

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.1111

Mg-8Zn-4Al-(0~1)Sr 镁合金铸态组织中的第二相研究

吴菊英¹, 李景仁², 张晋涛¹, 罗丽¹, 杨明波³, 吴璐⁴, 潘虎成²

(1. 四川工程职业技术学院 材料工程系, 四川 德阳 618000; 2. 东北大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110819;
3. 重庆理工大学 材料科学与工程学院, 重庆 400054; 4. 中国核动力研究设计院核燃料及
材料国家重点实验室, 成都 610041)

摘要:通过扫描电镜观察(SEM)、能谱分析(EDS)、X射线衍射分析(XRD)以及差热分析(DSC)等实验手段,系统地研究了添加微量Sr元素(质量分数0~1%)对铸态Mg-8Zn-4Al(ZA84)镁合金组织中的第二相种类的影响,并阐明了第二相形成与演变的内在机理。实验结果表明:未添加Sr元素的铸态Mg-8Zn-4Al合金组织由Q准晶相和少量Mg₃₂(Al,Zn)₄₉相组成。添加Sr元素后,合金铸态组织中均存在Al₄Sr和Mg₃₂(Al,Zn)₄₉相;其中Al₄Sr相随Sr含量增加而增加,Mg₃₂(Al,Zn)₄₉相随Sr含量增加而减少。在Mg₃₂(Al,Zn)₄₉相中Sr元素以未固溶和固溶两种形式存在,其中未固溶Sr元素的Mg₃₂(Al,Zn)₄₉相具有相对较高的Zn原子浓度和较低的Al原子浓度。相关结果将为第二相析出强化型Mg-8Zn-4Al合金的高强化与耐热化设计提供必要的理论支撑。

关键词:镁合金; Sr合金化; 第二相; 衍射分析; 能谱

中图分类号: TG136

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2021)04-117-12

The second phases in as-cast Mg-8Zn-4Al-(0-1)Sr magnesium alloys

WU Juying¹, LI Jingren², ZHANG Jintao¹, LUO Li¹, YANG Mingbo³, WU Lu⁴, PAN Hucheng²

(1. Department of Materials Engineering, Sichuan Engineering Technical College, Deyang, Sichuan 618000, P. R. China; 2. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China; 3. Chongqing University of Technology, School of Materials Science and Engineering, Chongqing 400054, P. R. China; 4. State Key Laboratory of Nuclear Fuel and Materials, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, P. R. China)

Abstract: To systematically investigate the effect of Sr addition on the second phases in the as-cast Mg-8Zn-4Al magnesium alloy and provide the theoretical basis for the design of the Mg-Zn-Al series alloys containing Sr element, the type and formation mechanism of second phases in the ZA84 as-cast magnesium alloys with low Sr mass fractions (0.1%, 0.3%, and 1.0%) were investigated and analyzed by using scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), differential scanning

收稿日期: 2020-03-24 **网络出版日期:** 2020-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1610253, 51971053); 中央高校基本科研业务费项目(N2002011); 辽宁省-沈阳材料科学国家研究中心联合研发基金(2019JH3/30100040)。

Supported by the National Natural Science of China (U1610253 and 51971053), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (N2002011), and Joint Research Fund of Liaoning-Shenyang National Laboratory for Materials Science (2019JH3/30100040).

作者简介: 吴菊英(1986—), 女, 讲师, 主要从事含Sr镁合金中第二相研究, (E-mail) wujuying@cqu.edu.cn。

通讯作者: 潘虎成, 男, 东北大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为轻合金的设计与制备, (E-mail) panhc@atm.neu.edu.cn。

calorimetry (DSC), and X-ray diffractometer (XRD). The results indicate that for the ZA84 as-cast alloy without Sr addition, besides the quasicrystal phase (Q), an extra $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ phase with a small amount is found to exist in the alloy. With Sr addition, there are Al4Sr and $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ phases in the as-cast alloy; the Al4Sr phase increases and $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ phase decreases with increase of Sr content. In the $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ phases of the as-cast Mg-8Zn-4Al-(0.1-1)Sr magnesium alloys, Sr mainly exists in two forms, i. e. indissolved and dissolved Sr atoms; in the $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ phase where Sr atoms are not dissolved, the Zn concentration is relatively high and Al concentration is low. The results provide the necessary theoretical support for the design of reinforced and heat-resistant Mg-8Zn-4Al alloy.

Keywords: magnesium alloy; Sr alloying; second phase; diffraction analyses; energy dispersive spectrum

镁及镁合金因为具有较低的密度、较高的比强度和比刚度、良好的减震性能和电磁屏蔽性能、良好的切削加工性能以及生物相容性和可回收性等一系列优势广泛应用于航空航天、交通运输、3C 电子等领域^[1-11]。目前广泛商用的镁合金包括 AZ 系镁合金如 AZ31、AZ91 等。但是面对日益苛刻的使用环境,商业镁合金仍需进一步提高性能。AZ 系镁合金由于存在低熔点的 γ -Mg₁₇Al₁₂ 相其力学性能在高于 120 °C 时急剧下降。为提高镁合金的高温性能,研究者们做了大量工作,研发了大量耐热镁合金系。譬如,在 AZ 系合金成分的基础上,增加 Zn 的含量,控制 Zn/Al 比,开发出了 ZA 系镁合金,如 ZA84、ZA102、ZA104、ZA124 等^[12]。在已经试制研究的耐热镁合金系中,Mg-Zn-Al 系合金由于具有较低的成本、较好的高温性能和优良的铸造性能等优势,被认为是一种有发展潜力的高温抗蠕变镁合金^[13-14]。Yang 等^[15]和杨明波等^[16]认为 Mg-Zn-Al 系合金高温抗蠕变机理主要在于通过增加 Zn 的含量和控制 Zn/Al 百分比,在镁合金中形成诸如 $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 和/或 MgZn 等耐热合金相,其中 $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 相的熔点为 535 °C,高于 AZ 系中的 γ -Mg₁₇Al₁₂ 相的熔点,从而提高镁合金的高温抗蠕变性能。虽然从微观组织控制的角度认为 Al 含量越少越容易得到 $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 和/或 MgZn 等耐热合金相,但综合考虑其力学、铸造性能及材料密度等因素,Mg-Zn-Al 系耐热镁合金中 Zn 和 Al 的含量应有一个较为合适的比例:当 Al 量小于 8% 时,随着 Zn 含量增加,合金抗拉强度提高,伸长率有所下降;而当含 Al 量大于 8% 时,随着 Zn 含量增加,合金抗拉强度降低,伸长率提高。因此,要保证 Mg-Zn-Al 系合金具有良好的综合力学、铸造性能,Zn 和 Al 的含量以及 Zn/Al 比应控制在一定的范围内。Zhang 等^[13]也在较大 Zn、Al 含量范围内研究了 ZA 系合金的铸态组织和力学性能,结果表明:Mg-(8~14)Zn-(2~6)Al 合金的典型铸态组织为初生 α -Mg 以及晶界共晶体(由 α 相和粗大的 β 相组成,其中 β 相为三元 Mg_cZn_yAl_z 相)。

