

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3033

高性能镁合金的研究进展

闫志飞¹,田光元²(共同一作),苏 辉²(共同一作),薛程鹏²,李 全²,王 硕²,

严程铭²,杨智皓²,高 平¹,王俊升^{2,3}

(1. 中国兵器工业集团 第五二研究所,内蒙古 包头 014030; 2. 北京理工大学 材料学院,北京 100081; 3. 北京理工大学 前沿交叉科学研究院,北京 100081)

摘 要:追求更高强度的材料一直是结构材料研究人员的目标,尤其是轻质结构材料—镁合金,被誉为“21 世纪最轻的结构合金”。低密度、高性能镁合金在各种技术应用中非常具有吸引力,特别是在镁合金中加入主要合金化元素后,其强度、塑性得到了极大提升,从而促进了不同合金体系的镁合金发展。本研究综述了铸造镁合金和变形镁合金的研究和发展现状。重点从合金体系、合金组成、制备工艺和力学性能等方面进行综述,旨在对未来设计强度更高、综合性能优异的镁合金提供参考。

关键词:高强度;铸造镁合金;变形镁合金;超轻;稀土镁合金

中图分类号: TG146

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2023)02-0101-13

Research Progress of High-Performance Magnesium Alloy

YAN Zhifei¹, TIAN Guangyuan¹(Co-first author), SU Hui²(Co-first author), XUE Chengpeng², LI Quan²,
WANG Shuo², YAN Chengming², YANG Zhihao², GAO Ping¹, WANG Junsheng^{2,3}

(1. No.52 Institute of China Ordnance Industries Group, Baotou 014030, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The pursuit of higher-strength materials has always been the goal pursued by researchers in structural materials, especially magnesium (Mg) alloys, which are lightweight structural materials known as “the lightest structural alloy of the 21st century”. Low-density, high-performance Mg alloys have become very attractive in various technical applications, especially with the addition of major alloying elements in Mg alloys, which greatly enhance their strength and plasticity and further promote the development of Mg alloys with different alloying systems. From this aspect, this review summarizes the research and development status of cast Mg alloys and wrought Mg alloys. Highlights are reviewed from the perspectives of alloying systems, alloy composition, preparation processes, and mechanical properties, aiming to provide a reference for the future design of higher-strength Mg alloys with excellent overall properties.

Key words: high strength; cast Mg alloy; wrought Mg alloy; ultralight; rare earth magnesium alloy

环境保护和节能是全球性问题。目前,燃料资源的枯竭和 CO₂ 排放是学术界关注的重要问题^[1]。在运输、军事、航天等领域中使用轻质材料可减少燃料消耗和环境问题^[2]。镁(Mg)是一种具有优异力

学性能的结构材料,是加工和应用中表现出高性能的合适候选材料,尤其随着航空航天领域对轻质材料的需求不断增加,促进了镁基材料的开发研究^[1,3]。然而,与其可替代材料,如铝合金和钢相比,镁合金

收稿日期: 2023-02-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52073030);国家自然科学基金区域创新联合基金重点项目(U20A20276)

作者简介: 闫志飞,1988 年生,副研究员.研究方向:特种材料加工. Email:116743567@qq.com

田光元(共同一作),1993 年生,博士生.研究方向:新型镁合金的设计与性能研究.电话:15735801185,Email:947258118@qq.com

苏 辉(共同一作),1994 年生,博士生.研究方向:新型镁合金的设计与性能研究.电话:18435318786,

Email: 949500160@qq.com

通讯作者: 王俊升,1979 年生,博士,教授.研究方向:轻质铝合金、镁合金的设计开发以及材料集成计算.电话:13810731357,

E-mail: junsheng.wang@bit.edu.cn

引用格式: 闫志飞,田光元,苏辉,等.高性能镁合金的研究进展[J].铸造技术,2023,44(2): 101-113.

YAN Z F, TIAN G Y, SU H, et al. Research progress of high-performance magnesium alloy [J]. Foundry Technology, 2023, 44 (2): 101-113.

虽作为最轻的轻质结构材料可大大减轻质量,但其强度低、塑性差、耐腐蚀性差等的缺点限制了其广泛应用^[4-5]。

随着科技和轻量化技术的发展,近年来镁合金的发展取得显著成效,如常见的镁合金(AZ91、AZ31)已经进行商业应用且日益成熟。在此基础上,一些高性能新型镁合金也得到发展。按照镁合金的成型工艺可分为铸造镁合金和变形镁合金两大类。这两种镁合金在成分、组织和性能上存在较大的差异。因此基于上述背景,本研究将以铸造镁合金和变形镁合金为基体材料,针对镁合金的强度、塑性等性能方面的最新研究进展进行综述,并对未来镁合金的发展进行展望。

1 高性能镁合金的研究

1.1 高强度铸造镁合金

高性能铸造镁合金是变形镁合金的基础,目前,研究人员已经开发出了具有不同成分和性能的镁合金。在纯镁中添加合金元素有助于改变其性质。镁具有化学活性,可以与其他金属合金元素发生反应,形成金属间化合物,影响微观结构,从而影响镁合金的力学性能。当前,研究者主要通过添加合金元素,利用固溶强化、析出强化等提升镁基体的力学性能^[6]。根据镁合金中所含合金元素的种类和比例的不同,目前常见的镁合金有镁铝锌(Mg-Al-Zn)系、镁稀土(Mg-RE)系、镁锂(Mg-Li)超轻系等合金系列,下面将介绍这些合金体系目前的研究状况。

1.1.1 Mg-Al-Zn(AZ)系

Al和Zn元素是最早的镁合金合金化元素。据报道,Al是添加到镁中以提升镁合金强度和可铸性的最有利溶质。根据Mg-Al二元合金的相图,Al在 α -Mg基体中的最大固溶度为12.7%(质量分数)。铝元素的含量对合金性能的影响较大,随着铝元素含量的增加,合金的结晶温度范围变小、流动性变好、晶粒细化、热裂及缩松现象等倾向明显得到改善,而且随着铝含量的增加,抗拉强度和疲劳强度得到提高。同时,Zn也是最主要的合金元素之一,在共晶温度下,Zn在 α -Mg基体中的最大固溶度为6.2%(质量分数)^[7]。目前,AZ系镁合金是镁合金的重要系列,在许多领域已经得到了实际应用。为了提升AZ系镁合金的力学性能,包括稀土元素(RE)在内的许多元素被用于该系镁合金的合金化处理。同时,向AZ系镁合金中添加稀土元素不仅可以起到细化晶粒的效果,形成强化相,同时也可对熔体起到净化、除气以及排除有害杂质元素的效果^[8-9]。Wang等^[10]在

Mg-2Al-1Zn(AZ21)合金中加入钆(Gd)元素,研究了合金的显微组织、机械性能。添加Gd元素导致合金中形成(Mg,Al)₃Gd相和立方Al₂Gd相,显著改善了AZ21合金的室温拉伸性能 and 高温性能。由于钐(Sm)具有独特的斜方晶系结构,Liu等^[11]研究了添加Sm对AZ41-xSm(x=0、1、2、3,质量分数)合金的力学性能和耐腐蚀性的影响,添加2%(质量分数)的Sm能显著细化晶粒,使得AZ41-2Sm合金具有极限抗拉强度(ultimate tensile strength,UTS)295.9 MPa和屈服强度(yield strength,YS)216.4 MPa,相比未添加的分别提升了2.49%和6.92%。同时,添加Sm后AZ41合金的腐蚀速率约为未添加合金的二分之一,提升了合金的耐腐蚀性。Nan等^[12]研究了不同钕(Nd)和Gd含量AZ80镁合金的显微组织和力学性能,添加0.6%Nd、Gd所研究的合金表现出最佳的力学性能,其UTS、YS和伸长率(elongation,EL)分别相对AZ80合金提升了34.37%(215 MPa)、52.63%(145 MPa)和60.19%(8.33%)。Park等^[13]研究锡(Sn)对AZ82合金力学性能的影响,因合金中形成了Mg₂Sn相对合金热处理过程中起到细化晶粒、固溶强化的效果,使合金的YS和UTS相对AZ82提升了20.17%(280 MPa)和6.63%(370 MPa)。Kim等^[14]研究了复合元素钙和钇(Ca+Y)对商用合金AZ31的力学性能影响,添加Ca和Y提升了合金的强度,且不损失延伸性,其YS和UTS分别增加42 MPa(~17%)和32 MPa(~9%)。并且合金的压缩屈服强度(compressive yield strength,CYS)也增加了36 MPa,从109 MPa增加至145 MPa。然而,Mg-Al-Zn系合金的强度和延展性仍不能同时满足一些重要零件的要求,限制了其潜在的应用。表1为近年来针对合金元素改善Mg-Al-Zn系合金显微组织和力学性能的研究^[15-16]。

表1 添加各种合金元素改善铸态Mg-Al-Zn系合金力学性能

Tab.1 Addition of various alloying elements to improve the mechanical properties of cast Mg-Al-Zn system alloys

成分, w/%	铸造工艺	拉伸性能			文献
		UTS/MPa	YS/MPa	EL/%	
AZ91+Ce	压铸	248	158	6.8	[16]
AZ91+1.0Nd	压铸	258	164	5.6	[17]
AZ91+0.8Y	压铸	270	160	11.0	[18]
AZ91+0.4Sb	重力铸造	264	177	4.5	[19]
AZ91+0.8Pr	重力铸造	228	137	6.8	[20]
AM60+1Sn+0.3Ti+1Ag	挤压压铸	265	128	8.8	[21]
AM60+0.9Y	重力铸造	192	62	12.6	[22]
AZ61-0.7Si-0.4Sb	重力铸造	175	99	5.0	[23]
AZ61-0.7Si-0.4Sr	重力铸造	184	115	5.9	
ZA84-0.1Sr	重力铸造	190	152	4.9	[24]

