挤压态 AT95-xSb 镁合金高温力学性能及组织分析

马春华^{1a,1b}, 仲志国^{1a,1b}, 赵亚忠², 王维青³, 卢志文^{1a,1b}

(1.南阳师范学院 a.机电工程学院 b.河南省稀土合金材料工程技术研究中心,河南 南阳 473061; 2.南阳理工学院 机械与汽车工程学院,河南 南阳 473004;

3.重庆理工大学 材料科学与工程学院,重庆 400054)

摘要:目的 为使 AT95-xSb 镁合金获得良好的高温力学性能,对挤压态 AT95-xSb (x=0.0, 0.3, 1.0, x 表 示质量分数,%)镁合金的高温力学性能及组织进行研究,以解决镁合金塑性变形能力较差的问题,为提高 镁合金的高温变形性能提供一些新思路。方法 所用合金材料是采用真空感应熔炼炉熔炼,国产 XJ-500 卧 式挤压机挤压制备的 AT95-xSb 镁合金棒材,通过 XRF-1800 CCDE 型 X 射线荧光光谱仪、Rigaku D/max 2500PC X 射线衍射仪、SEM、TEM 及 CMT-5105 电子万能试验机等对挤压态镁合金棒材的成分、物相、 显微组织及高温拉伸性能进行分析。结果 Sb 元素的添加使得 AT95 合金的第二相种类增加,数量增多;随 着元素 Sb 含量的增加及拉伸变形温度的升高,AT95-xSb 镁合金的高温拉伸强度降低,伸长率和屈强比增 大;断口扫描证实拉伸断口主要为韧性断裂,且150℃时拉伸断口的第二相颗粒明显比200℃时数量更多, 尺寸更大。结论 随着元素 Sb 含量的增加,挤压态 AT95-xSb 镁合金高温拉伸强度降低,伸长率和屈强比增 大,很大程度上能够提高镁合金的塑性变形能力。

关键词: AT95-xSb 镁合金; 高温拉伸; 锑; 屈强比; 断口

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.03.009

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2023)03-0081-08

Analysis on High-temperature Mechanical Properties and Microstructure of As-extruded AT95-xSb Magnesium Alloy

MA Chun-hua^{1a,1b}, ZHONG Zhi-guo^{1a,1b}, ZHAO Ya-zhong², WANG Wei-qing³, LU Zhi-wen^{1a,1b}

(1. a. School of Mechanical and Electronic Engineering, b. Henan Rare-earth Alloy Material Engineering and Engineering Research Center, Nanyang Normal University, Henan Nanyang 473061, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engi-

Received: 2022-08-31

作者简介:马春华(1980—),女,博士,副教授,主要研究方向为高强高塑镁合金的研发和强化机理,生物医用镁合金的降解,合金的相平衡与相变,材料热力学模拟预测与优化评估。

收稿日期: 2022-08-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52171157); 河南省自然科学基金(212300410377); 河南省重点研发与推广专项(科 技攻关)项目(212102210437)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52171157); Natural Science Foundation of Henan Province of China (212300410377); The Science and Technology Key Projects of Henan Province, China (212102210437)

Biography: MA Chun-hua (1980-), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: development and strengthening mechanism of high-strength and high-plasticity magnesium alloys, degradation of biomedical magnesium alloys, phase equilibrium and phase transformation of alloys, and thermodynamic simulation prediction and optimization evaluation of materials.

通讯作者:卢志文(1963—),男,博士,教授,主要研究方向为镁合金及成形加工,稀土合金材料及其应用。

Corresponding author: LU Zhi-wen (1963-), Male, Doctor, Professor, Research focus: magnesium alloy and forming processing, rare earth alloy materials and their applications.

引文格式:马春华, 仲志国, 赵亚忠, 等. 挤压态AT95-xSb镁合金高温力学性能及组织分析[J]. 精密成形工程, 2023, 15(3): 81-88.

