

# MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub>、CO 对 AM60B 合金晶粒细化的影响

刘 艳<sup>1</sup>, 龙思远<sup>1,2</sup>, 童 鑫<sup>1</sup>, 刘 青<sup>1</sup>, 游国强<sup>1,2</sup>, 袁 颖<sup>1</sup>

(1. 重庆大学, 重庆 400045)

(2. 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044)

**摘 要:** 在加入等摩尔量碳的基础上, 利用 MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub> 和 CO 对 760 °C 的 AM60B 合金进行了变质处理。结果表明: MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub> 和 CO 分别使 AM60B 的平均晶粒尺寸从 213 μm 减小到了 116, 90 和 106 μm; 经 MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub>、CO 变质处理后, AM60B 合金的维氏硬度、抗拉强度、屈服强度和伸长率均有很大提升, CO<sub>2</sub> 变质后的 AM60B 合金力学性能最好, CO 次之, MgCO<sub>3</sub> 最差。基于 SEM、EDS 以及 XRD 分析数据, MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub> 及 CO 气体具有相同的变质机理, 即主要是因为加入这 2 种含碳变质剂后, 熔体中的 Al 和 C 结合生成了 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 异质形核核心。

**关键词:** Mg-Al 合金; 变质处理; CO<sub>2</sub>; CO; MgCO<sub>3</sub>

**中图分类号:** TG111.5; TG146.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2019)01-0190-07

随着中国汽车工业和 3C 等行业的转型升级以及中国经济地位的显著提升, Mg-Al 合金的应用前景越来越好。然而, 众所周知, Mg-Al 合金强度相对较低、塑性较差、耐腐蚀性和耐高温性能不高, 这严重限制了它的使用范围。为此, 通常会在浇注生产工序中对 Mg-Al 合金进行晶粒细化处理, 如变质处理、过热处理等等<sup>[1-4]</sup>。其中, 加碳变质处理法被广泛认为是对 Mg-Al 合金最有效的晶粒细化手段。因此, 众多学者对此展开了广泛的研究, 并取得了一些好的成果。这些被研究的含碳变质剂主要包括: MgCO<sub>3</sub><sup>[5-7]</sup>、C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub><sup>[8,9]</sup>、Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub><sup>[10]</sup>、SiC<sup>[11]</sup>、石墨粉<sup>[12]</sup>以及含碳中间合金<sup>[13,14]</sup>, 它们都为固体状, 在变质处理时, 需要用一钟形罩将其压入 Mg-Al 合金熔体中并进行搅拌, 但随之而来的问题是操作依赖人工、间歇作业、熔体烧损严重。但随着科技的进步和经济的发展, 这种落后的操作工艺势必被淘汰。为此, 有学者提出了改变变质剂物理状态的观点, 尝试采用气态变质剂。日本学者 Yano<sup>[12]</sup>提出以氩气为载体向 Mg-Al 合金熔体中通入碳粉, 利用碳粉与熔体反应生成异质核心, 得到良好的晶粒细化效果, 并且以惰性气体为载体避免了向熔体中带入杂质或变质剂与熔体反应污染熔体等缺陷。但是此方法, 以高纯氩气为载体通入碳粉, 不仅设备昂贵复杂, 碳粉的通入参数可控性差, 而且通入的碳粉粗细也有严格的要求, 因此该工艺在生产上的广泛应用受到了限制。Subramanian<sup>[15]</sup>等人在 Ar 和

CO<sub>2</sub> 混合气体气氛下对镁铝合金进行挤压加工, 并对比分析了使用和不使用 CO<sub>2</sub> 对合金的显微组织以及力学性能的影响, 结果表明在 CO<sub>2</sub> 气体氛围下, Mg-Al 合金经过加工后具有较少的气孔和缺陷, 力学性能也得到提高。这间接指出了 CO<sub>2</sub> 气体有作为变质气体的潜质。南昌大学的高挺<sup>[16]</sup>直接用 CO<sub>2</sub> 气体作为变质剂, 探究其对 AZ91 镁合金的变质效果的影响, 结果表明 CO<sub>2</sub> 的变质效果稍逊 MgCO<sub>3</sub> 的变质效果。然而, 该作者并没有公布 CO<sub>2</sub> 变质处理的操作工艺, 因此, CO<sub>2</sub> 的变质效果还有待进一步研究。