如表 1 所示,研究者选择了各种微合金化元素,如 Ce、Nd、Y、Si、Pr、Ag、Sb、Sr 等,以进一步提升镁合金的力学性能。其中,AZ91+0.8Y 合金具有优异的机械性能,这已被 Zhang 等^[18]所证实,向合金 AZ91 中添加少量的 Y 会显著细化微观结构,包括初生相(α -Mg)和共晶相(β -Mg₁₇Al₁₂)。细化微观结构提升了合金的力学性能和耐腐蚀性,热裂纹减少。

1.1.2 Mg-RE 系

近年来,高性能铸造镁合金的开发受到全球的广泛关注并取得许多积极成果。目前商业铸造镁合金除了 Mg-Al-Zn 系合金外,Mg-RE 系合金(主要包括 Mg-Gd 和 Mg-Y 基合金)也得到了快速发展。该系列合金可通过低冷却速率的砂型铸造制备,并通过固溶和时效热处理工艺进一步提升合金的力学性能。同时,低压铸造和永久模重力铸造也被用于制造 Mg-RE 基合金的零部件。稀土元素通常分为两组,重稀土(heavy rare earths,HRE)和轻稀土(light rare earths,LRE)元素。轻稀土元素为从镧(La)到铕(Eu),重稀土元素是钷族从 Gd 到镥(Lu)元素。目前与传统 Mg-Al 或 Mg-Zn 系合金相比,已开发的高性能 Mg-RE 合金具有相对较高的力学性能,以及相对于铸造铝合金较低的密度和相接近的强度值。图 1 为 Mg-RE 轻金属密度与强度的示意图^[25]。

目前,WE43 和 WE54 是典型的商用 Mg-Y 基铸造合金^[25]。众所周知,WE43 合金的成分范围为Mg-(3.7-4.3)Y-(2.4-4.4)RE-(0.4-1.0)Zr(质量分数,%),其中 RE 元素为 Nd 和约 1.0%(质量分数)的 HRE 元素(Yb、Er、Dy 和 Gd)。由于 HRE 元素通常会导致成分偏析,且储量有限,对于商业 WE43 合金的改性主要集中在 Y、Nd 和 Zr 的添加和减少 HRE 元素的添加量^[26]。同时,还选择添加 Zn 元素,进一步增强 WE43 合金的力学性能。表 2 列出了一些添加 Zn 或 Gd 改善 WE43 合金的室温拉伸性能。从表中可以看出添加 Zn 或 Gd 改善的 WE43 合金的经过 T6 处理后,其 UTS 和 YS 强度可达到 345 MPa 和 196 MPa,分别高于 WE43 合金的典型值(UTS:250 MPa,YS:162 MPa)。

对于 Mg-Gd 基合金,通过添加其他合金元素也可显著提升合金的性能。根据添加元素的不同,Mg-Gd 基合金又可分为 Mg-Gd-RE(RE:Y、Nd、Dy),Mg-Gd-Ag 系列合金。He 等^[32]研究了 Mg-10Gd-2Y-0.5Zr 合金在铸态、固溶态(T4)、峰时效态(T6)的微观结构和力学性能,其峰时效态合金的 UTS、YS 和 EL 高达 362 MPa、239 MPa 和 4.7%,表现出优异的综合性能。同时,表 3 总结了 Mg-Gd 基合金的力学性能。可以看出,Mg-Gd-Sm 和 Mg-Gd-Nd 系合金具有与 Mg-Gd-Y 系相近的拉伸性能。由表 3 进一步发现,

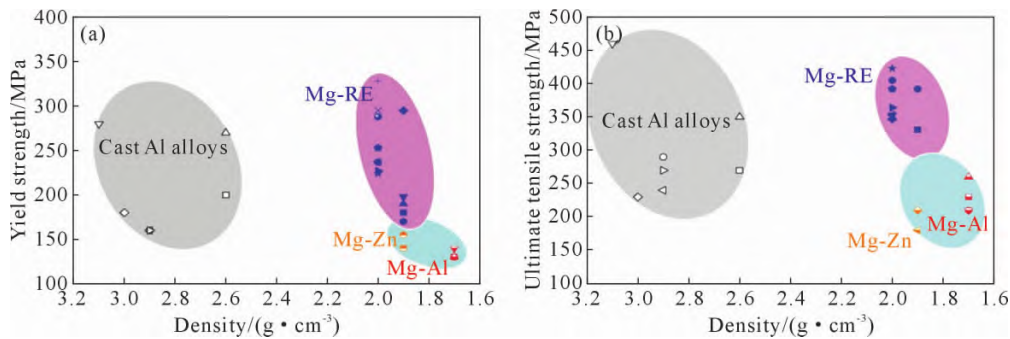


图 1 T6 热处理铸造铝合金、Mg-Al、Mg-Zn、Mg-RE 系列合金密度与屈服强度、抗拉强度的函数关系图:(a) 密度 vs.屈服强度,(b) 密度 vs.抗拉强度。其中,Al、Mg-Al 和 Mg-Zn 合金数据来自[25],Mg-RE 来自表 2~3

Fig.1 Graphs of T6 heat treated cast aluminum alloys, Mg-Al, Mg-Zn, and Mg-RE series alloys as a function of density versus yield strength and tensile strength: (a) density vs. yield strength, (b) density vs. tensile strength. Where the data for Al, Mg-Al and Mg-Zn alloys are from [25] and Mg-RE are from Tab.2~3

表2 添加Zn或Gd改善WE43合金的室温拉伸性能
Tab.2 Improvement of room temperature tensile properties of WE43 alloy by adding Zn or Gd

成分, w/%	测试条件	拉伸性能			文献
		UTS/MPa	YS/MPa	EL/%	
Mg-4Y-2.4Nd-0.2Zn-0.4Zr	T6	339	268	4.0	[27]
Mg-4Y-2Nd-1Gd-0.4Zr	T6	330	265	6.5	[27]
Mg-4Y-2.8Nd-0.2Zn-0.4Zr	As-cast	205	162	5.0	[28]
Mg-4Y-2.8Nd-0.2Zn-0.4Zr	T6	304	225	6.4	[28]
Mg-3.5Y-2Nd-1.3Gd-0.4Zr	T6	345	196	7.0	[29]
Mg-3Y-2.5Nd-1Gd-0.5Zn-0.5Zr	T6	324	186	9.7	[30]
Mg-4.3Y-3Nd-1.2Gd-0.2Zn-0.5Zr	T6	316	214	4.4	[31]
WE43	T6	250	162	2.0	[28]

表 3 高强铸造 Mg-Gd 基镁合金的室温拉伸性能
Tab.3 Room temperature tensile properties of Mg-Gd based high strength casting magnesium alloys

成分, w/%	测试条件	拉伸性能			文献
		UTS/MPa	YS/MPa	EL/%	
Mg-10Gd-2Y-0.5Zr	T6	362	239	4.7	[32]
Mg-10.4Gd-3.3Y-0.46Zr	T6	348	237	3.0	[33]
Mg-8Gd-2Sm-Zr	T6	329	195	7.7	
Mg-10Gd-2Sm-Zr	T6	347	237	3.2	
Mg-6Gd-2Nd-Zr	T6	342	182	7.9	[28]
Mg-8Gd-2Nd-Zr	T6	342	200	5.0	
Mg-11Gd-2Nd-Zr	T6	353	224	3.7	
Mg-16Gd-2Ag-0.3Zr	T6	423	328	2.6	[34]
Mg-3.4Gd-0.5Ag-0.11Zr	T6	414	293	2.2	[15]

在 Mg-Gd 基合金中, Mg-Gd-Ag 基合金表现出最高的强度。例如 Mg-3.4Gd-0.5Ag-0.11Zr 的 UTS、YS 和伸长率分别为 414 MPa、293 MPa 和 2.2%; Mg-16Gd-2Ag-0.3Zr 铸造合金在 T6 状态下的拉伸性能最高, 分别为 423 MPa(UTS)、328 MPa(YS) 和 2.6%(EL)^[15]。

1.1.3 Mg-Li 超轻系

镁锂合金(Mg-Li)因其超轻、相对较高的比强度和刚度以及良好的成型性等超强特性而受到越来越多科学研究和工业应用的关注^[35]。因为 Li 的低密度(0.53 g/cm³)可将 Mg-Li 合金密度从 1.77~1.83 g/cm³降低至 1.35~1.65 g/cm³^[36]。根据 Li 含量的不同, Mg-Li 合金可形成 3 种不同的晶体结构。第 1 种低 Li 含量(<5.7%)的 Mg-Li 合金固溶体仍保留了六方密排堆积(HCP)晶胞结构(α -Mg 相), 由于基体 α -Mg 相中位错移占主导地位, 表现出中等强度和低成型性^[37]。第 2 种是高 Li 含量(>10.3%)的 Mg-Li 合金, 其晶体结构由 α -Mg 相完全转变为具有体心立方(BCC)结构的 α -Li 相, 具有最低的强度、最大的延展性和最小的加工硬化性。其次, 在合适的 Li 含量(介于 5.7%~10.3%)之间, Mg-Li 合金具有两相结构(α + β), 这种结构具有双重效果, 因为它结合了 α -Mg 相的适度强度和 β -Li 相优异的延展性^[38-39]。与其他合金体系相比, 虽然 Mg-Li 基合金具有这些优点, 但是其强度低于 350 MPa 和抗蠕变性差等特性问题仍严重制约其更广泛的应用。