MA Chun-hua, ZHONG Zhi-guo, ZHAO Ya-zhong, et al. Analysis on High-temperature Mechanical Properties and Microstructure of As-extruded AT95-xSb Magnesium Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(3): 81-88.

neering, Nanyang Institute of Technology, Henan Nanyang 473004, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

ABSTRACT: The work aims to study the high-temperature mechanical properties and microstructure of as-extruded AT95-*x*Sb (*x*=0.0, 0.3 and 1.0, wt.%) magnesium alloy to solve the problem of poor plastic deformation ability of magnesium alloy, in order to obtain good high-temperature mechanical properties of AT95-*x*Sb magnesium alloy and provide some new ideas for improving the high-temperature deformation properties of magnesium alloy. The alloy material used was the AT95-*x*Sb magnesium alloy bar prepared by vacuum induction melting furnace and extruded by domestic XJ-500 horizontal extruder. XRF-1800 CCDE X-ray fluorescence spectrometer, RIGAKU D/max 2500PC X-ray diffractometer, SEM, TEM and CMT-5105 electronic universal testing machine were used to analyze the actual chemical compositions, phase, microstructure and high-temperature tensile properties of as-extruded magnesium alloy bar. The addition of element Sb increased the type and quantity of the second phase of AT95 alloy. With the increase of Sb content and tensile temperature, the high-temperature tensile strength of AT95-*x*Sb magnesium alloy decreased and the elongation and yield ratio increased. Fracture scanning confirmed that the tensile fracture was ductile fracture, and the number and size of the second phase particles in 150 °C tensile fracture was more than that in 200 °C tensile fracture. It is concluded that with the increase of Sb content, the tensile strength of as-extruded AT95-*x*Sb magnesium alloy at high temperature decreases, and the elongation and yield ratio increases, which can improve the plastic deformation increases, which can improve the plastic deformation ability of magnesium alloy to a great extent.

KEY WORDS: AT95-xSb magnesium alloy; high-temperature tensile; Sb; yield strength ratio; fracture

镁合金是迄今为止开发的最轻的金属结构材料, 具有低密度、高比强度、高比刚度及可回收性等优点, 在交通、医用及电子等工业领域中具有广阔的应用前 景^[1-5],尤其在高性能汽车上的应用具有很大潜力^[6-7]。 近年来,高温镁合金在许多领域呈现出巨大的应用潜 力,提高镁合金的高温性能已成为镁合金应用的关键 问题^[8-10]。锑元素的添加对镁合金力学性能有着显著 的成效,因此近年来备受科研工作者的关注^[11-14]。 Mg-Al 合金仍然是目前值得深入研究的代表性轻合 金^[15-18],具有很好的应用前景,元素 Sb 作为工业上 常用的变质剂,因加入镁合金中可以形成 Mg₃Sb₂相 而广受关注^[19-21]。Sb 元素的加入使 Mg₃Sb₂颗粒相形 核,从而使 Mg₂Si 金属间相的形态由汉字状变为多边 形,改善了其拉伸性能^[22-24]。因此,与基体合金相比, 向镁合金中添加锑元素可以改善合金的微观结构,从 而提高合金抗拉性能和韧性^[23]。而元素 Sn 和 Si 在元 素周期表中属于同族元素,元素 Mg 和 Sn 可以形成 Mg₂Sn 相。Sb 元素的加入可使细小的 Mg₃Sb₂颗粒分 布在晶界细化 Mg17Al12 析出物中,形成良好的微观组 织结构而改善其抗拉性能^[24]。有研究人员报道,由于 Mg₃Sb₂相可以作为熔体的异相成核中心,Sb 元素的 添加可显著细化 α-Mg 基体相的晶粒尺寸^[20-21]。有研 究结果^[25-26]表明,Sb 元素的加入可以降低镁合金的 织构,细化 Mg-9Al-5Sn 镁合金的晶粒,具有较好的 室温力学性能,该合金体系中有 Mg₂Sn 和 Mg₃Sb₂等 稳定的高温合金相,因此推测该合金体系将呈现良好 的高温性能,每种晶格类型的金属都有特定的滑移 系, 滑移系数量不同, 晶体结构不同, 滑移系也不相

同;晶体的滑移系越多,滑移越容易进行,塑性也就 越好。镁合金属于对称性低的密排六方晶格结构,室 温滑移系少,室温塑性变形能力较差,这成为限制镁 合金应用的因素之一,镁合金在高温变形时,随着温 度的升高可以开启一些其他滑移系(如非基面滑移 系、<c+a>滑移系),很大程度上能够提高镁合金的塑 性变形能力^[27-28]。同时,由于激活了基面滑移系和棱 柱面滑移系,晶界滑移也得以启动,可以获得较高的 塑性变形,所以学者们将目光转向镁合金的高温变形 方面,文中基于 Mg-9Al-5Sn 镁合金进行高温性能研究。