为了进一步系统地探索含碳气体对 Mg-Al 合金的细化效果, 本课题将 MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub> 和 CO 3 种含碳变质剂加入 AM60B 合金熔体中, 在加入等摩尔量碳的基础上, 从显微组织、晶粒尺寸、维氏硬度、力学性能等方面对 3 种变质剂的变质效果进行对比分析, 并对其变质机理进行分析。

## 1 实 验

本实验采用了航天工程常用的 AM60B 合金, 其成分如表 1 所示。实验示意图如图 1 所示。本实验所采用的熔炼炉为电阻炉, 所采用坩埚容量为 40 kg。首先, 称量 27 kg AM60B 锭块并将其装入预热后的坩埚中进行升温熔化, 熔炼过程中采用 N<sub>2</sub>+SF<sub>6</sub> 混合气体作为保护气体, 其中 N<sub>2</sub> 和 SF<sub>6</sub> 的流量分别为 10 和 20 mL/min。当温度达到 760 °C 时, 保温 30 min 以使

收稿日期: 2018-01-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0301100)

作者简介: 刘 艳, 女, 1994 年生, 硕士生, 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044, E-mail: liuyanly@cqu.edu.cn

熔体温度均匀。MgCO<sub>3</sub> 做变质剂时, 将预热后的由铝箔包裹的 MgCO<sub>3</sub> 粉末利用钟形罩压入 Mg-Al 合金熔体中, 平稳地作水平移动, 静止 10 min 后, 将处理过的熔体浇入模具中, 空冷得到试样。其中, MgCO<sub>3</sub> 用量为熔体质量的 1%。含碳气体做变质剂时, 利用镁合金气体精炼设备<sup>[17]</sup>将含碳气体导入 Mg-Al 合金熔体中并搅拌 10 min, CO<sub>2</sub> 通气流量为 4.76 L/min, CO 通气流量为 4.67 L/min, 通气时间为 15 min。

实验检测所用试样是从浇注试样底部向上 10 mm 处截取的, 经过研磨抛光后, 利用苦味酸、乙酸、无水乙醇的混合液对其腐蚀, 随后采用截线法获得晶粒尺寸。上述试样也进行了 SEM、EDS 和 XRD 分析。采用仅进行抛光未进行腐蚀的相同试样进行显微硬度测试。将细化处理后的 AM60B 试样加工成标准的拉伸试样, 在电子万能试验机上进行拉伸试验, 采用匀速单向位移拉伸, 拉伸速率为 1 mm/min。

## 2 结果与分析

### 2.1 铸态 AM60B 合金显微组织分析

经过 MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub> 和 CO 处理后的 AM60B 合金显微组织图见图 2。MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub> 及 CO 对 AM60B 合金

表 1 AM60B 合金化学成分

Table 1 Chemical composition of AM60B alloy (wt%)				
Al	Mn	Zn	Si	Mg
6.60	0.41	0.11	0.07	Bal.

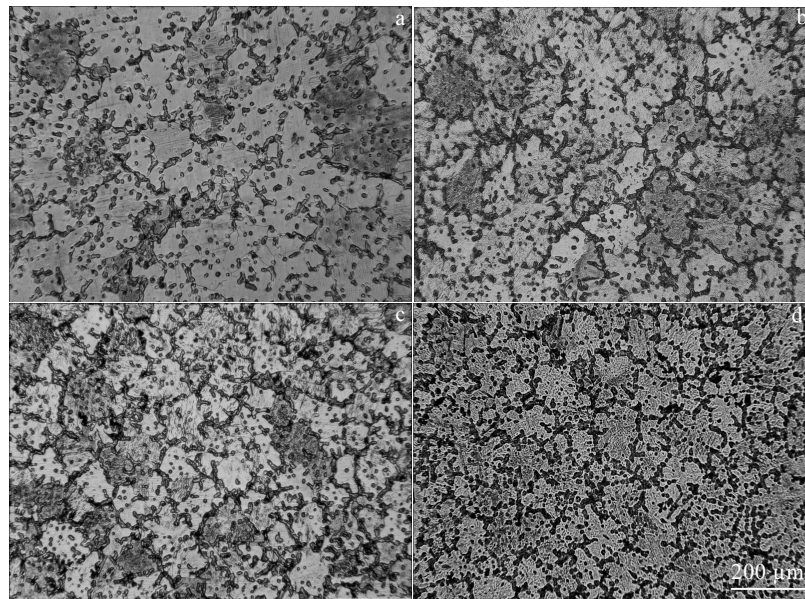
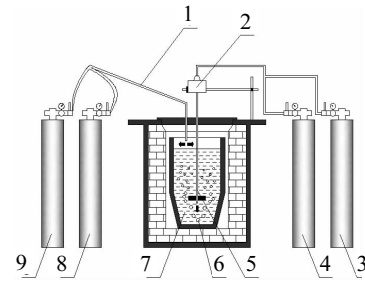


