peening on Fretting Fatigue Performance of Ti-6Al-4V[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering,2021,34(06):81-93.

[21] Gao F, Duan H, Ding Z, Tian L .Enhanced surface properties and contact fatigue performance of Cr4Mo4V bearing steel subjected to ultrasonic surface rolling processing *Verbesserte Oberflächeneigenschaften und Kontaktermüdungsleistung von einem ultraschall-oberflächengewalzten Cr4Mo4V-Lagerstahl*[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2023, 54(6):667-675.

[22] 王旭,黄元春,王强,胡嘉伟,李湘粤.异步轧制对 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 板材组织、织构和性能的影响[J].稀有金属,2023,47(07):934-941.

(Wang X, Huang Y C, Wang Q, Hu J W, Li X Y. Effect of asynchronous rolling on microstructure, texture and properties of Mg-Gd-Y-Zn-Zr sheet [J]. Rare Metals, 2019,47(07):934-941.)

[23] 孙蓟泉,戴辉,唐获.异步轧制技术发展概况及其应用前景[J].鞍钢技术,2009,(05):1-6.

(Sun J Q, Dai H, Tang D. Development and Application prospect of asynchronous rolling Technology [J]. Angang Steel Technology,2009,(05):1-6.)

[24] Xu Z G, Zhang H L, KRISHNAN P, et al. Non-conventional hot rolling for improvement of mechanical properties in binary Mg-alloys[J]. Mechanics of Materials, 2022,164: 104111.

[25] 江连运,陈亚飞,康广荣,等.厚规格板材异步和蛇形轧制分析及研究综述[J].太原科技大学学报, 2024,45(03):223-228+235.

(Jiang L Y, Chen Y F, Kang G R, et al. Analysis and Research review of asynchronous and serpentine rolling of thick gauge sheet [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology,2024,45(03):223-228+235.)

[26] 王涛,齐艳阳,刘江林,等.金属层合板轧制复合工艺国内外研究进展[J].哈尔滨工业大学学报, 2020,52(06):42-56.

(Wang T, Qi Y Y, Liu J L, et al. Research progress of metal laminated plate rolling composite technology at home and abroad [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019,52(06):42-56.)

[27] 李冰峰.异步轧制技术及其在铝合金中的应用[J].有色金属加工,2013,42(05):5-7.

(Li B F. Asynchronous Rolling Technology and its Application in Aluminum Alloy [J]. Nonferrous Metal Processing,2013,42(05):5-7.)

[28] Dai H.Grain Refi ning of Flange Plate for Welded H Section Steel Made under Asynchronous Rolling Condition[J].Journal of Wuhan University of Technology(Materials Science Edition),2011,26(06):1121-1127.

[29] S. Chen , Y.G. An, C. Lahaije. Toughness improvement in hot rolled HSLA steel plates through asymmetric rolling[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 625:374-379.

[30] 徐静茹,张卫东,杨鹏,等.粉末冶金钛基层状材料研究进展[J].粉末冶金技术,2023,41(01):71-78.

(Xu J R, Zhang W D, Yang P, et al. Research progress of titanium base materials in Powder Metallurgy [J]. Powder Metallurgy Technology,2023,41(01):71-78.)

[31] 贾成厂. 漫谈粉末冶金[J]. 金属世界, 2010(06): 10-14.

(Jia C C. Talk about Powder metallurgy [J]. Metal World, 2010(06): 10-14.)

[32] 付玉,王宇,徐永东,等.粉末冶金(SiCp+B₄C)/6061Al 复合材料组织与性能研究[J/OL].兵器材料科学与工程,2024,1-15.

(Fu Y, Wang Y, Xu Y D, et al. Study on Microstructure and Properties of Powder metallurgy (SiCp+B₄C)/6061Al Composites [J/OL]. Weapons Materials Science and Engineering,2024,1-15.)

[33] 田梅娟,坚增运,海瑞.SiC 颗粒增强 Al 基复合材料制备方法的研究进展[J].热加工工艺,2023,52(18):9-14.

(Tian M J, Jian Z Y, Hai R. Research progress of preparation methods of SiC particle reinforced Al Matrix Composites [J]. Hot Working Technology,2023,52(18):9-14.)

[34] Azim Gökce, Fehim Fındık, Kurt A O, etal. Microstructural examination and properties of premixed Al-Cu-Mg powder metallurgy alloy, Materials Characterization[J]. Materials Characterization, 2011, 62(7):730-735.