针对镁锂合金强度低的问题, 目前常见铸造 Mg-Li 合金提升强度的方法为合金化和热处理。合金化即添加微合金化元素, 通过固溶强化和第二相强化来提高合金的室温和高温性能。Al 和 Zn 是 Mg-Li 合金体系中主要的合金化元素, 分为 Mg-Al-Li(LA 系)、Mg-Li-Zn(LZ 系)和 Mg-Al-Zn(LAZ 系)。此外, 除 Zn 和 Al 外, 目前研究趋向于添加稀土元素。如, Wu 等^[40]采用铸造法制备了 Mg-5Li-3Al-2Zn-xCe(x=0~2.5, 质量分数, %)合金, 当添加 0.5%Ce(质

量分数)元素, 合金的 UTS 相比未添加时提升了 27%(233.05 MPa)。Peng 等^[41]研究了 Sn 和 Y 复合添加对铸态 Mg-5Li-3Al-2Zn(LAZ532)合金微观组织和力学性能的影响, Sn 和 Y 的加入细化了晶粒, 形成了 Mg₂Sn 和 Al₂Y 相, 从而通过第二相强化和细晶强化提升了合金的力学性能。该铸态 LAZ532 合金的 YS、UTS 和 EL 分别达到 166.2 MPa、228.6 MPa 和 14.8%, 相比铸态 LAZ532 合金提升了 47.6%、47.3% 和 51.0%。Ji 等^[42]通过固溶处理和时效处理研究了 Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Y 合金不同状态下的力学性能, 发现合金在 350 °C 下固溶热处理 4 h 表现出高强度(YS:226 MPa, UTS:292 MPa)。Song 等^[43]通过真空感应熔炼制备了密度为 1.52 g/cm³ 的铸态超轻高强度的 Mg-10Li-3Al-3Zn-xY(x=0、0.5、1.0, 质量分数, %)合金。添加 0.5%Y(质量分数)元素后形成了块状的 Al₂Y, 分布于 α -Mg 相内部和晶界处。固溶处理后, 合金的强度 UTS 高达 244 MPa, YS 比 0%Y(质量分数)合金高 60.5%。原因主要是由于 Y 在合金中具有固溶强化、细化晶粒和 Al₂Y 均匀分布引起的第二相强化作用。Dong 等^[44]制备了 Mg-12Li-3Al-xNd(x=0.3、0.7、1.1、2.0, 质量分数, %)合金, 对铸态组织和力学性能进行了观察和测试。研究结果表明, 该铸态合金组织由 α 相基体和 Al₂Nd、Al₁₁Nd₃、MgLiAl₂、Al₄Li₉ 和 AlLi 相组成。随着合金中 Nd 含量的增加, Al-Nd 金属间化合物由针状 Al₁₁Nd₃ 转变至粒状 Al₂Nd。当 Nd 含量为 2%时, 铸态 Mg-12Li-3Al-2Nd 表现出优异的综合性能(UTS:169 MPa 和 EL:32.5%), 获得了塑性良好、强度优异的 β 基 Mg-Li 合金。

1.2 高强度变形镁合金

变形镁合金的成形工艺主要包括挤压、轧制、锻造、冲压成形和超塑性变形(等通道转角挤压(equal channel angular pressing, ECAP)、剧烈塑性变形(severe plastic deformation, SPD)、高压扭转(high-pressure torsion, HPT)、累积叠轧焊(accumulative roll

bonding, ARB)和多向锻造(multi-directional forging, MDF))等。由于变形加工消除了铸造组织缺陷,细化了晶粒,故与铸造镁合金相比,变形镁合金具有更高的强度、更好的延展性和更好的力学性能,同时生产成本更低。

1.2.1 Mg-Al 系

Mg-Al 族是最常用的变形镁合金之一,具有强度适中、塑性高、耐腐蚀性能好和材料成本低等优点^[45-46]。Al的加入降低了不同滑移体系之间临界剪切应力的各向异性,促进了非基面滑移的激活,提高了镁合金的延性^[47]。此外,Al能与Mg形成 β -Mg₁₇Al₁₂析出相^[48],提高镁合金的强度。随着Zn、Ca、Sr、Si、Mn和稀土元素等少量合金元素的加入, β 相的形态、尺寸、数量和分布都发生了明显变化^[49],进而改变了合金的力学性能。

在Mg-Al合金中加入少量Zn(<1%)可显著提高Al在Mg基体中的溶解度,从而改善合金的力学性能。Zha等^[50]采用挤压、均匀化处理和多道次轧制

相结合的方法制备了细晶粒AZ31、AZ61和AZ91合金。轧制后的AZ31、AZ61和AZ91合金板材的平均晶粒尺寸约为3.0 μm ,且晶粒中含有细小的Mg₁₇Al₁₂颗粒。研究发现,随着Al含量的增加,Mg₁₇Al₁₂颗粒的数量增加。与其他工艺制备的细晶粒AZ91相比^[51],挤压和多道次轧制制备的AZ91表现出良好的综合力学性能,其YS、UTS和EL分别为244 MPa、369 MPa和12.9%。Shan等^[52]通过两步等通道挤压(two-step equal-channel angular pressing, TS-ECAP)和电脉冲处理(electropulsing treatment, EPT)相结合的方法,提高了AZ61合金的机械性能。TS-ECAP和EPT的工艺流程图如图2所示。研究发现,与传统的AZ61合金的性能相比,采用TS-ECAP和EPT方法获得了最佳的综合力学性能。首先,EPT后样品的晶粒尺寸从30 μm 细化到1 μm 。其次,YS和UTS分别从250 MPa和350 MPa提高到305 MPa和426 MPa。此外,EL从6.8%提高到18.3%,比传统AZ61合金的伸长率提高了3倍。

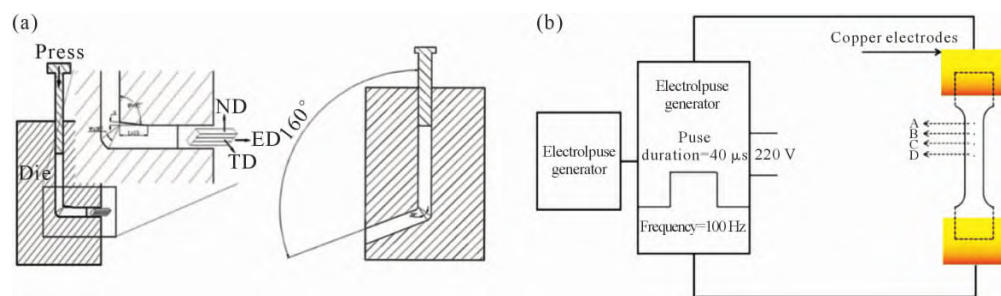


图2 TS-ECAP和EPT的工艺流程图:(a) ECAP的模具配置和ECAP的主要方向示意图,ED—挤出方向、ND—法向、TD—横向往,交角为90°和160°, (b) EPT过程和电脉冲产生的方波示意图^[52]

Fig.2 Process flow diagram of TS-ECAP and EPT: (a) schematic illustration of the die configuration for ECAP and the main directions for the ECAP, ED—extrusion direction, ND—normal direction, TD—transverse direction, the intersection angle $\phi=90^\circ$ and $\phi=160^\circ$, (b) schematic of the EPT process and square wave generated by electricity pulsing^[52]

Xu等^[53]将热挤压与多道旋转模具等通道挤压(rotary-die equal channel angular pressing, RD-ECAP)相结合的加工路线应用于AZ91合金,以提高其强度和延展性。RD-ECAP加工路线示意图如图3所示。结果表明,与铸造合金相比,ECAP合金在3个

正交各向异性方向上的强度和延展性同时得到改善,并且挤压道次的增加进一步改善了其力学性能。经过12道次后,合金在3个拉伸方向上实现了屈服强度为214.3~279.9 MPa、极限抗拉强度为321.0~382.0 MPa、伸长率为8.2~15.5%的最佳力学性能。Zhang等^[54]研究了大变形硬板轧制(hard-plate rolling, HPR)制备的Mg-Al-Zn合金的微观组织和力学性能。发现压下量为85%的样品表现出约314 MPa的最高屈服强度,约381 MPa的极限抗拉强度和约11%的伸长率。其中强度的提高主要是细晶强化的贡献,延展性的提高源自双峰晶粒组织的形成和基面织构的弱化。此外,Zhang等^[55]通过多向锻造制备的AZ80表现出优异的机械性能,抗拉强度达到402 MPa,EL超过17%。Zou等^[56]发现ZK60合金棒材在300 °C径向锻造后表现出341 MPa的高拉伸强度和27.1%的高伸长率。

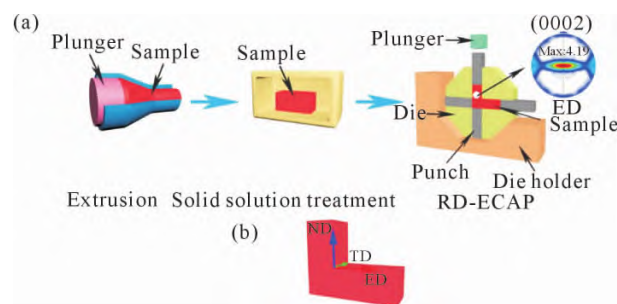


图3 热挤压与多道旋转模具等通道挤压:(a) 加工路线, (b) 样品取向示意图^[53]

Fig.3 Schematics of RD-ECAP: (a) processing route, (b) sample orientation^[53]

Mn 的加入可形成 α -Mn 和 Al_8Mn_5 等强化相^[57], 显著改善 Mg-Al 合金的耐腐蚀性能、蠕变性能和阻尼性能。Hu 等^[58]研究了用传统的一步挤压工艺制备的 Mg-0.4Al-xMn ($x=0, 0.3, 1.5$, 质量分数, %) 合金。其中 α -Mn 和 Al_8Mn_5 析出相改变了再结晶形核和晶粒生长行为。与动态再结晶 Mg-0.4Al 合金相比, Mg-0.4Al-0.3Mn 和 Mg-0.4Al-1.5Mn 合金表现出非动态再结晶和动态再结晶的双峰组织, 动态再结晶晶粒尺寸约为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 晶粒取向随机。Mg-0.4Al-0.3Mn 表现出优异的力学性能, YS、UTS 和 EL 分别为 239 MPa、262 MPa 和 30.1%, 而 Mg-0.4Al-1.5Mn 则表现出异常的 EL(52.5%) 和中等 YS(170 MPa)。