图 2 不同含碳变质剂变质处理前后的 AM60B 合金的组织

Fig.2 Microstructures of AM60B alloy inoculated by different grain refiners containing carbon: (a) unrefined, (b) MgCO<sub>3</sub>, (c) CO<sub>2</sub>, and (d) CO



1. mixed protective gas; 2. motor; 3. carbonous inoculation gas; 4. refining gas; 5. rotating impeller degassing; 6. carbonous bubble; 7. AM60B alloy melt; 8. N<sub>2</sub> gas tank; 9. SF<sub>6</sub> gas tank

图 1 气体变质示意图

Table 1 Schematic diagram of gas inoculation

都有较好的晶粒细化效果。由图 2 可以看出, 加入不同含碳变质剂后的 AM60B 合金的铸态组织主要还是由白色  $\alpha$ -Mg 基体和黑色  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 第二相构成, 但是可以看出形态发生了很明显的变化。未变质的合金试样组织具有粗大的晶粒和较为发达的树枝晶, 第二相沿晶界或晶内位置析出, 呈网状分布。加入 MgCO<sub>3</sub> 后, 初生相  $\alpha$ -Mg 虽然依旧为树枝晶, 但尺寸明显减小且枝晶间距变小,  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 第二相更多地聚集在晶界处, 在晶粒内有少量分布。而加入 CO<sub>2</sub>、CO 气体后合金组织进一步细化, 枝晶间距进一步减小, 第二相几乎都聚集在晶界处, 在晶粒内部偶有析出。

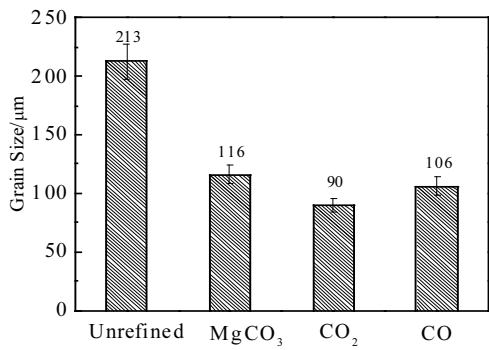


图 3 不同含碳变质剂变质处理前后 AM60B 合金的晶粒尺寸  
Fig.3 Grain sizes of AM60B alloy inoculated by different grain refiners containing carbon

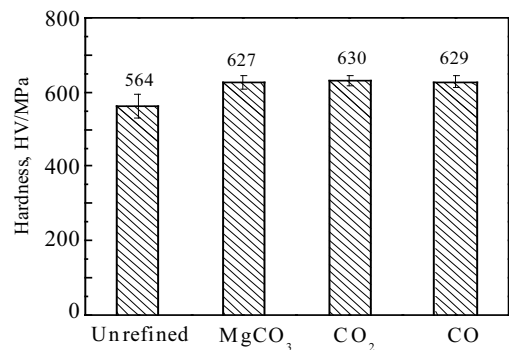


图 4 不同含碳变质剂变质处理前后 AM60B 合金的维氏硬度  
Fig.4 Vicker hardness of AM60B alloy inoculated by different grain refiners containing carbon

图 3 为加入不同变质剂后 AM60B 合金的平均晶粒尺寸图。可以看出，加入变质剂后，初生相  $\alpha$ -Mg 平均晶粒尺寸都有较大幅度的减小，表明细化效果良好。MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub>、CO 分别使 AM60B 合金的平均晶粒尺寸从未变质的 213  $\mu\text{m}$  减小到 116, 90, 106  $\mu\text{m}$ ，分别减小了 44.9%，57.7%，50.7%。显然，从这个角度而言，CO<sub>2</sub> 的变质效果最好。

