

变质细化在 Mg-Al 系合金中的应用及研究进展

李华成^{1, 2}, 程法嵩³, 于雷⁴, 范顺昌⁴, 占亮^{1, 2}, 冯志军^{1, 2}, 马英勃^{1, 2}, 孙志明^{1, 2}

(1. 中国机械总院集团 沈阳铸研科技有限公司, 辽宁沈阳 110022; 2. 中国机械总院集团 沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022; 3. 中国航发贵州黎阳航空动力有限公司, 贵州贵阳 550014; 4. 空军装备部驻辽阳地区军事代表室, 辽宁辽阳 111000)

摘要: 介绍了Mg-Al系合金的特点。综述了C、Sr、Ti、RE元素对Mg-Al系合金变质细化的影响和作用机理。从AZ、AM、AS、AE合金体系出发, 对比了不同变质处理下的差异, 指出了变质剂使用的最佳用量、加入温度、保温时间, 归纳了变质剂对合金晶粒尺寸、组织演变、力学性能的影响, 为Mg-Al系合金变质细化提供参考, 最后总结了几类合金中变质剂的作用特点, 为制备高性能低成本的镁合金提供系统思路。

关键词: 变质; 细化; 显微组织; 机理; Mg-Al合金

Mg-Al系合金有良好的铸造工艺性能, 且力学性能和耐蚀性能优异, 制备成本低, 在工业生产中有广泛应用^[1]。Mg-Al系合金中存在的Mg₁₇Al₁₂、Mg₂Si等粗大的共晶相导致合金的性能下降, 通过变质处理可以改善第二相尺寸、形貌、分布, 细化镁合金晶粒。变质作用一般分为两方面, 一是利用熔体中的异质形核质点如Al₄C₃、TiB₂等细化 α -Mg晶粒, CeSi₂相细化Mg₂Si相共晶组织; 二是吸附在共晶相基体上, 促进共晶相形核, 抑制其生长速度, 进而改变共晶相的生长方式。目前广泛应用于Mg-Al系合金中的变质剂主要有含碳、锶、钛和稀土变质剂。本文从AZ、AM、AS、AE合金体系出发, 综述了不同变质剂在Mg-Al系合金中的作用效果、机理及国内外研究现状, 为Mg-Al系合金的变质细化提供参考和思路。

作者简介:

李华成(1996-), 男, 硕士生, 主要研究方向为铸造镁合金材料制备。电话: 024-25282725, E-mail: 381165765@qq.com

通讯作者:

冯志军, 男, 研究员, 博士生导师。电话: 024-25375708, E-mail: 13909816093@139.com

中图分类号: TG146.2;
TG113.1

文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2023)
12-1535-07

收稿日期:

2023-03-06 收到初稿,
2023-06-08 收到修订稿。

1 AZ/AM系合金

1.1 含碳变质细化剂

目前应用在AZ、AM系合金的固体含碳变质剂包括C₂Cl₆、MgCO₃、石墨、SiC等, 气体变质剂包括CO、CO₂等, 其细化机制被广泛接受的是Al₄C₃异质形核理论。徐红伟^[2]计算了原位形成Al₄C₃颗粒的生成热, 其具有自发形核的倾向, 而且通过计算, 在<1120>Mg与<1210>Al₄C₃线错配度仅为3.4%, 面错配度{0002}Mg与{1012}Al₄C₃为7.2%, 因此认为Al₄C₃颗粒是 α -Mg有效的异质形核核心。高挺^[3]等研究MgCO₃对AZ91合金显微组织的影响, 在740℃时添加1%MgCO₃变质后, 合金的晶粒度达到79 μ m, 同时认为Mn在碳变质过程中发挥不可或缺的作用。A.saber^[4]同样认为Mn在Mg-Al系合金中有至关重要的作用, Al₄C₃相的形成成为Al₈Mn₃相形核提供了质点, 使得合金的晶粒细化; 在780℃时添加1%C粉(3~5 μ m)后合金晶粒尺寸与750℃添加0.7%C₂Cl₆后相近, 细化效果明显。Wang^[5]等在740℃的AM60熔体中加入了1.0%C₂Cl₆, 保温20 min后晶粒度降至70 μ m, 细化后合金的抗拉强度提高了27 MPa, 随着变质剂用量增加性能开始下降。冯海东^[6]研究了C₂Cl₆对AZ91合金细化的影响, 当添加2%后, 在740℃保温10 min后浇注的试样中, 合金的细化效果最

