

引用格式: 周鑫, 吴迪, 潘文字, 等. 微量 Gd 元素对 ZK60 铸造镁合金微观组织及拉伸性能的影响[J]. 航空材料学报, 2026, 46(3): 37-46.

ZHOU Xin, WU Di, PAN Wenyu, et al. Effect of trace Gd on microstructure and tensile property of ZK60 cast magnesium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(3): 37-46.

微量 Gd 元素对 ZK60 铸造镁合金微观组织 及拉伸性能的影响

周鑫^{1,4}, 吴迪^{2,3*}, 潘文字^{2,5}, 高跃¹, 张承宇^{2,3}, 邹航^{2,3},
李荣广^{1,4*}, 李金国^{2,3}

(1. 沈阳化工大学 机械与动力工程学院, 沈阳 110142; 2. 中国科学院金属研究所 师昌绪先进材料创新中心, 沈阳 110016;
3. 中国科学技术大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110016; 4. 沈阳化工大学 战略材料与关键构件研究中心, 沈阳 110142;
5. 沈阳化工大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110142)

摘要: 本工作系统研究 ZK60 镁合金微量添加 0.5% (质量分数, 下同) 与 1.0% 的 Gd 元素对其组织及拉伸性能的影响。通过光学显微镜、扫描电镜、能谱分析、差热分析、X 射线衍射分析等技术对 ZK60、ZVK600、ZVK610 合金试样铸态与固溶态微观组织进行表征, 测试合金的室温拉伸性能。结果表明, 铸态 ZK60 合金晶粒尺寸为 95 μm , 在晶界处存在粗大的块状 MgZn 相和少量 Zn_2Zr_3 相颗粒, 微量添加 Gd 元素会导致第二相比例增加, MgZn 相转变为 Mg_3GdZn_6 相, 但晶粒尺寸未发生细化。3 种合金铸态下的室温拉伸性能较为接近, 铸态 ZVK610 合金的屈服强度和塑性相对较低, 这与其相对较大的晶粒尺寸和较多晶界第二相有关。经过 T41 阶梯化固溶处理后, ZK60 合金的晶粒粗大, 第二相基本消除, 合金塑性显著提升, 但晶粒尺寸长大导致屈服强度略有下降, 而 ZVK600 和 ZVK610 合金仍有少量晶界第二相残留。延长高温固溶时间或提升固溶温度设计的 T42 和 T43 工艺, 虽然可以进一步降低基体中第二相比例, 但是由于晶粒长大, 合金屈服强度进一步下降, 塑性也没有明显提升, 因此推荐采用 T41 固溶热处理工艺。

关键词: ZK60 镁合金; 塑性; 微观组织; 析出相

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000164

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2024.000164

中图分类号: V252.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)03-0037-10

Effect of trace Gd on microstructure and tensile property of ZK60 cast magnesium alloy

ZHOU Xin^{1,4}, WU Di^{2,3*}, PAN Wenyu^{2,5}, GAO Yue¹, ZHANG Chengyu^{2,3}, ZOU Hang^{2,3},
LI Rongguang^{1,4*}, LI Jinguo^{2,3}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China; 2. Shi Changxu Advanced Materials Innovation Center, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang 110016, China; 4. Research Center for Strategic Materials and Key Components, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China; 5. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract: This study systematically investigates the effects of trace Gd additions of 0.5% (mass fraction, the same hereinafter) and 1.0% on the microstructure and tensile property of ZK60 magnesium alloy. The as-cast and solution-treated microstructures of ZK60, ZVK600, and ZVK610 alloys are characterized by optical microscopy, scanning electron microscopy, energy dispersive

spectroscopy, differential scanning calorimetry, and X-ray diffraction. The tensile properties of the alloy specimens are measured and analyzed *via* room-temperature tensile tests. The results show that the as-cast ZK60 alloy has grain size of 95 μm , with coarse blocky MgZn phases and a small number of Zn_2Zr_3 particles present at grain boundaries. Trace Gd addition increases the fraction of secondary phases and transforms the MgZn phase into the Mg_3GdZn_6 phase, but does not refine the grain size. The room-temperature tensile properties of the three as-cast alloys are relatively close. The as-cast ZVK610 alloy exhibits lower yield strength and ductility, which is associated with its relatively large grain size and increased grain-boundary secondary phases. After T41 step solution treatment, the grain of ZK60 alloy become coarse, the secondary phases are nearly eliminated, and the ductility is significantly improved. However, the yield strength decreases slightly due to grain coarsening. In contrast, a small amount of grain-boundary secondary phases remains in ZVK600 and ZVK610 alloys. T42 and T43 processes, designed with prolonged high-temperature solution time or elevated solution temperature, further reduce the secondary phase fraction in the matrix but lead to additional grain coarsening, resulting in further reduced yield strength and no obvious improvement in ductility. Therefore, T41 solution heat treatment process is recommended.

Key words: ZK60 magnesium alloy; plasticity; microstructure; precipitated phase

作为目前应用的最轻金属结构材料,镁合金具有密度低(1.74 g/cm^3)、减振降噪、资源丰富、易于回收、环境友好等优点,其比强度为 $158 (\text{kN} \cdot \text{m})/\text{kg}$,远高于钢铁、铝合金和钛合金,轻量化效果极为显著^[1-3]。镁合金汽车车身相对钢车身可减重45%(质量分数,下同)~55%,碳排放量降低13.5%~27.5%。如果使用镁合金来制造高铁车体,京沪高铁直达线路仅一天即可节约用电126万度,减少二氧化碳排放1146吨^[4]。镁合金板材及其二次成形部件在交通工具中用量大、用处广,可应用于列车减震地板、座椅骨架、卧铺骨架、车厢壁板等,同时其在航空航天、通讯电子等诸多领域也有着广泛而迫切的应用需求^[5-8]。

轧制是板材,尤其宽幅板材的主要生产方式,国内外科研人员在镁合金轧制基础研究和技术开发方面都开展了大量工作,也形成了一些较为成熟的轧制工艺。但是研究表明,镁合金在轧制过程中极易形成强基面织构,导致板材屈强比高(≥ 0.8)且加工硬化率低,同时易出现性能各向异性,对于板材的深加工(如弯折、扭转、拉伸等)极为不利,极大地限制镁合金板材的应用^[9-11]。虽然高温下($>200 \text{ }^\circ\text{C}$)镁合金板材的塑性会显著提升,甚至能够具有超塑性和优异的成形性能,但是,由于加工温度高、工模具复杂、有时还需要气氛保护,生产效率降低,产品成本增加,不利于广泛应用^[12-13]。