在力学性能方面,Mg-(10~12)Zn-(2~4)Al 合金的抗拉强度和屈服强度均优于 AZ91 合金,其中:Zn 含量为 8%~12% 时,随着 Al 含量增加,合金屈服强度增加;Zn 含量为 8%~10% 时,Al 含量 4% 的合金具有最高的抗拉强度;而在 Zn 含量为 12% 和 14% 时,合金的抗拉强度随 Al 含量增加而降低。Mg-Zn-Al 系合金具有成本较低、高温性能较好和铸造性能优良等优势。而碱土金属 Sr 也通常作为典型耐热镁合金 Mg-Al-Sr 系中的主加元素,得到了较为广泛的应用^[17-21]。杨明波等^[22]研究加入质量分数为 0.05%~0.15% 的 Sr 到 ZA84 镁合金,结果显示可提高室温和 150 °C 下的拉伸性能。因此,Sr 作为一种耐热镁合金的合金化元素,加入 ZA84 耐热镁合金系中,有望进一步提高合金的耐热性能。

迄今为止对于加入 Sr 元素对 ZA 系合金组织及性能影响的研究还比较少。笔者拟系统地研究 Sr 元素及其含量变化对 Mg-8Zn-4Al 镁合金铸态及均匀化处理后组织中第二相的类型的影响规律,从而为后续对性能的研究提供理论支撑。

1 实验方法

试验合金的原材料分别为工业纯 Mg、工业纯 Al、工业纯 Zn、化学纯 Sr、Mg-4.6Mn 中间合金和 Mg-27.85Zr 中间合金。采用真空封装熔炼方法。首先使用真空氩弧焊熔炼炉封装合金,具体步骤为:1)将规格为 150 mm× ϕ 36、壁厚为 1.5 mm 的无缝 45 钢管用钢刷和无水乙醇将内壁洗净,刷上一层薄薄的氮化硼;

2)将无缝钢管一端夹平,在真空氩弧焊熔炼炉中焊接密封;3)将总重量为30 g的合金按设计成分装入无缝钢管,并将另一端夹平,放入真空氩弧焊熔炼炉中;4)用机械真空泵将真空炉抽真空并用氩气洗气3次,随后采用氩弧焊接,密封无缝管;5)采用SG2-5-12井式电阻炉熔炼,升温至800℃保温2 h,待完全冷却后,用线切割机破坏无缝管,取出试样。

由于真空封装熔炼过程不存在氧化和烧损,因此仅对其打磨至金相水准进行X射线荧光光谱测试,以定量分析其化学成分。实验设备为日本岛津公司生产的XRF-1800CCDE型X射线荧光光谱仪,采用面扫描方式进行测试。成分测试结果与名义成分基本一致,如表1所示。

表1 Mg-8Zn-4Al-xSr 试验合金设计成分

Table 1 The nominal compositions of Sr-containing Mg-8Zn-4Al-xSr experimental alloys

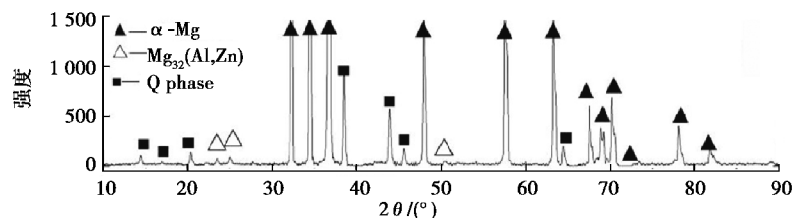
合金	设计成分				
	$w(\text{Al})/\%$	$w(\text{Zn})/\%$	$w(\text{Mn})/\%$	$w(\text{Sr})/\%$	$w(\text{Mg})/\%$
Mg-8Zn-4Al	4.0	8.0	0.3		87.7
Mg-8Zn-4Al-0.1Sr	4.0	8.0	0.3	0.1	87.6
Mg-8Zn-4Al-0.3Sr	4.0	8.0	0.3	0.3	87.4
Mg-8Zn-4Al-1.0Sr	4.0	8.0	0.3	1.0	86.7

试样经8%的硝酸蒸馏水溶液腐蚀后,在配有Oxford能谱分析仪(EDS)的TESCAN VEGA II LMU型扫描电子显微镜上观察(SE/BSE)和确定不同形态的合金相的成分,使用的加速电压为10 kV。采用Rigaku D/MAX-2500PC型X射线衍射仪(XRD)分析合金中的相组成。使用STA 449F3型热分析仪进行差热分析实验(DSC)。

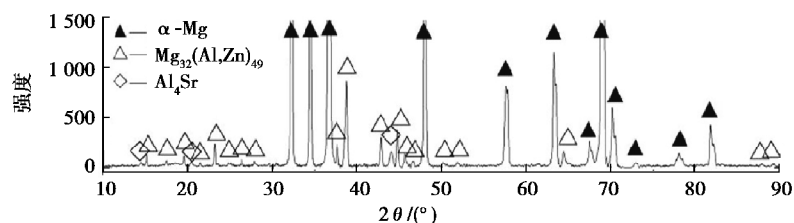
2 实验结果及分析

2.1 Mg-8Zn-4Al-(0~1.0)Sr 镁合金铸态组织的XRD物相分析

图1显示了不同Sr含量(0%,0.1%,0.3%,1.0%)的铸态Mg-8Zn-4Al镁合金的XRD衍射峰。结合文献中的报道^[13,23],从图1(a)中可以看出,在铸态Mg-8Zn-4Al镁合金中,主要的合金相为 α -Mg、Q准晶相以及少量的 $\text{Mg}_{32}(\text{Al},\text{Zn})_{49}$ 相;当加入0.1%的Sr元素以后,合金中的Q准晶相的形成受到抑制,基本上全部转变为 $\text{Mg}_{32}(\text{Al},\text{Zn})_{49}$ 相,并且出现了新的 Al_4Sr 相的衍射峰(图1(b));当Sr含量在0.1%~1.0%范围内时,合金相的类型没有明显的变化,但是 Al_4Sr 相和 $\text{Mg}_{32}(\text{Al},\text{Zn})_{49}$ 相的衍射峰强度随着Sr含量增加分别升高和降低,表明其数量分别增加和减少(图1(b)~(d))。