好,晶粒尺寸达到120 μm 。刘艳^[7]对比了等摩尔量碳的 MgCO_3 、 CO_2 、 CO 变质剂在760 $^\circ\text{C}$ 下对AM60合金的影响,经过变质后合金的性能显著提高,其原因是生成了 Al_4C_3 异质形核的核心, CO_2 变质效果最好, CO 次之, MgCO_3 相比较差,但是气体变质剂同样存在衰退现象。对比了 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_2 对AM60合金的变质细化作用^[8],相同条件下 CO_2 的变质效果最好,力学性能最高。随静置时间延长, CO_2 和 C_2H_2 变质衰退效果较为缓慢。上述变质剂的变质效果较为显著,但也存在一定问题如污染环境、变质衰退等问题,这些为含碳变质剂的发展提出新的挑战。

近年来,众多学者围绕含碳变质开发出新型或复合型变质细化剂,刘生发^[9]利用粉末原位合成法制备了 $\text{Mg-Al}_4\text{C}_3$ 中间合金,该中间合金相比传统 C_2Cl_6 、

MgCO_3 等对环境友好,同时熔体中的 Al_4C_3 相数量较容易控制,添加1% Al_4C_3 后AZ91D合金的晶粒尺寸由142 μm 降至63 μm , β 相变得细小且弥散分布,合金的组织得到改善,力学性能得到提高。Bae等^[10]向AZ91合金中加入了0.7% Al-SiC 复合材料变质剂,合金的晶粒尺寸由620 μm 降至74 μm , Al-Mn 相转变为 Al_6Mn_5 相,合金的屈服强度提高20%、韧性提高60%,是一种高效的变质细化剂。

另一种思路则是复合添加含碳变质剂,卢敏敏^[11]等通过复合添加 MgCO_3 、 SiC 、 C_2Cl_6 变质剂,其质量比为3:1:1时, MgCO_3 和 C_2Cl_6 释放的气体使 SiC 细化作用更均匀,合金固溶态晶粒尺寸由234 μm 降至72 μm ,如图1所示,获得了比添加单一变质剂更好的效果。

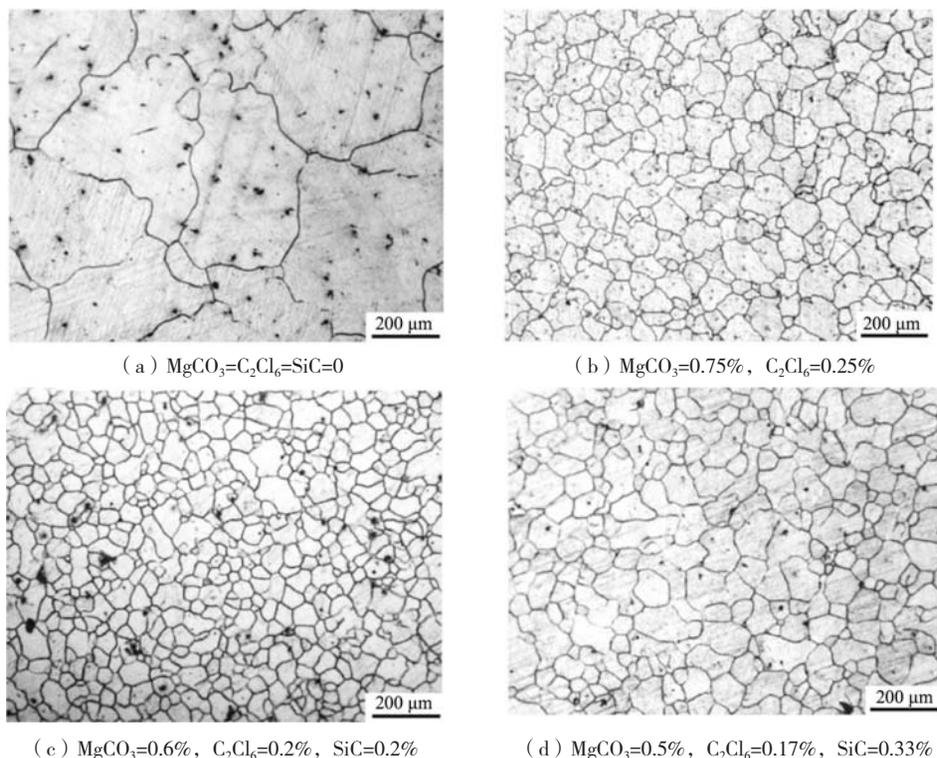


图1 不同变质处理的AZ91合金固溶态显微组织

Fig. 1 Solid solution microstructure of AZ91 alloy with different modification treatments