### 2.2 铸态 AM60B 合金力学性能分析

图 4 为不同变质剂变质处理前后的 AM60B 合金的平均维氏硬度。从图中可以看出，未经过变质处理的合金维氏硬度为(564±65.2) MPa，MgCO<sub>3</sub> 变质的合金维氏硬度为 (627±37.3) MPa，比未变质的合金提高了 11.2%；而经 CO<sub>2</sub> 变质的合金维氏硬度为 (630±28.5) MPa，比未添加含碳变质剂的合金提高了 11.7%；同样，CO 变质处理的合金维氏硬度为 (629±30.8) MPa，比未添加含碳变质剂的合金提高了 12.0%。综上所述，MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub>、CO 这 3 种变质剂均能使 AM60B 合金的维氏硬度增加，但是增加幅度有限且增加幅度均相差不大。从理论上来说，晶粒尺寸越小，第二项分布越均匀，晶界处位错塞积数越少，变形越困难，平均维氏硬度越高。结合 2.1 节中的平均晶粒尺寸数据而言，相比未变质，CO<sub>2</sub> 变质后的合金平均晶粒尺寸更小且第二项分布更均匀，CO 变质次之，MgCO<sub>3</sub> 变质后的合金平均晶粒尺寸更小，则从理论上而言，CO<sub>2</sub> 变质后合金具有最高的维氏硬度，CO 变质次之，MgCO<sub>3</sub> 变质最低。对比图 4，可发现二者规律吻合度较高。同时，二者测量偏差的差异也在一定程度上说明了 CO<sub>2</sub> 处理后的合金组织更为均匀，硬质相分布更为弥散。

图 5 为经 MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub>、CO 处理前后的 AM60B 合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率的变化图。从图中可以看出，经过 3 种变质剂分别处理过的 AM60B 合金的力学性能均有所提高。未变质的 AM60B 合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率仅分别为 145 MPa、85 MPa 和 4.9%，力学性能不佳。而经过 MgCO<sub>3</sub> 变质后的 AM60B 镁合金试样的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别增加至 179 MPa、90 MPa 和 6.7%；通过 CO<sub>2</sub> 变质后的 AM60B 镁合金抗拉强度、屈服强度和伸长率分别升高为 190 MPa、102 MPa 和 7.6%；通过 CO 变质后的 AM60B 镁合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 183 MPa、95 MPa 和 7.6%。一般说来，合金晶粒越细小，其力学性能越好。显然，上述研究结果与理论规律高度一致，证明 MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub>、CO 这 3 种变质剂对 AM60B 合金有很好的晶粒细化作用。此外，从上述可以得出：CO<sub>2</sub> 变质后的合金力学性能最好，CO 次之，MgCO<sub>3</sub> 最差。这与前面所进行的金相组织分析结果和维氏硬度分析结果完全吻合。

### 2.3 铸态 AM60B 合金的拉伸断口形貌分析

图 6 为经 MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub>、CO 这 3 种变质剂处理后的 AM60B 合金的室温拉伸断口 SEM 形貌。AM60B 合金断裂为脆性断裂。在 MgCO<sub>3</sub> 变质后的合金中(图 6a)，断口平整，没有塑性变形和紧缩等特征，为典型的脆性断裂。并且端口中出现的解理面相对较小，撕裂棱也较小，韧窝相对也较浅。而在 CO<sub>2</sub> 变质后的 AM60B 合金中(图 6b)，断口中出现了许多韧窝，一部分为等轴状韧窝一部分为剪切韧窝。通常当拉应力造成失效时，韧窝是等轴状的，但在剪切唇区域时，韧窝是椭圆或拉长的。与图 6a 相比，微观断口形貌中

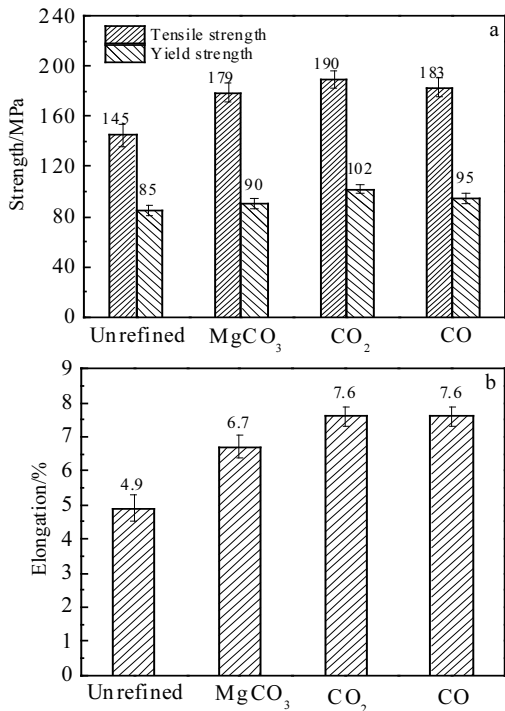


图 5 不同变质剂处理后 AM60B 合金力学性能

Fig.5 Mechanical properties of AM60B alloy inoculated by different grain refiners containing carbon: (a) tensile strength and yield strength and (b) elongation