研究表明,微量添加稀土元素可以促使镁合金在变形过程中非基面滑移的显著发生,以及再结晶晶粒的取向离散化,达到织构弱化的目的,从而提升加工成形性能^[14-15]。然而,目前研究主要集中于

稀土元素的添加对镁合金板材轧制过程中组织和性能的影响。铸锭作为变形材的初始坯料,其组织及性能对后续镁合金的变形行为及板材的最终性能产生影响。但是,目前对于微量添加稀土元素对铸造镁合金微观组织和力学性能的影响研究相对较少^[16-18]。

ZK60镁合金是传统商用高强变形镁合金,国内对应牌号为MB15,属于Mg-Zn系合金,Zn元素具有固溶和时效强化的作用,少量Zr元素是晶粒细化剂,对于铸造组织有显著细化作用。ZK60镁合金铸锭可通过挤压、轧制、锻造等工艺制备棒材、型材、板材、锻件等多种变形材,力学性能优良,接近6000系铝合金,已应用于摩托车轮毂、直升机变速箱壳体、机翼长桁、翼肋、雷达罩等主要承力部件^[19-22]。本工作通过在ZK60镁合金中微量添加稀土元素,对比分析Gd元素及其含量对铸造ZK60镁合金微观组织和力学性能的影响规律,为后续轧制过程组织性能研究奠定基础。

1 实验材料与方法

使用纯镁(99.99%)、纯锌(99.99%)、Mg-30Zr中间合金和Mg-30Gd中间合金采用半连续铸造方法制备Mg-6Zn-0.7Zr(ZK60)、Mg-6Zn-0.7Zr-0.5Gd(ZVK600)、Mg-6Zn-0.7Zr-1Gd(ZVK610)合金。将合金在电阻炉中加热至 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 熔化,并将熔体倒入 $720 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冷却结晶器中制备坯料。合金成分通过感应耦合等离子体原子发射光谱仪(inductively coupled plasma atomic emission spectrometer, ICP-AES)检测分析得出,元素含量在表1中列出。对

上述不同铸造坯料分别进行 T41、T42 和 T43 固溶处理, 固溶处理工艺如图 1 所示。

表 1 合金化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of alloys (mass fraction/%)

Alloy	Zn	Zr	Gd	Mg
ZK60	6.18	0.73	0	Bal.
ZVK600	6.42	0.67	0.5	Bal.
ZVK610	6.84	0.63	1.2	Bal.

对铸态以及固溶态样品分别采用 600、800、1000、1200 目和 1500 目砂纸依次研磨至表面无划痕, 使用将 4.2 g 苦味酸+10 mL 蒸馏水+10 mL 乙

酸+70 mL 无水乙醇制成的腐蚀溶液对试样依次浸蚀, 然后通过光学显微镜(optical microscope, OM)和扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察试样在铸态和固溶态下的微观组织形貌、第二相分布等, 然后通过能谱(energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)分析对试样进行化学成分测定以及 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)测试^[23], 从而确定合金相的组成。使用 TSE504D 万能试验机在室温下对样品进行拉伸测试, 应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。使用 SETSYS-18 综合热分析仪对样品进行差热分析(differential thermal analysis, DTA), 升温/降温速率为 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, 从 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 升高到 $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 后降低到 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

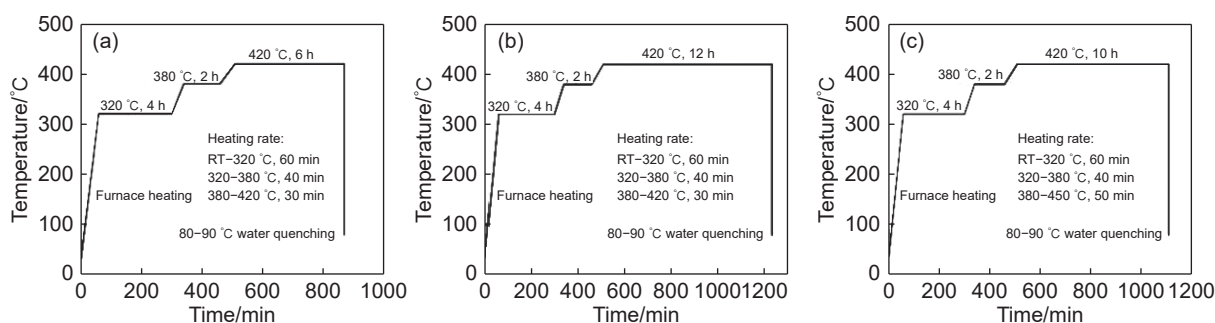


图 1 T41(a)、T42(b)和 T43(c)固溶处理工艺

Fig. 1 T41(a), T42(b), and T43(c) solid solution treatment process

2 结果与分析

2.1 铸态合金微观组织

图 2 为 3 种合金铸态试样的 OM 和 SEM 图。使用 ImageJ 软件统计出铸态 ZK60、ZVK600、ZVK610 合金的平均晶粒尺寸分别为 $95 \mu\text{m}$ 、 $96 \mu\text{m}$ 和 $103 \mu\text{m}$ 。微量添加稀土元素后, 合金并未表现出进一步晶粒细化, 3 种合金的晶粒尺寸相近。值得注意的是, ZK60 合金的晶粒为典型的等轴晶; ZVK610 合金的晶粒则出现明显的花瓣状, 即晶粒形态呈现枝晶化趋势。图 2(a-2)~(c-2)中, SEM 结果表明, 3 种铸态合金晶界处存在大量第二相。使用 ImageJ 软件计算出铸态 ZK60、ZVK600、ZVK610 合金第二相比例分别为 6.2%、6.4% 和 7.9%。随着 Gd 元素不断添加, 铸态合金的第二相比例增加。Gd 元素可以与合金中其他元素结合, 形成新的化合物或固溶体, 这些新相通常在铸态下以第二相形式存在, 从而导致第二相比例增加^[6]。同时受凝固过程影响, 在合金的凝固过程中, Gd 元素的存在可能会影响晶体生长和相变。它可能会

改变凝固路径, 促进第二相析出。图 2(a-3)~(c-3)分别为图 2(a-2)~(c-2)中红框圈出部分的放大图像, 可以发现, 随着 Gd 含量增加, 晶界处晶粒粗大, 第二相形貌也发生变化, 由块状转变为共晶片层状。