1.2 含锶变质剂

含Sr变质剂对含Al或不含Al镁合金都有变质细化效果,是开发高性能耐热镁合金的重要碱土元素。Sr在AZ系合金中的细化机制是GRF(生长抑制因子机制),即Sr富集在凝固前沿,阻碍基体长大,其与Al形成热稳定性高的 Al_4Sr 耐热强化相,改善 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相形貌,从而达到变质细化效果,使合金的性能提高。潘复生等^[12]研究发现,以 Mg-Sr 中间合金添加后的细化效果好于 Al-Sr 中间合金,而且不同状态的中间合金对晶粒细化效果影响较大,其主要归因于含Sr相的尺寸、形

貌和分布。

Cheng^[13]分析少量Sr对AZ31合金初晶析出的影响,添加0.12% Sr后合金的晶粒尺寸由439 μm 降至234 μm ,结果表明Sr的加入增加了合金的过冷度,形核几率增加,再辉温差降低,阻碍合金晶粒长大。

F. YAVARI^[14]在AZ61合金中加入Sr后,形核温度提高约8.2 $^\circ\text{C}$,形核过冷度降低3.5 $^\circ\text{C}$,随着Sr含量增加后,合金中先后形成 Al_4Sr 和 $\text{Al}_3\text{Mg}_{13}\text{Sr}$ 相,当Sr含量在0.75%时,晶粒尺寸最细,合金的抗压强度由186 MPa提高到280 MPa。

Sr与RE复合变质的效果比较显著。Zhang^[15]等在压铸AZ91-0.5RE合金加入不同质量分数的Sr, 当Sr含量在0.2%时, 合金表现出最好的高温性能, 继续增加Sr的含量到1.0%, 合金组织中形成Al₄Sr相, 同时合金中β相的数量减少, 抗蠕变性能提高。

Aria Afsharnaderi^[16]研究Sr和Ti对AZ91合金组织和性能变化, 添加0.5%Sr后阻碍了晶粒生长, 晶粒尺寸细化, 继续Sr含量后, 细化效果不明显。添加0.1%Ti后, 形成了TiAl₃相促进形核, 合金可以达到同样的细化效果, 而且合金的力学性能相比添加Sr的合金稍高。添加少量Sr变质效果较好, 一味增加Sr的含量其细化作用减弱, Ti的变质效果也与Sr相近且添加量更少, 当Sr和RE元素共同作用是, 变质效果更好。

1.3 含钛变质剂

Ti元素是一种良好的Mg-Al合金晶粒细化剂, 加入形式一般有Al-Ti、Al-Ti-B、Al-Ti-C等, 其在Mg-Al系合金中可以形成TiAl₃、TiC、TiB₂等高熔点质点促进形核。以Al-6Ti中间合金为例^[17], 其在熔体内以溶质Ti质点形式存在, 随着中间合金中B的加入, 合金的相组成由TiAl₃向TiAl₃+TiB₂转变, 在Ti/B质量比减少至2.2情况下又转变为TiB₂, Al-Ti-B中间合金的细化能力先增强后减弱, TiB₂颗粒与α-Mg晶粒位向关系错配度仅有5.6%, 是α-Mg理想的形核基底。由于TiB₂极容易团

聚, 当颗粒尺寸急剧增加后, 细化效果减弱。当添加Al-5Ti-B时^[17], 在Ti质点成分过冷的作用下, 以TiB₂形核质点为主; 当在Al-Ti合金中引入C元素后, Al-7.8Ti-0.4C中间合金中形核质点包含TiAl₃相和TiC相; 而在Al-7.3Ti-1.8C中间合金中形核质点主要是TiC相, 以上合金中Al-7.8Ti-0.4C细化效果更好, 作者认为TiAl₃与TiC共同提高变质细化效果。进一步提高合金中的C含量, 以Al-6.1Ti-4.6C中间合金为例, 合金中存在Al₄C₃和TiC形核质点, 其细化效果最好, 因此作者认为Al₄C₃质点比含Ti质点的细化效果更好。

Chen^[18]研究了Al-5Ti-B对AZ91晶粒细化的影响, 研究表明当Al-5Ti-B含量在0.3%时, 合金的晶粒尺寸最小, 细化效果最好, 如图2所示。合金的晶粒尺寸也与Al-Ti-B的加入温度、保温时间有关, 分别为750℃、保温30 min晶粒最细小, 随着合金凝固冷却速度的增加, 组织继续细化, 晶粒尺寸下降趋势减少。