在 Mg-Al 体系中加入 Ca, 可以在加工过程中形成热稳定性高的 Al_2Ca 、 Mg_2Ca 和 $(\text{Mg}, \text{Al})_2\text{Ca}$ 相, 从而提高合金的室温和高温力学性能和抗蠕变性能^[59]。Jiang 等^[60]研究了不同 Al 和 Ca 含量 Mg-Al-Ca 合金的微观组织和力学性能。发现挤压态 Mg-2.32Al-1.7Ca 合金的力学性能最佳, 其 YS、UTS 和 EL 分别为 275 MPa、324 MPa 和 10.2%。力学性能的提高主要是由于微观动态再结晶晶粒、纳米级板状 Al_2Ca ($30\sim 50\text{ nm}$) 析出相和分散在基体中的高密度亚微米级 Al_2Ca 颗粒($0.5\sim 1.0\text{ }\mu\text{m}$) 的共同作用。Naka 等^[61]通过在 24 m/min 的高模具速度挤压下开发了一种新的 Mg-1.3Al-0.3Ca-0.4Mn (AXM10304) 变形镁合金。合金在时效硬化后表现出出色的综合力学性能, UTS 为 306 MPa, YS 为 287 MPa, EL 为 20%。其中高强度的原因主要归因于平均晶粒尺寸为 $17\text{ }\mu\text{m}$ 的单层 Guinier-Preston(G.P.) 区高密度分布和 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 典型镁合金挤压织构。G.P. 区的均匀分散有利于交叉滑移, 且不易作为裂纹的萌生和扩展位点, 有效抑制了时效硬化后伸长率的退化。图 4 显示了各种挤压镁合金和铝镁硅(6061)合金的伸长率和抗拉应力。通过峰值时效热处理的 AXM10304 合金抗拉应力大幅增加, 而伸长率没有显著损失。峰值时效 AXM10304 合金的极限拉伸强度和伸长率可与挤压成型性差的 Mg-6Al-1Zn (AZ61) 和 Mg-6Zn-0.5Zr (ZK60) 商用合金^[62]和 6000 系列 Al 基合金^[63]相媲美。因此, 这种耐时效的 AMX10304 合金可以替代现有的商用 Mg-6Al-1Zn (AZ61) 和 Mg-6Zn-0.5Zr (ZK60) 合金, 并且有望作为工业结构应用上可行的锻造镁合金。

1.2.2 Mg-Zn 系

Mg-Zn 族作为强变形镁合金, 受到广泛关注。Mg-Zn 二元体系的 YS 和 EL 值通常低于 180 MPa 和 20%。为了改善 Mg-Zn 二元体系的力学性能, 各种

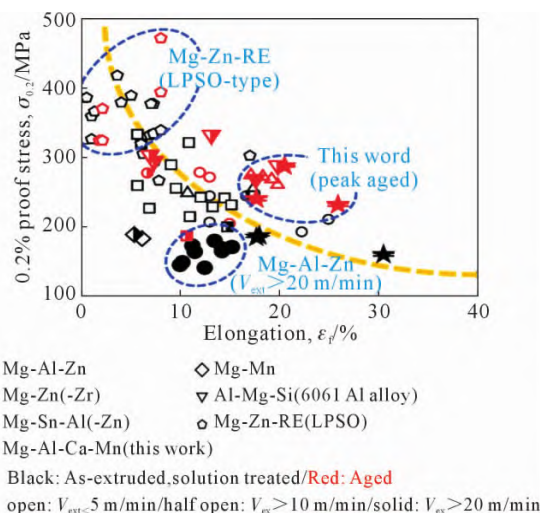


图4 以不同模具出口速度挤压的 Mg-Al-Zn、Mg-Zn-Zr、Mg-Sn-Zn-Al、Mg-Mn、Al-Mg-Si、LPSO 型 Mg-Zn-RE 合金以及 AXM 合金的拉伸破坏应变和拉伸 0.2% 的应力^[61]
Fig.4 Tensile failure strains and tensile 0.2% proof stresses of Mg-Al-Zn, Mg-Zn-Zr, Mg-Sn-Zn-Al, Mg-Mn, Al-Mg-Si, LPSO-type Mg-Zn-RE and AXM alloys extruded at various die exit speed^[61]

研究都集中在通过添加合金元素来开发新型 Mg-Zn 合金。Zareian 等^[64]发现, 添加 Ca 能有效细化 Mg-Zn 合金的晶粒尺寸, 改善其力学性能。在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热挤压 Mg-5.3Zn-0.6Ca (质量分数, %) 合金后, 获得了 220 MPa 的 YS 和 19.3% 的 EL^[65]。在相同的挤压温度下, 在 Mg-2Zn 合金中添加 1%Ca (质量分数) 可使 EL 提高到 29%^[66]。Horky 等^[67]报道了 Mg-0.6Zn-0.5Ca (质量分数, %) 合金的 YS 和 EL 分别高达 370 MPa 和 7%, 这是由于该过程中晶粒细化和未再结晶晶粒比例较高所致。此外, 稀土元素的添加能有效提高 Mg-Zn 合金的力学性能。Li 等^[68]通过轴对称热挤压法开发了 Mg-6Zn-2Yb-0.5Zr 合金, 其 UTS 为 $\sim 436\text{ MPa}$, EL 较低, 约为 14.1%。Huang 等^[69]发现, 搅拌摩擦加工的 Mg-6Zn 的强度和延展性可以通过 Y 和 Zr 共合金化得到增强, 通过该方法加工的 Mg-6Zn-1Y-0.5Zr 合金的 UTS 和 EL 达到 310 MPa 和 27.7%。Zhang 等^[70]发现, 在时效处理过程中, Sn 的加入使沉淀物细化并增加了沉淀物的密度。峰值时效 Mg-6Zn-1Mn-2Sn-0.5Ca 合金的 YS、UTS 和 EL 分别达到 379 MPa、407 MPa 和 7.5%。Yan 等^[71]通过高应变率轧制制备了 Mg-5Zn-xSr 合金 ($x=0, 0.2, 0.6, 1.0$, 质量分数, %)。轧制的 Mg-5Zn-0.6Sr 合金的最佳 UTS 为 359 MPa, EL 为 20%。Zr 是另一种有效改善 Mg-Zn 合金力学性能的重要合金元素。据报道, Mg-0.7Zn-0.2Zr-0.7Gd (质量分数, %) 合金经 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热轧和 $440\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火 1 h 后, EL 达到 29%^[72]。Liu 等^[73]研究了 Gd、Y 和 Ce 对 Mg-2Zn 合金的影响。添加

0.2%Gd(质量分数)可获得 27%的较大伸长率,而添加 0.2%Y(质量分数)后合金的 UTS 可达到 230 MPa。相反,Mg-2Zn-0.2Ce(质量分数,%)合金表现出中等力学性能的组合,UTS 为 230 MPa,EL 为 22%。

1.2.3 Mg-Li 系

Li 是最轻的金属,密度为 0.533 g/cm^3 。Mg-Li 合金的优点是超轻。随着 Li 含量的增加,镁合金的相组成逐渐发生变化。当 Li 含量小于 5.5%时,合金为单一密排六方结构的 α -Mg; 当 Li 含量在 5.5%~11%之间时,合金由 HCP 结构的 α -Mg 相和 BCC 结构的 β -Li 相组成。当 Li 含量超过 ~11%时,合金完全为 β -Li 相。Li 的加入提高了镁合金的延展性,但 Mg-Li 二元合金的强度相对较低,限制了其应用。在 Mg-Li 二元合金中加入微量合金元素或者对合金进行塑性变形是改善合金力学性能的有效方法。

Wu 等^[74]通过 Y 和 Ce 的组合添加,开发出一种轧制的 Mg-8Li-1Al 合金,其 UTS 为 279 MPa,EL 为 15.0%,并通过挤压和冷轧制备出高比强度 Mg-16Li-2.5Zn-2.5Er 合金。动态再结晶导致挤压过程中的细晶强化,冷轧后,引入高密度位错并和均匀分布第二相颗粒进一步导致加工硬化和弥散强化^[75]。Guo 等^[76]发现双相 Mg-9.5Li-1 Zn 合金在大应变冷轧后 β -Li 相转化为了 α -Mg 相,高密度应变诱导相变在不牺牲延性的情况下提高了屈服强度。因此,

应变诱导相变是改善双相镁合金力学性能的有效方法。Yang 等^[77]研究了挤压 Mg-6Li-0.3Zn-0.6Y 合金的微观组织和力学行为。结果表明,Mg-6Li-0.3Zn-0.6Y 合金的微观结构由 α -Mg β -Li、W-Mg₃Zn₃Y₂ 相和 X-Mg₁₂ZnY 相组成,挤压 Mg-6Li-0.3Zn-0.6Y 合金的 UTS 为 225 MPa,EL 为 18%。并且 Y 和 Zn 的共添加可以提高长周期有序堆垛相挤压 Mg-6.5Li 合金的耐腐蚀性^[78]。Michael 等^[79]通过铸造+淬火制备了一种高比强度为 $\sim 350 \text{ kN m kg}^{-1}$ 的体心立方 Mg-14Li-7Al 合金。他们提出了一种用于超轻镁合金的旋节分解强化机制,其特定屈服强度几乎超过了所有其他工程合金,为旋节分解提供了令人信服的形态学、化学、结构和热力学证据,并表明旋节区和基体之间弥漫过渡区的晶格失配是提高该类合金屈服强度的主要因素。Yang 等^[80]利用旋转模锻将大量的孪晶和堆垛断层引入 Mg-4Li 合金的粗晶粒中,成功制备了一种 UTS 为 409 MPa 的块状 Mg-4Li-3Al-3Zn 合金。图 5 为锻造镁锂合金的示意图和机械性能。

