

为金属“量身定制”内部结构—— 异构金属材料的制备研究进展

Tailoring the Internal Structure of Metals: Research Status of the Preparation of Heterogeneous Metal Materials

供稿|陈思伦, 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

内 容 导 读

金属材料的性能往往与其内部结构密切相关。通过有意识地设计并制备具有异构（即非均匀）微观组织的金属材料，可以显著提升其强度、韧性、疲劳寿命等关键性能，从而满足航空航天、新能源、高端装备等领域对材料性能的严苛要求。本文系统梳理了当前异构金属材料的主流制备方法，主要包括两大类：一是通过机械变形（如表面研磨、超声滚压、异步轧制等）在材料内部引入梯度结构或细化晶粒；二是借助物理化学手段（如粉末冶金、电沉积、增材制造等）实现成分与组织的跨尺度调控。文中详细阐述了各类工艺的原理、优势与局限性，并结合典型研究案例说明其实际应用效果。最后，对异构金属材料制备中存在的挑战与未来发展方向进行了展望，以期为相关领域的研究与工程实践提供参考。

随着航空航天、核电、新能源等关键领域的长足发展，各种极端环境对材料的高力学性能提出了迫切需求^[1]，其中金属材料的研究与应用占据主导地位。在科技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]。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正是对该要求的响应。

金属材料异构是指在不改变成分的情况下，通过控制其内部元素分布和组织结构来改善或提高材

料性能的方法。异构是一种由强度和塑性具有显著差异的区域构成的微结构^[3]。在变形过程中，软区产生背应力，硬区产生正向应力，共同导致异质变形诱导强化^[4]；同时，通过调控异质区的分布和范围可以进一步改变材料性能。异构结构的标志性特征是晶粒、晶体缺陷、相组成等组织结构在三维空间中实现跨尺度、多层级的有序构筑^[5]。异构金属的设计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,具有异构结构的材料主要包括钢铁、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。由于异构金属材料兼具高强度和高延展性,且这一特性是无法通过在常规材料上进行改变得到的特殊性能^[7],因此逐渐成为行业中的研究热点和前沿。

工业上采取制备异构金属材料的方法主要分为两类^[8]。一类是通过机械变形对材料进行晶粒细化,形成多尺度晶粒分布,从而在材料内部获得异质微观结构以提高其性能。常见代表性的方法有表面机械研磨处理(SMAT)、超声表面滚压强化(USRP)、异步轧制(ASR)等。另一类是通过物理或化学方法将原子团簇或不同成分的粉末混合,形成具有异构特征的微观组织金属材料^[8]。常见方法主要有粉末冶金(PM)、电沉积(ED)以及增材制造(AM)。

当前对于异构金属材料制造的工艺介绍较为缺乏,本综述系统总结了机械变形和物理化学两类常见异构制备方式的优缺点、存在的局限性及问题,并展望了未来发展的可能方向。

机械变形法制造工艺及其优缺点

表面机械研磨处理

表面机械研磨处理工艺是近年来开发的一种用于增强合金机械性能的表面处理工艺。该工艺主要是通过驱动大量小球(弹丸)高速冲击试样表面,使其发生剧烈塑性变形,从而在表面形成一层纳米晶,同时细化试样的亚表面晶粒,最终提高合金表面的硬度和耐磨损性能^[9]。该工艺将光滑的弹丸置于真空容器内,在振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1~10 mm,振动频率为50~20 kHz,弹丸速度可达1~20 m/s^[10]。

通过表面机械研磨处理工艺在合金表面形成一层纳米晶,可以显著提高其机械性能^[11]。该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参数,有利于理想微观结构的制备。此外,表面机械研磨处理工艺不改变合金化学成分,且工艺简单、成本低廉,因而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控制,材料表面粗糙度不理想等问题。