Wang^[19]在AZ31合金中加入0.3%的Al-4Ti-5B中间合金, 合金的晶粒尺寸由1 100 μm降至80 μm, 合金中含B质点包括TiB₂和AlB₁₂, 而AlB₁₂颗粒与α-Mg晶粒位向关系错配度超过15%, 意味着AlB₁₂颗粒不是α-Mg晶粒的异质形核质点。然而M. Suresh^[20]研究了B对AZ91合金组织和性能的影响, 在添加0.032%B后晶粒细化, 其形成的高熔点AlB₁₂颗粒具有与α-Mg相同的晶体结构和晶格常数, 作者就认为AlB₁₂颗粒是促进形核的质

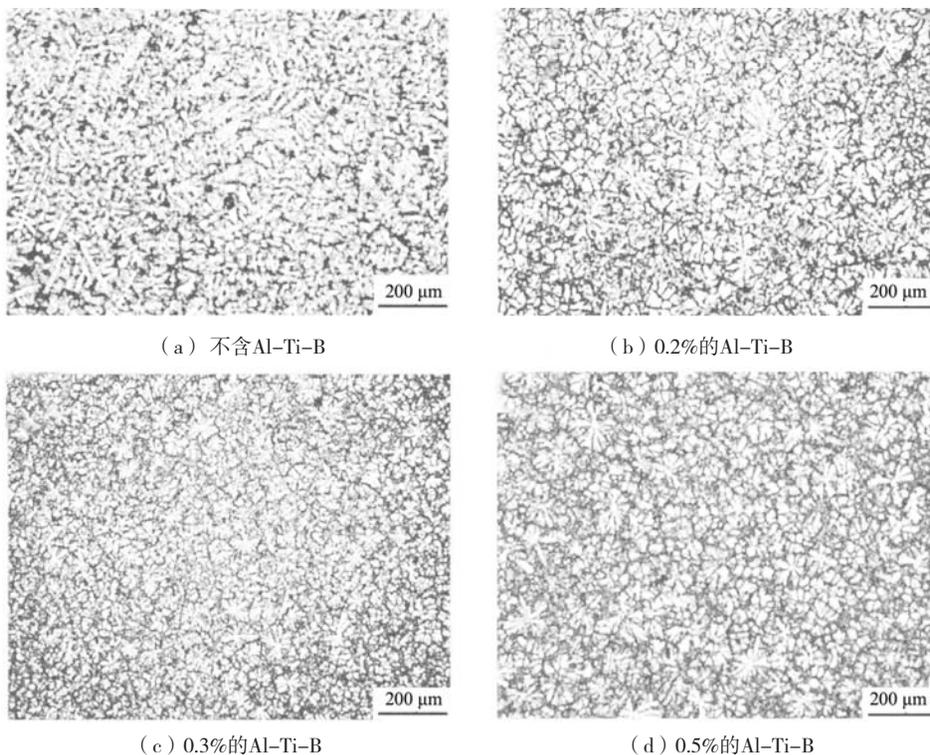


图2 不同含量Al-Ti-B细化的AZ91D合金显微组织

Fig. 2 Microstructure of AZ91D alloy refined with different contents of Al-Ti-B

点的观点是不严谨的,合金凝固时 AlB_{12} 相在结晶前沿富集阻碍晶粒长大亦会造成晶粒尺寸减小,当B添加量在0.04%时,合金的抗拉强度、屈服强度、伸长率分别达到229 MPa、113 MPa、4.9%。

2 AS系合金

Mg-Al-Si系合金的耐热、抗蠕变性能好,其 Mg_2Si 强化相常以粗大汉字状出现导致合金性能下降,在实际生产中仅适用于冷却速度较大的压铸件,无法用于砂型铸造工艺^[21]。因此通过变质细化剂来改变 Mg_2Si 相的形貌、尺寸、分布就显得尤为重要。

2.1 Sr 变质剂

Sr在镁中固溶度较低仅为0.11%,多余的Sr富集在固/液生长界面形成Sr富集层, Qin^[22]认为Sr在变质过程中富集在 Mg_2Si 相表面,影响 $\langle 100 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 晶向之间的相对生长速度,使得 Mg_2Si 相的生长方式及最终形态改变,但随着Sr含量的增加,变质效果减弱。廖健南^[23]研究了Sr在Mg-6Al-1.5Si合金中对 Mg_2Si 相的变质机理,发现 Mg_2Si 相观察到了 Al_4Sr 相和剩余的Sr元素,其认为 Al_4Sr 为促进形核的质点,而且Sr影响着 Mg_2Si 的生长方式。

邹志文^[24]在Mg-9Al-1Si-0.3Zn合金加入了少量Sr,当Sr含量少于0.32%时,合金的显微组织中未观察到 Al_4Sr 相,Sr含量在0.16%时, Mg_2Si 相变得均匀分布,其尺寸由100 μm 降至20 μm 以下,继续增加Sr含量,其细化效果不明显。