Cao 等^[81]通过在 300 °C 下进行 77.3%的大变形热压缩并随后进行 60%的冷轧,获得了高强度(299 MPa)和良好伸长率(15.7%)的 Mg-7.28Li-2.19Al-0.091Y 合金。Ji 等^[82]通过 100 °C 热挤压和随后的冷轧,获得了高比强度的 Mg-16Li-2.5Zn-2.5Er 合金,其 UTS 为 234 MPa,YS 为 225 MPa,EL 为 26%。Meng 等^[83]

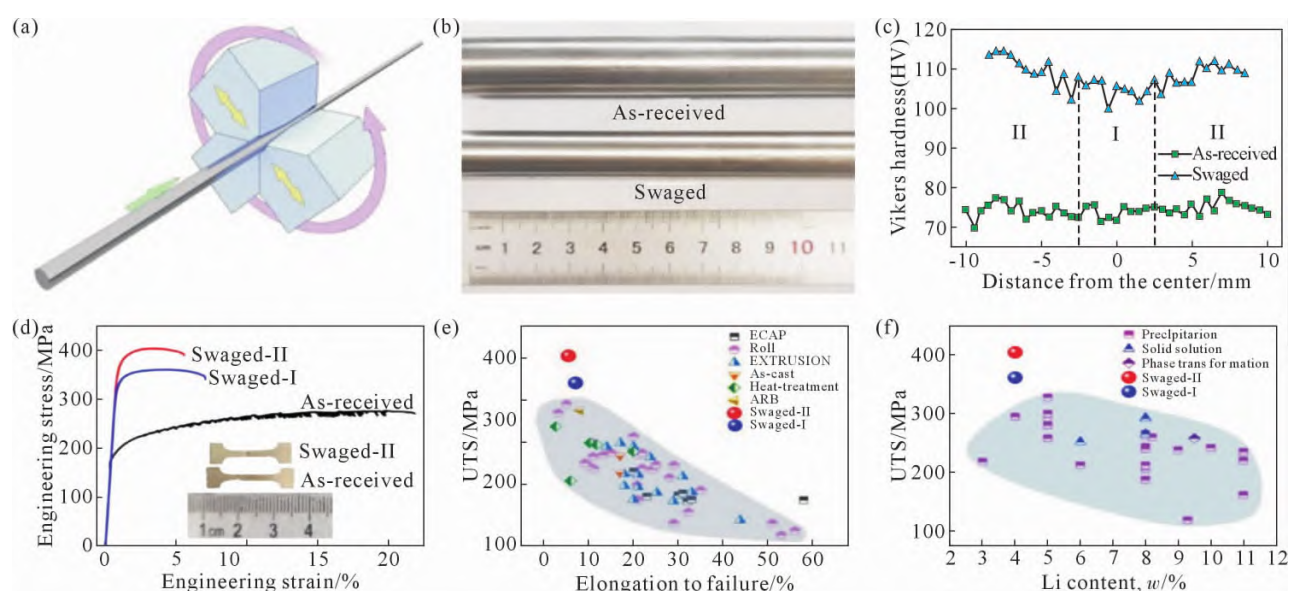


图 5 锻造镁锂合金的旋锻技术示意图和机械性能:(a) 旋锻技术示意图,(b) 旋锻前后样品图,(c) 从试样中心到两边缘的维氏硬度,(d) 未旋锻和旋锻试样的拉伸曲线,(e) 本研究与文献报道的 UTS 和断后伸长率的比较,(f) Mg-Li-X 合金不同强化机制下 UTS 与 Li 含量的关系图^[80]

Fig.5 Schematic illustration of the rotary swaging technique and mechanical properties of the swaged Mg-Li alloys: (a) schematic diagram of the rotary swaging technique, (b) diagram of the sample before and after rotary swaging, (c) Vickers hardness from the centre of the specimen to both edges, (d) tensile curves of the unswaged and rotary swaged specimens, (e) comparison of UTS and elongation after break in this study with those reported in the literature, (f) plot of UTS vs. Li content for different strengthening mechanisms of the Mg-Li-X alloy^[80]

对 Mg-8Li-1Al 合金进行了 280 °C 热挤压,随后进行 200 °C 的热轧工艺,通过细化晶粒和加工硬化的方法,获得了 UTS 为 313.9 MPa 的 Mg-Li 合金。Zheng 等^[84]研究了 Mg-Li 合金在传统两层累积叠轧焊(two-layer accumulative roll bonding, TARB)和四层累积叠轧焊(four-layer accumulative roll bonding, FARB)过程中的几何变化和数学关系,发现与铸态 Mg-14Li-3Al-2Gd 相比,经 ARB 处理的板材的屈服强度和抗拉强度显著提高。TARB6 和 FARB4 板材的屈服强度分别为 (201.6±4.7) MPa 和 (231.6±3.8) MPa, 分别提高了 209.6%和 240.7%。TARB 和 FARB 过程示意图如图 6 所示。

1.2.4 Mg-RE 系

Gd 在 Mg 中的溶解度在 819 K 时高达 23.5% (质量分数)。因此,Gd 的加入可以产生明显的固溶强化效果。Liu 等^[85]通过旋锻和时效工艺制备了纳米

晶 Mg-8Gd-3Y-0.4Zr 合金,其 YS 为 650 MPa,UTS 为 710 MPa,如图 7 所示。主要的强化机理是纳米晶粒强化。这项工作提供了一种简单且低成本的生产技术来制造块状纳米晶镁合金。

Du 等^[86]通过热挤压、预变形和两级时效处理,研制出超高强度和延展性的 Mg-12Gd-1Er-1Zn-0.9Zr(质量分数,%)合金,其力学性能如图 8 所示。预变形会引入高密度位错,导致加工硬化并在两阶段时效期间诱导沉淀。该研究为开发具有高强度和延展性协同作用的镁合金提供了一种有效的途径。

Yu 等^[87]通过挤压和后续两步时效处理制备了一种高强度 Mg-9Gd-3Nd-1Zn-1Sn-0.5Zr(质量分数,%)合金,其 UTS 为 462 MPa,YS 和 EL 分别为 392 MPa 和 4.2%。高强度主要是由于 β' 相和 LPSO 相数量的增加。Liu 等^[88]通过等通道挤压和时效处理,开发出了高强度和延展性优异的 Mg-10.6Gd-2Ag (质量分

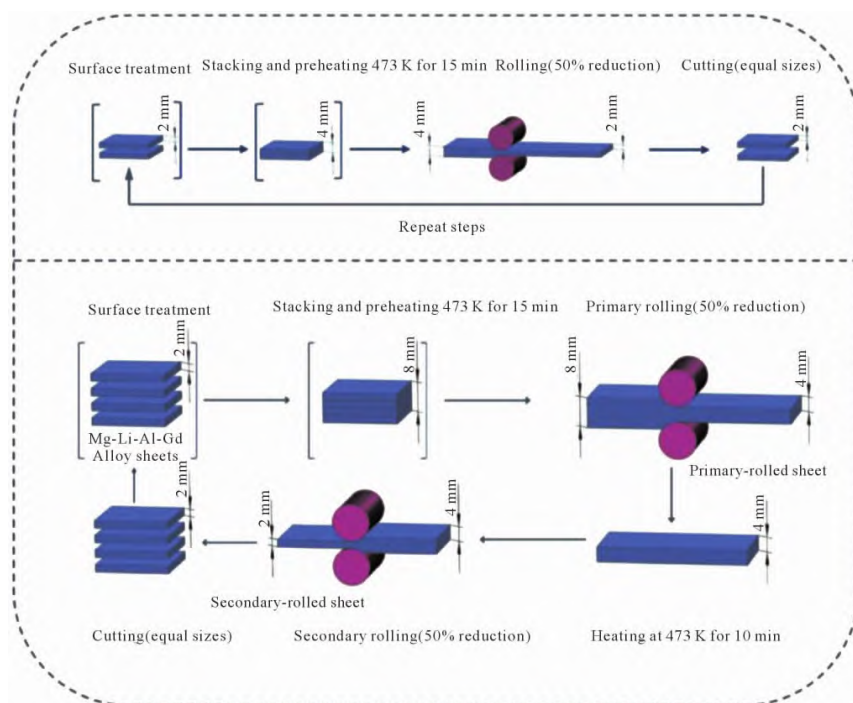


图 6 累积叠轧焊流程示意图:(a) TARB,(b) FARB^[84]

Fig.6 Process diagram of accumulative roll bonding: (a) TARB, (b) FARB^[84]

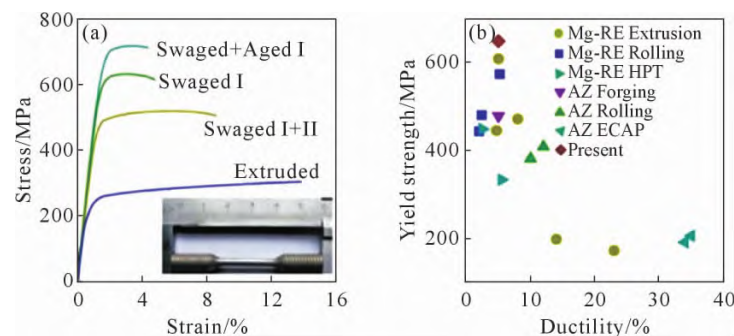


图 7 Mg-8Gd-3Y-0.4Zr Mg 合金的拉伸性能:(a)拉伸应力-应变曲线,(b)加工镁合金的屈服强度与延展性的比较^[85]