韧窝数量明显变多, 说明经过 CO<sub>2</sub> 变质后断裂方式变为了解理断裂和韧窝型断裂相结合的断裂方式, 这也是延伸率和拉伸强度提高的原因。在 CO 变质处理后的 AM60B 合金中 (图 6c), 断口出现一些韧窝, 且大多数为等轴状韧窝, 是典型的微孔聚集型断裂。通常在大的应力作用下, 基体金属产生塑性变形后, 在基体与非金属夹杂物、析出相粒子周围产生应力集中, 使界面拉开或使异相颗粒折断形成微孔。由此判断 CO 变质后的 AM60B 合金为解理断裂为主韧窝型断裂为辅。

### 2.4 细化机理

加碳变质法的基本原理是加入的含碳变质剂在 Mg-Al 合金熔体中自身分解或者与熔体中元素反应生成碳原子, 随后碳原子与熔体中的其他微量元素生成高熔点稳定性的化合物, 在熔体中以固体质点的形式存在, 在熔体凝固的时候作为异质形核核心从而细化晶粒。MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub> 和 CO 在 AM60B 中生成碳原子的反应如下所示:

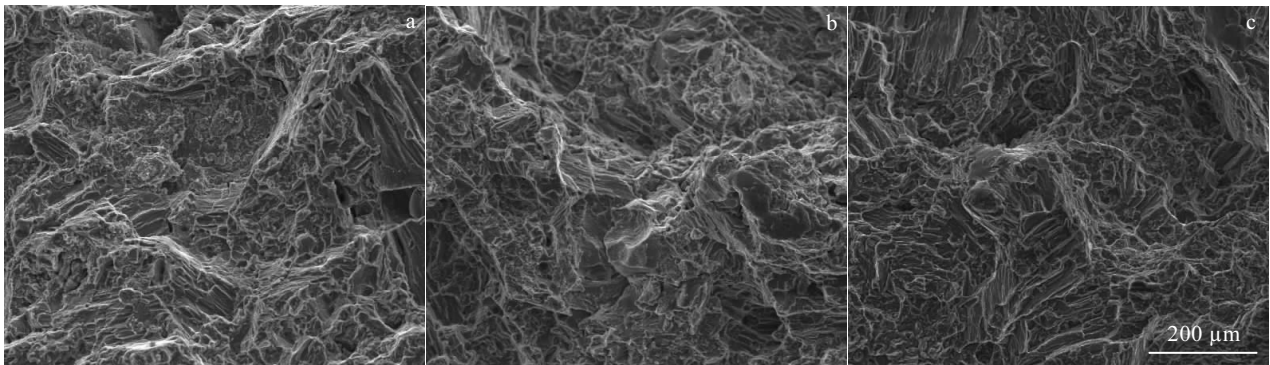
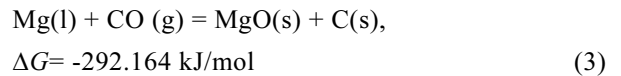
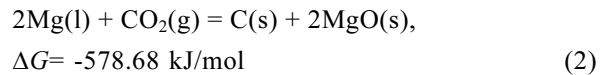


图 6 不同含碳变质剂变质处理后 AM60B 合金的室温拉伸断口 SEM 形貌

Fig.6 SEM morphologies of tensile fracture for AM60B alloy inoculated by different grain refiners containing carbon: (a) MgCO<sub>3</sub>, (b) CO<sub>2</sub>, and (c) CO

一个反应能正向进行的必要条件是其吉布斯自由能值为负。从上述数据可以看出, MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub> 和 CO 在 AM60B 合金熔体中生成碳原子的热力学驱动力极大, 反应正向可行, 为后续生成异质形核核心提供了必须的碳原子。

迄今, 含碳变质法中所生成的含碳异质形核核心仍未被具体确定, 当前的几种主流的含碳异质形核基底包

括: Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>MgC<sub>2</sub>、MgO、Al<sub>2</sub>OC<sup>[10-12,18]</sup>。从晶格常数而言, Al<sub>2</sub>MgC<sub>2</sub> (a=0.338 nm, c=0.582 nm) 与 α-Mg (a=0.320 nm, c=0.520 nm) 最为接近, Al<sub>2</sub>OC (a=0.317 nm, c=0.508 nm) 次之, 随后是 MgO (a=0.422 nm, c=0.582 nm), 最后是 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> (a=0.333 nm, c=2.493 nm)。从面错配度而言, α-Mg 与 Al<sub>2</sub>OC 的面错配度最小, 为 1.23%, 与 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 的为 3.4%, 与 Al<sub>2</sub>MgC<sub>2</sub> 的为 5.3%,