Wang^[25]等研究了Sr和Sb对Mg-12Al-0.7Si合金中 $Mg_{17}Al_{12}$ 和 Mg_2Si 相的变质细化影响,结果表明添加0.09%Sr后,合金中汉字状的 Mg_2Si 相转变为细小不规则的多边形状,而添加0.5%Sb的合金中仍存在少量汉字状,因此Sr比Sb在变质 Mg_2Si 相效果更好。相反添加了0.5%Sb的合金中网状 $Mg_{17}Al_{12}$ 相发生断裂,而在含0.09%Sr合金中仍存在少量网状相,相比变质 $Mg_{17}Al_{12}$ 相,Sb变质效果更好。

张连腾^[26]研究了Sr、Y复合变质对Mg-9Al-3Si凝固组织的影响,发现添加稀土Y后,合金的晶粒尺寸先降低后增大,复合变质后, Mg_2Si 尺寸减少40%,合金的抗拉强度和伸长率分别提高31.2%和300%。

2.2 RE 变质剂

在Mg-Al合金中加入Si后形成 Mg_2Si 相,合金的热稳定性增强但仍不及AE42合金,添加少量稀土后不仅可以变质粗大的 Mg_2Si 相,也可以降低稀土使用量,降低生产成本。当合金中Al含量较高、Si含量较低时,AS系合金中易形成 Al_4RE 或 $Al_{11}RE_3$ 或 Al_2RE 相,促进形

核细化组织,RE含量高后会出现过改性效果。

李克^[27]研究了Ce在Mg-3Al-2.5Si合金中对 Mg_2Si 相的变质作用机理,当Ce含量在1%时,初生 Mg_2Si 相尺寸减少到18 μm 以下,形貌由骨骼状向多边形转变,基体中形成大量 $CeSi_2$ 相。由于 $\langle 001 \rangle CeSi_2$ 和 $\langle 100 \rangle Mg_2Si$ 错配度仅为7.46%, $CeSi_2$ 可以作为异质形核核心,同时Ce原子可以吸附到 Mg_2Si 生长前沿抑制其长大,继续增加Ce含量后, $CeSi_2$ 相快速长大,Ce原子的吸附和抑制作用减弱,变质效果降低。朱文杰^[28]在Mg-5Al-2Si合金中加入Ce后,合金中形成了细小的 $Al_{11}Ce_3$ 和 $CeSi_2$ 相, Mg_2Si 共晶相的形貌、尺寸大大改善,当Ce含量为0.4%时,力学性能达到最佳,增加Ce含量到0.8%后,长大的 $CeSi_2$ 相已不能变质粗大的 Mg_2Si 相,合金的力学性能下降。

蒋一锋^[29]等在Mg-14Al-5Si合金中加入1.5%Ce后, Mg_2Si 相尺寸由45 μm 降至6 μm ,部分网状 $Mg_{17}Al_{12}$ 相断裂成孤岛状并且细化,合金的力学性能达到最佳。Ce作为表面活性元素,富集在 Mg_2Si 表面,降低其表面能,促进 Mg_2Si 相形核,也抑制了 Mg_2Si 相的生长速度,长大方式由各向异性转变为各向同性, Mg_2Si 相得到变质。增到Ce含量到2%,出现杆状Ce-Si相,形核几率降低,出现过变质效果。

范晋平^[30]等研究了Y在Mg-14Al-5Si合金中的变质作用,与Ce相同,Y作为表面活性元素凝固时在晶粒生长前沿富集限制 $Mg_{17}Al_{12}$ 相长大;与Ce不同,当Y添加量在1.5%时,合金中形成Mg-Si-Y相消耗了Y,造成了变质效果减弱。

Liu^[31]在Mg-7Al-1Si合金中添加1%Gd后,合金中形成了 Al_2Gd 相,低熔点 $Mg_{17}Al_{12}$ 相数量减少, Mg_2Si 相由汉字状转变为块状或点状,平均晶粒尺寸降低。

3 AE系合金

稀土在Mg-Al系合金中可以净化合金熔体,提高合金的流动性、耐热及耐蚀性能,减少显微缩松和热裂的发生。稀土会优先与Al结合形成稀土强化相,使 $Mg_{17}Al_{12}$ 相减少和分散,形成孤立小岛,稀土相也可以阻碍晶粒长大,改善组织达到变质效果。

夏鹏举^[32]研究稀土Nd与 C_2Cl_6 对AZ91合金变质处理的影响,单独稀土Nd变质的效果好于 C_2Cl_6 和稀土复合变质,复合变质好于单独用 C_2Cl_6 变质效果。