图 3 和图 4 分别为铸态 ZK60 和 ZVK610 合金晶界处第二相的 SEM 图及相应 EDS 能谱分析结果, 其中第二相和基体的能谱分析结果以质量分数形式统计于表 2。铸态 ZK60 试样中第二相的元素组成为 64.4%Mg、34.8%Zn 和 0.8%Zr, 基体的元素组成为 89.9%Mg、10%Zn 和 0.1%Zr。从图 3(b)~(d)可以看出, Zn 元素主要分布在晶间粗大的块状第二相中, Zr 元素集中分布于一些细小的第二相颗粒中, 表明铸态 ZK60 合金晶界处的第二相主要为 Mg-Zn 相, 可能含有少量 Zn-Zr 相。

添加稀土元素不但会导致晶间第二相形貌发生变化, 而且导致第二相成分甚至种类发生变化。铸态 ZVK610 合金中第二相的元素组成为 33.2%Mg、50%Zn、0.6%Zr 和 16.2%Gd, 基体的元素组成为 94.1%Mg、5.4%Zn、0.2%Zr 和 0.3%Gd, 如表 2 所示。从图 4(b)~(d)可以看出, 与

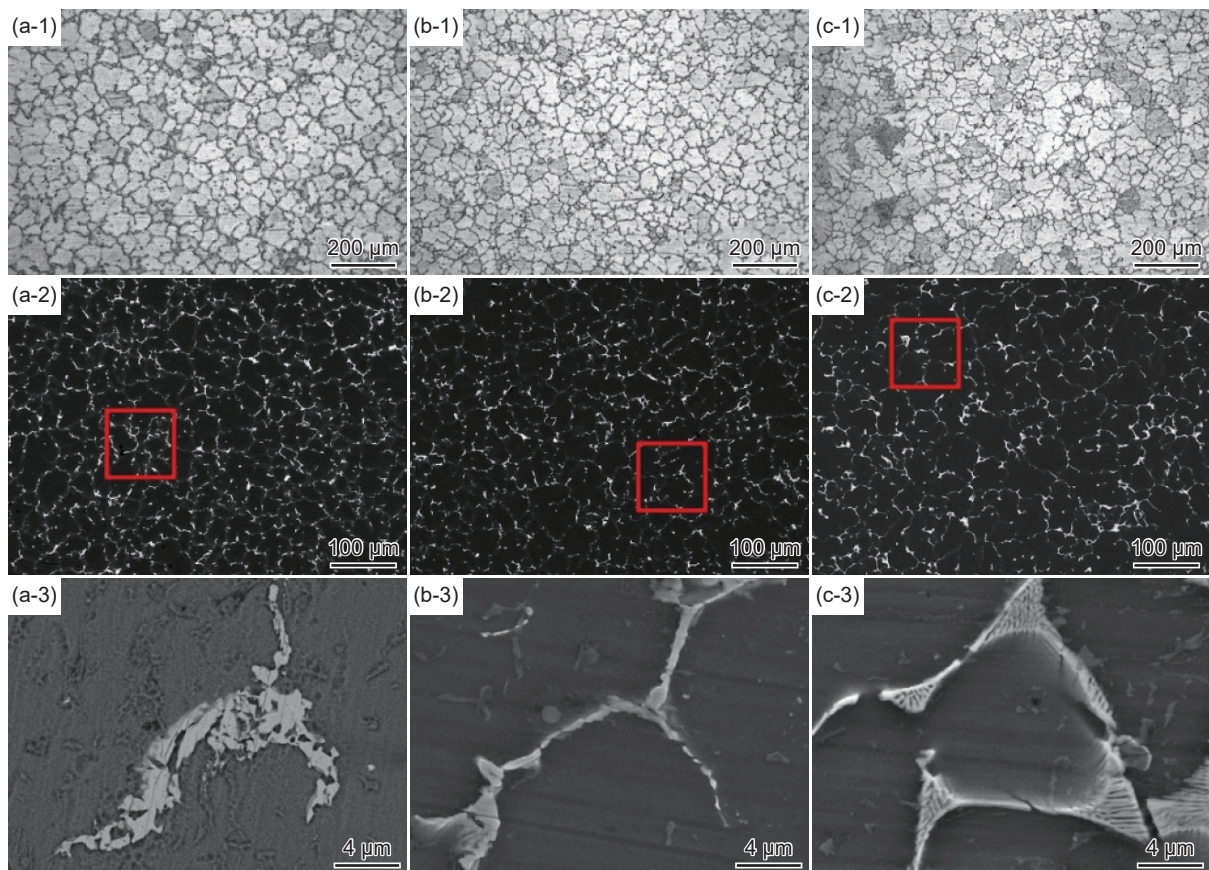


图 2 铸态 ZK60(a)、ZVK600(b)和 ZVK610(c)合金的光学显微镜(1)、扫描电子显微镜(2)及其放大图像(3)
Fig. 2 OM (1), SEM (2), and its magnified images (3) of as-cast ZK60 (a), ZVK600 (b), and ZVK610 (c) alloys

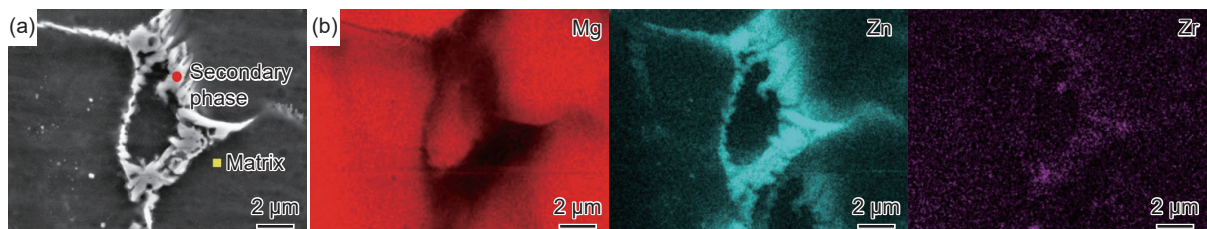


图 3 铸态 ZK60 合金晶界处第二相扫描电子显微镜图(a)和能谱分析(b)
Fig. 3 SEM image (a) and EDS analysis (b) of the secondary phase at the grain boundary of as-cast ZK60 alloy

ZK60 合金明显不同, ZVK610 合金的晶间第二相除了含有大量 Zn 元素外, 还均匀分布着 Gd 元素, 说明大部分第二相已转变为 Mg-Zn-Gd 三元相。同时, 也存在一些 Zn-Zr 相颗粒。