与 MgO 的为 7.2%。综上可看出, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>MgC<sub>2</sub> 和 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 作为异质形核核心的可能性很大, 而 MgO 的可能性相对较小, 并且, 除了 Kim 等人<sup>[18]</sup>提出的推断外, 并没有其他更多有力证据的支撑。此外, 根据 Jin 等人<sup>[19]</sup>的热力学计算结果, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 不能在含铝量低于 10% 的镁合金中稳定存在, 因此, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在 AM60B 合金中作为异质形核核心的可能性也相应减小。Al<sub>2</sub>MgC<sub>2</sub> 形核理论是近年来才被提出的一种异质形核理论。Huang

等人<sup>[11]</sup>通过透射电镜等手段直接探测到了 Al<sub>2</sub>MgC<sub>2</sub> 颗粒的存在, 并且也确定了其与基体 α-Mg 之间的位向关系。而一直以来, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 都被被认为是最有效的异质形核核心。为了进一步确认异质形核核心, 对本实验所得试样进行了 SEM、EDS、XRD 分析。

图 7 为对 MgCO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub> 和 CO 变质处理后的 AM60B 合金进行的 SEM、EDS 检测图。从图中可以看出, 未变质的合金组织中第二相粗大、成条状块状

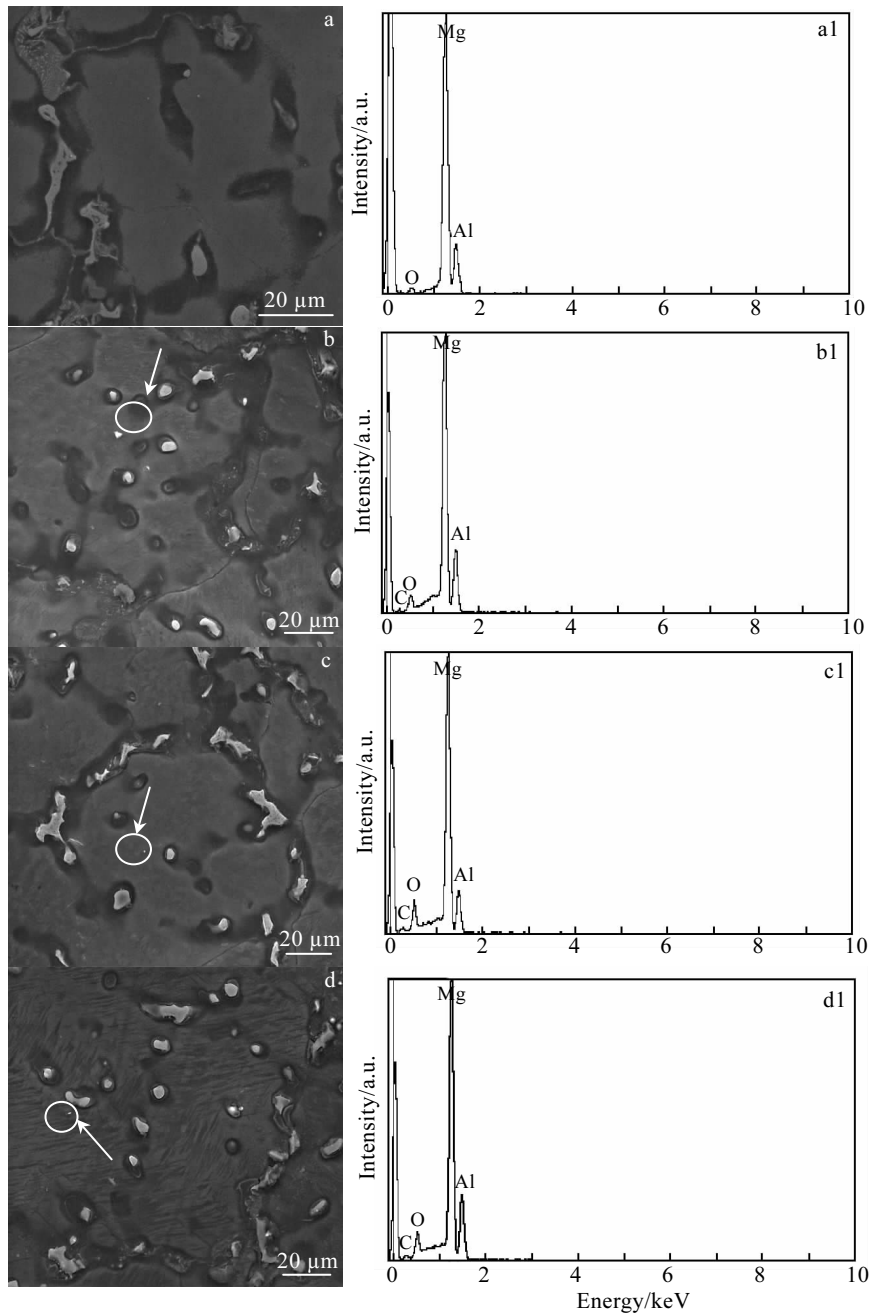


图 7 不同含碳变质剂变质处理后的 AM60B 合金的 SEM 和 EDS 检测图

Fig.7 SEM images (a~d) and EDS analyses (a1~d1) of AM60B alloy inoculated by different grain refiners containing carbon: (a) unrefined, (b) MgCO<sub>3</sub>, (c) CO<sub>2</sub>, and (d) CO