雷宇^[33]在压铸AZ91D合金中添加了稀土La、RE,合金中出现了针状 $Al_{11}RE_3$ 、颗粒 Al_2RE 相,网状 $Mg_{17}Al_{12}$ 相开始分散和细小,继续添加稀土后,虽然 $Mg_{17}Al_{12}$ 相继续减少,但稀土相 $Al_{11}RE$ 、 Al_2RE 发生粗化。

关蕾^[34]研究了稀土Y变质对Mg-Al合金铸态组织影

响,随着Y含量增加,合金的晶粒尺寸先减少后增大,但始终比原始合金晶粒更细小,并且冷却速度对细化的影响超过Y元素变质的影响,在200 °C/S冷却速度下,即使添加1%以下的稀土Y对合金也有细化作用。

复合稀土添加可以改善合金的组织。李鹤^[35]在AZ91-Ce合金中添加少量La后,合金中出现管状Al-RE

相,继续增加后,针状相逐渐被管状相取代, $Mg_{17}Al_{12}$ 相转为粒状。姜楠^[36]在AZ80合金中添加0.6%Nd后形成针状 $Al_{11}RE_3$ 相如图3b所示,继续添加稀土Gd后,合金中针状相逐渐向块状 Al_2RE 相转变如图3c所示,合金组织细化并改善。

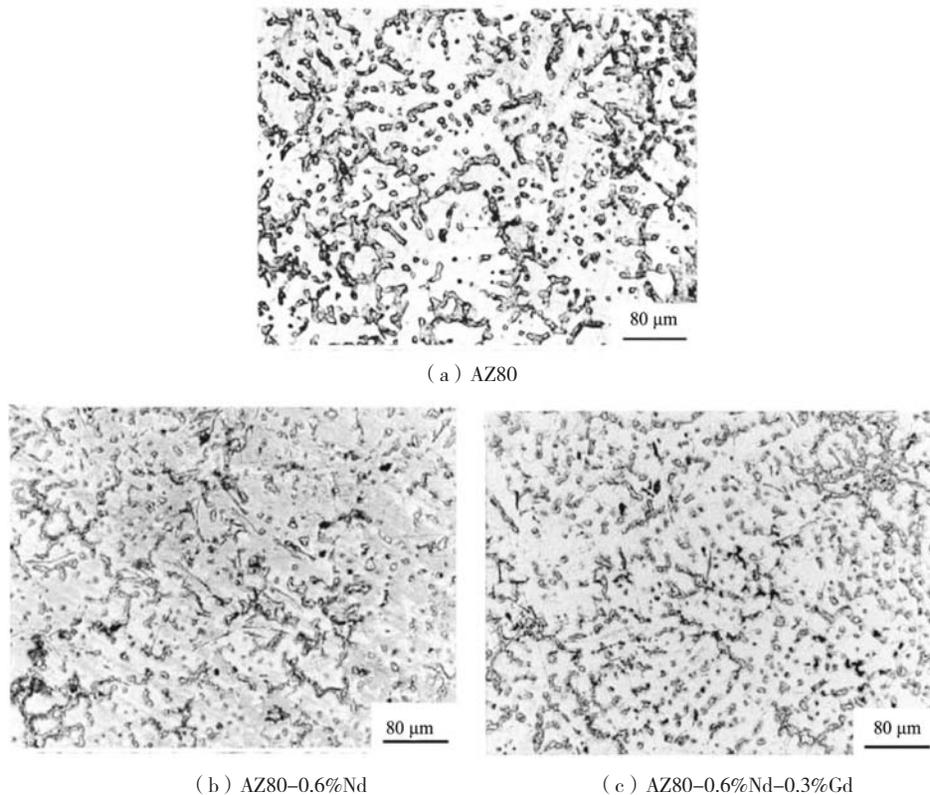


图3 AZ80-xRE合金显微组织

Fig. 3 Microstructure of AZ80-xRE alloy

4 总结与展望

(1) 在AZ系合金中,含碳变质剂细化作用明显,但也存在一定的问题, Al_4C_3 颗粒容易沉降,导致变质效果减弱,其中 C_2Cl_6 变质效果显著,但挥发出氯气污染环境。同含碳变质一样,含Ti变质剂中形成 TiB_2 颗粒,很容易团聚,存在变质衰退问题,其形核效率低于 Al_4C_3 颗粒。Sr在变质过程中维持时间长,提高了合金的过冷度阻碍晶粒长大,不过其变质效果相比稀土变质较弱,稀土变质剂主要使 $Mg_{17}Al_{12}$ 相减少、断裂、分散,添加量过多对时效态合金性能影响较大。相同作用机理下的变质剂复合后,晶粒细化效果更好;不同作用机理的变质剂复合,也可以提高变质效