为进一步研究第二相随 Gd 含量变化的演变规律, 采用 X 射线衍射分析 3 种合金的物相组成, 如图 5 所示。XRD 分析结果表明铸态 ZK60 合金主要有 α -Mg 和 MgZn 相组成, 并含有少量 Zn_2Zr_3 相, 这也可以与前面的能谱分析结果相对应, 晶间粗大的第二相主要为 MgZn 相, 而少量含 Zr 的颗粒状第二相为 Zn_2Zr_3 相。对比分析 ZVK600 和 ZVK610 合金可以发现, 微量添加 Gd 元素后合金中 MgZn 相峰值降低, 表明其比例明显下降, 形成一种新的

Mg-Zn-Gd 三元相, 即 Mg_3GdZn_6 相。随着 Gd 含量增加, Mg_3GdZn_6 相衍射峰增强, 说明其含量增加^[24], 而 Zn_2Zr_3 相的峰依然存在。对应上述 EDS 分析结果, 可以认为稀土元素添加后, 铸造 ZK60 合金晶间粗大的第二相会由 MgZn 相逐渐转变为 Mg_3GdZn_6 相。

为了能够合理设计固溶工艺, 需要获得 3 种合金中第二相的熔点。因此, 对 3 种合金进行差热分析。图 6 为铸态 ZK60、ZVK600、ZVK610 合金升温与降温的 DTA 曲线, 3 种合金的升温与降温热分析曲线形状相似。在图 6(a)升温曲线中, 3 种合金的对应曲线均出现 3 个吸热峰, ZK60 合金的吸热峰温度分别为 338、545 °C 和 635 °C, ZVK600 合

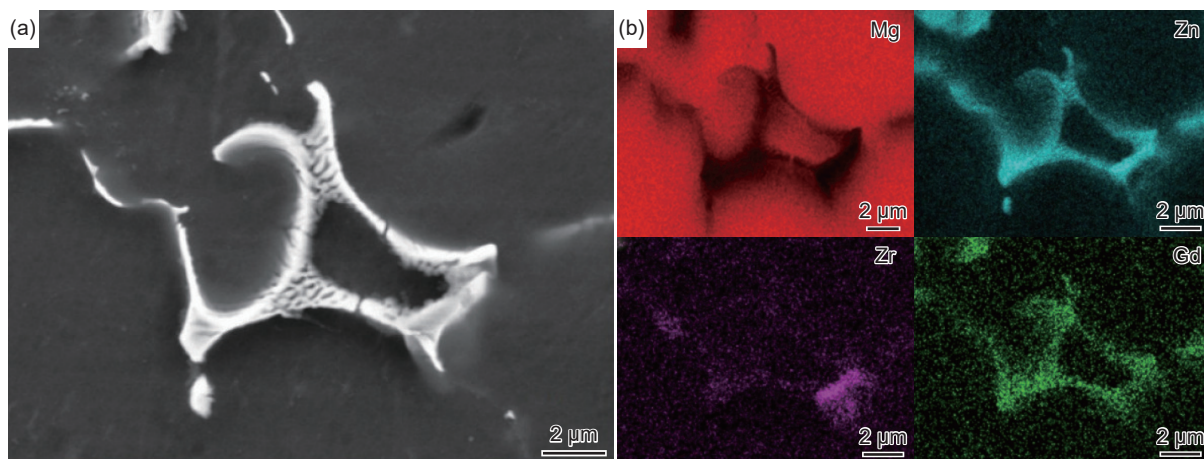


图 4 铸态 ZVK610 合金晶界处第二相扫描电子显微镜图(a)和能谱分析(b)

Fig. 4 SEM image (a) and EDS analysis (b) of the secondary phase at the grain boundary of as-cast ZVK610 alloy

表 2 铸态 ZK60、ZVK610 合金能谱分析结果
(质量分数/%)

Table 2 EDS analysis results of as-cast ZK60 and ZVK610 alloys (mass fraction/%)

Sample	Sampling position	Mg	Zn	Zr	Gd
ZK60	Second phase	64.4	34.8	0.8	0
	Matrix	89.9	10	0.1	0
ZVK610	Second phase	33.2	50	0.6	16.2
	Matrix	94.1	5.4	0.2	0.3

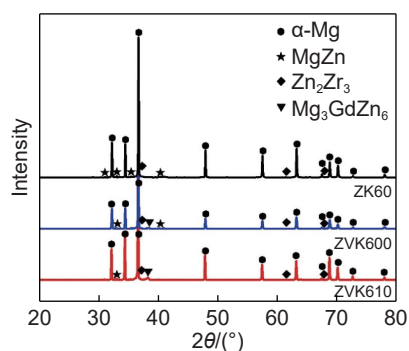


图 5 铸态 ZK60、ZVK600、ZVK610 合金 X 射线衍射分析图谱

Fig. 5 XRD patterns of as-cast ZK60, ZVK600, and ZVK610 alloys

金的吸热峰温度分别为 442、571 °C 和 631 °C, ZVK610 合金的吸热峰温度分别为 441、589 °C 和 631 °C。在图 6(b)降温曲线中, 3 种合金的对应曲线均出现 3 个放热峰, 与相应的升温曲线上吸热峰一一对应。ZK60 合金升温曲线在 338 °C 处出现第一个吸热峰, 根据 XRD 结果与 Mg-Zn 系合金相图, ZK60 合金主要存在 MgZn 低熔点相, 因此可推断在 338 °C 处为 MgZn 低熔点相溶解到基体^[25]。ZVK600、ZVK610 合金的升温曲线分别在 442 °C 与 441 °C 出现吸热峰, 结合 XRD 结果分析, 此处

两个峰对应的温度比 ZK60 合金对应的吸热峰温度高, 这是因为加入 Gd 元素后, Gd 元素明显在晶界第二相处富集, 与 Mg、Zn 元素结合形成比 MgZn 相熔点更高的 Mg₃GdZn₆ 相。此外, 3 种合金在较高的 540~590 °C 范围内均存在一个吸热峰, 结合上述 EDS 分析、XRD 结果以及 Zn-Zr 系相图, 分析得出此处为 Zn₂Zr₃ 相的溶解, 最后在 630~635 °C

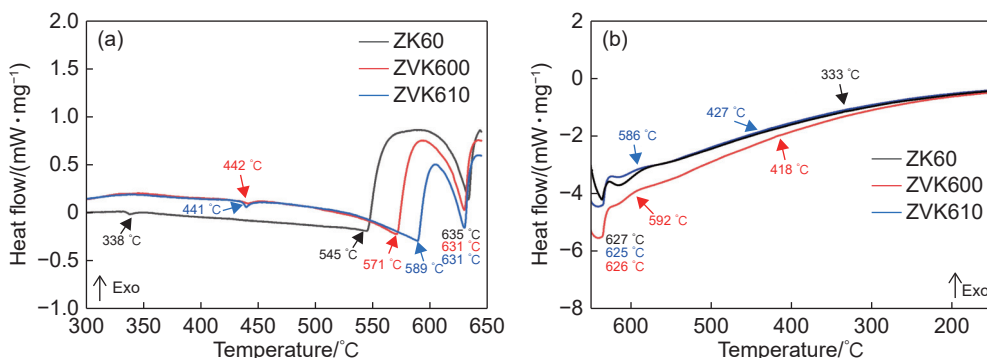


图 6 3 种铸态合金升温(a)与降温(b)差热分析曲线

Fig. 6 Differential thermal analysis curves of three as-cast alloys during heating (a) and cooling (b)