分布在晶界处, 而经 3 种变质剂处理后的合金组织中的第二相成较小的颗粒状较为均匀地分布在镁合金基体上。此外, 从图 7b 中可以看到,  $\alpha$ -Mg 中存在着尺寸小于  $2\ \mu\text{m}$  的颗粒, 从小颗粒的 EDS 能谱中可知, 该颗粒物主要由 Mg、Al、O 和 C 组成, 其中 Al 和 C 的摩尔比近似为 1.46:1, 接近 4:3。其中, Mg 所占比例很大, 可以认为, Mg 来自于基体, 毕竟该颗粒尺寸较小, 部分电子束极有可能打到基体上, 反映基体的相关信息; 又因为镁合金性质活泼、极易氧化, 在一般的制样过程中不可避免地被氧化形成  $MgO$ , 所以 EDS 能谱中所探测到的 O 便极有可能来自于此。因此, 不难看出, 该颗粒极有可能为  $Al_4C_3$ 。如图 7c、7d 所示, 在经  $CO_2$ 、 $CO$  变质后的试样组织中, 也同样存在着如前所述的小颗粒  $Al_4C_3$ 。

图 8 为经不同变质剂处理后 AM60B 合金的 XRD 分析结果。如图所示, 未变质的 AM60B 合金中主要包含的物相为  $\alpha$ -Mg 和  $Mg_{17}Al_{12}$ 。而在  $MgCO_3$  变质处理后的合金中, 其第二相  $Mg_{17}Al_{12}$  峰变弱, 数量相对变少; 最为关键的是, 在该合金中检测出了  $Al_4C_3$  物相。同样地, 在经  $CO_2$  和  $CO$  变质处理后的 AM60B 合金中不仅含有  $\alpha$ -Mg 和  $Mg_{17}Al_{12}$ , 也含有  $Al_4C_3$ 。这也从另一个方面佐证了 SEM 图中所观察到的小颗粒为  $Al_4C_3$ , 因此, 可以推断,  $Al_4C_3$  在  $CO_2$  和  $CO$  气体变质中担任着异质形核核心的作用, 从而促进了 AM60B 镁合金的晶粒细化。

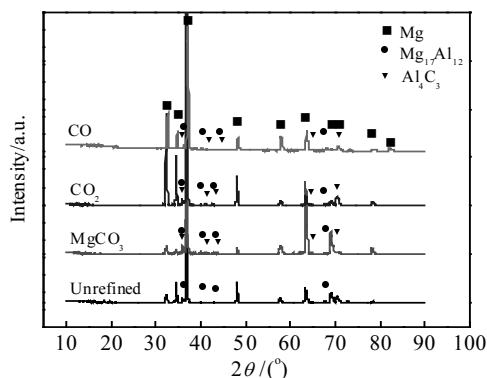


图 8 添加不同变质剂后 AM60B 合金的 XRD 图谱

Fig.8 XRD patterns of AM60B alloy treated by different grain refiners

### 3 结论

1) 在  $760\ ^\circ\text{C}$  下对 AM60B 镁合金进行变质处理再静置 10 min 后,  $MgCO_3$ 、 $CO_2$  和  $CO$  分别使 AM60B 的平均晶粒尺寸从  $213\ \mu\text{m}$  减小到了 116、90 和  $106\ \mu\text{m}$ 。

2) 经  $MgCO_3$ 、 $CO_2$ 、 $CO$  变质处理后, AM60B 合金的维氏硬度、抗拉强度、屈服强度和伸长率均有很大提升, 与平均晶粒尺寸变化规律一致,  $CO_2$  变质后的 AM60B 合金力学性能最好,  $CO$  次之,  $MgCO_3$  最差。