果。在实际生产中,选择适宜的变质剂,研究变质处理中的工艺参数,提高合金的性能。

(2) 在AS系合金中, Mg_2Si 作为耐热相可以提高合金的高温性能,通过Sr、RE变质可以提高合金的耐热性并改善合金组织,扩大合金用途,当变质剂添加过量时,将产生过变质效果。

(3) 在AE系合金中,RE元素主要与Al结合形成Al-RE相阻碍 $Mg_{17}Al_{12}$ 相的形成,改善合金的组织,提高耐热性。当稀土添加量过多时,稀土相易粗大恶化组织,使得变质效果变差,普遍认为采用复合稀土变质相比单一稀土变质的效果更好。在RE变质基础上,可以进一步研究与含碳、锶、钛变质剂复合对Mg-Al系合金变质细化的作用,提高Mg-Al系合金的应用。

参考文献:

- [1] PAN Fusheng, YANG Mingbo, CHEN Xian-hua. 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.
- [2] 徐红伟. 镁合金石墨烯变质剂的制备及晶粒细化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [3] 高挺, 李克, 王倩. 镁合金碳质法细化工艺及机理研究 [J]. *热加工工艺*, 2012, 41 (2): 84–88.
- [4] SABER A, HAGHAYEGHI R, NAJAFI H, et al. An investigation on duplex nucleation in AZ91 magnesium alloy and its influence on high temperature mechanical Properties [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 2018, 140 (4): 041002.
- [5] WANG Zhaohui, KANG Yonglin, ZHAO Hongjin, et al. Grain refinement of Mg-Al magnesium alloys by carbon inoculation [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16 (A03): s1851–s1854.
- [6] 冯海东. 六氟乙烷对镁合金熔体除氢及晶粒细化的影响 [J]. *铸造技术*, 2016, 37 (10): 2257–2260.
- [7] 刘艳, 龙思远, 董鑫, 等. $MgCO_3$ 、 CO_2 、 CO 对AM60B合金晶粒细化的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48 (1): 190–196.
- [8] 刘艳. Mg-Al系镁合金含碳气体变质方法的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [9] 刘生发, 李波, 韩辉, 等. Mg-Al $4C_3$ 中间合金在AZ91D镁合金中的细化效果及机理 [J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19 (1): 32–37.
- [10] BAE J H, YOU B S. Feasibility of grain refinement method for AZ91 alloy using commercial Al-SiC composite [J]. *Materials Science and Technology*, 2020, 36 (2): 194–201.
- [11] 卢敏敏, 李克, 吴尚敏, 等. 复合碳变质剂对镁合金的晶粒细化作用 [J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25 (4): 883–889.
- [12] 潘复生, 杨明波. 含铈镁合金组织和性能的最新研究进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21 (10): 2382–2393.
- [13] CHENG R J, PAN F S, JIANG S, et al. Effect of minor Sr on precipitates in AZ31 magnesium alloys [J]. *Materials Science and Technology*, 2013, 29 (2): 219–225.
- [14] YAVARI F, SHABESTARI S G. Assessment of the microstructure, solidification characteristics and mechanical properties of AZ61+xSr magnesium alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions, B.Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2020, 51B (6): 3089–3097.
- [15] ZHANG Dongdong, ZHANG Deping, BU Fanqiang, et al. Effects of minor Sr addition on the microstructure, mechanical properties and creep behavior of high pressure die casting AZ91-0.5RE based alloy [J]. *Materials Science & Engineering, A.Structural Materials: Properties, Misrostructure and Processing*, 2017, 693: 51–59.
- [16] AFSHARNADERI, ARIA, MALEKAN, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of the AZ91 magnesium alloy with Sr and Ti additions in the as-cast and as-aged conditions [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28 (11): 6853–6863.
- [17] 刘晓滕. Al-Ti-B/C中间合金及Y, Gd对AZ31镁合金晶粒尺寸和力学性能的影响 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [18] CHEN T J, WANG R Q, MA Y, et al. Grain refinement of AZ91D magnesium alloy by Al-Ti-B master alloy and its effect on mechanical properties [J]. *Materials & Design*, 2012, 34 (2): 637–648.
- [19] WANG Yingxin, ZENG Xiaoqin, DING Wenjiang. Effect of Al-4Ti-5B master alloy on the grain refinement of AZ31 magnesium alloy [J]. *Scripta materialia*, 2006, 54 (2): 269–273.
- [20] SURESH M, SRINIVASAN A, RAVI K R, et al. Influence of boron addition on the grain refinement and mechanical properties of AZ91 Mg alloy [J]. *Materials Science & Engineering, A.Structural Materials: Properties, Misrostructure and Processing*, 2009, 525 (1/2): 207–210.
- [21] 杨明波, 潘复生, 白亮, 等. 合金元素对Mg-Al-Si系镁合金中 Mg_2Si 相形貌影响的研究进展 [J]. *热加工工艺*, 2007, 36 (14): 71–74.
- [22] QIN Q D, ZHAO Y G, ZHOU W, et al. Effect of phosphorus on microstructure and growth manner of primary Mg_2Si crystal in Mg_2Si/Al composite [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2007, 447 (1–2): 186–191.
- [23] 廖健南. Mg-Al-Si合金中 Mg_2Si 相的变质机理研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- [24] 邹志文, 熊守美. Sr对Mg-9Al-1Si-0.3Zn合金微观组织和力学性能的影响 [J]. *金属学报*, 2010, 46 (10): 1200–1205.
- [25] WANG Zhiwen, WANG Hongxia, GONG Jialin, et al. Modification and refinement effects of Sb and Sr on $Mg_{17}Al_{12}$ and Mg_2Si phases in Mg-12Al-0.7Si alloy [J]. *China Foundry*, 2016, 13 (5): 310–315.
- [26] 张连腾, 陈乐平, 周全. Sr、Y复合变质对Mg-9Al-3Si合金凝固组织及力学性能影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39 (11): 1268–1272.
- [27] 李克, 李健, 胡斐, 等. Ce对Mg-3Al-2.5Si合金中初生 Mg_2Si 相的变质作用与机理 [J]. *有色金属工程*, 2019, 9 (1): 19–24.
- [28] 朱文杰, 李德江, 曾小勤, 等. Ce对铸造Mg-5Al-2Si合金中 Mg_2Si 相改性及力学性能的影响 [J]. *铸造*, 2019, 68 (7): 679–683.
- [29] 蒋一锋, 范晋平, 裴镖, 等. Ce对Mg-14Al-5Si合金组织及性能的影响 [J]. *有色金属工程*, 2021, 11 (10): 33–39.
- [30] 范晋平, 蒋一锋, 裴镖, 等. Y对Mg-14Al-5Si合金性能的影响 [J]. *材料研究学报*, 2022, 36 (3): 213–219.
- [31] LIU Jian, WANG Wu-xiao, Zhang Sha, et al. Effect of Gd-Ca combined additions on the microstructure and creep properties of Mg-7Al-1Si alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 620: 74–79.