范围内 α -Mg 相溶解^[25]。

2.2 固溶态合金微观组织

铸态合金晶间形成的粗大第二相过多地消耗添加的合金元素,对于后续轧制等塑性加工不利,容易导致开裂。因此,需要通过适当的固溶处理工艺将其消除或消减。根据上述 DTA 结果,合金中存在不同熔点的第二相。所以,设计阶梯式固溶工艺 T41,具体工艺见图 1(a)。图 7 为 T41 工艺固溶处理的 3 种合金 OM 和 SEM 组织。ZK60、ZVK600、ZVK610 合金平均晶粒尺寸分别为 102、103 μm 和 108 μm ,与铸态组织相比,经过固溶处理,合金晶粒尺寸均变大。进一步分析 SEM 结果,ZK60、ZVK600、ZVK610 合金第二相比例分别为 0.2%、1.8% 和 2.5%。可以看出,经过 T41 工艺固溶处理后,ZK60 合金中晶间第二相大部分消除,但 Gd 元

素的添加导致 ZVK600 和 ZVK610 合金中仍有少量晶间第二相残留。

通过 SEM 和 EDS 结果进一步对比分析固溶态 ZK60 和 ZVK610 合金中残留第二相,结果如图 8 所示。经过 T41 工艺固溶处理后,ZK60 合金中残留的少量第二相颗粒富含 Zn、Zr 元素,对应上述表征结果,应为 Zn_2Zr_3 相。该相熔点较高,与 Mg 基体的熔点较为接近,很难通过合适的固溶处理工艺消除。3 种合金中 Zn_2Zr_3 相比比例均很低,基本不会对后续塑性加工工艺产生显著影响。ZVK610 合金能谱分析结果表明,其残留的晶间第二相为 Mg-Zn-Gd 三元相,对应上述表征结果,可以确定为 Mg_3GdZn_6 相。经过 T41 工艺的固溶处理后,这种含有稀土元素的三元相得以部分消除,但仍有少量残留。

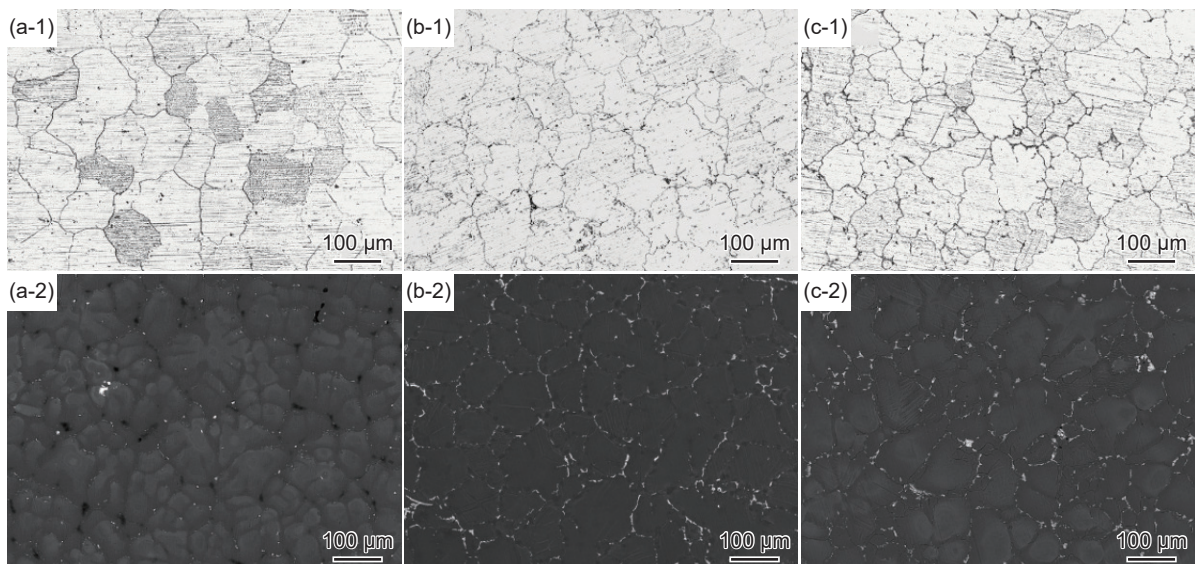


图 7 T41 工艺固溶态 ZK60(a)、ZVK600(b)、ZVK610(c)合金光学显微镜图(1)和扫描电子显微镜图(2)

Fig. 7 OM images (1) and SEM images (2) of T41 solution-treated ZK60 (a), ZVK600 (b), and ZVK610 (c) alloys

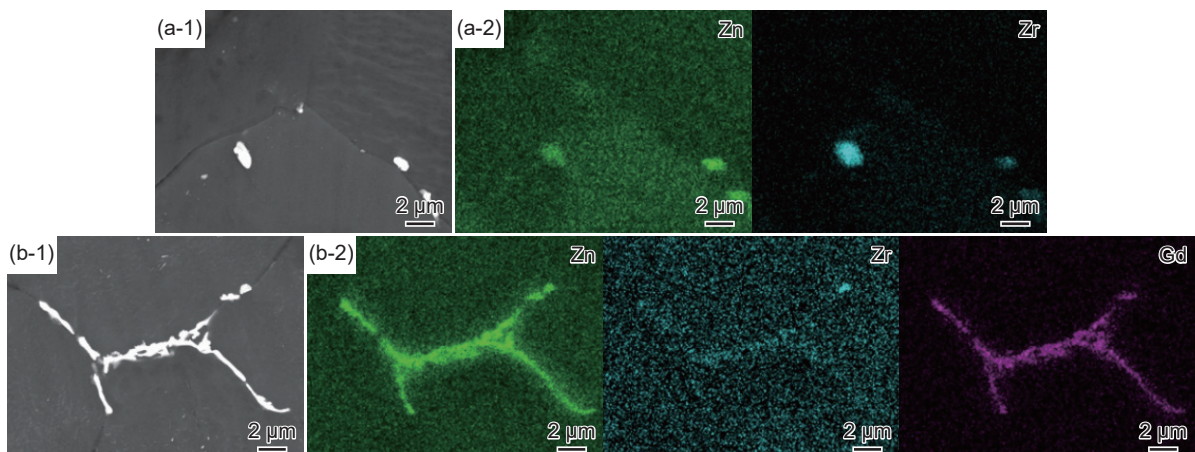


图 8 T41 工艺固溶态 ZK60(a)、ZVK610(b)合金第二相扫描电子显微镜图(1)和能谱分析(2)