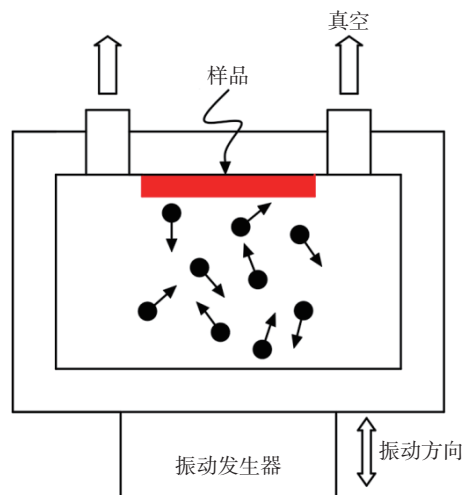


图1 表面机械研磨处理工艺图^[10]

Chen等^[12]利用表面机械研磨处理工艺对奥氏体304不锈钢材进行处理,以不同冲击速度制备了梯度结构不锈钢。根据扫描电子显微镜、透射电子显微镜及X射线衍射分析了梯度微观结构与冲击时间和力学性能之间的定量关系。结果表明,经处理后样品的拉伸强度随处理时间的增加而提高,并达到饱和水平。由于梯度结构的多种强化微观结构的叠加,处理后的样品表现出同时具有高刚度、高强度和良好延展性。

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,研究了表面机械研磨处理工艺对轧制态AZ80镁合金板材组织和性能的影响。结果表明,经过表面机械研磨处理工艺处理的AZ80镁合金板材相比未处理状态,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30 N以下时其耐磨性能也更好。

超声表面滚压强化

超声表面滚压强化工艺是一种以18~30 kHz的超声波为能量源,通过静载滚动的工作模式,对金属零件进行往复滚压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,产生周期性冲挤作用,使金属材料表面产生大幅度塑性变形^[14]。该工艺利用了金属材料在常温下的冷塑性特征,通过高频冲击对金属

表面的微观构造进行“削峰填谷”，从而获得理想的表面粗糙度^[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，从而减少位错缠结和堆积，促进塑性变形^[16]。

如图 2 所示，超声表面滚压强化装置由超声波发生器、预压弹簧、换能器、变幅杆、工具头等构成。

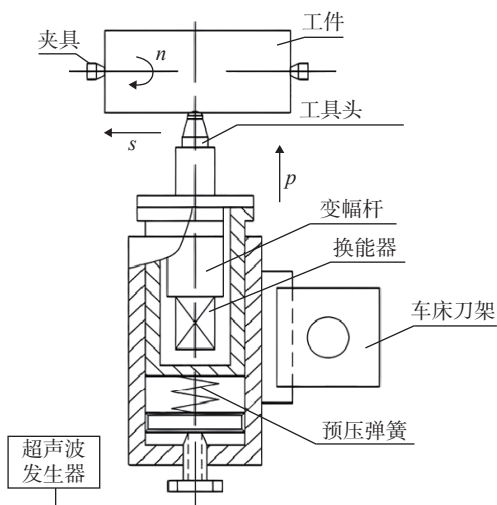


图 2 超声表面滚压强化装置示意图^[17]（注： n 代表工件的转速， s 代表工具头的进给方向， p 代表工具头对工件表面的压力）

超声表面滚压强化处理能在工件表层引入有益的残余压应力，同时消除部分有害的拉应力。该处理可显著提高工件的疲劳强度，并降低表面摩擦系数，从而大幅提升其耐磨性和耐腐蚀性，并延长使用寿命^[18]。此外，该工艺还具有综合成本低、效率高、兼容性好等优点。但其也存在缺点：当表面强

化层的塑性变形达到一定程度后，材料性能很难进一步提升，过度加工反而会导致起皱、开裂等表面缺陷，导致性能恶化^[19]。

Wang 等^[20] 通过超声表面滚压强化处理 Ti-6Al-4V 后对其进行微动疲劳性能分析，结果表明：超声表面滚压强化处理后试样表面硬度提高了 46.2%，表面粗糙度降低了 34.1%，残余压应力沿深度方向先增加后减少，摩擦疲劳寿命得到显著改善。

Gao 等^[21] 对 Cr4Mo4V 钢进行超声表面滚压强化处理，研究了处理前后试件的残余应力、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形貌。结果表明：超声表面滚压强化处理使试样内部残余应力增加，并由拉应力转变为压应力。在 500 °C 内高温处理后的试样硬度明显高于处理前，高温使用性能得到提升。同时，超声表面滚压强化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，从而进一步提高了 Cr4Mo4V 轴承钢的滚动接触疲劳寿命。