(a) 不含Sr



(b) 0.1%Sr

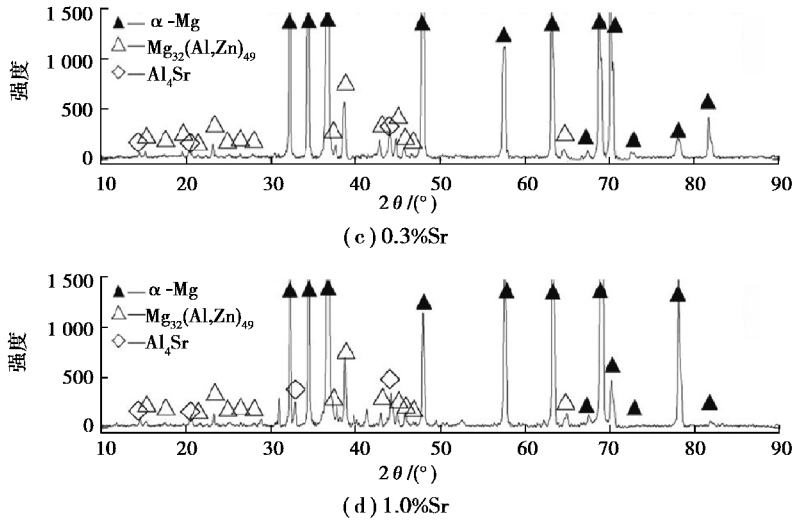


图 1 不同锶含量的铸态 Mg-8Zn-4Al 镁合金 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of the as-cast Mg-8Zn-4Al experimental alloys with different Sr contents

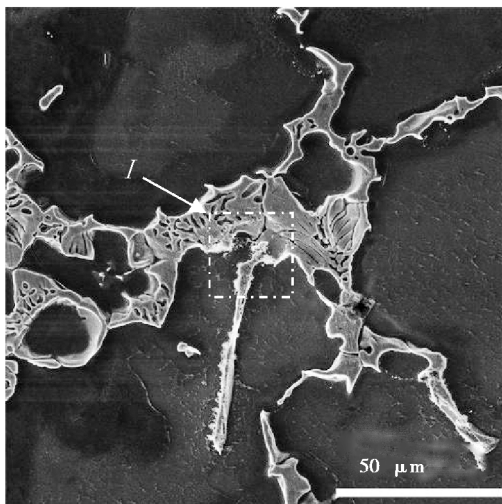
2.2 Mg-8Zn-4Al-(0~1.0)Sr 镁合金铸态组织中的第二相

图 2 显示了铸态 Mg-8Zn-4Al 合金的二次电子(SE)和背散射电子(BSE)扫描电镜照片。从图中可以看到,实验合金中的第二相沿枝晶界分布,且呈现出不同的形态。根据图中的 EDS 结果,层片状共晶第二相和大块状离异共晶第二相(图 2(c)中的 A、B 两个箭头处)为通常文献中报道的 Q 准晶相^[13,23],并且面扫描结果表明该相的成分起伏不大,仅能从表 2 的 EDS 结果中观察到细微的区别。此外,还能够观察到少量棒状 Al-Mn 相。

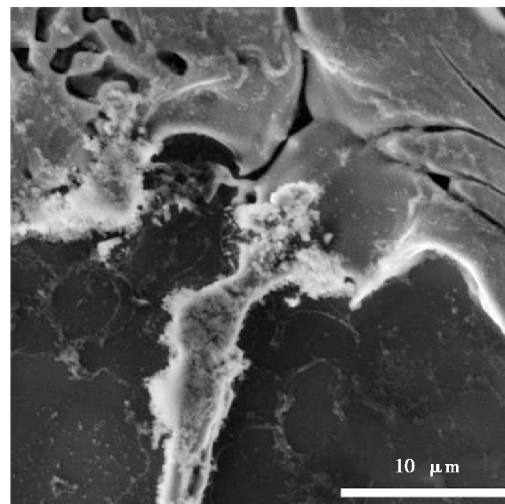
表 2 未添加锶的铸态 Mg-8Zn-4Al 合金的能谱分析结果

Table 2 EDS results of the as-cast Mg-8Zn-4Al experimental alloys without Sr addition

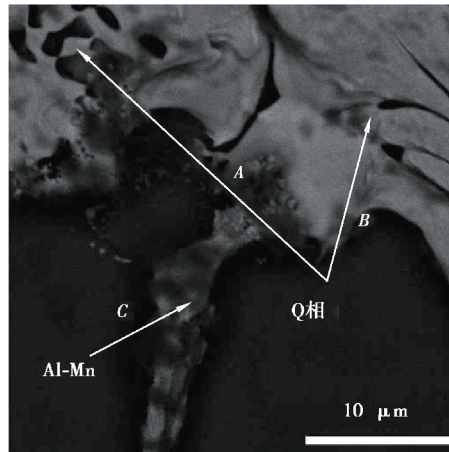
测量位置	$w(\text{Mg})/\%$	$w(\text{Al})/\%$	$w(\text{Zn})/\%$	$w(\text{Mn})/\%$	$w(\text{Sr})/\%$	合计/ $\%$
Fig. 2(c)-A	45.53	21.85	32.63			100
Fig. 2(c)-B	47.37	18.97	33.66			100
Fig. 2(c)-C	10.78	76.63		12.59		100



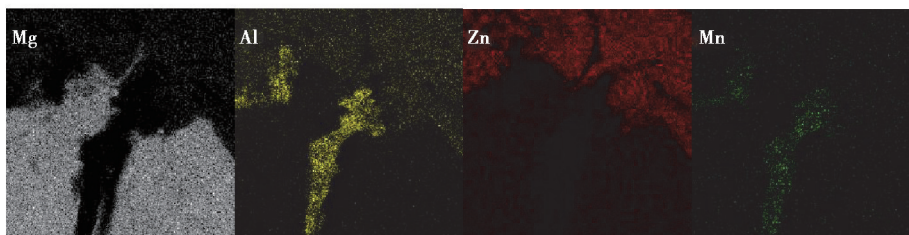
(a) 低倍 SEM



(b) 中区域 A 的高倍 SEM



(c) 区域 I 的BSE



(d) 区域 I 的X射线面扫描

图 2 未添加锶的铸态 Mg-8Zn-4Al 试验合金的 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of the as-cast Mg-8Zn-4Al experimental alloy without Sr addition

张静等^[13]研究了 Mg-Zn-Al 系合金成分对微观结构和力学性能的影响,提出了一种 Al 含量及 Zn/Al 比对显微组织相组成的影响示意图(图 3),指出:Zn/Al 比较低的 ZA74 合金铸态组织由二十面对称的准晶的 Q 相和 α -Mg 组成,而 Zn/Al 比较高的 ZA104 合金铸态组织由鱼骨状的 τ -Mg₃₂(Al,Zn)₄₉ 相和 α -Mg 组成。本研究的 Mg-8Zn-4Al 合金的 Zn/Al 比介于两者之间,且较为靠近 ZA74 合金;根据图 3 所示,应该存在大量二十面对称的 Q 准晶相和少量 τ -Mg₃₂(Al,Zn)₄₉ 相,本研究的结果与之较吻合。