Fig. 8 SEM images (1) and EDS analysis (2) of the secondary phase in T41 solution-treated ZK60 (a) and ZVK610 (b) alloys

为了探究是否可以通过进一步延长高温固溶阶段的时间,或者提升 T41 工艺第三阶段的固溶温度来消除 ZVK600 和 ZVK610 合金中的残留第二相,设计了 T42 和 T43 固溶工艺,具体工艺参数如图 1(b)、(c)所示。图 9 为 T42 和 T43 固溶工艺处理的 ZVK600、ZVK610 合金 OM 图,晶粒尺寸统计结果表明,与 T41 工艺处理结果相比,两种合金的晶粒尺寸发生明显长大, T42 工艺处理的 ZVK600、ZVK610 合金晶粒尺寸分别为 115 μm 和 113 μm ,而 T43 工艺处理的两种合金晶粒尺寸进一步长大至 124 μm 和 126 μm 。根据 OM 图可以看出,仍有少量残留第二相。

图 10 为 T42 和 T43 固溶处理工艺的 ZVK600、ZVK610 合金 SEM 图, T42 固溶工艺下 ZVK600、ZVK610 合金的第二相比例分别为 1.7% 和 2.3%, T43 固溶工艺下 ZVK600、ZVK610 合金的第二相

比例分别为 1.3% 和 2.1%。可以看出,经过延长第三阶段的固溶时间,即 T42 固溶处理工艺下, ZVK600、ZVK610 合金中残留第二相含量略小于 T41 工艺,晶间第二相进一步消减程度有限。同时,提高固溶温度的 T43 固溶处理工艺效果相同。进一步消减晶间第二相固然对后续塑性加工有益,但是,晶粒尺寸显著增大会导致合金力学性能变差,所以,需要通过进一步测试拉伸性能综合评价 3 种固溶处理工艺优劣。

2.3 室温拉伸性能

图 11(a)为 ZK60、ZVK600 和 ZVK610 3 种合金不同状态下的室温拉伸曲线,对应的拉伸性能如表 3 所示。铸态下 ZK60 合金屈服强度 (yield strength, YS)、极限抗拉强度 (ultimate tensile strength, UTS) 和断后伸长率 (elongation at break, EL) 分别为 129 MPa、255 MPa 和 18%。与铸态

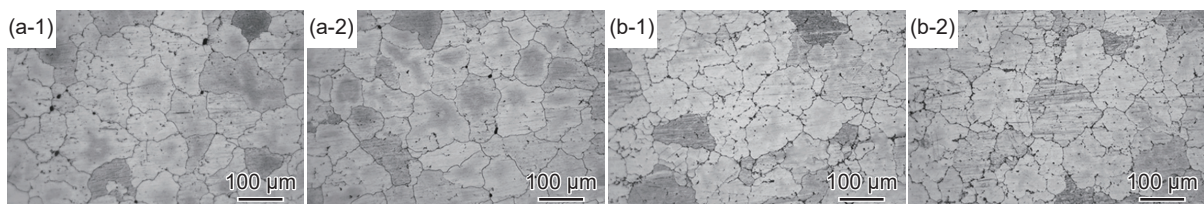


图 9 T42(a)、T43(b)工艺固溶态 ZVK600(1)、ZVK610(2)合金光学显微镜图

Fig. 9 OM images of T42 (a) and T43 (b) solution-treated ZVK600 (1) and ZVK610 (2) alloys

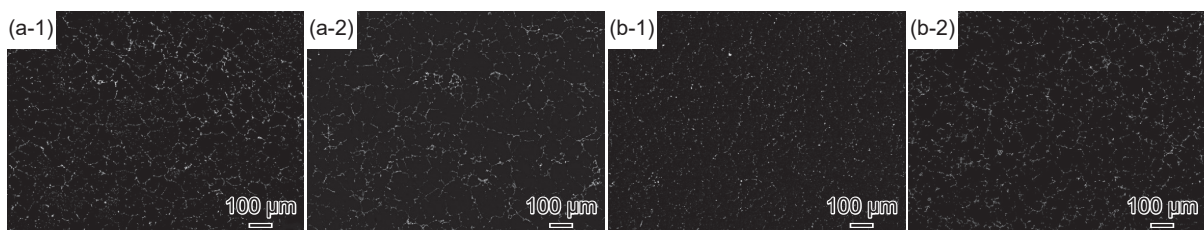


图 10 T42(a)、T43(b)工艺固溶态 ZVK600(1)、ZVK610(2)合金扫描电子显微镜图

Fig. 10 SEM images of T42 (a) and T43 (b) solution-treated ZVK600 (1) and ZVK610 (2) alloys

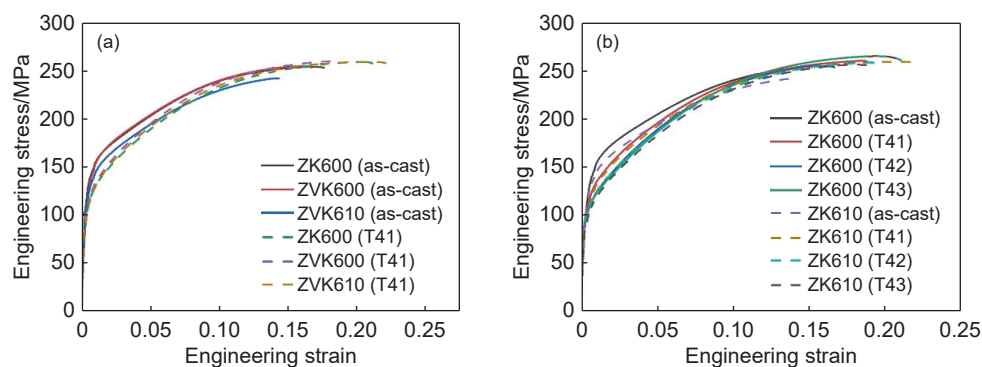


图 11 3 种合金铸态和 T41 固溶态 (a) 以及 ZVK600、ZVK610 合金 4 种不同状态 (b) 的应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of three as-cast and T41 solution-treated alloys (a) as well as ZVK600 and ZVK610 alloys under four different conditions (b)

