

含锶镁合金组织和性能的最新研究进展

潘复生, 杨明波

(重庆大学 国家镁合金工程技术研究中心, 重庆 400030)

摘 要: 锶作为一种应用潜力较大的镁合金合金化元素, 已在镁合金中的应用研究领域引起国内外的广泛关注和高度重视。国内外近几年来的研究工作主要集中在锶对镁合金晶粒细化、第二相改性和含锶耐热镁合金的发展等方面。对国内外含锶镁合金研究工作的最新进展进行综述, 介绍重庆大学近几年在含锶镁合金方面的最新研究成果, 讨论若干新型含锶镁合金的组织 and 性能, 分析含锶镁合金发展和生产应用中存在的问题和今后的研究方向。

关键词: 镁合金; Sr; Sr 中间合金; 含 Sr 新型镁合金; 组织; 性能

中图分类号: TG146.2; TG146.4

文献标志码: A

Research status on microstructure and mechanical properties of magnesium alloys containing strontium

PAN Fu-sheng, YANG Ming-bo

(National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Sr is a very potential alloying and/or micro-alloying element for magnesium alloys. The investigations about the effects of Sr addition on the microstructure and properties of magnesium alloys and the development of new type Sr-containing magnesium alloys have attracted an increasing interest. Recently, the work was focused on the grain refinement and the improvement of second phases in magnesium alloys by addition of strontium. The latest research status about the effects of Sr addition on the microstructure of magnesium alloys and the development of new type magnesium alloys containing Sr were reviewed, and the existing problems were discussed. The research work shows that the microstructure and composition of the master alloys containing Sr have obvious influence on the grain refinement of magnesium alloys caused by addition of strontium.

Key words: magnesium alloys; Sr; Sr master alloys; new type Sr-containing magnesium alloys; microstructure; mechanical properties

镁合金由于具有资源丰富、密度低、比强度和比刚度、阻尼减振降噪能力强、能屏蔽电磁辐射和易于再生利用等优点, 被誉为“21 世纪的绿色结构材料”。目前, 虽然镁合金在汽车和航空航天等领域正逐步得到应用, 但随着应用的不断深入, 对镁合金的性能也提出了越来越高的要求。一些阻碍镁合金大规模应用的技术瓶颈仍未得到有效解决, 如镁合金常温和高温力学性能较低、塑性变形能力和耐腐蚀性能差等。

因此, 如何提高镁合金的综合性能一直是镁合金材料研究的一个重点和难点。

由于晶粒细化对镁合金力学性能及成形和加工性能等具有显著的改善作用, 因此, 其研究工作一直受到国内外的广泛关注和高度重视。目前, 国内外已研究和发现了较多的镁合金晶粒细化方法, 其中, 采用较多的主要集中在微合金化、快速凝固和后续塑性加工大变形等方法上, 而在这些晶粒细化方法中, 又以

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB613704); 国家杰出青年基金资助项目(50725413)

收稿日期: 2010-04-30; **修订日期:** 2011-07-30

通信作者: 潘复生, 教授, 博士; 电话: 023-65112635; E-mail: fspan@cqu.edu.cn

微合金化方法应用最多和最为简单实用。Sr 作为一种有效的晶粒细化用微合金化元素, 其在铝合金中已得到了广泛的应用, 但在镁合金晶粒细化上的应用才刚刚起步^[1-3]。同时, 除了细化镁合金晶粒外, Sr 微合金化对镁合金中的合金相也已发现存在明显的变质和/或细化作用。此外, 作为主体合金元素, Sr 还被用于新型镁合金(如 Mg-Al-Sr 和 Mg-Sn-Sr 等)的研制开发^[1, 4-9]。也正是看到 Sr 元素在镁合金应用中的优势及潜力, 国内外对于 Sr 影响镁合金的组织及含 Sr 新型镁合金开发给予了广泛的关注和高度的重视, 并对此开展了较深入的研究, 取得了一些积极的进展。其中, 重庆大学在这方面开展了长期连续的工作, 发表的重要论文占了该方向国内外重要论文的三分之一以上。本文作者结合重庆大学近几年在含锶镁合金方面的最新研究成果, 对国内外含锶镁合金研究工作的最新进展进行了综述, 讨论了若干新型含锶镁合金的组织 and 性能, 分析了含锶镁合金发展和生产应用中存在的问题和今后的研究方向。

1 锶对镁合金晶粒的细化作用

虽然已有研究发现^[10-12]: 通过对 C、RE、Si、Ca、B、Ti、Sb 和 Zr 等元素微合金化可在一定程度上细化镁合金的晶粒。但总体而言, 这些已报道的微合金化元素在镁合金晶粒细化效果和通用性等方面还存在不少问题^[10], 如对于含 Al 的镁合金, 迄今为止还没有找到一种通用可靠的微合金化晶粒细化剂; 而对于不含 Al 的镁合金, 虽然目前其公认的最为有效的微合金化晶粒细化元素是 Zr, 但 Zr 的使用范围也还仅局限于特定的镁合金体系, 甚至局限于特定成分的镁合金, 如 Zr 用于 Mg-Zn 系合金要求 Zn 的含量不能超过 4%, 以免形成 ZnZr 化合物降低合金力学性能^[13]。此外, 由于 Zr 的存在对生产过程中一些合金元素的控制增加了很大的难度, 因此, 也不适用于含 Mn、Sn、Si 和 Fe 等镁合金的晶粒细化^[13-14]。

Sr 对镁合金晶粒细化作用的研究主要集中在澳大利亚昆士兰大学和国内重庆大学等单位^[1-2, 11, 15-19]。研究发现, Sr 对于低 Al 和高 Al 含量的 Mg-Al 系合金(如 AZ31 和 AZ91 镁合金)均具有明显的晶粒细化效果。冷却速度越快, 对 AZ31 等合金的晶粒细化效果越明显; 对纯镁晶粒的细化效果又高于对镁合金的。图 1 所示为 Sr 对纯镁和 Mg-Al 合金细化效果的比较^[17]。研究发现, Sr 对不含 Al 的镁合金(如 Mg-3.8Zn-2.2Ca、Mg-RE-Mn-Zn、Mg-RE-Mn-Sc 和

ZK60 等镁合金)的晶粒细化效果也相当明显(见图 2~3)^[20-24]。例如, 0.1% 加入到 Mg-3.8Zn-2.2Ca 镁合金中可以使晶粒尺寸从 200 μm 以上减小到 100 μm 以下。

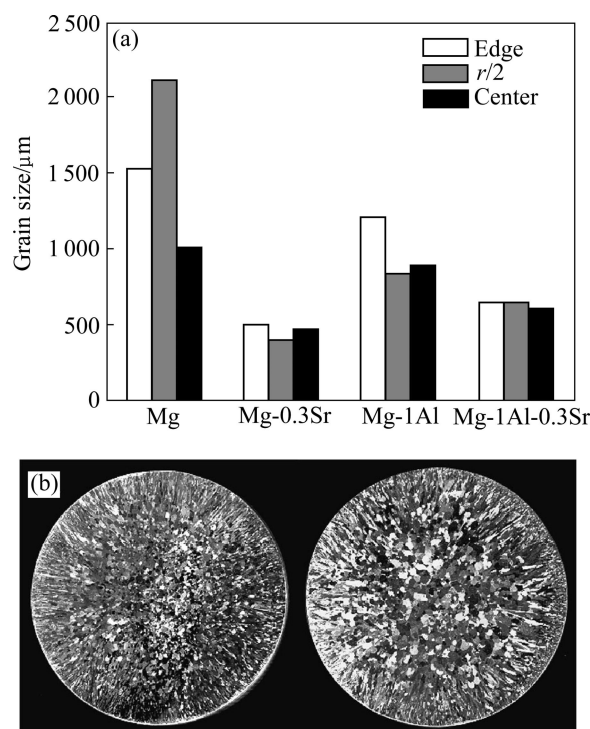


图1 Sr 对纯镁和 Mg-1Al 合金晶粒细化的影响^[17]