[35] Yu C, Chen J, Zhang Q, Li W. Research progress on friction and wear properties of powder metallurgy brake pad. Advances in Mechanical Engineering. 2022;14(12).

[36] Liu F, Deng Y, Han X, et. al. Electrodeposition of metals and alloys from ionic liquids[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 654:163-170.

[37] 刘金水.电化学沉积技术在贵金属纳米结构制备中的应用探索[J].冶金与材料,2024,44(05):94-96.

(Liu J S. Application of electrochemical deposition technology in the preparation of nanostructures of precious metals [J]. Metallurgy and Materials, 2018,44(05):94-96.)

[38] 张英杰,闫宇星,章江洪.电沉积法制备纳米多层膜技术的优缺点及其研究进展[J].材料保护,2009,42(08):56-58+61.

(Zhang Y J, Yan Y X, Zhang J H. Advantages and disadvantages of electrodeposition technology for the preparation of nano-multilayer films [J]. Materials Protection,2009,42(08):56-58+61.)

[39] Chen X, Liang J, Zhou Z, et. al. The preparation of SnO₂ film by electrodeposition[J]. Materials Research Bulletin, 2010, 45(12):2006-2011.

[40] Fujita N, Amasaki S, Yumiba H, et. al. Preparation of Co–Pt thick film magnets by pulse electrodeposition[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 310(2):2590-2592.

[41] 杨扬,张澳,李瑶,等.金属增材制造工艺、材料及成形机理的研究与应用[J].金属加工(热加工),2024,(03):33-45.

(Yang Y, Zhang A, Li Y, et al. Research and Application of Metal Additive Manufacturing Process, Materials and Forming Mechanism [J]. Metal Processing (Hot Processing),2024,(03):33-45.)

[42] 王克鸿,彭勇,段梦伟,等.多维异质异构大型构件智能增材制造研究进展[J].科学通报,2024,69(17):2401-2416.

(Wang Kehong, Peng Yong, Duan Mengwei, et al. Research progress of intelligent additive Manufacturing for multi-dimensional heterogeneous large components [J]. Chinese Science Bulletin, 2019,69(17):2401-2416.)

[43] 关慰勉,梁新增,刘艳梅,等.层状复合钛合金增材制造研究进展及发展趋势[J].中国有色金属学报,2024,34(07):2173-2187.

(Guan X M, Liang X X, Liu Y M, et al. Research progress and development trend of additive manufacturing of layered titanium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2024,34(07):2173-2187.)

[44] 安小鹏,田海峰,马永占,等.金属增材制造技术应用与研究[J].锻造与冲压,2024,(15):50-57.

(An X P, Tian H F, Ma Y Z, et al. Application and Research of Metal Additive Manufacturing Technology [J]. Forging & Metalforming,2024,(15):50-57.)

[45] Zhao N, Parthasarathy M, Patil S, et. al. Direct additive manufacturing of metal parts for automotive applications[J]. Journal of Manufacturing Systems,, 2023, 68:368-375.

[46] Shang C, Wu H, Pan G, Zhu J, Wang S, Wu G, Gao J, Liu Z, Li R, Mao X. The Characteristic Microstructures and Properties of Steel-Based Alloy via Additive Manufacturing. *Materials*. 2023; 16(7):2696.

[47] 范国华,缪克松,李丹阳,等.从局域应力/应变视角理解异构金属材料的强韧化行为[J].金属学报,2022,58(11):1427-1440.

(Fan G H, Miao K S, Li D Y, et al. Understanding the strengthening and toughening behavior of

heterogeneous metal materials from the perspective of local stress/strain [J].Acta Metallica Sinica,2022,58(11):1427-1440.)

[48] Yi Ma, Yingchun Guan. Research and Application Progress in Laser Additive Manufacturing of Heterogeneous Metals (Invited)[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(10): 1002304(in chinese).

基金项目

四川省科技支撑项目（20ZDYF2461,20ZDZX0042）；攀西试验区第六批项目（高成形性钒钛微合金化超高强汽车板开发及应用）；西华大学重点科研基金资助项目（Z203121）；

作者简介

陈思屹（2001.03.11），男，四川省广安市人，研究生。2023年毕业于西华大学材料成型及控制工程专业，主要研究方向：金属方向。通讯地址：四川省成都市红光大道 9999 号西华大学；E-mail: 1597484085@qq.com。

录用稿件，
非最终出版稿