表3 3种合金4种不同状态拉伸性能
Table 3 Tensile property of three alloys under four different conditions

Alloy	Condition	UTS/MPa	YS/MPa	EL/%
ZK60	As-cast	255	129	18
	T41	256	109	23
ZVK600	As-cast	251	127	16
	T41	261	107	20
	T42	255	96	17
	T43	262	95	22
ZVK610	As-cast	241	121	16
	T41	258	105	20
	T42	259	99	19
	T43	255	92	19

ZVK600和ZVK610合金的力学性能相比,可以发现,微量添加稀土元素Gd并未显著改变合金铸态拉伸性能。其中,ZVK610合金屈服强度相对略低,这与其略大的晶粒尺寸和相对较高第二相比例有关。而Gd元素添加导致第二相比例增加,也使得铸态ZVK600、ZVK610合金室温塑性略低于ZK60合金。

从图11(a)可以明显看出,经过T41固溶处理后,3种合金的塑性均得到明显提升,均不低于20%,与其他铸造合金相比,塑性较好,表明该固溶处理工艺很好地消除或消减铸造合金中粗大第二相,这也与前面的组织表征结果相一致。由于ZVK600、ZVK610合金中仍有少量Mg-Zn-Gd三元相残留,其塑性略低于T41固溶态的ZK60合金。从图11(a)中铸态和固溶态的拉伸曲线对比还可以明显看出,T41固溶处理后,ZK60、ZVK600和ZVK610 3种合金屈服强度均显著下降,由铸态的129、127 MPa和121 MPa分别下降至109、107 MPa和105 MPa,这与固溶后合金晶粒尺寸增大密切相关。

图11(b)为ZVK600、ZVK610合金4种不同状态的室温拉伸曲线,对比可以看到,与铸态合金相比,无论哪种固溶处理工艺,都会使合金塑性明显提升,但是,同时也会导致屈服强度显著下降。以ZVK610合金为例,铸态时合金的室温断后伸长率是16%,经过固溶处理后合金的塑性可以达到或接近20%。值得注意的是,3种固溶处理工艺下,合金塑性相当,但相较于T41工艺,T42和T43固溶处理工艺后,合金屈服强度发生进一步下降。这是由于延长高温处理阶段的固溶时间或提高固溶

温度会导致合金晶粒尺寸进一步增大,导致合金屈服强度发生显著下降。此外,合金晶粒尺寸增大也会导致塑性下降,这可能与第二相消减获得的塑性提升相抵消。综上所述,与T41固溶处理工艺相比,T42和T43固溶处理的ZVK610合金塑性没有明显提升,但屈服强度却发生显著下降,对于ZVK600合金也存在类似现象。

3 结论

(1)Gd元素的微量添加并未使铸态ZK60镁合金组织发生细化,但晶粒形貌从等轴状转向花瓣状,呈现出枝晶化趋势。晶界处粗大第二相比例随着Gd含量增加而增加,ZK60、ZVK600、ZVK610合金第二相比例分别为6.2%、6.4%和7.9%,其形貌也由块状转变为共晶片层状。

(2)ZK60铸态合金组织中第二相为晶界粗大的块状MgZn相和少量 Zn_2Zr_3 相颗粒,微量添加Gd元素后,MgZn相转变为 Mg_3GdZn_6 相。根据各相熔点差热分析结果,设计T41、T42和T43 3种固溶处理工艺。经过固溶处理后,晶界处粗大第二相得以大量消减,但晶粒尺寸也发生明显增大,特别是对于T42和T43工艺对应的第三阶段长时间/高温固溶处理的ZVK600、ZVK610合金。

(3)铸态ZK60、ZVK600合金的室温拉伸性能十分相近,而铸态ZVK610合金屈服强度和塑性相对略低,这与其相对较大的晶粒尺寸和较多的晶界第二相有关。T41固溶处理后,3种合金塑性均显著提升,但屈服强度下降。T42和T43固溶处理工艺导致ZVK600、ZVK610合金屈服强度进一步降低,且塑性并未显著提升。3种固溶处理工艺中,推荐采用T41固溶处理工艺。

参考文献:

- [1] 杨青山,颜宏伟,彭鹏,等.高成形镁合金板材最新研究进展[J].稀有金属,2024,48(3):398-410.
YANG Q S, YAN H W, PENG P, et al. Latest progress of high formability in Mg alloy sheets: a review[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2024, 48(3): 398-410.
- [2] 林金保,任伟杰,王心怡.挤压态ZK60镁合金室温拉伸不对称性研究[J].金属学报,2016,52(3):264-270.
LIN J B, REN W J, WANG X Y. Research on the tension-compression asymmetry of as-extruded ZK60 magnesium alloys at room temperature[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(3): 264-270.
- [3] 黄正华,戚文军,郑开宏,等.La对ZK60合金铸态组织