Fig.7 Tensile properties of the Mg-8Gd-3Y-0.4Zr Mg alloys: (a) tensile stress-strain curves, (b) comparison of yield strength versus ductility of processed Mg alloys^[85]

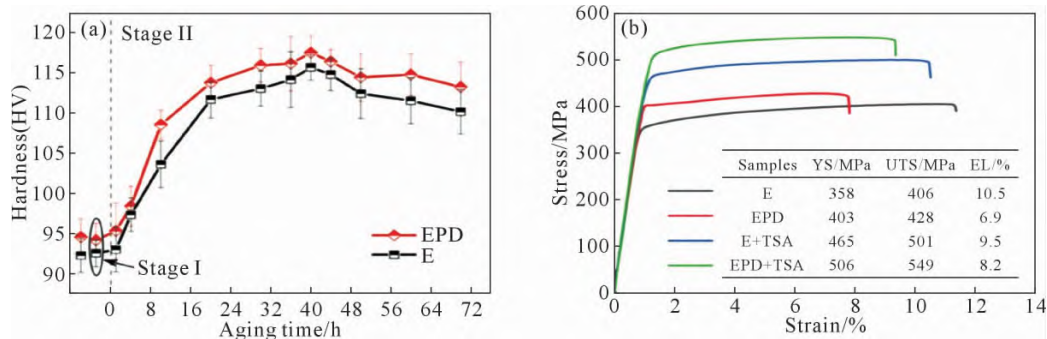


图 8 超高强 Mg-12Gd-1Er-1Zn-0.9Zr 合金的力学性能:(a)时效硬化曲线,(b)拉伸工程应力-应变曲线^[86]
Fig.8 Mechanical properties of ultrahigh strength Mg-12Gd-1Er-1Zn-0.9Zr alloy: (a) age-hardening behavior, (b) tensile engineering stress-strain curves^[86]

数,%)合金,其 UTS 为 460 MPa,延展性适中(8.9%)。精细和完整的动态再结晶微观结构提高了合金的延展性。Zhen 等^[89]通过交替时效工艺提高了 Mg-9.5Gd-4Y-2.2Zn-0.5Zr(质量分数,%)合金的综合力学性能,使其 YS 达到 425 MPa,UTS 达到 493 MPa,EL 为 11.2%。此外,Tong 等^[90]通过多向锻造和时效处理获得了具有超高 YS(417 MPa)和高塑性(12.9%)的 Mg-8.2Gd-3.8Y-1.0Zn-0.4r(质量分数,%)合金。Li 等^[91]通过时效处理实现了挤压 Mg-13Gd 合金强度和塑性的同时提高,其 YS 为 400 MPa 和 EL 为 15%,主要归因于在以动态再结晶和细晶粒为主的结构中形成了高密度纳米级 β 析出物和一定比例的无沉淀区。Wang 等^[92]通过在预时效处理过程中改变动态再结晶行为,开发了强度和延展性平衡的 Mg-Gd-Y-Zn-Mn 合金。Mg-9.2Gd-4.4Y-1Zn-0.8Mn 的 UTS、YS 和 EL 分别达到 455 MPa、382 MPa 和 11%,如图 9 所示。特殊的双峰结构,强纤维组织, β -Mg₂(Gd,Y)颗粒、层状和块状 LPSO 相提高了合金的机械性能。

Y 和 Nd 在 Mg 中具有较大的溶解度,可以通过改变变形机制的相对活性和再结晶机制之间的相互作用来改变合金的力学性能。Lei 等^[93]考察了 Y 对 Mg-4Gd-0.5Zr 合金组织和力学性能的影响。结果表明,随着 Y 含量从 0%增加到 1.2%,铸态和挤压态合金的晶粒尺寸逐渐减小,而最大织构强度明显

减小。纳米级 Mg(Gd,Y)颗粒在相对较高的 Y 含量下开始析出。设计的 Mg-4Gd-0.5Zr-xY($x=0,0.5,0.8$ 和 1.2,质量分数,%)合金表现出出色的延展性和中等强度。随着 Y 含量从 0%增加到 1.2%,Mg-4Gd-0.5Zr 基合金的伸长率沿挤压方向从 44.6%略微降低到 39.0%,而屈服强度从 87.9 MPa 大幅提高到 134.1 MPa。结果表明,固溶强化与细晶强化是主要的强化机理,含 Y 合金的高延展性主要与锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移的激活相关。Ma 等^[94]在含有 LPSO 相的 Mg-3.16Y-1.85Zn-0.37Zr(质量分数)合金上进行了不同的挤压工艺。考察了挤压参数对合金组织、力学性能和阻尼能力的影响。结果表明,在室温下,360 °C、挤压比为 9:1 的合金表现出良好的综合性能,YS 为 280 MPa,UTS 为 330 MPa,EL 为 21%,阻尼值 Q 为 0.023(应变幅值 $\varepsilon=10$)。Chen 等^[95]通过 ECAP 加工技术将 Mg-6.8Y-2.5Zn 合金的晶粒尺寸细化到纳米级(330 nm),使得合金强度显著提高,极限抗拉强度和屈服强度为 450 MPa 和 400 MPa,研究中发现 LPSO 结构有助于在 ECAP 加工过程中形成超细晶粒。

Huang 等^[96]利用原位 TEM 表征和分子动力学(molecule dynamics, MD)模拟阐明了时效态 Mg-2.4%Nd(质量分数)挤压棒中位错-析出相的相互作用。结果表明,基面位错在变形过程中可以直接剪切 β'' 相,而 β_1 相由于反相边界的产生而难以绕过。研

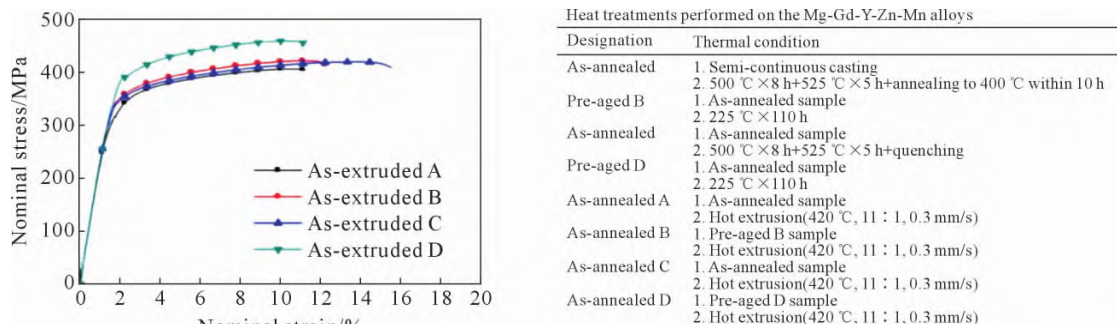


图 9 环境温度下沿挤压方向拉伸样品的力学性能^[92]
Fig.9 Tensile properties of the as-extruded samples tested along with ED at ambient temperature^[92]

究发现,Mg-2.4%Nd(质量分数)合金含有大量的 β_1 析出相,比只有 β'' 析出相的合金具有更高的延展性。Lv等^[7]在挤压的Mg-6Zn-0.5Mn(ZM60)中加入少量Nd(0.6%,质量分数)和Er(0.3%,质量分数),开发出一种新型变形镁合金。在ZM60-0.6Nd-0.3Er合金中,由于位错的积累,形成了大量的 β'_1 (Mg₄Zn₇)棒状析出相和厚的 β''_2 (MgZn₂)析出相,阻碍了动态再结晶晶粒的生长。相应的合金YS、UTS和EL分别从210.9 MPa、298.5 MPa和11.8%(ZM60)提高到245.8 MPa、347.2 MPa和16.3%(ZM60-0.6Nd-0.3Er)。Sheng等^[8]研究了挤压态Mg-4Zn-0.6Y-0.5Nd合金在不同退火工艺下的静态再结晶过程。结果表明,挤压后的Mg-4Zn-0.6Y-0.5Nd合金主要为较大的拉长晶粒,并具有一定体积分数的动态再结晶晶粒。挤压态Mg-4Zn-0.6Y-0.5Nd合金在250℃退火后的屈服强度为174 MPa,抗拉强度为258 MPa,伸长率为14.5%。

2 总结与展望

本文简要回顾了Mg-Al-Zn、Mg-RE、Mg-Li等体系的高强度铸造镁合金和高强度变形镁合金的最新发展,讨论了与镁合金机械性能相关的关键问题,这些问题需要克服才能实现更广泛和更直接的应用。然而,当前存在一些悬而未决的问题,未来获得更高强度的镁合金仍建议从以下几方面开展研究:

(1)需要进一步研究,以更好地了解各种合金元素和微合金元素对铸造镁合金的微观结构、机械性能的影响机制,借助先进手段(CALPHAD计算)优化合金成分。

(2)开发优异的铸造净化工艺,降低铸造镁合金的杂质元素,同时也需要发展部分结合熔剂提纯和无溶剂提纯合金的方法的优势组合最佳的复合提纯工艺。

(3)Mg-Li体系合金的强度相比Mg-RE体系仍存在较大差距,未来应更系统的研究Mg-Li,铸造工艺、工艺参数优化、铸件缺陷等方面系统研究。同时应积极开发具有高强度高模量的镁锂合金。

参考文献:

- [1] MAQBOOL A, KHAN N Z, SIDDIQUEE A N, et al. Overcoming challenges in using magnesium-based materials for industrial applications using friction-stir engineering [J]. Materials Science and Technology, 2022. DOI:10.1080/02670836.2022.2158539.
- [2] SUH B C, SHIM M S, SHIN K S, et al. Current issues in magnesium sheet alloys: Where do we go from here? [J]. Scripta Materialia, 2014, 84-85:1-6.
- [3] HOMMA T, KUNITO N, KAMADO S. Fabrication of extraordinary high-strength magnesium alloy by hot extrusion [J]. Scripta Materialia, 2009, 61(6): 644-647.
- [4] TRANG T T T, ZHANG J H, KIM J H, et al. Designing a magnesium alloy with high strength and high formability [J]. Nature Communications, 2018, 9: 2522.
- [5] NIE J F. Precipitation and hardening in magnesium alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43: 3891-3939.
- [6] MONTANI M, DEMIR A G, MOSTAED E, et al. Processability of pure Zn and pure Fe by SLM for biodegradable metallic implant manufacturing [J]. Rapid Prototyping Journal, 2017, 23(3): 514-523.
- [7] NING Z L, WANG H, LIU H H, et al. Effects of Nd on microstructures and properties at the elevated temperature of a Mg-0.3Zn-0.32Zr alloy [J]. Materials & Design, 2010, 31(9): 4438-4444.
- [8] STJOHN D H, QIAN M, EASTON M A, et al. Grain refinement of magnesium alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36: 1669-1679.
- [9] ZHANG J, YUAN F Q, DU Y. Enhanced age-strengthening by two-step progressive solution treatment in an Mg-Zn-Al-Re alloy [J]. Materials & Design, 2013, 52: 332-336.
- [10] WANG X D, DU W B, LIU K, et al. Microstructure, tensile properties and creep behaviors of as-cast Mg-2Al-1Zn-xGd(x=1, 2, 3, and 4wt.%) alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 522: 78-84.
- [11] LIU B S, WANG H H, ZHANG Y Z, et al. The influence of adding samarium on the microstructure, mechanical performance and corrosion behavior of as-extruded AZ41 alloys [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2021, 150: 109851.
- [12] JIANG N, CHEN L, MENG L G, et al. Effect of neodymium, gadolinium addition on microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy [J]. Journal of Rare Earths, 2016, 34(6): 632-637.
- [13] PARK S H, JUNG J G, YOON J H, et al. Influence of Sn addition on the microstructure and mechanical properties of extruded Mg-8Al-2Zn alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 626: 128-135.
- [14] KIM S H, BAE S W, LEE S W, et al. Microstructural evolution and improvement in mechanical properties of extruded AZ31 alloy by combined addition of Ca and Y [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 725: 309-318.
- [15] PAN F S, YANG M B, CHEN X H. A review on casting magnesium alloys: modification of commercial alloys and development of new alloys [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(12): 1211-1221.
- [16] YANG Y, LIU Y B, QIN S Y, et al. High cycle fatigue properties of die-cast magnesium alloy AZ91D with addition of different concentrations of cerium [J]. Journal of Rare Earths, 2006, 24(5): 591-595.
- [17] YANG Y, LI X S. Influence of neodymium on high cycle fatigue behavior of die cast AZ91D magnesium alloy [J]. Journal of Rare Earths, 2010, 28(3): 456-460.
- [18] ZHANG J H, NIU X D, QIU X, et al. Effect of yttrium-rich misch metal on the microstructures, mechanical properties and corrosion

- behavior of die cast AZ91 alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 471(1-2): 322-330.
- [19] YUAN G Y, SUN Y S, DING W J. Effects of bismuth and antimony additions on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 308: 38-44.
- [20] CUI X P, LIU H F, MENG J, et al. Microstructure and mechanical properties of die-cast AZ91D magnesium alloy by Pr additions[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: s435-s438.
- [21] AÇIKGÖZ Ş, ŞEVIK H, KURNAZ S C. Influence of silver addition on the microstructure and mechanical properties of squeeze cast Mg-6Al-1Sn-0.3Mn-0.3Ti [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(27): 7368-7372.
- [22] SU G H, ZHANG L, CHENG L R, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-6Al-0.3Mn-xY alloys prepared by casting and hot rolling[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(3): 383-389.
- [23] YANG M B, SHEN J, PAN F S. Effect of Sb on microstructure of semi-solid isothermal heat-treated AZ61-0.7Si magnesium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(1): 32-39.
- [24] YANG M B, PAN F S, CHENG L. Effects of minor Sr on as-cast microstructure and mechanical properties of ZA84 magnesium alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 19: 1043-1050.
- [25] WU G H, WANG C L, SUN M, et al. Recent developments and applications on high-performance cast magnesium rare-earth alloys [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 9(1): 1-20.
- [26] NING Z L, YI J Y, QIAN M, et al. Microstructure and elevated temperature mechanical and creep properties of Mg-4Y-3Nd-0.5Zr alloy in the product form of a large structural casting[J]. Materials & Design, 2014, 60: 218-225.
- [27] HE S M, ZENG X Q, PENG L M, et al. Microstructure and strengthening mechanism of high strength Mg-10Gd-2Y-0.5Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 427(1-2): 316-323.
- [28] SU Z J, LIU C M, WAN Y C. Microstructures and mechanical properties of high performance Mg-4Y-2.4Nd-0.2Zn-0.4Zr alloy [J]. Materials & Design, 2013, 45: 466-472.
- [29] FU P G, PENG L M, JIANG H Y, et al. Tensile properties of high strength cast Mg alloys at room temperature: A review[J]. China Foundry, 2014, 11(4): 277-286.
- [30] FU P G, PENG L M, JIANG H Y, et al. Fracture behavior and mechanical properties of Mg-4Y-2Nd-1Gd-0.4Zr(wt.%) alloy at room temperature[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 486(1-2): 572-579.
- [31] ZHANG H H, ZHANG L, WU G H, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-3.0Y-2.5Nd-1.0Gd-xZn-0.5Zr alloys produced by metallic and sand mold casting[J]. Journal of Materials Research, 2017, 32: 3191-3201.
- [32] ZHANG H H, FAN J F, ZHANG L, et al. Effect of heat treatment on microstructure, mechanical properties and fracture behaviors of sand-cast Mg-4Y-3Nd-1Gd-0.2Zn-0.5Zr alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 677: 411-420.
- [33] LIU X B, CHEN R S, HAN E H. Effects of ageing treatment on microstructures and properties of Mg-Gd-Y-Zr alloys with and without Zn additions[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 465(1-2): 232-238.
- [34] ZHANG Y, WU Y J, PENG L M, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of an ultra-high strength casting Mg-15.6Gd-1.8Ag-0.4Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 615: 703-711.
- [35] MINETA T, HASEGAWA K, SATO H. High strength and plastic deformability of Mg-Li-Al alloy with dual BCC phase produced by a combination of heat treatment and multi-directional forging in channel die[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 773: 138867.
- [36] CHANG T C, WANG J Y, CHU C L, et al. Mechanical properties and microstructures of various Mg-Li alloys[J]. Materials Letters, 2006, 60(27): 3272-3276.
- [37] WANG J H, WU R Z, FENG J, et al. Influence of rolling strain on electromagnetic shielding property and mechanical properties of dual-phase Mg-9Li alloy[J]. Materials Characterization, 2019, 157: 109924.
- [38] SUN Y H, WANG R C, REN J, et al. Microstructure, texture, and mechanical properties of as-extruded Mg-xLi-3Al-2Zn-0.2Zr alloys (x=5, 7, 8, 9, 11 wt%)[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 755: 201-210.
- [39] AGNEW S R, YOO M H, TOMÉ C N. Application of texture simulation to understanding mechanical behavior of Mg and solid solution alloys containing Li or Y [J]. Acta Materialia, 2001, 49(20): 4227-4289.
- [40] WU L B, LIU X H, WU R Z, et al. Microstructure and tensile properties of Mg-Li-Al-Zn based alloys with Ce addition[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(4): 779-785.
- [41] PENG X, XU S H, DING D H, et al. Microstructural evolution, mechanical properties and corrosion behavior of as-cast Mg-5Li-3Al-2Zn alloy with different Sn and Y addition[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 72: 16-22.
- [42] JI H, PENG X, ZHANG X L, et al. Balance of mechanical properties of Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Y alloy by solution and low-temperature aging treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 791: 655-664.
- [43] SONG W J, LIU J, HE S, et al. Microstructure and mechanical properties of as-cast ultralight and high strength Mg-10Li-3Al-3Zn-xY alloy with multi-precipitates[J]. Materials Characterization, 2022, 189: 111972.
- [44] DONG T S, ZHENG X D, WANG T, et al. Effect of Nd content on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-12Li-3Al alloy[J]. China Foundry, 2018, 14(4): 279-285.
- [45] LI Y K, ZHA M, JIA H L, et al. Tailoring bimodal grain structure of Mg-9Al-1Zn alloy for strength-ductility synergy: Co-regulating effect from coarse Al₃Y and submicron Mg₁₇Al₁₂ particles[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 9(5): 1556-1566.
- [46] ZHANG Y, JIANG H T, KANG Q, et al. Microstructure evolution and mechanical property of Mg-3Al alloys with addition of Ca and Gd during rolling and annealing process[J]. Journal of Magnesium

