

Mg 粉添加量对泡沫铝发泡行为的影响

王磊^{1,2}, 姚广春^{1,2}, 罗洪杰^{1,2}, 梁李斯^{1,2}, 张志刚^{1,2}

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110819;

2. 东北大学 教育部材料先进制备技术工程研究中心, 沈阳 110004)

摘要: 利用粉末冶金法制备不同 Mg 粉添加量的纯铝闭孔泡沫铝材料, 并对 Mg 粉添加量对泡沫铝发泡行为及泡沫稳定性的影响进行研究。结果表明: Mg 粉的添加导致前驱体膨胀率的显著增大和泡沫体泡孔结构的均匀化; 添加的 Mg 粉同空气雾化 Al 粉表面的 Al_2O_3 反应, 生成同铝熔体有良好润湿性的 $MgAl_2O_4$ 相, 打破原有铝粉表面的氧化物结构, 生成的 $MgAl_2O_4$ 相均匀地分布于泡孔的布拉德边界和泡壁上; 润湿性 $MgAl_2O_4$ 相的出现增加熔体的表观黏度, 大大减弱重力排液、毛细作用和气泡流动带来的负面影响, 从而提高泡沫的稳定性; 在空气雾化工业纯 Al 粉含氧量(质量分数)为 $(0.34 \pm 0.01)\%$ 和 Mg 粉添加量为 $(0.6\% \sim 1.0)\%$ 的条件下, 可以获得最佳的膨胀率和均匀的泡孔结构。

关键词: 泡沫铝; 粉末冶金; Mg 粉; 发泡行为; 泡沫稳定性

中图分类号: TG 146.21

文献标志码: A

Effect of addition of Mg powders on foaming behaviors of Al foams

WANG Lei^{1,2}, YAO Guang-chun^{1,2}, LUO Hong-jie^{1,2}, LIANG Li-si^{1,2}, ZHANG Zhi-gang^{1,2}

(1. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Engineering and Researching Center of Advanced Preparation Technology of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Closed-cell pure aluminum (Al) foams with Mg powders were prepared by powder metallurgy route. The effects of addition of Mg powders on the foaming behaviors and foam stability were discussed. The results show that the expansion rate of the precursor increases significantly with addition of Mg powders and uniform cell structures of Al foams are obtained; $MgAl_2O_4$ phases with good wettability with Al melt are formed due to the reaction between Mg powders and Al_2O_3 on the surface of Al powders; original oxide structures on surfaces of Al powder are destroyed and $MgAl_2O_4$ phases locate uniformly into the plateau borders and cell walls; the apparent viscosity of melt is enhanced due to the present of $MgAl_2O_4$ phases. Negative impacts caused by gravity drainage, capillarity and bubble flow are weakened greatly and hence foam stability is improved. The optimum expansion rate and uniform cell structures are achieved as oxygen content for air-atomized Al powder is $(0.34 \pm 0.01)\%$ (mass fraction) and addition of Mg powder is $(0.6\% \sim 1.0)\%$.

Key words: Al foams; powder metallurgy; Mg powder; foaming behaviors; foam stability

泡沫铝是一种集结构与功能为一体的新型复合材料, 具有轻质、高比刚度、高能量吸收以及电磁屏蔽和阻尼减震等优点^[1-3]。在众多泡沫铝制备方法(熔体

直接发泡法、注气法和粉末冶金法)中, 粉末冶金法由于具有近净成形^[4-6]的特点, 可以制备各种形状复杂的泡沫铝零部件, 越来越受到泡沫铝研究者的青睐。采

用该方法所制备出来的泡沫铝产品也广泛应用于汽车制造和航空航天等领域^[7-8]。

在泡沫铝的制备过程中,重力排液、毛细作用和气泡流动是不可避免的。重力作用下的液态金属会沿着泡壁和布拉德边界形成的通道向重力垂直向下的方向流动,导致实铝层的出现;而毛细作用使得已经形成的液态泡壁由于布拉德边界的允吸而变得更细;气泡流动使得相互形成的气泡相互挤压,同样会增加气泡合并的概率。因此减小重力排液、毛细作用以及气泡流动是稳定气泡的关键所在。目前,金属泡沫最主要的稳定机理是由 DUDKA 等^[9]提出的颗粒稳定机理,即通过添加陶瓷颗粒或者能与基体材料反应的颗粒物质到金属熔体或者粉末冶金法制备的前驱体中,通过陶瓷颗粒在气-固界面处的富集,增加熔体的表现黏度,减小布拉德边界与泡壁之间的压差而稳定泡沫。液态金属发泡方法是将陶瓷颗粒添加到熔融金属中,并且普遍地认为与液态金属有很好润湿性的陶瓷颗粒能够改善泡沫的稳定性^[10-11]。在采用粉末冶金法制备泡沫铝的过程中,Al 粉表面氧化是不可避免的,这与铝粉极易氧化的特性密切相关,而且文献^[12]报道了过低氧含量的 Al 粉会导致泡沫的不稳定,因此使用适当氧含量的 Al 粉是必需的。但是由于氧化铝颗粒与铝熔体之间差的润湿性^[13],导致这些铝粉表面的氧化铝颗粒并不能稳定泡沫。文献^[14]报道过 Mg 粉在铝粉烧结实验中的关键作用,即通过添加适量的 Mg 粉,这些 Mg 粉同 Al 粉表面的氧化膜反应形成 $MgAl_2O_4$,破坏了原来的氧化物结构,促进了铝粉的烧结。因此,通过将适量 Mg 粉添加到粉末冶金泡沫铝的前驱体中,必然会破坏铝粉表面的氧化物结构。目前,国内外少见相关文献报道系统研究 Mg 粉对粉末冶金泡沫铝泡孔结构和泡沫稳定性的影响。