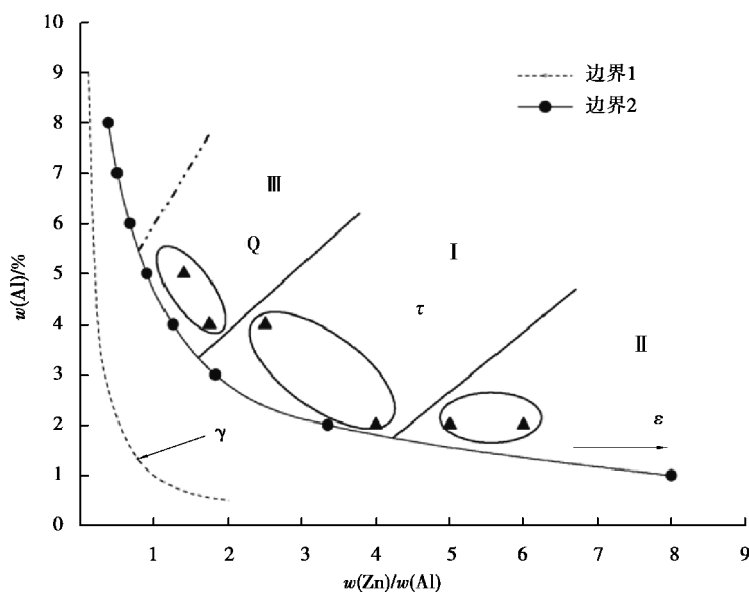


图 3 Al 含量及 Zn/Al 比对显微组织相组成的影响示意图^[13]

Fig. 3 Schematic diagram of microstructural constituents as a function of the Zn/Al ratio and the Al content^[13]

图 4 为低 Sr 含量(0.1%, 0.3% 和 1.0%)的 Mg-8Zn-4Al 系合金铸态组织中合金相的低、高倍 SEM 照片(其中低倍的为二次电子 SE 相, 高倍的为背散射电子 BSE 相), 图 5~7 为各个合金的面扫描结果, 图 4~7 中各箭头处的 EDS 结果见表 3。对比图 2 和图 4 可以看出: 添加少量(0.1%~0.3%)Sr 到 Mg-8Zn-4Al 合金中后, 合金中第二相的形态和分布未见明显变化, 组织中均存在类似未添加 Sr 的 Mg-8Zn-4Al 铸态合金中的细小层片状共晶第二相和大块状离异共晶第二相; 但添加 1.0% Sr 后, 合金中则出现了一些粗大的层片状第二相(见图 4(e)), 且合金中第二相的数量显著增加。

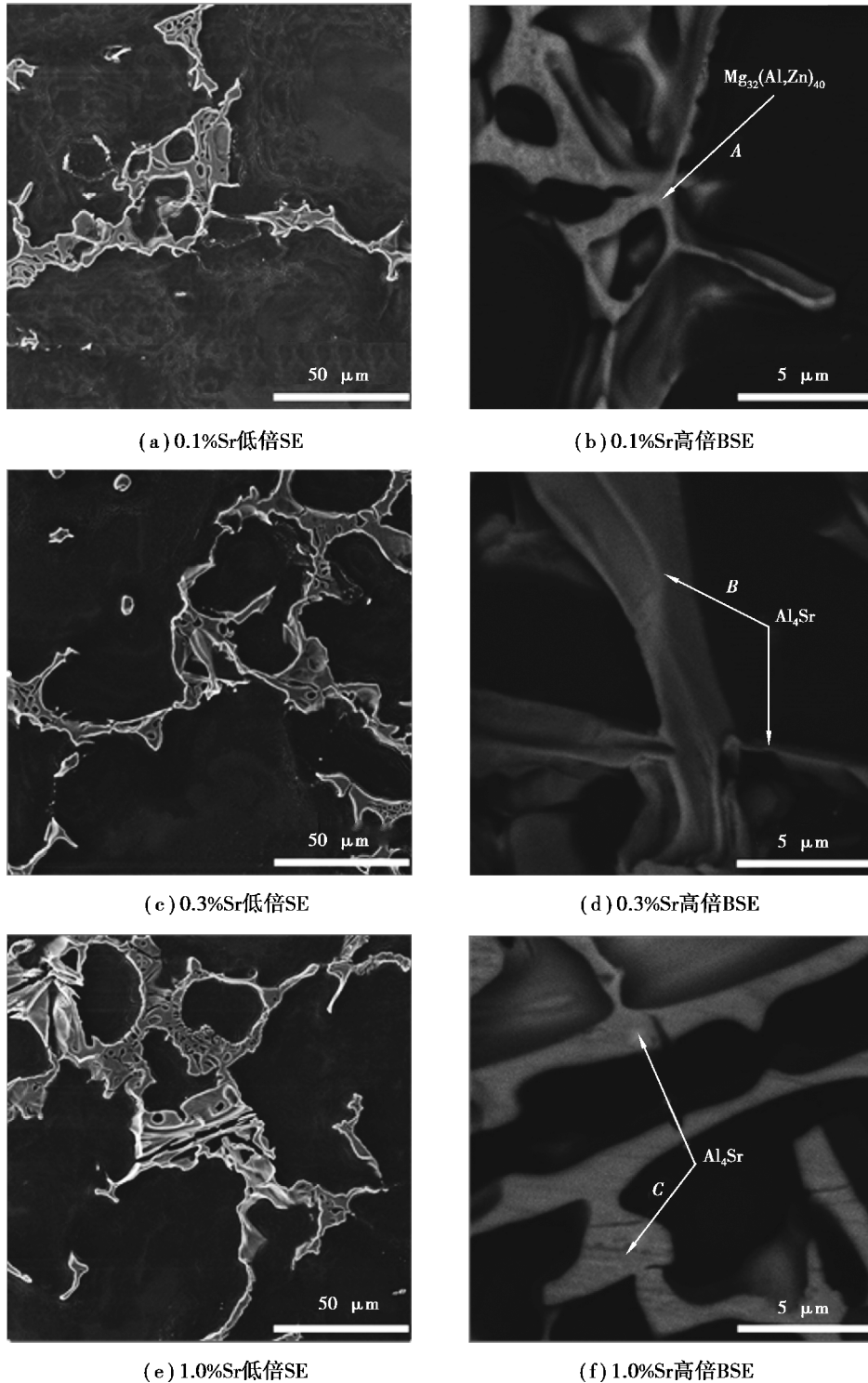


图 4 低铈含量铸态 Mg-8Zn-4Al 试验合金的低倍(SE)、高倍(BSE)扫描电镜照片, (b)(d)(f)为(a)(c)(e)中矩形区域的放大图片

Fig. 4 Low and high magnification SEM images of the as-cast Mg-8Zn-4Al experimental alloys with low Sr additions, where (b), (d) and (f) are the magnified images of the rectangular framed areas in (a), (c), and (e), respectively