Fig.1 Grain size of pure Mg and Mg-1Al binary alloy with 0.3% Sr addition(a) and macrographs (b) of Mg and Mg-1Al binary alloy grain refined with 0.3% Sr^[17]

研究发现, Sr 的加入状态对镁合金细化晶粒有重要影响。由于纯 Sr 存在易氧化烧损和添加数量不易控制等问题, Sr 细化镁合金晶粒主要以 Sr 中间合金的形式添加。但只研究 Sr 加入量、熔体保温温度和保温时间等细化工艺对细化效果的影响是不够的, 只采用 Al-Sr 中间合金也会影响 Sr 在不含铝镁合金中的应用。因此, 对于不同状态和不同类型 Sr 中间合金细化镁合金晶粒是否存在差异进行研究有重要意义。对此, 重庆大学进行了大量工作, 研究发现: 与以 Al-10Sr 中间合金添加 Sr 的形式相比, 以 Mg-10Sr 中间合金形式添加 Sr 可使 AZ31 镁合金获得更高的晶粒细化效率(见图 4)^[25]; 不同状态 Al-10Sr 和 Mg-10Sr 中间合金对镁合金的细化效果存在较大的差异^[26-28]。如对于 Mg-10Sr 中间合金细化 AZ31 镁合金, 热处理态 Mg-10Sr 中间合金具有较轧制态、重熔快速凝固态和原始铸态 Mg-10Sr 中间合金更高的晶粒细化效率(见图 5 和 6)。而对于 Al-10Sr 中间合金细化 AZ31 镁合金, 重熔 Al-10Sr 中间合金的细化效果最好(见表 1)。

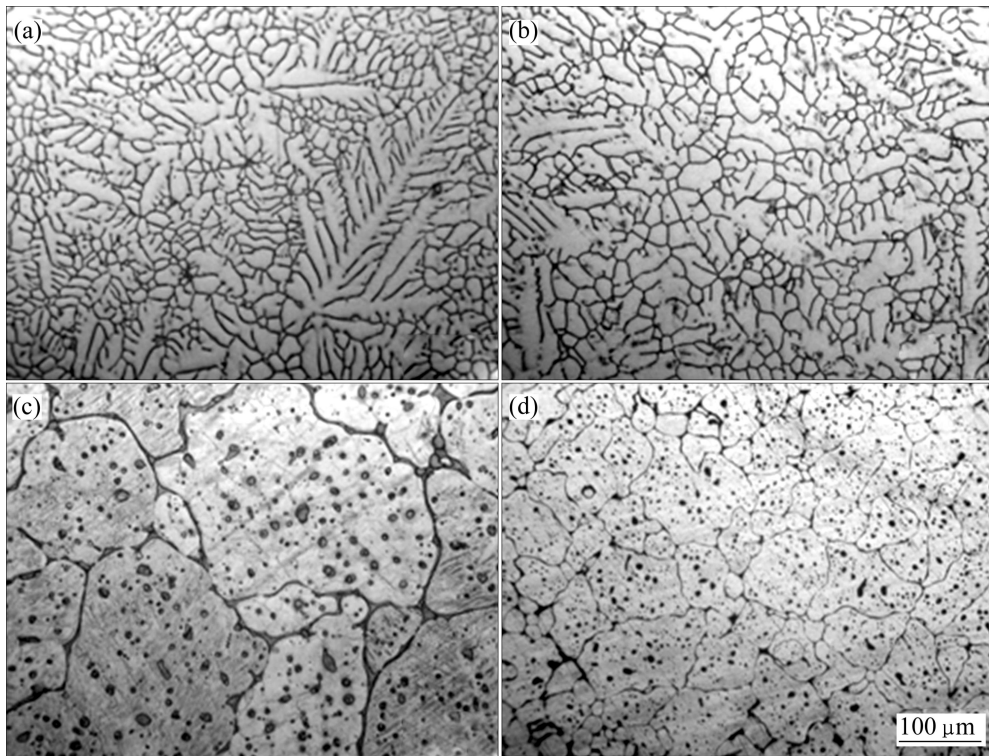


图 2 含 Sr 的 Mg-3.8Zn-2.2Ca 镁合金的晶粒细化^[22]

Fig.2 Grain refinement of Sr-containing Mg-3.8Zn-2.2Ca magnesium alloy^[22]: (a), (c) Mg-3.8Zn-2.2Ca alloy; (b), (d) Mg-3.8Zn-2.2Ca-0.1Sr alloy

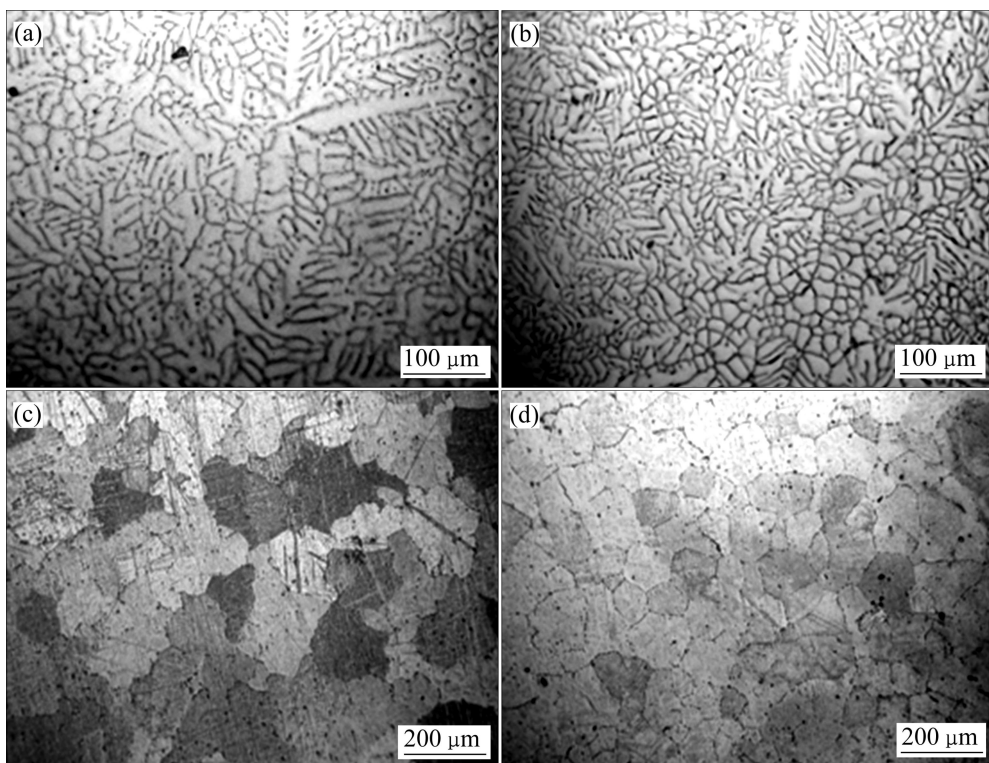


图 3 含 Sr 的 Mg-3Ce-1.2Mn-1Zn 镁合金的晶粒细化^[23]

Fig.3 Grain refinement of Sr-containing Mg-3Ce-1.2Mn-1Zn magnesium alloy^[23]: (a), (c) Mg-3Ce-1.2Mn-1Zn alloy; (b), (d) Mg-3Ce-1.2Mn-1Zn-0.1Sr alloy