异步轧制

异步轧制工艺是利用两个表面线速度不同的工作轧辊对工件进行轧制的工艺。通过上下轧辊的不同半径或者两个轧辊的转速不同使上下轧辊的工作线速度产生差异^[22]，前者又称异径异步轧制，后者则是同径异步轧制，如图 3 所示。近年来，研究人员还研究出依靠两个半径和转速相同但摩擦系数不同的轧辊来实现异步轧制的方法。

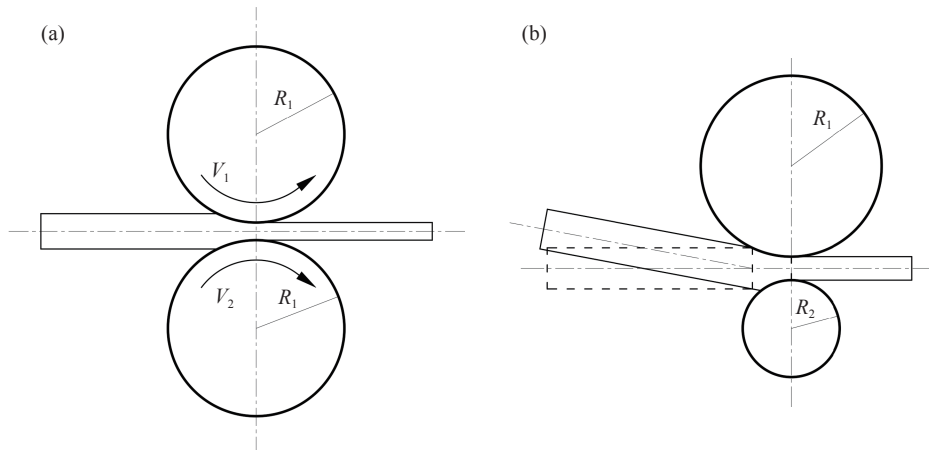


图 3 不同异步轧制工艺示意图：(a) 同径异步轧制^[8]；(b) 异径异步轧制^[23]（注： V_1 、 V_2 分别代表不同的线速度， R_1 、 R_2 分别代表轧辊的半径）

由于上下轧辊表面线速度不同,在变形区内会形成一个特殊区域,即异步轧制所特有的“搓轧区”,该区域内上下表面的接触摩擦力方向相反,不仅改变了变形区内的应力状态,还增强了剪切变形^[24]。在其作用下,晶粒尺寸细化,取向分布发生变化,从而改善了金属的表面质量、金相组织、晶体位向和综合力学性能^[25]。

轧制工艺可通过细化材料晶粒、消除显微组织缺陷,从而使材料组织密实,力学性能得到改善。与常规轧制相比,异步轧制具有显著降低轧制压力、轧制扭矩,降低产品能耗,减少轧制道次,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]。此外,该工艺还具有设备重量轻、能耗低、产品精度高、生产成本低、效率高的特点。但由于异步轧制上下轧辊工作线速度不同,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于此,有利于变形能量的积累并提供更大的再结晶驱动力,为晶粒的成核和生长提供有利条件。在相同的变形和退火工艺下,异步轧制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]对高合金低强度钢进行异步轧制和传统轧制的对比研究,并通过光学显微镜、电子背散射技术、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,并减少了 α 纤维组织。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。

物理化学法制造工艺及其优缺点

粉末冶金

粉末冶金(PM)工艺是以金属粉末(或金属粉

末与非金属粉末的混合物)为原料,通过成形和烧结制造金属材料、复合材料及各类制品的工艺^[30]。制取粉末后经混合、压制成型,在相应条件下进行烧结,再进行后处理得到成品。粉末冶金工艺可通过筛选粉末原料、控制烧结温度与时间等参数有效调控材料的微观结构和晶粒尺寸,实现晶粒细化,提高强度和硬度,同时有助于提高位错密度,从而改善材料的塑性变形能力和断裂韧性,实现对异构金属材料性能的强化调控^[8]。