1 试验

1.1 试验材料

试验材料来自于本课题组熔炼挤压制备的 ¢18 mm AT95-xSb(x=0.0,0.3,1.0,x 表示质量分 数,%)镁合金挤压棒材,合金熔炼采用真空感应炉 熔炼,所制备的铸锭放入箱式炉内进行均匀化处理, 以 0.68 ℃/min 的速率随炉升温至 420 ℃保温 12 h 后 空冷。在热挤压之前,将均匀化处理过的铸锭和挤压 模具在 300 ℃预热 2 h 并进行正向挤压,挤压比为 28.2,平均挤压速度为 10 mm/s。

1.2 试验方法

选取 AT95-xSb 镁合金挤压棒材的 3 个代表性合 金样品 AT95-xSb,分别在 25、150、200 ℃下进行拉 伸力学性能测试,拉伸速度为 2 mm/min,以得到具 有代表性的试验数据。高温拉伸试验的试样采用车床 加工,尺寸参照 GB/T 4338—1995,试样的加工图如 图 1 所示。拉伸试验采用新三思 CMT-5105 微机控制 电子万能试验机进行,并采用匀速单向位移拉伸,拉 伸速率为 2 mm/min,为保证试验数据的准确性,每 个同成分的合金加工 6 个高温拉伸试棒,测试结果取 平均值。合金的化学成分采用 X 射线荧光光谱仪 (XRF-1800 CCDE)进行测试,结果如表 1 所示。 采用 X 射线衍射仪(Rigaku D/max 2500PC)对合金 样品进行物相分析,物相测试参数:射线为 CuKα; 石墨单色器,加速电压为 40 kV 扫描角度为 10°~90°; 扫描速度为 4 (°)/min;灯丝电流为 250 mA;步长为 0.02 min⁻¹,工作电压为 60 kV。采用扫描电子显微镜 (TESCAN VEGA II LMU)进行断口分析,加速电 压为 0.2~30 kV,电子束电流为 1 pA~2 μA。



图 1 高温拉伸试棒加工图(单位:mm) Fig.1 Processing drawing of high-temperature tensile bar (unit: mm)

表 1 AT95--xSb 镁合金的化学成分 Tab.1 Chemical composition of AT95-xSb magnesium alloy wt.%

Code	Alloy	Nominal composition				Actual composition			
		Al	Sn	Sb	Mg	Al	Sn	Sb	Mg
1	AT95	9.0	5.0	0.0	Bal.	10.19	5.10	0.00	Bal.
2	AT95-0.3Sb	9.0	5.0	0.3	Bal.	9.75	5.02	0.18	Bal.
3	AT95-1.0Sb	9.0	5.0	1.0	Bal.	9.78	4.86	0.71	Bal.

2 结果与分析

2.1 Sb 元素对合金强化相的影响

AT95–xSb 合金样品的 X 射线衍射图谱如图 2 所 示。可以看出,图 2 中各衍射峰的位置基本一致,随 着 Sb 元素的添加,α–Mg 的各峰位向高角度略有偏 移。铸态 AT95 镁合金由α–Mg、Mg₂Sn 和 Mg₁₇Al₁₂ 相组成;铸态 AT95–1.0Sb 镁合金的主要第二相为 Mg₃Sb₂、Mg₂Sn 和 Mg₁₇Al₁₂相。相比之下,添加 Sb 元素的镁合金具有对应于 Mg₃Sb₂ 相的 X 射线衍射 峰,说明 Sb 元素的添加促进了 Mg₃Sb₂相的生成,且 随着 Sb 元素含量的增加,Mg₃Sb₂相的衍射峰强度逐 渐增大。



图 2 AT95-xSb 铸态镁合金的 XRD 衍射图谱 Fig.2 XRD pattern of the as-cast AT95-xSb magnesium alloy