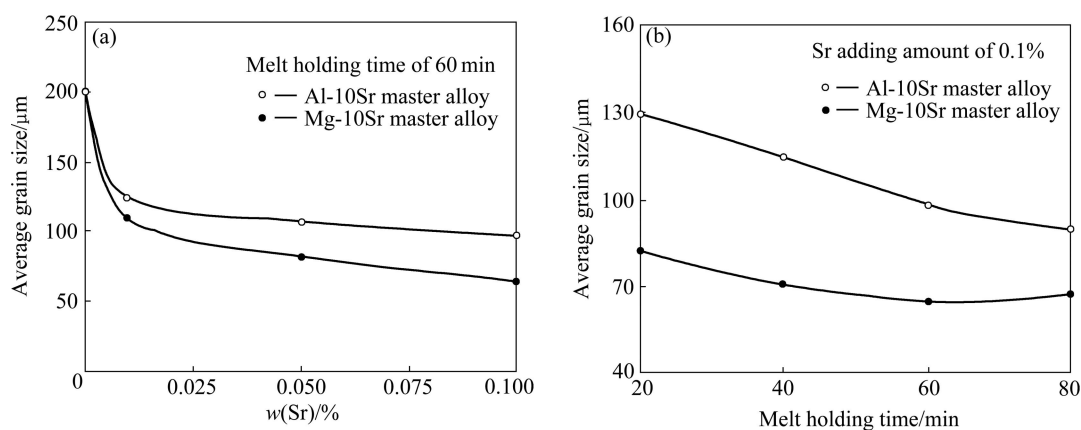


图 4 Al-10Sr 和 Mg-10Sr 中间合金细化 AZ31 镁合金晶粒的差异^[25]

Fig.4 Difference of Al-10Sr and Mg-10Sr master alloys in grain refinement of AZ31 magnesium alloy^[25]: (a) Different Sr adding amounts; (b) Different melt holding times

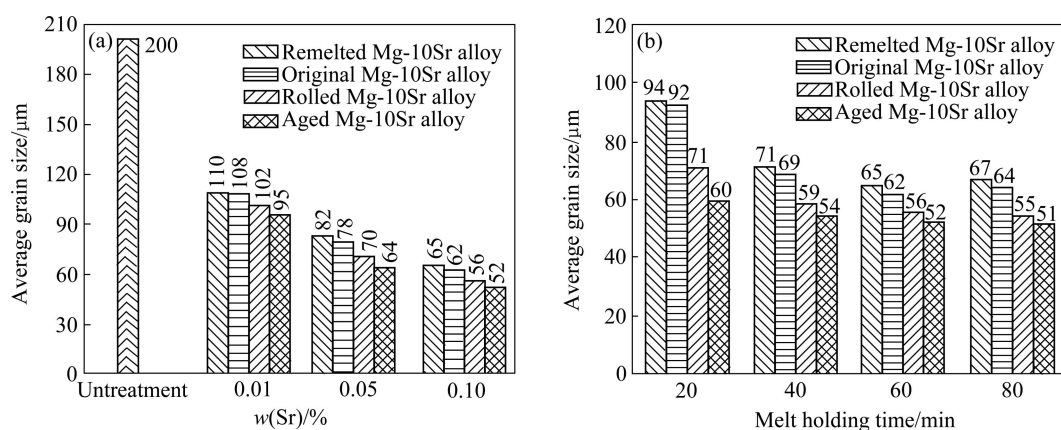


图 5 Mg-10Sr 中间合金状态对 AZ31 镁合金晶粒细化的影响^[26]

Fig.5 Effects of state of Al-10Sr master alloy on grain refinement of AZ31 magnesium alloy^[26]: (a) Effect of mass fraction of Sr; (b) Effect of melt holding time

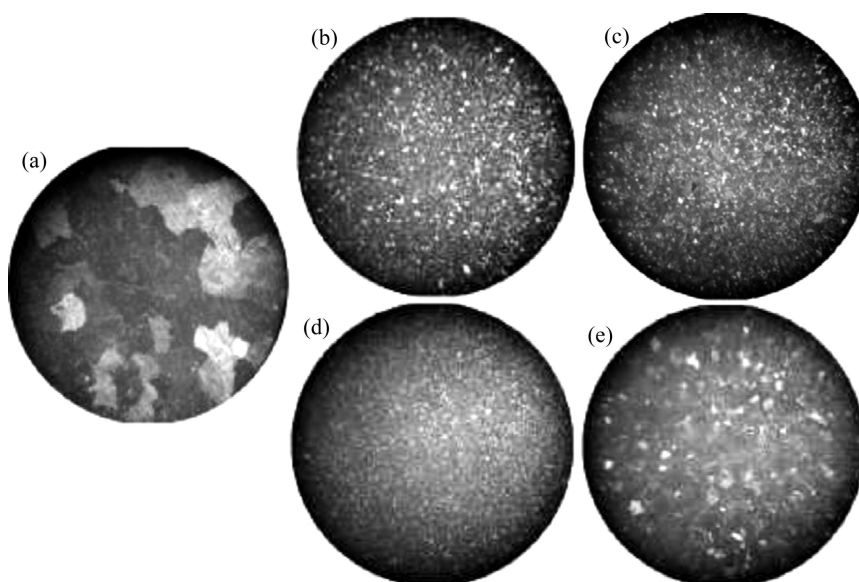


图 6 采用不同状态的 Mg-10Sr 中间合金在 AZ31 合金中添加 0.1% Sr 后晶粒细化效果的比较^[26]

Fig.6 Comparison of grain refinement of AZ31 alloy treated with various Mg-10Sr master alloys for 0.1% Sr and 60 min melt holding time (Diameter of each polished section is 25 mm)^[26]: (a) Without Sr modification, average grain size (AGS)=200 μm; (b) Original, AGS=62 μm; (c) Rolled, AGS=56 μm; (d) Aged, AGS=52 μm; (e) Remelted, AGS=65 μm

此外, 轧制态、热处理态、快速凝固态和常规铸态 Mg-10Sr 中间合金对 ZK60 镁合金的晶粒细化效果也各不相同^[29]。而对于不同类型和/或不同状态 Al-10Sr 和 Mg-10Sr 中间合金细化镁合金晶粒的差异, 分析认为与不同 Al-10Sr 和 Mg-10Sr 中间合金组织中含 Sr 相的形貌、尺寸和分布有关(见图 7 和 8)^[25-26]。

表 1 Al-10Sr 中间合金状态对 AZ31 镁合金晶粒细化的影响^[27]

Table 1 Effects of state of Al-10Sr master alloy on grain refinement of AZ31 magnesium alloy^[27]

Type of commercial Al-10Sr alloy	Melt holding time/min	Average grain size/ μm
Untreated	60	111
Solutionized	60	103
Rolled	60	91
Remelted	60	68

2 锶对镁合金中合金相的变质和/或细化作用

Sr 除了可以细化镁合金晶粒外, 还对镁合金中的合金相具有一定变质和/或细化作用, 重庆大学、重庆

理工大学等对此做了大量的工作。研究^[30-33]发现, 在 AZ61-0.7Si 合金中添加 0.03%~0.09%Sr 后, 合金中的 Mg_2Si 相从粗大汉字状形貌变为细小的颗粒状和/或多边形状(见图 9), 而其机理则可能与以下两个方面有关: 1) Sr 在镁中的固溶度低(约为 0.11%)导致多余的 Sr 富集在 Mg_2Si 相的生长界面前沿, 从而使 Mg_2Si 相生长受到限制; 2) 添加少量 Sr 增大了过冷度, 使得凝固过程中 Mg_2Si 相核心增加。类似的研究结果也在 JUAREZ-ISLAS^[34]和 SRIIVASAN 等^[35]的研究中得到了进一步证实。如 JUAREZ-ISLAS^[34]研究发现, 在 Mg-2Al-0.5Si 合金中加入 Sr 不但使汉字形 Mg_2Si 变细, 而且合金中 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的含量也随 Sr 量的增多而减少, 但当 Sr 的量超过 0.3%时会在合金组织中形成稳定性较高的 Sr_2Si 和 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$ 新相。研究^[36]还发现, 在 Mg-3Sn-2Ca 镁合金中添加 0.1%Sr 可明显细化合金中的初生 CaMgSn 相(见图 10)。由于开发 Mg-Sn-Ca 系镁合金的关键问题之一是合金中初生 CaMgSn 相的变质细化, 因此, 这一结果为新型 Mg-Sn-Ca 系镁合金的设计及开发提供了新的思路, 并为 Mg-Sn-Ca 系镁合金中初生和/或共晶 CaMgSn 相的变质和细化研究指明了新的研究方向。而在含 Ca 的镁合金中添加 Sr, 不但会改善由 Ca 引起的铸造性能较差的问题, 还可能与合金