粉末冶金工艺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],易于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,实现近净成形和自动化批量生产^[32]。但存在模具设备昂贵,成本较高,生产周期长,制品孔隙率较高^[33]等缺点。

Gökce 等^[34]采用标准粉末冶金工艺在宏观和微观层面上将铜粉和镁粉与铝粉混合,制备出轻质高强的铝基粉末冶金合金,获得了组织结构良好的高强度材料。三点弯曲试验表明,以 Al5Cu 和 Al5Cu0.5Mg 合金(25 g 载荷下的维氏硬度分别为 50 和 60)组成的单质粉末混合物分别烧结后,横向断裂强度(TRS)分别为 294 和 466 MPa。结果表明,Al5Cu0.5Mg 微合金化使铝的横向断裂强度从基材的 84 MPa 提高至 466 MPa,提高了近 5 倍;其硬度值比 Al 基材提高约 2 倍。

Yu 等^[35]总结了粉末冶金工艺制造刹车片的摩擦磨损性能及磨损机理。测试结果表明,所得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。

电沉积

电沉积(ED)工艺的原理是离子的电迁移,其机理是对流、扩散和电极反应的共同作用,即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]。电沉积工艺关键在于新晶核的形成和晶体的生长,故可通过调控电解液成分、温度、浓度以及电流密度等参数调控沉积层的均匀性和晶粒的尺寸,从而调整镀层的成分和组织结构等,获得所需的镀层,大幅提高金属材料的整

体性能。

电沉积工艺具有可控性和高效性，能通过控制工艺参数提高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]，但镀层内存在高内应力，易导致镀层发生翘曲、开裂^[38]。

Chen 等^[39]通过一步电沉积法在 Cu 衬底上成功制备了纯 SnO₂ 薄膜，无需对电解质进行预处理。通过精确控制 HNO₃ 浓度、电解质老化时间、沉积电压和温度等工艺参数，成功制备出 SnO₂ 薄膜。研究发现，保持其他参数不变。随着 HNO₃ 浓度增加，沉积物相组成由 Sn 转变为 Sn 和 SnO₂ 的混合物，最终变为纯 SnO₂。仅改变电解质老化时间，当电解质老化时间延长至 1 h 以上，溶液中开始出现白色沉淀，沉积物由纯 SnO₂ 逐渐变为 Sn 和 SnO₂ 的混合物。保持其他参数不变，当温度为 60 °C 或以下时，沉积物仅为 Sn；而当温度达到 65 °C 及以上时，SnO₂ 成为主导相。随着电压升高，沉积速率增加，且粉末沉积形态发生显著变化，同时沉积物中 Sn 逐渐成为主导相。最终在 HNO₃ 浓度为 80 mmol/L、电解质老化时间不超过 1 h、沉积电压为 0.2~0.4 V、温度为 65~85 °C 的条件下，得到了致密且具有良好黏附力的 SnO₂ 薄膜。

Fujita 等^[40]采用脉冲电沉积法获得 Co-Pt 厚膜磁体，研究发现脉冲关断时间对电流效率、内应力和薄膜成分具有显著调控作用。在 0~30 ms 的脉冲关断时间范围内，电流效率随时间的增加而提高；内应力则随脉冲关断时间增加急剧下降；当脉冲关断时间增加到 8 ms 时，Co 含量增加。当脉冲开启和关断时间分别设置为 4 和 8 ms 时，能得到 Co 原子百分数为 55%、厚度为 43 μm 的 Co-Pt 膜。

增材制造

增材制造（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。该工艺依托计算机技术，利用数字化三维模型，基于离散-堆积的原理，通过打印设备将材料以从点到面、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术方法^[42]。

增材制造技术不仅灵活便捷，而且高效高精密，可适用于制造复杂零件，并具有快速制样等特点^[43]。但其可选择的材料有限，制品后处理工艺复杂，且难以避免试样内部气孔、裂纹、未融合等缺陷^[44]。目前，金属 3D 打印材料在航空航天、生物医学、模具等领域已得到广泛应用。