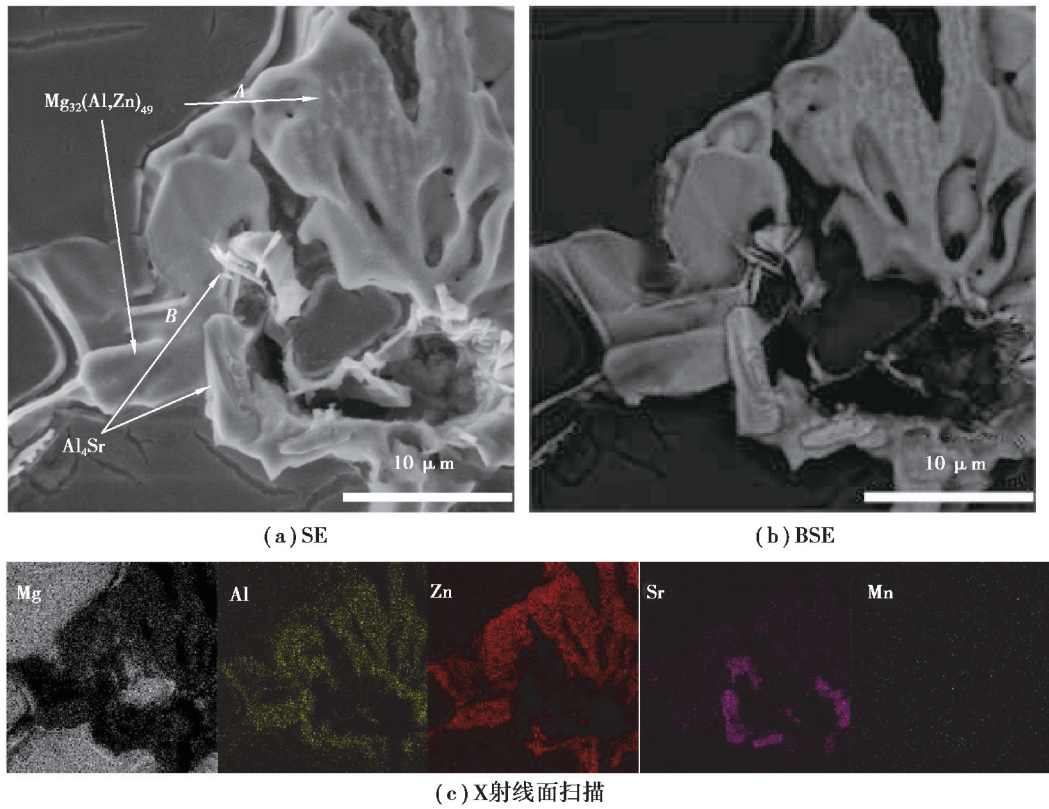


图 5 Mg-8Zn-4Al-0.1Sr 铸态合金的面扫描结果

Fig. 5 The SEM images of the as-cast Mg-8Zn-4Al-0.1Sr experimental alloy

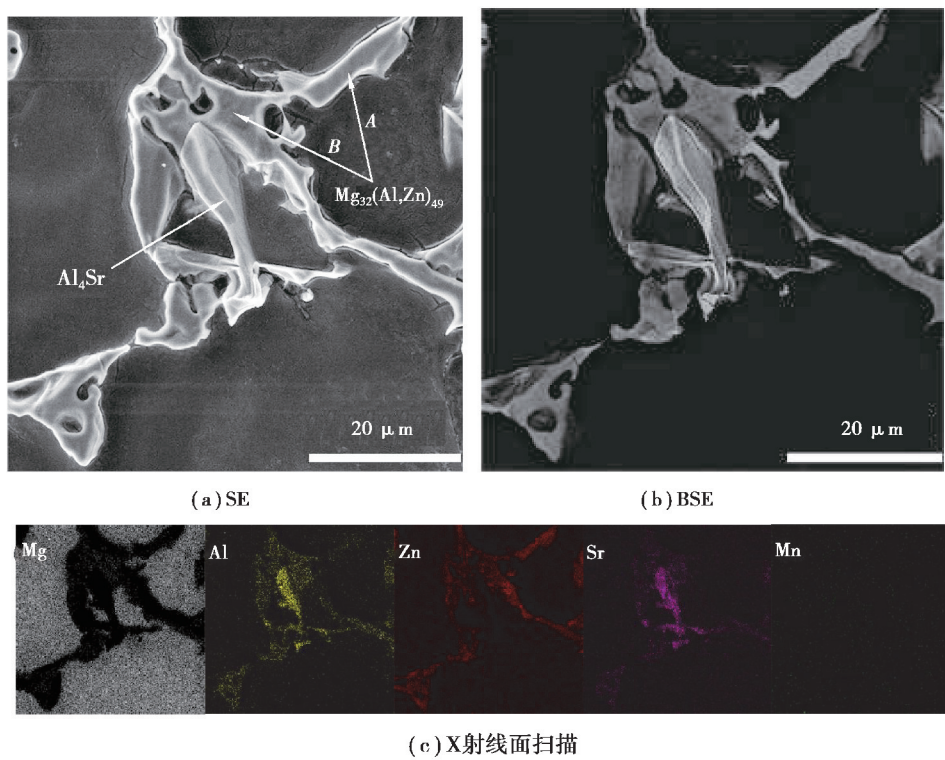


图 6 Mg-8Zn-4Al-0.3Sr 铸态合金的面扫描结果

Fig. 6 The SEM images of the as-cast Mg-8Zn-4Al-0.3Sr experimental alloy

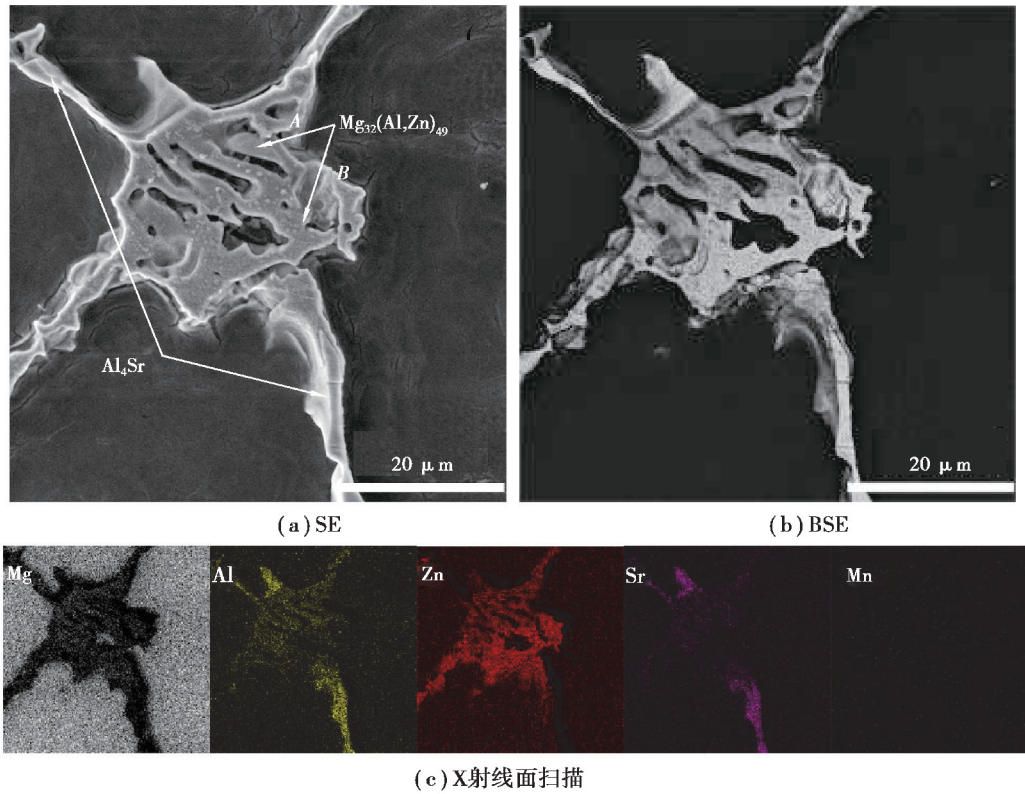


图 7 Mg-8Zn-4Al-1Sr 铸态合金的面扫描结果

Fig. 7 The SEM images of the as-cast Mg-8Zn-4Al-1Sr experimental alloy

表 3 铸态 Mg-8Zn-4Al-(0.1~1)Sr 合金的能谱分析结果

Table 3 EDS results of the as-cast Mg-8Zn-4Al-(0.1~1)Sr experimental alloys

分析点	$w(\text{Mg})/\%$	$w(\text{Al})/\%$	$w(\text{Zn})/\%$	$w(\text{Mn})/\%$	$w(\text{Sr})/\%$	合计/ $\%$
Fig. 4(b)-A	38.60	30.34	27.70		3.36	100
Fig. 4(d)-B	7.23	56.07	16.05		20.65	100
Fig. 4(f)-C	7.96	56.32	15.13		20.60	100
Fig. 5(a)-A	39.74	30.38	26.52		3.36	100
Fig. 5(a)-B	26.13	43.66	12.04		18.16	100
Fig. 6(a)-A	43.17	13.79	43.05			100
Fig. 6(a)-B	44.65	25.75	26.03		3.57	100
Fig. 7(a)-A	44.25	26.60	25.46		3.69	100
Fig. 7(a)-B	41.98	16.01	42.01			100

从高倍 BSE 照片中可以看出:添加 0.1% Sr 的合金中出现了花瓣状的含 Sr 第二相,根据表 3 中的能谱结果可知其为固溶了 Sr 元素的 $\text{Mg}_{32}(\text{Al},\text{Zn})_{49}$ 相(见图 4(b));添加 0.3% Sr 的合金中除了如前所述的 $\text{Mg}_{32}(\text{Al},\text{Zn})_{49}$ 相以外,还出现了条块状含 Sr 第二相(见图 4(d)),根据能谱结果可以确定其为类似前文中提到的 Al_4Sr 相;当 Sr 含量增加至 1.0% 后,合金组织中的第二相类型与添加 0.3% Sr 的合金完全相同,但 Al_4Sr 相的形态由不规则条块状变为粗大层片状,且数量显著增加(见图 4(f))。

图 5~7 的面扫描结果进一步显示了低铈含量 Mg-8Zn-4Al 铸态合金组织中的第二相的细节信息。从图