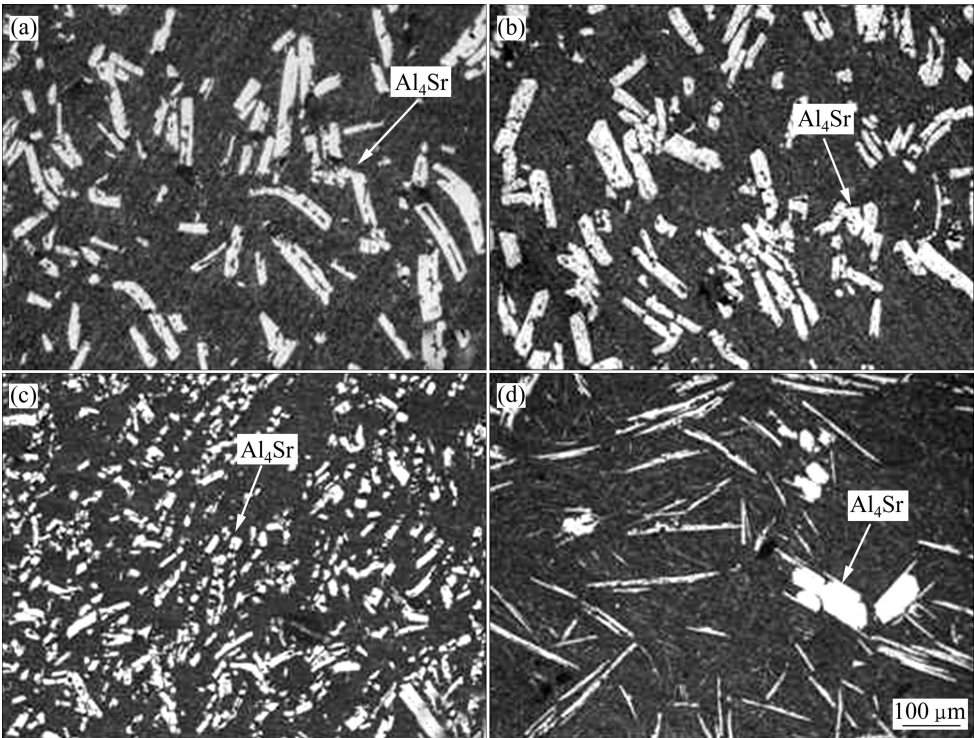


图 7 不同状态 Al-10Sr 中间合金的显微组织^[27]
Fig.7 Microstructures of Al-10Sr master alloys at different states^[27]: (a) Original extrusion state; (b) Solutionized state; (c) Rolled state; (d) Remelting rapid solidification state

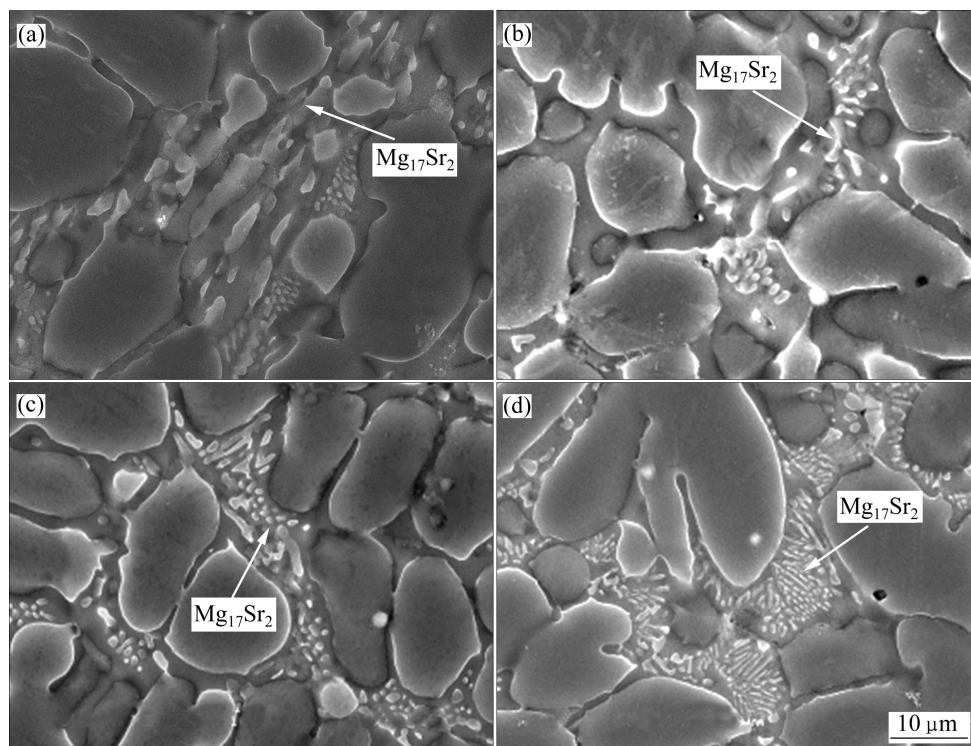


图 8 不同状态 Mg-10Sr 中间合金的显微组织^[26]

Fig.8 Microstructures of Mg-10Sr master alloys with different states^[26]: (a) Conventional casting state; (b) Rolled state; (c) Solutionized state; (d) Rapid solidification state

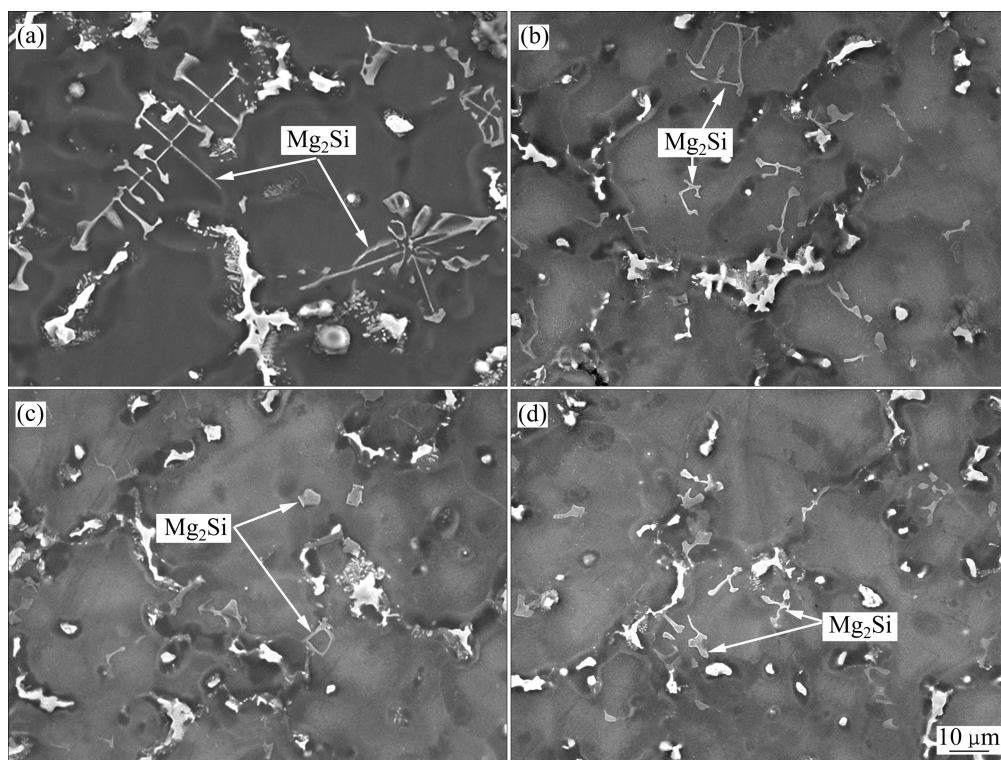


图 9 Sr 对 AZ61-0.7Si 镁合金中 Mg_2Si 相形貌的影响^[31]