2.2 Sb 元素对高温力学性能的影响

将 AT95-xSb 镁合金挤压棒材的 3 个代表性合金 样品 AT95-xSb 分别在 25、150、200 ℃下进行拉伸 力学性能测试,拉伸速度为2 mm/min,为保证试验 数据的准确性,每个成分的合金样品最少测试3次并 取平均值,得到具有代表性的试验数据。图3分别给 出了合金试样在不同温度下拉伸的工程应力--应变曲 线,整体来看,随着温度的升高,所有样品都出现强 度降低、伸长率增大的变化趋势,在拉伸开始变形的 阶段,随着变形量的增加出现加工硬化现象,应力快 速增大直至达到峰值,然后逐渐下降直到样品断裂。 对于没有添加 Sb 元素的 AT95 合金, 随着温度由室 温升高到 150 ℃, 再升高到 200 ℃, 其伸长率由 4.6% 逐渐增大到 28.0%, 最后增大至 42.1%。可以看出, 在室温拉伸时,AT95 镁合金在应力达到峰值时发生 断裂,没有形成稳态阶段;而变形温度达到150℃以 上时 , 合金在达到峰值应力时并没有断裂 , 而是应力 随着应变的增大而逐渐降低,因此得出,合金在高温 时发生软化,其强度逐渐降低,形成较短的稳态阶段。 含质量分数 0.3% Sb 元素的 AT95-0.3Sb 镁合金在室 温下的伸长率是 4.7%,随着温度的升高,在 200 ℃ 时达到 85.6%,其强度逐渐降低;含质量分数为 1.0% Sb 的 AT95-1.0Sb 镁合金在室温下的伸长率是 3.9%, 随着温度的升高,在200℃时达到61.9%,其强度逐 渐降低。3个合金样品伸长率都在200℃时达到最大 值,其中,AT95-0.3Sb 镁合金的伸长率最大,未添 加 Sb 元素的 AT95 镁合金伸长率最小,因此,添加 适量的 Sb 元素可以增大 AT95 挤压镁合金的伸长率。 从图 3b 中可以看出,150 ℃时拉伸呈现明显的上凸 形状,而200℃时拉伸的凸起降低,这是变形温度升 高时材料的软化和拉伸变形产生的硬化竞争结果造 成的差异。从图 3 中还可以看出,温度不同,在弹性 变形阶段的斜率也发生了变化,斜率随着温度的升高 逐渐降低,有报道指出,在应力-应变曲线中的峰值

是动态回复的开始^[29],镁合金高温变形时由于非基面 滑移的开启对材料软化有着重要贡献^[30],非基面滑移 的 CRSS(Critical Resolved Shear Stress,又称 Schmid 定律)随着温度的升高而减小^[31],发生动态回复所需 要的应力也会越来越小,从而导致曲线峰值应力随着 变形温度的升高而降低。





2.3 挤压态 AT95-xSb 镁合金高温拉伸屈 强比分析

表 2 给出了 3 个样品在不同温度时的抗拉强度

(UTS), 屈服强度(YS), 伸长率(EL)及屈强比 (σ₄/σ_b)。作为衡量材料强度储备标准的屈强比 $(\sigma_{\rm s}/\sigma_{\rm b})$ 也是重要的材料性能参数,屈强比越大,零 件的可靠性结构越高,从表2可以看出,不含 Sb 的 AT95 镁合金室温时的屈强比为 0.73, 随着温度的升 高,200 ℃时屈强比达到 0.85; 含质量分数 0.3% Sb 的 AT95-0.3Sb 镁合金室温时的屈强比为 0.66, 随着 温度的升高,200 ℃时屈强比达到0.91;含质量分数 1.0% Sb 的 AT95-1.0Sb 镁合金室温时的屈强比是 0.70,随着温度的升高,200℃时屈强比达到 0.90, 因此,随着温度的升高,AT95-xSb挤压镁合金的屈 强比也逐渐增大。屈强比增大或降低对于不同材料的 不同使用要求各有益处。对于机械结构件,增大屈强 比将增长材料在屈服前的工作时间,可以充分利用材 料。再就是,较大的屈强比可以使材料安全强度和使 用强度之间的差距减小,从而提高结构件可靠性,产 品质量得以保证,加工成本降低。同时,较大的屈强 比提供优良的塑性 , 可改善结构件的使用安全性。 随 着 Sb 元素的增加及拉伸变形温度的升高, AT95-xSb 挤压镁合金屈强比呈现增大的趋势,因此,该合金材 料具有更加优良的使用可靠性。