5的面扫描结果中可以看出除了固溶了Sr元素的 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相(图5(a)中A箭头处)以外,Mg-8Zn-4Al-0.1Sr合金铸态组织中还可以观察到一些同时富集Al、Sr元素的不规则块状和/或细小层片状第二相,结合表3中的能谱结果可以确定为 Al_4Sr 相。而从图6的面扫描结果中可以看出,Mg-8Zn-4Al-0.3Sr合金组织中存在未固溶Sr元素和固溶Sr元素2种 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相(图6(a)中A、B箭头处),其中未固溶Sr元素的相具有相对较高的Zn元素浓度和较低的Al元素浓度,这与表3中的EDS结果是一致的。图7显示了与图6中类似的结果。

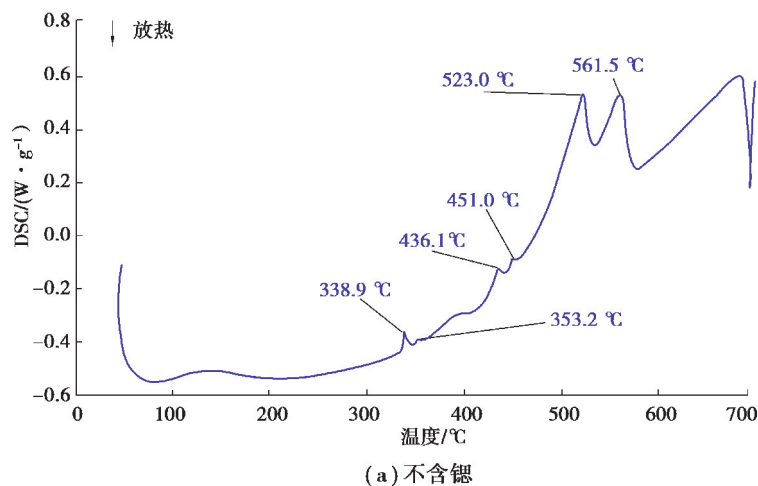
以上结果表明:未添加Sr的铸态Mg-8Zn-4Al合金组织由二十面对称的Q准晶相和少量 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相组成。较低Sr含量(0.1%~1.0%)的合金铸态组织中均存在 $\alpha-Mg$ 、 Al_4Sr 和 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相,并且在 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相中存在未固溶Sr元素和固溶Sr元素两种形式,其中未固溶Sr元素的相具有相对较高的Zn元素浓度和较低的Al元素浓度。此外,在0.1%~1.0%范围内,随着Sr含量增加,铸态Mg-8Zn-4Al合金组织中 Al_4Sr 相的数量增加, $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相的数量持续减少。以上结果均与XRD结果相吻合。

由文献[24-25]中铸态Mg-Al-Zn-Sr系合金的凝固过程可知,添加0.1%的Sr元素到Mg-8Zn-4Al合金中以后,首先随着温度降低, $\alpha-Mg$ 枝晶形核并长大;随着温度降低,由于Al和Sr原子的结合力较强,容易通过共晶反应($L \rightarrow \alpha-Mg + Al_4Sr$)在高温下形成较为稳定的 Al_4Sr 相;当温度持续降低时,Al、Zn原子在固液界面处强烈富集,容易通过共晶或转晶反应形成 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相,并且由于液相中存在残余Sr,有部分 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相会固溶一些Sr原子。因此Mg-8Zn-4Al-0.1Sr的合金组织由 $\alpha-Mg$ 、 Al_4Sr 和 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相组成。随着Sr含量在0.1%~1.0%范围内增加,通过共晶反应($L \rightarrow \alpha-Mg + Al_4Sr$)生成的 Al_4Sr 相数量增加,并且由于共晶反应消耗了大量Al原子,剩余液相中的Al原子数量大量减少,后续通过转晶反应生成的 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相的数量持续降低。