Fig.9 Effects of Sr addition on morphology of Mg_2Si phase in AZ61-0.7Si magnesium alloy^[31]: (a) Without adding Sr; (b) 0.3%Sr; (c) 0.6%Sr; (d) 0.9%Sr

中的 Al_2Ca 相结合成三元化合物, 从而弱化 Al_2Ca 对基体的脆化作用, 并最终提高合金的综合力学性能^[37-38]。在 AZ31 合金中, 同样发现了 Sr 对第二相的改性作用^[39]。当添加 Sr 到 AZ31 镁合金后, 随着 Sr 含量从 0.3% 增加到 2.5%, AZ31 镁合金中的 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相由连续的不规则条块状逐步变得断续和细小并逐渐

减少, 同时在 AZ31-0.3Sr 合金中形成少量附在 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相上生长的 Al_4Sr 相; 而当 Sr 含量增加至 1.0% 时, 合金中出现了层片状共晶 ($\text{Mg}_{17}\text{Sr}_2 + \alpha\text{-Mg}$) 组织和与不规则小块状 Al_4Sr 相共存的含 Sr 合金相, 且层片状共晶 ($\text{Mg}_{17}\text{Sr}_2 + \alpha\text{-Mg}$) 组织的数量随着 Sr 含量的升高而增加 (见图 11)。

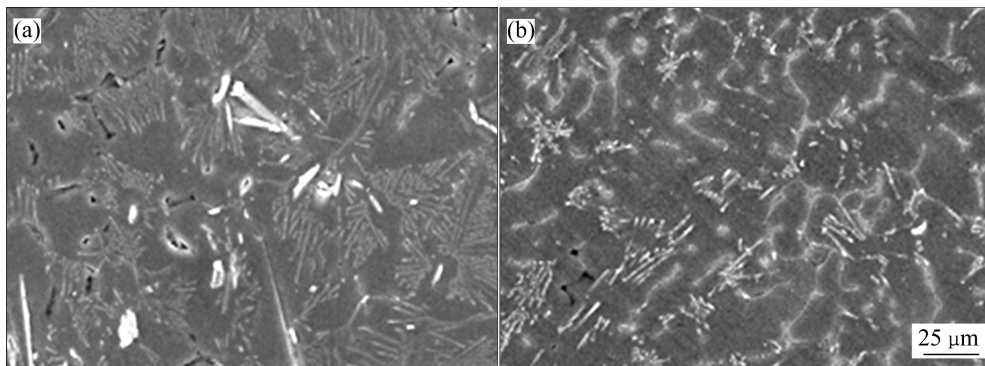


图 10 含 Sr 的 Mg-3Sn-2Ca 镁合金中初生 CaMgSn 相的细化^[36]

Fig.10 Refinement of primary CaMgSn phase in Sr-containing Mg-3Sn-2Ca magnesium alloy^[36]: (a) Mg-3Sn-2Ca alloy; (b) Mg-3Sn-2Ca-0.1Sr alloy

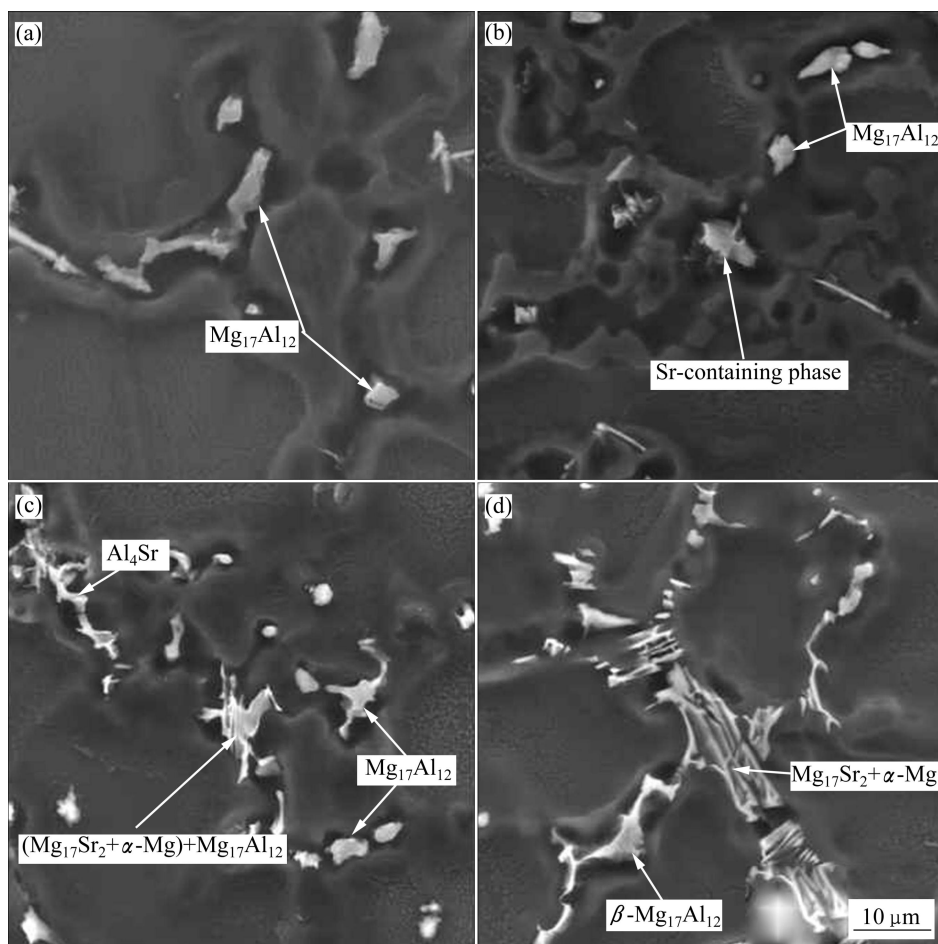


图 11 Sr 对 AZ31 镁合金中合金相的影响^[39]

Fig.11 Effect of Sr addition on alloying phases in AZ31 magnesium alloy^[39]: (a) AZ31 alloy; (b) AZ31+0.3Sr alloy; (c) AZ31+1.0Sr alloy; (d) AZ31+2.5Sr alloy

3 含 Sr 新型镁合金的开发与研究

众所周知, 研究开发高性能的高温抗蠕变耐热镁合金对于进一步拓展镁合金的应用具有重要意义。自 20 世纪 90 年代以来, 国内外对于耐热镁合金的研究开发给予了广泛关注和高度重视。迄今为止, 已先后出现关于 AS(Mg-Al-Si)系、AE(Mg-Al-RE)系、ZE(Mg-Zn-RE-Zr)系、ZA(Mg-Zn-Al)系、EQ/QE(Mg-Ag-RE-Zr)系、HZ(Mg-Th-Zn-Zr)系、QH(Mg-Ag-Th-Zr)系和 WE(Mg-Y-RE-Zr)系等耐热镁合金的研究开发报道^[40]。但总体而言, 这些已报道的耐热镁合金在工业中得到应用的品种十分有限, 并且大多存在生产成本较高、铸造性能不好和/或性能欠佳等问题: 如 AS 系镁合金中粗大的汉字状 Mg_2Si 相会严重降低合金的力学性能, ZA 系镁合金的铸造性能较差, 而 AE、WE、EQ、ZE 和 ACM/MRI 系镁合金则因添加了昂贵的稀土等元素导致成本高, 因此, 目前该类合金仅主要用于航空航天和军工等领域。此外, HZ 和 QH 系镁合金也因添加了对人体影响较大的放射性元素钍而使其应用受到很大的限制。因此, 有必要在利用合金化和/或微合金化、组织和性能控制及铸造工艺优化等方法解决已有耐热镁合金存在问题的同时, 设计开发高性能/低成本新型

耐热镁合金。

由于 Sr 元素与稀土等元素相比, 价格低廉; 同时, Sr 元素添加到镁合金中还可形成热稳定性高的耐热强化相, 从而使镁合金的抗蠕变性能得到改善和提高。此外, 正如前所述, Sr 还存在细化镁合金晶粒和变质镁合金中第二相等优点, 而这对于镁合金高温强度和蠕变性能的提高同样也是有益的。因此, 含 Sr 耐热镁合金被认为是一种非常有发展前途的高性能/低成本新型耐热镁合金。