3) 基于 SEM、EDS 以及 XRD 分析数据,  $MgCO_3$ 、 $CO_2$  及  $CO$  气体具有相同的变质机理, 即主要是因为加入这 2 种含碳变质剂后, 熔体中的 Al 和 C 结合生成了  $Al_4C_3$  异质形核核心。

### 参考文献 References

- [1] Vinotha D, Raghukandan K, Pillai U T S et al. *Transactions of the Indian Institute of Metals* [J], 2009, 62(6): 521
- [2] Wang Huiyuan(王慧源), Liu Shengfa(刘生发), Han Hui(韩辉). *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2008, 29(12): 1734
- [3] Yang Mingbo(杨明波), Pan Fusheng(潘复生), Li Zhongsheng(李忠盛) et al. *Foundry*(铸造)[J], 2005, 54(4): 314
- [4] Motegi T. *Materials Science and Engineering A, Structural Materials Properties Microstructure and Processing*[J], 2005, 413: 408
- [5] Gao S Y, Cui J Z, Li Q C et al. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik* [J], 2010, 41(8): 652
- [6] Chen Tijun, Wang Ruiquan, Huang Haijun et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2012, 22(7): 1533
- [7] Wang Ruiquan(王瑞权), Zhang Dahua(张大华), Liu Eryong(刘二勇) et al. *Foundry Engineering*(铸造工程)[J], 2010, 34(1): 19
- [8] Wang Zhaohui, Kang Yonglin, Zhao Hongjin et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2006, 16(s3): 1851
- [9] Wang Xinxin(王欣欣), Yuan Sen(袁森), Zeng Shufeng(曾书峰) et al. *Hot Working Technology*(热加工技术)[J], 2008, 37(13): 17
- [10] Nimityongskul S, Jones M, Choi H et al. *Materials Science & Engineering A*[J], 2010, 527(7-8): 2104
- [11] Huang Yuanding, Kainer Karl Ulrich. *Scripta Materialia*[J], 2011, 64(8): 793
- [12] Tamura Y, Kono N, Motegi T et al. *Journal of Japan Institute of Light Metals*[J], 1998, 48: 185
- [13] Du J, Wang M, Zhou M et al. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2014, 592(14): 313
- [14] Han G, Liu X. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2009, 487: 194
- [15] Subramanian J, Guan K C, Kuma J et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211(8): 1416
- [16] Gao Ting(高挺). *Thesis for Master Degree*(硕士论文)[D].

- Nanchang: Nanchang University, 2011
- [17] Li Cong (李 聪), Long Siyuan (龙思远), Yang Huaide (杨怀德) *et al. Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2013(1): 121
- [18] Kim Y M, Wang L, You B S. *Journal of Alloys & Compounds* [J], 2010, 490(1-2): 695
- [19] Jin Q, Eom J P, Lim S G *et al. Scripta Materialia*[J], 2005, 52(5): 421

## Effects of MgCO<sub>3</sub>, Gaseous CO<sub>2</sub> and CO on Grain Refinement of AM60B Alloy

Liu Yan<sup>1</sup>, Long Siyuan<sup>1,2</sup>, Tong Xin<sup>1</sup>, Liu Qing<sup>1</sup>, You Guoqiang<sup>1,2</sup>, Yuan Ying<sup>1</sup>

(1. Chongqing University, Chongqing 400045, China)

(2. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Based on the equal addition amount of carbon, the effects of MgCO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> and CO on grain refinement of AM60B alloy were investigated. The results indicate that the average grain size of AM60B alloy decreases from 213 μm to 116, 90 and 106 μm by the addition of MgCO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> and CO, respectively. Also, the Vickers hardness, tensile strength, yield strength and elongation of AM60B alloy inoculated by MgCO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> and CO are all improved in some degree; moreover, CO<sub>2</sub> treated AM60B alloy has the best mechanical properties, followed by the CO treated and MgCO<sub>3</sub> treated in sequence. In addition, supported by SEM, EDS and XRD, the observed Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> particles as a result of the addition of MgCO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> and CO should be responsible for the grain refinement of treated AM60B alloy.

**Key words:** Mg-Al alloy; inoculation; CO<sub>2</sub>; CO; MgCO<sub>3</sub>

---

Corresponding author: Long Siyuan, Ph. D., Professor, College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China, E-mail: siyuan\_long@cqu.edu.cn