本文作者通过添加不同含量 Mg 粉到前驱体中,分析发泡后泡沫体膨胀行为和表面形貌来确定其最佳 Mg 粉含量,并利用原位反应生成的润湿性颗粒稳定机理^[9]探讨 Mg 粉的添加对泡沫稳定性的影响。

1 实验

1.1 实验原料

采用 Malvern Mastersizer2000 激光粒度分析仪分析试验中所使用的粉末,粉末原料的特性如表 1 所列。

采用 LECO 公司生产的 TC-436 型氧氮测定仪测得空气雾化 Al 粉中氧含量(质量分数)为 $(0.34 \pm 0.01)\%$ 。

表 1 实验用粉末原料的物理特征

Table 1 Physical characteristics of powder materials used in experiment

Material	Purity/%	Particle size/ μm		
		D_{10}	D_{50}	D_{90}
Al powder	99.0	50.475	117.078	233.587
TiH ₂ powder	99.6	8.518	32.544	66.841
Mg powder	98.0	56.920	129.325	248.050

1.2 检测方法

利用分辨率为 300dpi 的扫描仪对发泡后未切割样品进行外观形貌扫描。利用线切割机将泡沫体沿高度方向切开,将切开后的泡孔横截面用黑色光亮漆进行喷漆处理以增加布拉德边界和泡壁同泡孔底部之间的对比度,将喷漆后晾干的样品用砂纸打磨并抛光,样品干燥后对泡孔表面形貌进行扫描。将添加适量 Mg 粉的前驱体在一定温度下加热,采用 XRD 物相分析来鉴定是否有新的物相生成。利用光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)分析布拉德边界和泡壁上的物质分布情况并对 SEM 中的物相采用 EDS 元素分析,用来确定其物相组成。

1.3 实验方法

将工业纯 Al 粉、不同添加量的 Mg 粉和 0.6%(质量分数)的氢化钛在 KQM-X4B/B 型行星式四头快速球磨机上混料 2 h。混合物在 YES-2000 型数显式压力试验机上通过单轴向冷压压制直径为 50 mm,高度为 20 mm 的可发泡前驱体材料。采用的压制压力为 400 MPa,保压时间为 10 min。将压制后的前驱体放入预先加热到 1 073 K 的电阻炉内进行发泡实验。发泡时间控制在 100~160 s。对于没有添加 Mg 粉的前驱体,发泡时间为 140~150 s;添加了 Mg 粉的前驱体发泡时间控制在 100~110 s,实验工艺流程示意图如图 1 所示。

2 结果与讨论

2.1 Mg 粉添加量对膨胀率的影响

本实验中采用的 Mg 粉添加量为 0、0.2%、0.6%、1.0%、1.4%和 1.8%。为了更加准确地描述泡沫铝膨胀行为,采用膨胀率计算公式:

$$R_E = \frac{h_F}{h_P} \quad (1)$$

式中: R_E 为膨胀率; h_p 为泡沫体发泡前高度; h_F 为泡沫体发泡后高度。

图 2 所示为含有不同 Mg 含量泡沫铝发泡后的外观照片。在实验过程中, 有 Mg 粉的前驱体的发泡时间为 105 s, 没有 Mg 粉的发泡时间为 145 s(这是由于在 105 s 的情况下, 发泡时没有 Mg 粉的前驱体的上表面氧化严重而导致不能出现明显的膨胀, 见图 2(a)顶部所示)。从图 2 可以看出, 随着 Mg 粉含量的增加, 膨胀率也明显增大。当 Mg 添加量达到 0.6% 时, 膨胀率最大; 当达到 1.0% 时, 出现了小幅度的减小, 随后又出现了小幅度增大。当 Mg 粉添加量为 0.6% 时, 利用式(1)可计算出其最大膨胀率大约为 472%。因此, 从膨胀行为上看, Mg 粉添加量在 0.2% 以上就可以了。