目前, 国内外对于含 Sr 新型耐热镁合金的研究开发主要集中在 AJ (Mg-Al-Sr) 系合金上, 其耐热强化机理主要在于合金中含 Sr 热稳定相的形成^[1, 4-8]。已有研究发现, 在 Mg-5Al 合金中添加 1.2%Sr 会导致离异 Al-Sr 二元相和 Mg-Sr-Al 三元相的形成, 而这些相被认为是合金高温抗蠕变性能提高的原因所在。加拿大 Noranda 公司是 AJ 系耐热镁合金开发的先行者, 该公司基于 AM50 镁合金, 已成功开发出 AJ50X、AJ52X 和 AJ62X 等牌号的 AJ 系耐热镁合金^[1]。此外, 国内 BAI 等^[7]也研究了 AJC411、AJC511、AJC611 和 AJC711 等几种含有 Ca 的 AJ 系耐热镁合金。表 2 所列这些 AJ 系镁合金的成分及其力学性能。对于 Mg-Al-Sr 镁合金的组织 and 性能控制, Sr/Al 质量比 ($m(Sr)/m(Al)$)被认为是非常关键的因素之一。已有研究发现, 通过控制 Sr/Al 比可以使 Mg-Al-Sr 合金得到

表 2 部分 Mg-Al-Sr 新型镁合金的化学成分及其抗拉性能^[1, 4-8]

Table 2 Compositions and tensile properties for part new type Mg-Al-Sr based alloys^[1, 4-8]

Alloy	w/%					Tensile property			
	Al	Sr	Mn	Ca	Mg	$\sigma_{0.2}/MPa$	σ_b/MPa	$\delta\%$	Temperature/ $^{\circ}C$
AJ50X	5	0.5	0.2-0.3	—	Bal.	125	194	6.0	RT
						88	108	4.6	175
AJ52X	5	2.0	0.2-0.3	—	Bal.	145	202	4	RT
						103	148	15	175
AJ62X	6	2.4	0.2-0.3	—	Bal.	140	232	7	RT
						106	144	21	175
AJC411	3.8-4.2	0.8-1.2	0.3-0.5	0.8-1.2	Bal.	98	143	1.6	RT
						86	120	2.1	175
AJ42	4	2	0.3	—	Bal.	114	161	5.1	RT
						97	136	9.8	175
AJC421	4	2	0.3	1	Bal.	88	131	1.2	RT
						91	122	1.6	175
AJC511	4.8-5.2	0.8-1.2	0.3-0.5	0.8-1.2	Bal.	101	134	1.3	RT
						87	124	2.7	175
AJC611	5.8-6.2	0.8-1.2	0.3-0.5	0.8-1.2	Bal.	104	140	2.2	RT
						95	133	3.1	175
AJC711	6.8-7.2	0.8-1.2	0.3-0.5	0.8-1.2	Bal.	112	152	3.0	RT
						92	138	4.9	175

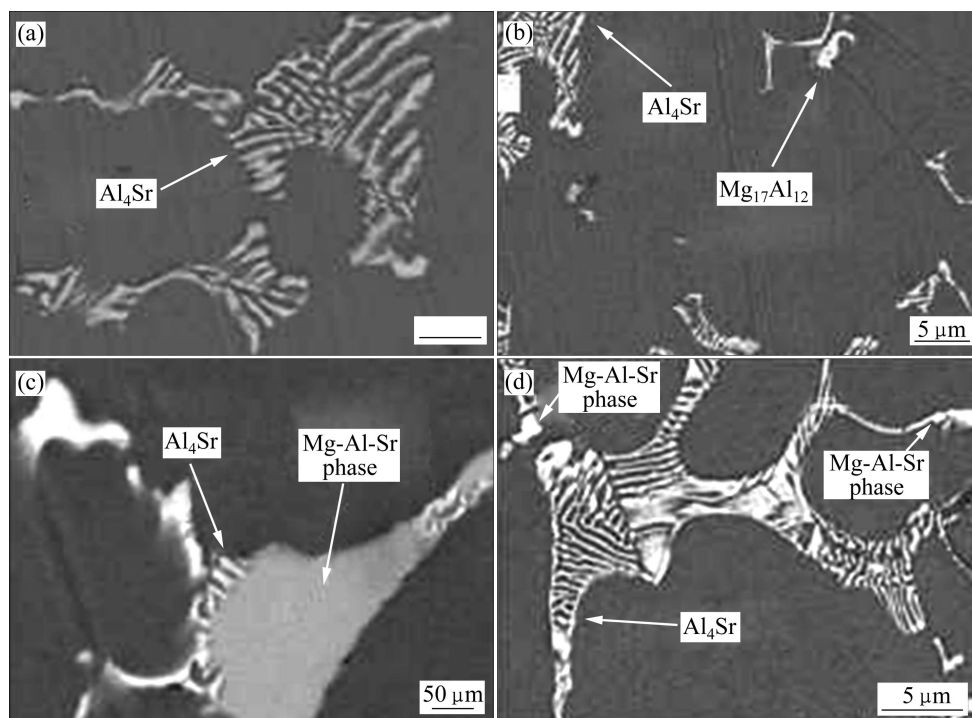


图 12 压铸 Mg-Al-Sr 镁合金的显微组织^[1]

Fig.12 Microstructures of die casting Mg-Al-Sr alloys^[1]: (a) Mg-5Al-1Sr; (b) Mg-6Al-1.6Sr; (c) Mg-5Al-2Sr; (d) Mg-6Al-2Sr

不同的显微组织^[1]。如 $m(\text{Sr})/m(\text{Al})$ 约为 0.3 时, 合金中的第二相主要为 Al_4Sr 和/或 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相(见图 12(a)和(b)), 而当 $m(\text{Sr})/m(\text{Al})$ 大于 0.3 时, 合金中的第二相主要为 Mg-Al-Sr 三元相(见图 12(c)和(d))。此外, BAI 等^[7]还调查了 AJC411-711 合金的组织, 发现在合金晶界上主要存在片层状 Mg_2Ca 相、粗大 $(\text{Mg}, \text{Al})_2\text{Ca}$ 共晶相和块状 Mg-Al-Sr 三元相(见图 13), 并且随着 Al 含量增加, Mg_2Ca 和 Mg-Al-Sr 相的数量减少, $(\text{Mg}, \text{Al})_2\text{Ca}$ 相的数量增加; 当 Al 含量达到 7% 时, 还会形成薄片状的 Al_4Sr 相。至于力学性能, 其在 175 °C 下的强度和韧性随着 Al 含量的增加而增加(见图 14)。在 175 °C、70 MPa 条件下, AJC611 和 AJC511 合金显示出了较佳的抗蠕变性能。此外, BAI 等^[8]还研究了挤压对 AJ42 和 AJC421 合金组织和性能的影响, 发现热挤压后合金组织中的第二相破碎、抗蠕变性能下降(见图 15)。

除了 Mg-Al-Sr 系镁合金外, Mg-Sn-Sr 系镁合金是另一个正在研究的含 Sr 新型镁合金。Mg-Sn-Sr 系耐热镁合金的强化机理在于 Sr 可与 Mg 和 Sn 形成热稳定性高的 SrMgSn 相^[9, 41]。此外, 含 Sn 镁合金高的时效硬化效果对于 Mg-Sn-Sr 合金力学性能的改善也是有益的。目前, 国内外对于 Mg-Sn-Sr 系耐热镁合金的研究还非常少, 仅 LIU 等^[9]初步考察了 Mg-5Sn-