表 2 AT95-xSb 镁合金棒材的高温拉伸性能 Tab.2 High-temperature tensile properties of AT95-xSb magnesium alloy bar

Code	Alloys	$T/^{\circ}\mathbb{C}$	UTS/MPa	YS/MPa	EL/%	$\sigma_{ m s}/\sigma_{ m b}$					
1#	AT95	25	339	250	4.6	0.73					
		150	321	239	28.0	0.74					
		200	237	201	42.1	0.85					
2 [#]	AT95-0.3Sb	25	358	238	4.7	0.66					
		150	285	237	40.0	0.83					
		200	186	169	83.6	0.91					
3#	AT95-1.0Sb	25	374	263	3.9	0.70					
		150	265	229	37.0	0.86					
		200	175	158	61.9	0.90					

2.4 高温拉伸断口形貌分析

图 4 和图 5 分别为 AT95-xSb 挤压态合金在 150、 200 ℃时拉伸变形断口的扫描照片。合金样品的拉伸 断口显示都含有大量韧窝和撕裂棱,呈现河流花纹的 分布,为韧性断裂,撕裂棱的间距约为 15 μm,有大 量空洞存在。同时,在韧窝底部有较多第二相,大小 约为几微米,这些第二相颗粒与镁基体的结合能力较 差,在拉伸变形过程中易成为裂纹源,导致断裂的产 生。高温拉伸时,随着时间和应变的增加,由于晶界 的运动能力较差,因而形成空洞,随着拉伸变形的继 续,空洞长大并相互合并,使得局部应力应变增大, 因而最终沿晶界撕裂形成韧性断裂。



d 1#背散射断口形貌

e 2#背散射断口形貌

f 3#背散射断口形貌



Fig.4 Microscopic scanning images of tensile fracture of as-extruded AT95-xSb alloy at 150 °C: a) SEM image of secondary electron fracture 1[#]; b) SEM image of secondary electron fracture 2[#]; c) SEM image of secondary electron fracture 3[#]; d) BSE image of fracture 2[#]; f) BSE image of fracture 3[#]



f 3 #背散射断口形貌



Fig.5 Microscopic scanning images of tensile fracture of as-extruded AT95-xSb alloy at 200 ℃: a) SEM image of secondary electron fracture $1^{#}$; b) SEM image of secondary electron fracture $2^{#}$; c) SEM image of secondary electron fracture $3^{#}$; d) BSE image of fracture 1[#]; e) BSE image of fracture 2[#]; f) BSE image of fracture 3[#]