Zhao 等^[45]选择日产智能巡航控制系统的前雷达安装支架作为研究对象，以验证金属增材制造在汽车行业的有效性。研究采用 Sandvik Osprey 生产的粉末粒度为 38 μm 不锈钢 316L 金属粉末打印了该支架，并对成品进行分析。结果表明，与模压成型件相比，增材制造支架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，增材制造工艺有效地节省了加工时间，提高了材料利用率。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。

结束语

金属材料的异构不仅能显著提高屈服强度，提升拉伸均匀塑性，还能同步改善断裂韧性、疲劳强度、导热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，各种异构化方法运用也趋于成熟。其制备技术多种多样，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表 1 所示。

在新时代工业制造中，除了探究新型制备异构金属材料制备技术，更要在原有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，其未来发展方向可以从 3 个方面出发：

（1）丰富可控制的参数：尽可能与现阶段更多

表 1 工艺总结

工艺	优点	缺点
机械变形法	<p>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</p> <p>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</p> <p>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</p>	<p>弹丸工作状态不易控制, 材料表面粗糙度不理想</p> <p>易导致起皱、开裂等表面缺陷</p> <p>影响产品的平直度, 易引起轧机震颤</p>
物理化学法	<p>粉末冶金: 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, 实现近净成形和自动化批量生产</p> <p>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</p> <p>增材制造: 灵活便捷, 高效高精, 适用于制造复杂的零件, 可实现快速制样</p>	<p>模具设备昂贵, 成本较高, 生产周期长, 制品的孔隙率较高</p> <p>镀层内存在高内应力, 易使镀层发生翘曲、开裂</p> <p>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</p>

高精度、高效率的辅助设备相结合, 引入更多元的工艺参数, 从而实现对材料结构性能更有效、更精准的调控。

(2) 降低工艺成本: 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, 在尽可能降低工艺成本、简化过程的同时, 保持其工艺精准的科学性制造方法。

(3) 拓展复杂条件下的应用: 随着异构金属材料的应用广泛, 需要使其能够服役于严苛的环境条件, 应用于更复杂、更难强化的工件。

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. 金属学报, 2022, 58(11): 1416

[2] 张炯. 阐述金属材料组织和性能之间的关系. 科技创新与应用, 2016(3): 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. 金属学报, 2022, 58(11): 1349

[4] Zhu Y T, Ameyama K, Anderson P M, et al. Heterostructured materials: superior properties from hetero-zone interaction. *Mater Res Lett*, 2020, 9(1): 1

[5] 武晓雷, 朱运田. 异构金属材料专刊前言. 金属学报, 2022, 58(11): 1347

[6] 赵甫, 史金飞, 许有熊, 等. 异质异构仿生贝壳复合材料. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2022, 41(3): 253

[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. 材料导报, 2023, 37(18): 156

[8] 张显程, 张勇, 李晓, 等. 异构金属材料的设计与制造. 金属学报, 2022, 58(11): 1399

[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.

鞍钢技术, 2018(6): 1

[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. 精密成形工程, 2021, 13(4): 159

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

[12] Chen A Y, Chen W, Jiang J G, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of austenite stainless steel with gradient twinned structure by surface mechanical attrition treatment. *Nanomaterials*, 2021, 11(6): 1624

[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. 热加工工艺, 2018, 47(8): 111

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

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

[16] Zhao Y H, Zhai J Q, Guan Y J, et al. Molecular dynamics study of acoustic softening effect in ultrasonic vibration assisted tension of monocrystalline/polycrystalline coppers. *J Mater Process Technol*, 2022, 307: Art No. 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. 内燃机与配件, 2022(24): 103

[18] 王婷, 王东坡, 刘刚, 等. 40Cr 超声表面滚压加工纳米化. 机械工程学报, 2009, 45(5): 177

[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. 表面技术, 2023, 52(2): 122

[20] Wang N, Zhu J L, Liu B, et al. Influence of ultrasonic surface rolling process and shot peening on fretting fatigue performance of Ti-6Al-4V. *Chin J Mech Eng*, 2021, 34(1): Art No. 90

[21] Gao F, Duan H, Ding Z, et al. Enhanced surface properties and contact fatigue performance of Cr4Mo4V bearing steel subjected to ultrasonic surface rolling processing. *Materialwiss Werkstofftech*,