综上所述,随着Sr含量增加(即Sr/Al原子比增加),Mg-8Zn-4Al-(0.1~1.0)Sr合金铸态组织中含Sr第二相的类型的变化服从以下规律: $Mg_{32}(Al,Zn)_{49} \rightarrow Al_4Sr$;而这2种相的Sr/Al比分别约为0.11和0.25,Sr/Al比例也是增加的,表明第二相的类型变化直接受到合金中Sr/Al比的影响。

2.3 Mg-8Zn-4Al-(0.1-1.0)Sr 铸态合金的差热分析

图8为不同Sr含量的Mg-8Zn-4Al铸态试验合金的DSC加热曲线,从图中可以看出,不同Sr含量的Mg-8Zn-4Al系合金相变过程非常复杂。由于缺少Mg-Zn-Sr、Al-Zn-Sr三元相图数据,基于Mg-Zn-Sr、Mg-Al-Sr、Al-Zn-Sr、Mg-Al-Zn这4个三元系构建Mg-Zn-Al-Sr四元相图更加困难,从而无法结合热力学相图与DSC数据协同分析。因此只能结合组织分析得到部分信息:对于未添加Sr的Mg-8Zn-4Al铸态合金,在523℃左右发生的相变应该对应准晶Q相的形成;而最后一个338.9℃附近的吸热峰应该对应 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相的形成,其间有很多相变峰,对应着复杂的相变过程,有待进一步进行分析。而对于低铈含量(0.1%~1.0%)的合金,可能在523.7~599.6℃范围内都生成了Q准晶相,Q准晶相又在后续的反应中转变成了其他第二相,并且由于相变温度与 $\alpha-Mg$ 反应吸热峰靠得过近,在Sr含量为1.0%的合金中无法被明显观察到,仅能观察到Mg峰的宽化;而 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相的形成温度在340.9~352.9℃范围内随着Sr含量增加略有降低。



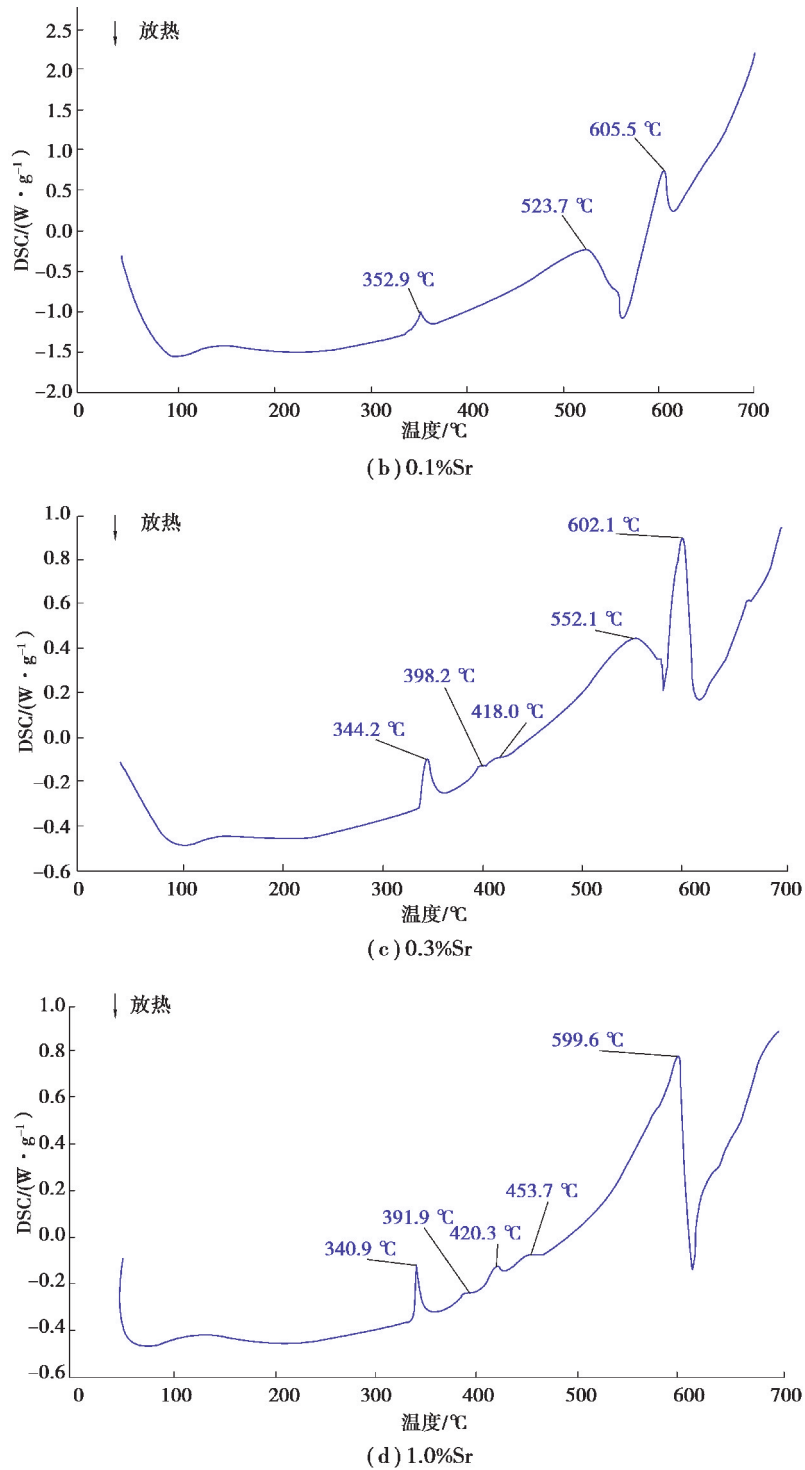


图 8 不同 Sr 含量的 Mg-8Zn-4Al 铸态试验合金的 DSC 加热曲线

Fig. 8 DSC heating curves for the as-cast Mg-8Zn-4Al experimental alloys with different Sr contents

3 结 论

通过添加不同含量的 Sr 系统地研究了 Mg-8Zn-4Al- x Sr 铸态合金的微观组织, 并采用 SEM、DSC、XRD 等分析测试手段对合金内的第二相种类进行了表征, 得出以下主要结论。

1) 未添加 Sr 的铸态 Mg-8Zn-4Al 合金组织由 Q 准晶相和少量 $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 相组成。较低 Sr 含量 (0.1%~1.0%) 的合金铸态组织中均存在 Al_4Sr 和 $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 相。

2) Mg-8Zn-4Al-(0.1~1.0)Sr 镁合金铸态组织中的 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相有些会固溶一部分 Sr 原子,而未固溶 Sr 原子的 $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相具有相对较高的 Zn/Al 比。

3) Sr 元素质量分数在 0.1%~1.0% 范围内增加,铸态 Mg-8Zn-4Al-xSr 合金组织中 Al_4Sr 相的数量增加, $Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相的数量减少。

参考文献:

- [1] Zeng Z R, Zhu Y M, Nie J F, et al. Effects of calcium on strength and microstructural evolution of extruded alloys based on Mg-3Al-1Zn-0.3Mn[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(9): 4344-4363.
- [2] Yin S Q, Duan W C, Liu W H, et al. Influence of specific second phases on corrosion behaviors of Mg-Zn-Gd-Zr alloys[J]. Corrosion Science, 2020, 166: 108419.
- [3] Wang P Q, Guo E Y, Wang X J, et al. The influence of Sc addition on microstructure and tensile mechanical properties of Mg-4.5Sn-5Zn alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2019, 7(3): 456-465.
- [4] Md S, Birru A K. Mechanical and metallurgical properties of friction stir welded dissimilar joints of AZ91 magnesium alloy and AA 6082-T6 aluminium alloy[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2019, 7(2): 264-271.
- [5] 柳杨璐, 刘婷婷, 潘复生, 等. 基于第一性原理的镁合金合金相及固溶体研究进展[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(10): 30-44.
Liu Y L, Liu T T, Pan F S, et al. Research progress on intermetallic compounds and solid solutions of Mg alloys based on first-principles calculation [J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(10): 30-44. (in Chinese)
- [6] 王鹏, 付传锋, 胡亚民. 镁合金体积成形进展[J]. 精密成形工程, 2011, 3(4): 42-46.
Wang P, Fu C F, Hu Y M. The development of bulk forming of magnesium alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(4): 42-46. (in Chinese)
- [7] 杨明波, 沈威武, 钟罗喜, 等. Zn 和 Gd 对 Mg-4.0Y-2.8Nd-0.4Zr 镁合金铸态组织和拉伸性能的影响 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019(3): 143-149.
Yang M B, Shen W W, Zhong L X, et al. Effects of Zn and Gd additions on as-cast microstructure and tensile properties of Mg-4.0Y-2.8Nd-0.4Zr magnesium alloy [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019 (3): 143-149. (in Chinese)
- [8] 舒大禹, 陈强, 胡传凯, 等. 镁合金异形件等温精密成形预制坯优化设计[J]. 精密成形工程, 2011, 3(5): 26-30.
Shu D Y, Chen Q, Hu C K, et al. Optimization design of isothermal forming preform for magnesium alloy irregular part[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(5): 26-30. (in Chinese)
- [9] 陈家明, 宋登辉, 周涛, 等. 累积叠轧焊温度对 AZ31 镁合金板材组织与性能的影响[J]. 精密成形工程, 2019, 11(4): 129-133.
Chen J M, Song D H, Zhou T, et al. Effects of accumulative rolling temperature on microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy sheet[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(4): 129-133. (in Chinese)
- [10] 吕胡缘, 宋登辉, 周涛, 等. 循环道次对高温叠轧 AZ31 镁合金板材组织与性能的影响[J]. 精密成形工程, 2019, 11(3): 117-121.
Lyu H Y, Song D H, Zhou T, et al. Effects of cyclic passes on micro-structure and properties of AZ31 magnesium alloy sheet rolled at high temperature[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(3): 117-121. (in Chinese)
- [11] 陶健全, 张艳平, 李晓松, 等. Mg-Y-Nd-Zr 镁合金焊接接头的显微组织与力学性能研究[J]. 精密成形工程, 2019, 11(1): 76-80.
Tao J Q, Zhang Y P, Li X S, et al. Microstructure and mechanical properties of welded joint for Mg-Y-Nd-Zr magnesium alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(1): 76-80. (in Chinese)
- [12] 陈振华. 耐热镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
Chen Z H. Heat-resistant magnesium alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [13] Zhang J, Guo Z X, Pan F S, et al. Effect of composition on the microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Al alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 456(1/2): 43-51.
- [14] Zhang Z, Couture A, Luo A L. An investigation of the properties of Mg-Zn-Al alloys[J]. Scripta Materialia, 1998, 39(1): 45-53.
- [15] Yang M B, Bai L, Pan F S, et al. Effects of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of ZA84

- magnesium alloy[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, 2008, 15(6): 747-752.
- [16] 杨明波, 沈佳, 白亮, 等. ZA84 镁合金在半固态等温热处理过程中的组织演变[J]. 特种铸造及有色合金, 2008 (9): 690-692.
Yang M B, Shen J, Bai L, et al. Microstructural evolution of ZA84 magnesium alloy during semi-solid isothermal heat treatment [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008 (9): 690-692. (in Chinese)
- [17] Hirai K, Somekawa H, Takigawa Y, et al. Effects of Ca and Sr addition on mechanical properties of a cast AZ91 magnesium alloy at room and elevated temperature [J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 403 (1/2): 276-280.
- [18] Bai J, Sun Y S, Xun S, et al. Microstructure and tensile creep behavior of Mg-4Al based magnesium alloys with alkaline-earth elements Sr and Ca additions[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 419(1/2): 181-188.
- [19] Baril E, Labelle P, Pekguleryuz M. Elevated temperature Mg-Al-Sr: creep resistance, mechanical properties, and microstructure[J]. JOM, 2003, 55(11): 34-39.
- [20] 杨明波, 潘复生, 李忠盛, 等. Sr 对 Mg-3Al-1Zn 镁合金铸态组织的影响[J]. 重庆工学院学报, 2007(5): 10-12.
Yang M B, Pan F S, Li Z S, et al. Effects of Sr on the as-cast microstructure of Mg-3Al-1Zn magnesium alloy[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2007(5): 10-12. (in Chinese)
- [21] 吴璐, 潘复生, 杨明波, 等. Mg-3Al-1Zn-(0~0.5)Sr 镁合金铸态组织中的第二相研究[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(3): 1-9.
Wu L, Pan F S, Yang M B, et al. An investigation on second phases in the as-cast Mg-3Al-1Zn-(0-0.5)Sr magnesium alloys [J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(3): 1-9. (in Chinese)
- [22] 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, 2010, 19(7): 1043-1050.
- [23] Bourgeois L, Muddle B C, Nie J F. The crystal structure of the equilibrium Φ phase in Mg-Zn-Al casting alloys [J]. Acta Materialia, 2001, 49(14): 2701-2711.
- [24] 吴菊英, 吴璐, 潘复生, 等. 均匀化退火对 Mg-3Al-1Zn-2.2/5Sr 镁合金中第二相的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(7): 1638-1642.
Wu J Y, Wu L, Pan F S, et al. Effect of homogenization annealing on second phases in Mg-3Al-1Zn-2.2/5Sr magnesium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(7): 1638-1642. (in Chinese)
- [25] 吴璐, 潘复生, 杨明波, 等. Mg-9Al-1Zn(0-0.6)Sr 镁合金铸态组织及晶粒细化研究[J]. 功能材料, 2014, 45(2): 63-67.
Wu L, Pan F S, Yang M B, et al. An investigation of as-cast microstructure and grain refinement in Mg-9Al-1Zn-(0-0.6)Sr magnesium alloys [J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(2): 63-67. (in Chinese)

(编辑 罗 敏)