由于镁合金的独立滑移系少,孪生是低温变形的 主要变形机制,随着变形温度的升高,位错的攀移和 交滑移更易发生,使得晶界的迁移能力增强,动态再 结晶形核增多,从而促进动态再结晶的发生,提高塑 性变形^[32], 热稳定性差的 Mg17Al12 合金相在高温变 形过程中容易发生分解^[33]; 而 Mg₂Sn 合金相有着相 对高的熔点、硬度和热稳定性,可以提高镁合金的耐 热性能^[34]。AT95-xSb 镁合金中的合金相有 Mg₁₇Al₁₂ 相、Mg₂Sn 相和 Mg₃Sb₂ 相。Mg₂Sn 相可以作为 Mg17Al12 相的异质核心而共存,这样可间接提高 Mg17Al12相的耐高温性,从而使得合金在高温下具有 较高的强度。而在 Mg-Al-Sn 镁合金中加入 Sb 元素, 可与 Mg 形成 Mg₃Sb₂相。Mg₃Sb₂相具有良好的电性 能、热性能以及高的 ZT 值 (Thermoelectric figure of merit), Mg₃Sb₂相与 Mg₂Sn 相的位相关系满足(0001) Mg₃Sb₂//(111) Mg₂Sn,因此,Mg₃Sb₂相可以作为 Mg₂Sn 相的异质形核核心从而细化 Mg₂Sn 相,而且 异质形核需要的能量小,形核几率大,如果存在形核 核心将优先发生异质形核。Mg₃Sb₂相熔点较高(1228 ℃), 可显著提高合金在高温下的性能, 在不同变形 温度下的拉伸变形过程中,第二相对优化和改善镁合 金的高温性能起着关键作用。由此可以总结出, AT95-xSb 挤压镁合金在较高温度下拉伸变形,随着 应变量的蓄积,合金强化相尺寸增大,数目减少,将 向晶界发生团聚。而强化相粒子对晶界起着重要的钉 扎作用,能够有效阻碍晶界的移动并限制晶粒长大。 随着拉伸变形温度的升高,合金在150℃时的断口形 貌如图 4 所示, 解离平台减少, 断口扫描可以看到大 量的浅小韧窝和明显的河流花样 ,表明变形温度的升 高导致韧性变形时位错的滑移机制起到主要作用。 200 ℃拉伸断裂时,断口形貌特征与150 ℃时基本相 同,但出现极少量的解理面和较大较深的孔洞,如图 5 所示,因此该断裂主要属于韧性断裂,且夹杂有极 少量脆性断裂,断口形貌主要为韧窝。同时可以看出, 200 ℃时断口第二相颗粒数量明显比 150 ℃时少,颗 粒尺寸变小,这是由于随着变形温度的升高,变形继 续进行,晶粒发生转动,释放高的应力以避免微裂纹 的形成,合金相向晶界位置移动并发生团聚,因此, 150 ℃时断口处合金相数目增多,尺寸变大;随着温 度的继续升高,镁基体中的合金固溶度增大,同时, 当变形温度到达 200 ℃时,共晶相 Mg17Al12 由于热稳 定性差而被熔融,因而导致合金相数目减少,尺寸变 小,如图5所示。

3 结论

1) AT95-xSb 镁合金中的主要合金相为 Mg₁₇Al₁₂ 相、Mg₂Sn 相和 Mg₃Sb₂相, Sb 元素的添加使得 AT95 合金的第二相种类增加,数量增多, Sb 元素主要以 Mg₃Sb₂相形式存在。

2)随着拉伸温度的升高,AT95-xSb 镁合金拉伸 样品均呈现强度降低、伸长率逐渐增大的变化趋势, 因此,适量 Sb 元素可以增大 AT95 挤压镁合金的伸 长率,随着 Sb 元素含量的增加以及温度的升高,屈 强比也呈现增大的趋势。

3)随着 Sb 元素含量的增加和拉伸变形温度的升高,150 ℃时拉伸断口的第二相明显比 200 ℃时数量 多,颗粒大。解离平台减少,从断口扫描图片可以看 到大量的浅小韧窝和明显的河流花样,出现极少量的 解理面和较大较深的孔洞,属于韧性断裂,断口形貌 以韧窝为主,200 ℃时合金拉伸变形能力最好。

参考文献:

- ZHANG Yun, JIANG Hai-tao, KANG Qiang, 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.
- [2] 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.
- [3] 刘印,王昌,于振涛,等. 医用镁合金的力学性能研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(S1): 288-292.
 LIU Yin, WANG Chang, YU Zhen-tao, et al. Review on Mechanical Properties of Medical Magnesium Alloys[J].
 Materials Reports, 2019, 33(S1): 288-292.
- [4] LI Li, LI De-jiang, ZENG Xiao-qin. Microstructural Evolution of Mg-Al-Re Alloy Reinforced with Alumina Fibers[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(3): 565-577.
- [5] 彭鹏,汤爱涛,佘加,等. 超细晶镁合金的研究现状及展望[J]. 材料导报,2019,33(9):1526-1534.
 PENG Peng, TANG Ai-tao, SHE Jia, et al. Ultrafine Grained Magnesium Alloys Research: Status Quo and Future Directions[J]. Materials Reports, 2019, 33(9): 1526-1534.
- [6] ZHANG Shao-you, WANG Cheng, NING Hong, et al. Relieving Segregation in Twin-Roll Cast Mg-8Al-2Sn-1Zn Alloys via Controlled Rolling[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 9(1): 254-265.
- [7] WANG Hui-Yuan, RONG Jian, LIU Guo-Jun. Effects of Zn on the Microstructure and Tensile Properties of As-Extruded Mg-8Al-2Sn Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 698: 249-255.
- [8] 吴星辰,程眉,张治民.挤压态稀土镁合金高温单轴 拉伸行为特征研究[J].中北大学学报(自然科学版), 2020,41(4):378-384.
 WU Xing-chen, CHENG Mei, ZHANG Zhi-min. Research on High Temperature Uniaxial Tensile Behavior of As-Extruded Rare Earth Magnesium Alloy[J]. Journal

of North University of China (Natural Science Edition), 2020, 41(4): 378-384.