- and Alloys, 2020, 8(3): 769-779.
- [47] HWANG J H, ZARGARAN A, PARK G, et al. Effect of 1Al addition on deformation behavior of Mg[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, 9(2): 489-498.
- [48] CHAUDRY U M, HAMAD K, KO Y G. Effect of calcium on the superplastic behavior of AZ31 magnesium alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 815: 140874.
- [49] XU C, WANG J F, CHEN C, et al. Initial micro-galvanic corrosion behavior between Mg₂Ca and α -Mg via quasi-in situ SEM approach and first-principles calculation[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021-01. DOI:10.1016/j.jma.2021.06.017.
- [50] ZHA M, ZHANG H M, WANG C, et al. Prominent role of a high-volume fraction of Mg₁₇Al₁₂ particles on tensile behaviors of rolled Mg-Al-Zn alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 728: 682-693.
- [51] ZHANG Z Y, YU H S, CHEN G, et al. Correlation between microstructure and tensile properties in powder metallurgy AZ91 alloys[J]. *Materials Letters*, 2011, 65(17-18): 2686-2689.
- [52] SHAN Z H, YANG J, FAN J F, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of an AZ61 alloy processed with TS-ECAP and EPT[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 780: 139195.
- [53] XU B Q, SUN J P, YANG Z Q, et al. Microstructure and anisotropic mechanical behavior of the high-strength and ductility AZ91 Mg alloy processed by hot extrusion and multi-pass RD-ECAP[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 780: 139191.
- [54] ZHANG H, ZHA M, TIAN T, et al. Prominent role of high-volume fraction Mg₁₇Al₁₂ dynamic precipitations on multimodal microstructure formation and strength-ductility synergy of Mg-Al-Zn alloys processed by hard-plate rolling (HPR)[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 808: 140920.
- [55] ZHANG Z J, YUAN L, SHAN D B, et al. The quantitative effects of temperature and cumulative strain on the mechanical properties of hot-extruded AZ80 Mg alloy during multi-directional forging [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 827: 142036.
- [56] ZOU J F, MA L F, ZHU Y C, et al. Deformation mechanism of ZK60 magnesium bars during radial forging: Mathematical modeling and experimental investigation[J]. *Materials Characterization*, 2021, 179: 111321.
- [57] LIAO H B, ZHAN M Y, LI C B, et al. Grain refinement of Mg-Al alloys inoculated by MgAl₂O₄ powder[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, 9(4): 1211-1219.
- [58] HU F P, ZHAO S J, GU G L, et al. Strong and ductile Mg-0.4Al alloy with minor Mn addition achieved by conventional extrusion [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 795: 139926.
- [59] HOMMA T, NAKAWAKI S, KAMADO S. Improvement in creep property of a cast Mg-6Al-3Ca alloy by Mn addition[J]. *Scripta Materialia*, 2010, 63(12): 1173-1176.
- [60] JIANG Z T, JIANG B, YANG H, et al. Influence of the Al₂Ca phase on microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Ca alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 647: 357-363.
- [61] NAKATA T, XU C, AJIMA R, et al. Strong and ductile age-hardening Mg-Al-Ca-Mn alloy that can be extruded as fast as aluminum alloys[J]. *Acta Materialia*, 2017, 130: 261-270.
- [62] ATWELL D L, BARNETT M R. Extrusion limits of magnesium alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, 38: 3032-3041.
- [63] DAVIS C, BARNETT M. Expanding the extrusion limits of wrought magnesium alloys[J]. *JOM*, 2004, 56: 22-24.
- [64] ZAREIAN Z, EMAMY M, MALEKAN M, et al. Tailoring the mechanical properties of Mg-Zn magnesium alloy by calcium addition and hot extrusion process[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 774: 138929.
- [65] TONG L B, ZHANG Q X, JIANG Z H, et al. Microstructures, mechanical properties and corrosion resistances of extruded Mg-Zn-Ca-xCe/La alloys[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 62: 57-70.
- [66] ZAREIAN Z, EMAMY M, MALEKAN M, et al. Tailoring the mechanical properties of Mg-Zn magnesium alloy by calcium addition and hot extrusion process[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 774: 138929.
- [67] HORKY J, BRYLA K, KRYSZIAN M, et al. Improving mechanical properties of lean Mg-Zn-Ca alloy for absorbable implants via Double Equal Channel Angular Pressing (D-ECAP)[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 826: 142002.
- [68] LI L, WANG Y, ZHANG C C, et al. Ultrafine-grained Mg-Zn-Yb-Zr alloy with simultaneously improved strength and ductility processed by axisymmetric hot extrusion[J]. *Vacuum*, 2020, 173: 109157.
- [69] LI J C, HUANG Y X, WANG F F, et al. Enhanced strength and ductility of friction-stir-processed Mg-6Zn alloys via Y and Zr co-alloying[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 773: 138877.
- [70] CHEN X, ZHANG D F, XU J Y, et al. Improvement of mechanical properties of hot extruded and age treated Mg-Zn-Mn-Ca alloy through Sn addition[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 850: 156711.
- [71] YAN H G, GONG X L, CHEN J H, et al. Microstructure, texture characteristics, mechanical and bio-corrosion properties of high strain rate rolled Mg-Zn-Sr alloys[J]. *Metals and Materials International*, 2021, 27: 2249-2263.
- [72] SAMMAN T, LI X. Sheet texture modification in magnesium-based alloys by selective rare earth alloying[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(10-11): 3809-3822.
- [73] LIU P, JIANG H T, CAI Z X, et al. The effect of Y, Ce and Gd on texture, recrystallization and mechanical property of Mg-Zn alloys [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2016, 4(3): 188-196.
- [74] ZHONG F, WU H J, JIAO Y L, et al. Effect of Y and Ce on the microstructure, mechanical properties and anisotropy of as-rolled Mg-8Li-1Al alloy[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2020, 39: 124-134.
- [75] JI Q, WANG Y, WU R Z, et al. High specific strength Mg-Li-Zn-Er alloy processed by multi deformation processes[J]. *Materials Characterization*, 2020, 160: 110135.
- [76] GUO F, JIANG L Y, MA Y L, et al. Strengthening a dual-phase Mg-Li alloy by strain-induced phase transformation at room temperature[J]. *Scripta Materialia*, 2020, 179: 16-19.
- [77] SU J, YANG Y, FU X, et al. Microstructure and mechanical prop-

- erties of duplex structured Mg-Li-Zn-Y alloys [J]. Archives of Foundry Engineering, 2018, 18 (1): 181-185.
- [78] LI J G, YANG Y, DENG H J, et al. Microstructure and corrosion behavior of as-extruded Mg-6.5Li-xY-γZn alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 823: 153839.
- [79] XIN T Z, ZHAO Y H, MAHJOUB R, et al. Ultrahigh specific strength in a magnesium alloy strengthened by spinodal decomposition[J]. Science Advances, 2021, 7(23): eabf3039.
- [80] YANG Y, CHEN X, NIE J F, et al. Achieving ultra-strong Magnesium-lithium alloys by low-strain rotary swaging[J]. Materials Research Letters, 2021, 9(6): 255-262.
- [81] CAO F R, ZHOU B J, DING X, et al. Mechanical properties and microstructural evolution in a superlight Mg-7.28Li-2.19Al-0.091Y alloy fabricated by rolling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 745: 436-445.
- [82] JI Q, WANG Y, WU R Z, et al. High specific strength Mg-Li-Zn-Er alloy processed by multi deformation processes[J]. Materials Characterization, 2020, 160: 110135.
- [83] MENG X R, WU R Z, ZHANG M L, et al. Microstructures and properties of superlight Mg-Li-Al-Zn wrought alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 486(1-2): 722-725.
- [84] ZHENG H P, WU R Z, HOU L G, et al. Mathematical analysis and its experimental comparisons for the accumulative roll bonding (ARB) process with different superimposed layers[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 9(5): 1741-1752.
- [85] WAN Y C, TANG B, GAO Y H, et al. Bulk nanocrystalline high-strength magnesium alloys prepared via rotary swaging [J]. Acta Materialia, 2020, 200: 274-286.
- [86] JIA L Y, DU W B, FU J L, et al. Obtaining ultra-high strength and ductility in a Mg-Gd-Er-Zn-Zr Alloy via extrusion, pre-deformation and two-stage aging[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2021, 34(1): 39-44.
- [87] YAN Z H, YU Y D, QIAN J H, et al. Fabrication of high-strength Mg-Gd-Nd-Zn-Sn-Zr alloy via extrusion and aging[J]. Metals and Materials International, 2021, 27: 4182-4194.
- [88] SUN J P, XU B Q, YANG Z Q, et al. Achieving excellent ductility in high-strength Mg-10.6Gd-2Ag alloy via equal channel angular pressing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 817: 152688.
- [89] ZHENG J, CHEN Z, YAN Z M, et al. An alternating ageing-annealing process for enhancing strength and ductility of a Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 828: 142103.
- [90] TONG L B, CHU J H, SUN W T, et al. Achieving an ultra-high strength and moderate ductility in Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy via a decreased-temperature multi-directional forging [J]. Materials Characterization, 2021, 171: 110804.
- [91] LI R G, DAI Y Q, SONG P F, et al. Simultaneous enhancement of strength and ductility by aging treatment in fine-grained Mg-13Gd alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 818: 141441.
- [92] WANG K, DOU X X, WANG J F, et al. Achieving enhanced mechanical properties in Mg-Gd-Y-Zn-Mn alloy by altering dynamic recrystallization behavior via pre-ageing treatment [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 790: 139635.
- [93] LEI B, WANG C H, JIANG B, et al. Role of Y on the microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Zr alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 861: 144371.
- [94] MA Y J, LIU C M, HUANG Y J, et al. Effect of extrusion parameters on microstructure, mechanical properties and damping capacities of Mg-Y-Zn-Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 935: 168122.
- [95] CHEN B, LIN D L, ZENG X Q, et al. Microstructure and mechanical properties of ultrafine grained $Mg_{97}Y_2Zn_1$ alloy processed by equal channel angular pressing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 440(1-2): 94-100.
- [96] HUANG Z H, YANG C M, ALLISON J E, et al. Dislocation cross-slip in precipitation hardened Mg-Nd alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 859: 157858.
- [97] LV B J, WANG S, XU T W, et al. Effects of minor Nd and Er additions on the precipitation evolution and dynamic recrystallization behavior of Mg-6.0Zn-0.5Mn alloy [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 9(3): 840-852.
- [98] SHENG L Y, DU B N, HU Z Y, et al. Effects of annealing treatment on microstructure and tensile behavior of the Mg-Zn-Y-Nd alloy[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(3): 601-613.