- 与力学性能的影响[J]. 稀有金属, 2012, 36(5): 835-840.
- HUANG Z H, QI W J, ZHENG K H, et al. Effects of La on as-cast microstructure and mechanical property of ZK60 alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2012, 36(5): 835-840.
- [4] 钟罗喜, 袁淑, 张奇, 等. Gd 含量对 Mg-xGd-1.0Y-1.0Zn-0.5Zr 镁合金微观组织和力学性能的影响[J]. 铸造, 2019, 68(7): 699-704.
- ZHONG L X, YUAN S, ZHANG Q, et al. Effects of Gd on microstructure and mechanical properties of Mg-xGd-1.0Y-1.0Zn-0.5Zr magnesium alloys[J]. Foundry, 2019, 68(7): 699-704.
- [5] LI R G, ZHOU S Q, ZHANG H, et al. Rapid drop in ductility of the bimodal-structured Mg-15Gd binary alloy during early aging[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2024, 12(9): 3772-3779.
- [6] HUANG Z H, QI W J, XU J. Effects of Gd on microstructure and mechanical property of ZK60 magnesium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(9): 2568-2576.
- [7] 李景仁, 谢东升, 张栋栋, 等. Ce 添加对 Mg-Ca 挤压合金力学性能与热稳定性影响研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(2): 1-10.
- LI J R, XIE D S, ZHANG D D, et al. Effect of Ce on mechanical property and thermal stability of extruded Mg-Ca alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(2): 1-10.
- [8] 秦兵. 添加 Yb、Ca 对 ZK60 镁合金组织及性能的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- QIN B. The effect of Yb and Ca additions on microstructural evolution and tensile properties of ZK60 cast magnesium alloy[D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [9] 蔡文龙, 石章智, 赵安琪, 等. 合金化元素 Sn 对镁合金组织与性能影响的研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(9): 47-57.
- CAI W L, SHI Z Z, ZHAO A Q, et al. Research progress in effects of alloying element Sn on microstructures and properties of Mg alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(9): 47-57.
- [10] 李志强, 帅川, 柳伟, 等. 高模量镁基材料实验和集成计算研究进展[J]. 航空材料学报, 2024, 44(3): 43-64.
- LI Z Q, SHUAI C, LIU W, et al. Research progress in experimental and integrated calculations of high modulus magnesium based materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(3): 43-64.
- [11] 黄正华, 戚文军, 徐静, 等. Bi 对 ZK60 合金组织与力学性能的影响[C]//2013 广东材料发展论坛——战略性新兴产业发展与新材料科技创新研讨会论文集. 广州: 广东省科学技术协会科技交流部, 2013: 187-188.
- HUANG Z H, QI W J, XU J, et al. The effect of bismuth addition on microstructure and mechanical properties of ZK60 magnesium alloy[C]//Proceedings of the 2013 Guangdong Forum on Materials Development: Symposium on Strategic Emerging Industries Development and Materials Science & Technology Innovation. Guangzhou: Science and Technology Exchange Department, Guangdong Association for Science and Technology, 2013: 187-188.
- [12] 王文珂. ZK60 镁合金板材降温轧制及织构对其成形性影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- WANG W K. Research on lowered temperature rolling of ZK60 plates and the effect of texture on formability[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [13] 郭非. 镁合金板材大应变轧制变形行为及对组织性能的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- GUO F. Deformation behavior of large strain rolling of Mg alloys sheets and its effect on microstructures and properties[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [14] 谢博文. ZK60 镁合金的组织及力学行为研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.
- XIE B W. Research on microstructure and mechanical behavior of ZK60 magnesium alloy[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019.
- [15] 李金柱, 黎小辉, 周楠, 等. Cd 和 Nd 对 ZK60 镁合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(11): 1071-1074.
- LI J Z, LI X H, ZHOU N, et al. Effects of Cd and Nd addition on microstructure and mechanical properties of As-cast ZK60 magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2013, 33(11): 1071-1074.
- [16] ZHANG W C. Evolution of microstructure and mechanical properties of ZK60 magnesium alloy processed by asymmetric lowered-temperature rolling[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(9): 2877-2888.
- [17] 戚文军, 黄正华, 郑开宏, 等. Gd 对 ZK60 变形镁合金组织与力学性能的影响[C]//中国有色金属学会第十四届材料科学与合金加工学术年会论文集. 北京: 中国有色金属学会, 2011: 207-219.
- QI W J, HUANG Z H, ZHENG K H, et al. The effect of gadolinium addition on microstructure and mechanical properties of ZK60 deformed magnesium alloy[C]//Proceedings of the 14th Annual Academic Conference on Materials Science and Alloy Processing, Chinese Society for Nonferrous Metals. Beijing: Chinese Society for Nonferrous Metals, 2011, 207-219.
- [18] 杨文朋, 郭学锋. 往复挤压快速凝固 ZK60 合金的组织与力学性能[J]. 金属热处理, 2011, 36(7): 5-9.

- YANG W P, GUO X F. Microstructure and mechanical properties of ZK60 alloy processed by rapid solidification and reciprocating extrusion[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2011, 36(7): 5-9.
- [19] 刘婷婷, 潘复生, 张喜燕. 稀土 Sc 对 ZK60 镁合金组织和力学性能的影响[C]//2011 中国材料研讨会论文集. 北京: 中国材料研究学会, 2011: 231.
- LIU T T, PAN F S, ZHANG X Y. The effect of scandium addition on microstructure and mechanical Properties of ZK60 magnesium alloy[C]//Proceedings of the 2011 Chinese Symposium on Materials Science, Chinese Materials Research Society. Beijing: Chinese Materials Research Society, 2011: 231.
- [20] 赵阔, 张莉, 孙扬善, 等. Y 对 ZK60 镁合金组织与性能的影响研究[J]. *中国材料进展*, 2009, 28(7): 72-77.
- ZHAO K, ZHANG L, SUN Y S, et al. Effect of Y concentration on the microstructures and mechanical properties of ZK60 alloys[J]. *Materials China*, 2009, 28(7): 72-77.
- [21] 程仁菊, 潘复生, 杨明波, 等. Sr 对 ZK60 镁合金晶粒细化的影响[J]. *北京科技大学学报*, 2008, 30(12): 1397-1401.
- CHENG R J, PAN F S, YANG M B, et al. Effect of Sr on the grain refinement of ZK60 magnesium alloy[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 30(12): 1397-1401.
- [22] LI R G, LI X, ZHANG Y, et al. Achieving good ductility in high-strength Mg-19Gd binary alloy by stacking faults induced $\langle c+a \rangle$ slip[J]. *Materials Research Letters*, 2025, 13(3): 188-196.
- [23] 贺彦达, 吴迪, 张承宇, 等. VW53 镁合金室温压缩过程中的孪生行为研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2024, 53(9): 2604-2613.
- HE Y D, WU D, ZHANG C Y, et al. Twinning behavior of VW53 magnesium alloy during compression at RT[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2024, 53(9): 2604-2613.
- [24] 刘涛, 王小刚, 李伟莉, 等. Gd 含量对铸造 WE43 镁合金显微组织和力学性能的影响[J]. *铸造*, 2020, 69(10): 1030-1033.
- LIU T, WANG X G, LI W L, et al. Effect of Gd content on microstructure and mechanical properties of WE43 magnesium cast alloy[J]. *Foundry*, 2020, 69(10): 1030-1033.
- [25] 梁基谢夫. 金属二元系相图手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- LIANG J X F. Handbook of phase diagrams for metallic binary systems[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.

收稿日期: 2024-10-30; 录用日期: 2025-01-21

基金项目: 国家自然科学基金 (52371037, 52171055, 52171121, 51971151)

通讯作者: 吴迪 (1985—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为镁合金微观组织调控、强韧化机制及先进成形技术, 联系地址: 辽宁省沈阳市沈河区文化路 72 号 (110016), E-mail: dwu@imr.ac.cn; 李荣广 (1980—), 男, 博士, 教授, 研究方向为轻合金材料设计、关键构件制备与性能优化, 联系地址: 辽宁省沈阳市经济技术开发区 11 号街 (110142), E-mail: lirongguang@syuct.edu.cn

(本文责编: 陈 卉)