- [9] LIU Chong-liang, QUAN Gao-feng, ZHOU Ming-yang, et al. Constitutive Behavior and Processing Map of As-cast Mg-8Y-6Gd-1Nd-0.17Zn Magnesium Alloy Compressed at Elevated Temperatures[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(8): 2591-2598.
- [10] 付三玲,李全安,张清.高钆耐热镁合金在高温蠕变
 过程中的显微组织演变[J].中国稀土学报,2020, 38(5):655-660.

FU San-ling, Li Quan-an, ZHANG Qing. Microstructural Evolution of High Gadolinium Heat Resistant Magnesium Alloys during High Temperature Creep[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2020, 38(5): 655-660.

- [11] 张清, 朱利敏, 李全安. Mg-5Y-3Sm-0.8Ca-0.5Sb 合金的高温蠕变行为[J]. 有色金属工程, 2019, 9(1): 1-4.
 ZHANG Qing, ZHU Li-min, LI Quan-an. High Temperature Creep Behavior of Mg-5Y-3Sm-0.8Ca-0.5Sb Alloy[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(1): 1-4.
- [12] 张清, 王莹, 李萍, 等. AZ81-0.5Sb 镁合金的热压缩 行为[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(12): 54-58.
 ZHANG Qing, WANG Ying, LI Ping, et al. Hot Compression Behavior of AZ81-0.5Sb Magnesium Alloy[J].
 Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, 40(12): 54-58.
- [13] 宋佩维. Sb 对 Mg-8Al-12Zn-2Si 合金组织与性能的影响[J]. 铸造技术, 2017, 38(8): 1800-1804.
 SONG Pei-wei. Effects of Sb Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-8Al-12Zn-2Si Alloy[J]. Foundry Technology, 2017, 38(8): 1800-1804.
- [14] 马涛. Sb 对 Mg-Al-Si 合金组织的影响[J]. 科技资讯, 2015, 13(36): 141-143.
 MA Tao. Effects of Sb on Microstructure of Mg-Al-Si Alloy[J]. Science & Technology Information, 2015, 13(36): 141-143.
- [15] 谢誉璐, 黄光胜, 刘帅帅, 等. 微量 Ca 元素对 AZ31 镁合金热变形行为的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(12): 12070-12075.
 XIE Yu-lu, HUANG Guang-sheng, LIU Shuai-shuai, et al. Effect of Microelement Calcium on Thermal Deformation Behavior of AZ31 Magnesium Alloy[J]. Materials Reports, 2020, 34(12): 12070-12075.
- [16] 王柏宁, 王峰, 王志, 等. 铸态与挤压态 AM50-4%(Zn, Y)合金组织及力学性能[J]. 材料导报, 2020, 34(20): 20076-20080.
 WANG Bo-ning, WANG Feng, WANG Zhi, et al. Microstructure and Mechanical Properties of As-Cast and Extruded AM50-4%(Zn, Y) Alloys[J]. Materials Reports, 2020, 34(20): 20076-20080.
- [17] 热焱, 邱克强, 李东和, 等. 高硬度 Mg-5Al-2Sn-5Ca 镁合金在铸态与热处理后的蠕变行为[J]. 材料导报, 2020, 34(12): 12076-12082.
 RE Yan, QIU Ke-qiang, LI Dong-he, et al. Investigation

on Creep Behavior of Mg-5Al-2Sn-5Ca Magnesium Alloy with High Hardness in As-Cast and after Heat-Treatment[J]. Materials Reports, 2020, 34(12): 12076-12082.