- 2023, 54(6): 667
- [22] 王旭, 黄元春, 王强, 等. 异步轧制对 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 板材组织、织构和性能的影响. 稀有金属, 2023, 47(7): 934
- [23] 孙蓟泉, 戴辉, 唐荻. 异步轧制技术发展概况及其应用前景. 鞍钢技术, 2009(5): 1
- [24] Xu Z G, Zhang H L, Krishnan P, et al. Non-conventional hot rolling for improvement of mechanical properties in binary Mg-alloys. *Mech Mater*, 2022, 164: Art No. 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. 太原科技大学学报, 2024, 45(3): 223
- [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. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(6): 42
- [27] 李冰峰. 异步轧制技术及其在铝合金中的应用. 有色金属加工, 2013, 42(5): 5
- [28] Dai H, Sun J Q, Tang D. Grain refining of flange plate for welded H section steel made under asynchronous rolling condition. *J Wuhan Univ Technol Mat Sci Edit*, 2011, 26(6): 1121
- [29] Chen S, An Y G, Lahaije C. Toughness improvement in hot rolled HSLA steel plates through asymmetric rolling. *Mater Sci Eng A*, 2015, 625: 374
- [30] 徐静茹, 张卫东, 杨鹏, 等. 粉末冶金钛基层状材料研究进展. 粉末冶金技术, 2023, 41(1): 71
- [31] 贾成厂. 漫谈粉末冶金. 金属世界, 2010(6): 10
- [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. 兵器材料科学与工程, 2024, 47(5): 78
- [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. 热加工工艺, 2023, 52(18): 9
- [34] Gökce A, Fındık F, Kurt A O, et al. Microstructural examination and properties of premixed Al-Cu-Mg powder metallurgy alloy, materials characterization. *Mater Charact*, 2011, 62(7): 730
- [35] Yu C Y, Chen J W, Zhang Q H, et al. Research progress on friction and wear properties of powder metallurgy brake pad. *Adv Mech Eng*, 2022, 14(12): 1
- [36] Liu F, Deng Y D, Han X P, et al. Electrodeposition of metals and alloys from ionic liquids. *J Alloys Compd*, 2016, 654: 163
- [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. 冶金与材料, 2024, 44(5): 94
- [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. 材料保护, 2009, 42(8): 56
- [39] Chen X P, Liang J Y, Zhou Z T, et al. The preparation of SnO₂ film by electrodeposition. *Mater Res Bull*, 2010, 45(12): 2006
- [40] Fujita N, Amasaki S, Yumiba H, et al. Preparation of Co-Pt thick film magnets by pulse electrodeposition. *J Magn Magn Mater*, 2007, 310(S2): 2590
- [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. 金属加工 (热加工), 2024(3): 33
- [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. 科学通报, 2024, 69(17): 2401
- [43] 徐亮, 梁永仁, 叶梦元. 基于激光闪射法测量 3D 打印铝合金的热物性参数. 金属世界, 2025(4): 86
- [44] 安小鹏, 田海峰, 马永占, 等. 金属增材制造技术应用与研究. 锻造与冲压, 2024(15): 50
- [45] Zhao N Z, Parthasarathy M, Patil S, et al. Direct additive manufacturing of metal parts for automotive applications. *J Manuf Syst*, 2023, 68: 368
- [46] Shang C, Wu H H, Pan G F, et al. The characteristic microstructures and properties of steel-based alloy via additive manufacturing. *Mater*, 2023, 16(7): 2696
- 基金项目: 四川省科技支撑资助项目 (20ZDYF2461, 20ZDZX0042); 攀西试验区第六批资助项目 (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: 陈思伦 (2001—), 男, 四川省广安人, 研究生。主要研究方向: 金属。通信地址: 四川省成都市红光大道 9999 号西华大学; E-mail: 1597484085@qq.com。
- 通信作者: 王正云 (1981—), 男, 四川达州人, 博士, 高级实验师, 硕士研究生导师。主要研究方向: 相变功能材料、高性能结构材料、先进连接技术。通信地址: 四川省成都市红光大道 9999 号西华大学; E-mail: wzy-513@163.com。