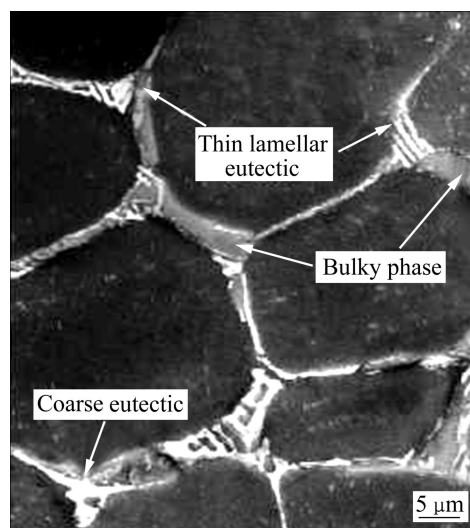
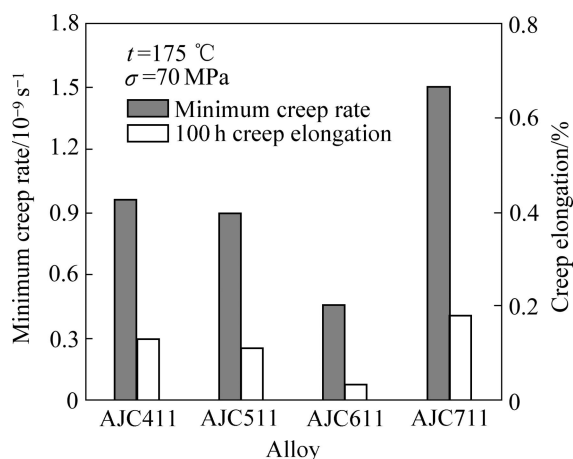
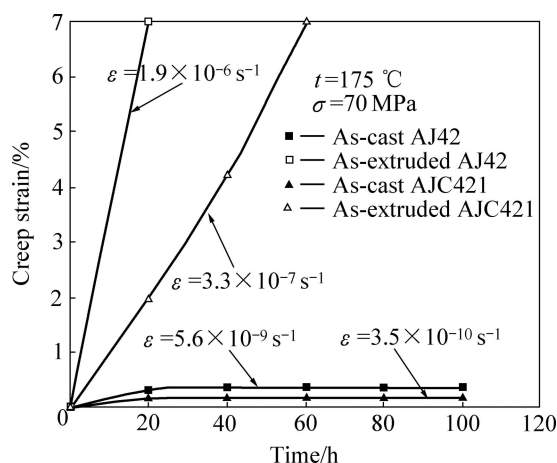
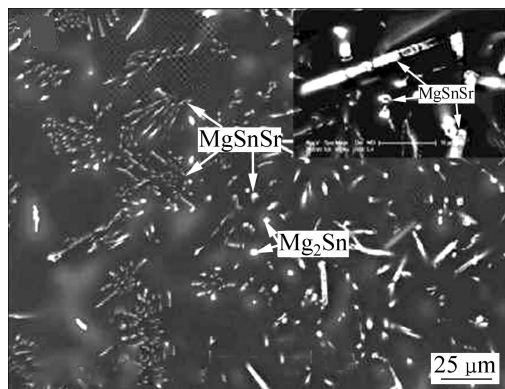


图 13 AJC411 镁合金的 SEM 像^[7]

Fig.13 SEM image of AJC411 alloy^[7]

(0.4–4.8)Sr 镁合金的组织 and 性能。与本文作者及其团队成员^[42–43]正在研究的 Mg-Sn-Ca 系镁合金类似, 在 Mg-Sn-Sr 系合金中会形成粗大的初生和/或共晶 SrMgSn 三元相(见图 16), 该相会极大地影响该系合金的力学性能。因此, 还需要在今后的研究中通过合金化和/或微合金化改善合金的组织, 进而提高合金的力

图14 AJC411-711 合金的蠕变性能^[7]Fig.14 Creep properties for AJC411-711^[7]图15 挤压 AJ42 和 AJC421 合金的蠕变性能^[8]Fig.15 Creep properties of AJ42 and AJC421 alloys^[8]图16 Mg-5Sn-4.8Sr 镁合金中的 SrMgSn 相形貌^[9]Fig.16 Morphology of SrMgSn phase in Mg-5Sn-4.8Sr^[9]

学性能。此外, Mg-Sn-Sr 系合金中 Sn 和 Sr 的成分优化以及合金的铸造性能考察等也需要在今后的工作中加以考虑。

4 结束语

Sr 对镁合金组织的影响及含 Sr 新型镁合金的开发尽管已取得了一些进展,但仍难以适应镁合金快速发展和应用的需要。下面几方面的内容在今后的研究工作中应给予高度重视。1) 含锶多元镁合金的相图研究,二元相图已有了初步研究,但多元相图的工作才刚刚开始。2) 锶影响镁合金组织的机理研究。这方面的工作也刚刚起步。3) 锶影响变形和热处理组织的研究,这方面的研究目前还相当少,对合金发展极其不利。可以预计,随着 Sr 影响镁合金组织性能的研究和含 Sr 新型镁合金开发的逐步深入, Sr 在镁合金中的应用必将得到进一步扩大。

REFERENCES

- [1] PAN Fu-sheng, YANG Ming-bo, MA Yan-long. Development of new type magnesium alloys containing Sr and RE elements[J]. Materials Science Forum, 2007, 561/565: 191-197.
- [2] TANG Ai-tao, PAN Fu-sheng, YANG Ming-bo, CHENG Ren-ju. Mechanical properties and microstructure of magnesium-aluminum based alloys containing strontium[J]. Materials Transactions, 2008, 49(6): 1203-1211.
- [3] 程仁菊, 潘复生, 杨明波, 汤爱涛. 锶在镁合金中的应用及其研究新进展[J]. 材料导报, 2008, 22(5): 63-67.
- [4] CHENG Ren-ju, PAN Fu-sheng, YANG Ming-bo, TANG Ai-tao. Application and new developments of strontium in magnesium alloys[J]. Materials Reviews, 2008, 22(5): 63-67.
- [5] PARVEZ M A, MEDRAJ M, ESSADIQI E, MUNTASAR A, DENES G. Experimental study of the ternary magnesium-aluminum-strontium system[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 402(1/2): 170-185.
- [6] MARTIN K, ANDREAS F B, GILLES L E, PHILIPPE P, UWE G. Microstructure and dislocation analysis after creep deformation of die-cast Mg-Al-Sr (AJ) alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 510/511(1): 387-392.
- [7] ZHANG Q, WANG S P, HU H. Effect of strontium content on porosity and tensile properties of squeeze cast Mg-Al-Sr alloy[J]. Materials Technology, 2009, 24(1): 166-169.
- [8] BAI Jing, SUN Yang-shan, XUE Feng, XUE Shan, QIANG Jing, ZHU Tian-bai. Effect of Al contents on microstructures, tensile and creep properties of Mg-Al-Sr-Ca alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 437(1/2): 247-253.
- [9] BAI Jing, SUN Yang-shan, XUE Feng, XUE Shan, QIANG Jing, TAO Wei-jian. Effect of extrusion on microstructures, and mechanical and creep properties of Mg-Al-Sr and Mg-Al-Sr-Ca

- alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55(12): 1163–1166.
- [9] LIU Hong-mei, CHEN Yun-gui, ZHAO Hao-feng, WEI Shang-hai, GAO Wei. Effects of strontium on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-5wt.%Sn alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 504(2): 345–350.
- [10] STJOHN D H, QIAN M, EASTON M A, CAO P, HILDEBRAND Z. Grain refinement of magnesium alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, 36(7): 1669–1679.
- [11] LEE Y C, DAHLE A K, STJOHN D H. The role of solute in grain refinement of magnesium[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2000, 31(11): 2895–2906.
- [12] BAMBERGER M. Structural refinement of cast magnesium alloys[J]. *Materials Science and Technology*, 2001, 17(1): 15–24.
- [13] BAMBERGER M, DEHM G. Trends in the development of new Mg alloys[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2008, 38(3): 505–533.
- [14] EMLEY E F. Principles of magnesium technology[M]. Oxford: Pergamon Press, 1966: 127–155.
- [15] ZENG Xiao-qin, WANG Ying-xin, DING Wen-jiang, LUO A A, SACHDEV A K. Effect of strontium on the microstructure, mechanical properties, and fracture behavior of AZ31 magnesium alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, 37(4): 1333–1341.
- [16] DU J, YANG J, KUWABARA M, LI W F, PENG J H. Effect of strontium on the grain refining efficiency of Mg-3Al alloy refined by carbon inoculation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 470(1/2): 228–232.
- [17] LEE S, LEE S H, KIM D H. Effect of Y, Sr and Nd additions on the microstructure and microfracture mechanism of squeeze-cast AZ91-X magnesium alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1998, 29(4): 1221–1235.
- [18] PAN Yi-chuan, LIU Xiang-fa, YANG Hua. Sr microalloying for refining grain size of AZ91D magnesium alloy[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition*, 2007, 22(1): 74–76.
- [19] LIU S F, LIU L Y, KANG L G. Refinement role of electromagnetic stirring and strontium in AZ91 magnesium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 450(1/2): 546–550.
- [20] 程仁菊, 潘复生, 杨明波, 汤爱涛. 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): 1397–140.
- CHENG Ren-ju, PAN Fu-sheng, YANG Ming-bo, TANG Ai-tao. Effect of Sr on the grain refinement of ZK60 magnesium alloy[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 30(12): 1397–140.
- [21] YANG Ming-bo, PAN Fu-sheng, CHENG Liang. 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.
- [22] YANG M B, CHENG L, PAN F S. Comparison about effects of Sr, Zr and Ce additions on as cast microstructure and mechanical properties of Mg-3.8Zn-2.2Ca (wt-%) magnesium alloy[J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2010, 23(2): 111–118.
- [23] YANG Ming-bo, PAN Fu-sheng, LIANG Xiao-feng, SHEN Jia, QIN Cai-yuan. Effects of minor Zr and Sr on as-cast microstructure and mechanical properties of Mg-3Ce-1.2Mn-1Zn alloy[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(9): 3216–3224.
- [24] PAN Fu-sheng, YANG Ming-bo, SHEN Jia, WU Lu. Effects of minor Zr and Sr on as-cast microstructure and mechanical properties of Mg-3Ce-1.2Mn-0.9Sc (wt-%) magnesium alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(13/14): 4292–4299.
- [25] YANG Ming-bo, PAN Fu-sheng, CHENG Ren-ju, TANG Ai-tao. Comparison about efficiency of Al-10Sr and Mg-10Sr master alloy to grain refinement of AZ31 magnesium Alloy[J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(24): 10074–10079.
- [26] YANG Ming-bo, PAN Fu-sheng, CHENG Ren-ju, TANG Ai-tao. Effect of Mg-10Sr master alloy on grain refinement of AZ31 magnesium alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 491(1/2): 440–445.
- [27] YANG M B, PAN F S, CHENG R J, TANG A T, SHEN J. Effects of treating processes on microstructure of commercial Al-10Sr master alloy and its refinement efficiency to AZ31 magnesium alloy[J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2007, 20(6): 297–303.
- [28] YANG Ming-bo, PAN Fu-sheng, CHENG Ren-ju, TANG Ai-tao. Effects of solutionized Al-10Sr master alloys on grain refinement of AZ31 magnesium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 461(1/2): 298–303.
- [29] CHENG Ren-ju, PAN Fu-sheng, YANG Ming-bo, TANG Ai-tao. Effects of various Mg-Sr master alloys on microstructural refinement of ZK60 magnesium alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 18 (Supplement 1): s50–s54.
- [30] YANG Ming-bo, PAN Fu-sheng, CHENG Ren-ju, SHEN Jia. Comparison about effects of Sb, Sn and Sr on as-cast microstructure and mechanical properties of AZ61-0.7Si magnesium alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 489(1/2): 413–418.
- [31] 杨明波, 潘复生, 程仁菊, 赵玮霖. Sr和Sb变质AZ61-0.7Si合金的铸态组织和力学性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(10): 1737–1741.
- YANG Ming-bo, PAN Fu-sheng, CHENG Ren-ju, ZHAO Wei-lin. As-cast microstructure and mechanical properties of Sr and Sb modified AZ61-0.7Si magnesium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(10): 1737–1741.
- [32] YANG Ming-bo, SHEN Jia, BAI Liang, PAN Fu-sheng. Effects

- of Sr on the microstructure, tensile and creep properties of AZ61-0.7Si magnesium alloy[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2009, 16(1): 89–95.
- [33] YANG Ming-bo, PAN Fu-sheng, SHEN Jia, BAI Liang. Comparison about effects of Sb and Sr on modification and refinement of Mg₂Si phases in AZ61-0.7Si magnesium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(2): 287–292.
- [34] JUAREZ-ISLAS J A. Rapid solidification of Mg-Al-Zn-Si alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1991, 134(1/2): 1193–1196.
- [35] SRINIVASAN A, PILLAI U T S, SWAMINATHAN J, DAS S K, PAI B C. Observations of microstructural refinement in Mg-Al-Si alloys containing strontium[J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(18): 6087–6089.
- [36] YANG Ming-bo, QIN Cai-yuan, LIANG Xiao-feng, PAN Fu-sheng. Observation of microstructural refinement in Mg-3Sn-2Ca magnesium alloy containing minor Sr[J]. Materials Science Forum, 2011, 686: 271–275.
- [37] 王社斌, 李晓斌, 范晋平, 王 帅, 许并社. Mg-5Al-0.8Ca-0.2La-xSr 镁合金的显微组织及高温力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(5): 826–832.
- WANG She-bin, LI Xiao-bin, FAN Jing-ping, WANG Shuai, XU Bing-she. Microstructure and high temperature mechanical properties of Mg-5Al-0.8Ca-0.2La-xSr alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(5): 826–832.
- [38] SATO T, KRAL M V. Microstructural evolution of Mg-Al-Ca-Sr alloy during creep[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 498(1/2): 369–376.
- [39] WU Lu, PAN Fu-sheng, YANG Ming-bo, WU Ju-ying, LIU Ting-ting. As-cast microstructure and Sr-containing phases of AZ31 magnesium alloys with high Sr contents[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(4): 784–789.
- [40] LUO A A. Recent magnesium alloy development for elevated temperature applications[J]. International Materials Reviews, 2004, 49(1): 13–28.
- [41] KIM B H, PARK K C, PARK Y H, PARK I M. Effect of Ca and Sr additions on high temperature and corrosion properties of Mg-4Al-2Sn based alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(2): 808–814.
- [42] YANG Ming-bo, PAN Fu-sheng, CHENG Liang, SHEN Jia. Effects of cerium on as-cast microstructure and mechanical properties of Mg-3Sn-2Ca magnesium alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 512(1/2): 132–138.
- [43] YANG Ming-bo, LIANG Xiao-feng, ZHU Yi, PAN Fu-sheng. Effects of zirconium addition on as-cast microstructure and mechanical properties of Mg-3Sn-2Ca magnesium alloy[J]. Materials and Design, 2011, 32(4): 1967–1973.

(编辑 龙怀中)

潘复生教授简介

潘复生, 1962 年出生, 浙江兰溪人, 博士, 教授、博士生导师。现任重庆市科学技术研究院院长, 重庆大学国家镁合金工程技术中心主任, 中国材料学会常务理事, 中国镁业协会副会长, 重庆材料学会理事长, 国务院学位委员会学科评议组成员等。1998 年被确定为国家百千万人才工程国家级专家。曾留学英国牛津大学、德国国家材料研究所、美国加州大学洛杉矶分校和日本千叶大学等, 专长镁合金、铝合金等方面的研究和开发。已发表论文 300 余篇, 出版著作 9 部, 获国家和省部级重要科技奖励 12 次。1990 年获得中国青年科技奖, 2008 年获得何梁何利奖, 2009 年被评为“全国杰出专业技术人才”。是 2005 年第一届中英材料会主席, 第三届中欧材料会主席, 第三届和第四届国际镁合金会议主席, 多次应邀在国际会议上做大会特邀报告。