- [32] 夏鹏举. Mg-Al系合金凝固组织中共晶 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相的分布和形貌及其对合金力学性能的影响 [D]. 西安: 西安理工大学, 2011.
- [33] 雷宇. Mg-Al-RE系压铸镁合金的组织与性能研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [34] 关蕾. Y变质及热处理对Mg-Al合金组织与性能的影响 [D]. 西安: 西安理工大学, 2012.
- [35] 李鹤. La对AZ80-Ce合金中Al-RE相形貌影响机制研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [36] JIANG Nan, CHEN Lei, MENG Ling-gang. Effect of neodymium, gadolinium addition on microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy [J]. *Journal of Rare Earths*, 2016, 34 (6) : 632-637.

Application and Research Progress of Metamorphic Refinement in Mg-Al Series Alloys

LI Hua-cheng^{1,2}, CHENG Fa-song³, YU Lei⁴, FAN Shun-chang⁴, ZHAN Liang^{1,2}, FENG Zhi-jun^{1,2}, MA Ying-bo^{1,2}, SUN Zhi-ming^{1,2}

(1. Shenyang Zhuyan Science and Technology Limited Company, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., CAM, Shenyang 110022, Liaoning, China; 3. AECC Guizhou Liyang Aviation Power Limited Company, Guiyang 550014, Guizhou, China; 4. Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Liaoyang, Liaoyang 111000, Liaoning, China)

Abstract:

This paper introduced the characteristics of Mg-Al alloys, reviewed the influence and mechanism of C, Sr, Ti, and RE elements on the metamorphic refinement of Mg-Al alloys. By the AZ, AM, AS and AE alloy systems, the differences under different metamorphic treatments were compared. The optimal dosage, addition temperature and holding time of the metamorphic agent were pointed out. The influence of the metamorphic agent on the grain size, microstructure evolution and mechanical properties of the alloy were summarized, which provided a reference for the metamorphic refinement of Mg-Al alloys. Finally, the author summarized the characteristics of metamorphic agents in several types of alloys, and provided systematic ideas for the preparation of high-performance and low-cost magnesium alloys.

Key words:

deterioration; refinement; microstructure; mechanism; Mg-Al alloy