- [18] 蒙毅,杨越,曹雷刚,等. Al 含量对 Mg-Al 亚共晶合 金热收缩行为的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(18): 3185-3189.
 MENG Yi, YANG Yue, CAO Lei-gang, et al. Effect of Al on the Thermal Shrinkage Behavior of Hypoeutectic Mg-Al Alloys[J]. Materials Review, 2018, 32(18): 3185-3189.
- [19] HOU Dan-hui, LIANG Song-mao, CHEN Rong-shi, et al. Effects of Sb Content on Solidification Pathways and Grain Size of AZ91 Magnesium Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2015, 28(1): 115-121.
- [20] BALASUBRAMANI N, SRINIVASAN A, PILLAI U T S, et al. Effect of Pb and Sb Additions on the Precipitation Kinetics of AZ91 Magnesium Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 457(1/2): 275-281.
- [21] YUAN Guang-yin, SUN Yang-shan, DING Wen-jiang. Effects of Sb Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Az91 Magnesium Alloy[J]. Scripta Materialia, 2000, 43(11): 1009-1013.
- [22] SRINIVASAN A, SWAMINATHAN J, GUNJAN M K, et al. Effect of Intermetallic Phases on the Creep Behavior of AZ91 Magnesium Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(6): 1395-1403.
- [23] YUAN G Y, LIU Z L, WANG Q D, et al. Microstructure Refinement of Mg–Al–Zn–Si Alloys[J]. Materials Letters, 2002, 56(1/2): 53-58.
- [24] SRINIVASAN A, PILLAI U S, PAI B C. Microstructure and Mechanical Properties of Si and Sb Added AZ91 Magnesium Alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36(8): 2235-2243.
- [25] 马春华, 潘复生, 卢志文. Mg-9AI-5Sn-xSb 挤压镁合 金单轴压缩性能及断口分析[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(9): 126-131.
 MA Chun-hua, PAN Fu-sheng, LU Zhi-wen. Compressive Properties and Fracture Analysis of Mg-9AI-5SnxSb Extruded Magnesium Alloy under Uniaxial Compression[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(9): 126-131.
- [26] MA Chun-hua, PAN Fu-sheng, ZHANG Ding-fei, et al. Effects of Sb Addition on Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Mg-9Al-5Sn Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2021, 34(2): 278-288.
- [27] 关海昆,李全安,陈晓亚,等. Mg-11Gd-2Y-1.5Ag-0.5Zr 合金的高温蠕变行为[J]. 材料导报, 2021, 35(6):6126-6130.
 GUAN Hai-kun, LI Quan-an, CHEN Xiao-ya, et al. High Temperature Creep Behavior of Mg-11Gd-2Y-1.5Ag-0.5Zr Alloy[J]. Materials Reports, 2021, 35(6):6126-6130.
- [28] 李进彪. AT63 镁合金室温和高温变形行为的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

LI Jin-biao. Investigation on the Deformation Behavior of AT63 Magnesium Alloy at Room and Elevated Temperatures[D]. Changchun: Jilin University, 2014.

- [29] WU H Y, YANG J C, LIAO J H, et al. Dynamic Behavior of Extruded AZ61 Mg Alloy during Hot Compression[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 535: 68-75.
- [30] KOIKE J, KOBAYASHI T, MUKAI T, et al. The Activity of Non-Basal Slip Systems and Dynamic Recovery at Room Temperature in Fine-Grained AZ31B Magnesium Alloys[J]. Acta Materialia, 2003, 51(7): 2055-2065.
- [31] CHAPUIS A, DRIVER J H. Temperature Dependency of Slip and Twinning in Plane Strain Compressed Magnesium Single Crystals[J]. Acta Materialia, 2011, 59(5):

1986-1994.

- [32] 陈振华,许芳艳,傅定发,等. 镁合金的动态再结晶
 [J]. 化工进展, 2006, 25(2): 140-146.
 CHEN Zhen-hua, XU Fang-yan, FU Ding-fa, et al. Dynamic Recrystallization of Magnesium Alloy[J].
 Chemical Industry and Engineering Progress, 2006, 25(2): 140-146.
- [33] NINOMIYA R, OJIRO T, KUBOTA K. Improved Heat Resistance of Mg-Al Alloys by the Ca Addition[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43(2): 669-674.
- [34] GIBSON M A, FANG X, BETTLES C J, et al. The Effect of Precipitate State on the Creep Resistance of Mg–Sn Alloys[J]. Scripta Materialia, 2010, 63(8): 899-902.