2.2 Mg 粉添加量对泡孔结构的影响

图 3 所示为不同 Mg 含量的泡沫铝的纵剖面照片, 可以发现随着 Mg 含量的增加, 泡孔结构发生了明显改变。在图 3(a)中可以发现泡孔结构极不均匀, 而且形成了底部实铝层。图 3(b)所示的泡孔结构有所改善, 但是底部实铝层还是比较明显。这说明了少量 Mg 的添加没有有效地阻止重力排液。然而, 从图 3(c)和(d)可以发现, 在 Mg 含量为 0.6%~1.0% 时泡沫铝的膨胀

行为增强, 泡孔结构相对均匀, 而且更为重要的是底部实铝层基本消失了, 这也是粉末冶金法能够制备近净成形泡沫铝部件的原因之一。过多添加 Mg 粉, 即当 Mg 含量大于 1.0% 之后, 气泡大量地合并, 这是因为过多 Mg 粉同铝熔体之间形成部分镁铝合金相, 降低了基体材料的熔点。因此, 在相同发泡温度下合金熔体的表观黏度就会降低, 在重力作用下加剧了金属液体沿着布拉德边界和泡壁形成的通道垂直向下流动, 使底部实铝层明显变厚; 添加过多 Mg 粉还会导致合金熔体的表面张力增加, 使布拉德边界对泡壁的吮吸作用增强, 加速了气泡壁变薄, 进而导致气泡破裂和合并, 出现如图 3(e)和(f)所示的气泡合并和实铝层的出现。

2.3 稳定性机理分析

由于前驱体上端面在发泡过程中完全处于空气中, 因此上端面是前驱体接触空气最多的也是氧浓度最高的地方, 所以发泡后泡沫体顶部形貌能够反应泡沫体的表面氧化程度。对于极易氧化的铝, 顶部氧化程度决定了泡沫体膨胀的高低。图 4 所示为 6 种不同 Mg 含量样品发泡后没有切割的顶部视图, 可以发现随着 Mg 含量的增加, 在相同时间下(除了没有添加

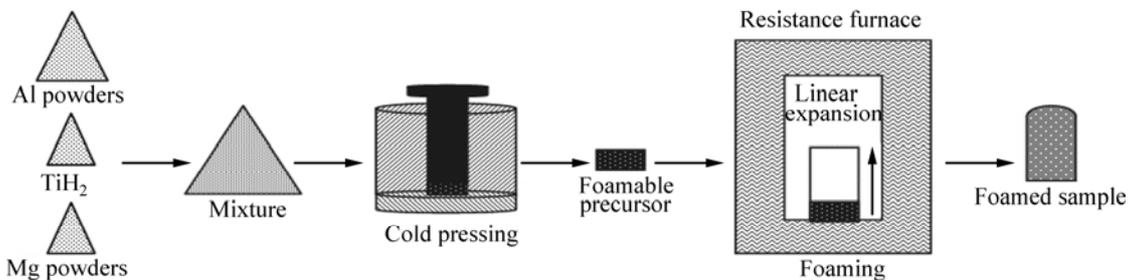


图 1 粉末冶金法制备泡沫铝流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of preparation of Al foams by powder metallurgy route

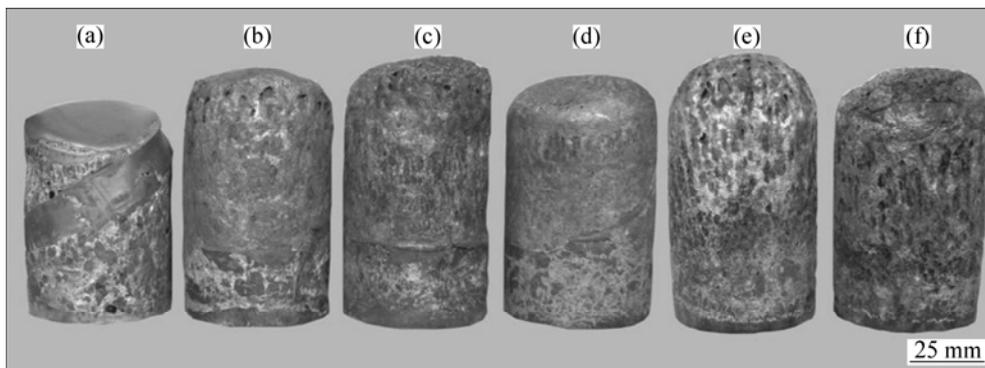


图 2 不同 Mg 含量的泡沫铝宏观照片(发泡温度为 1 073 K)

Fig.2 Macrographs of Al foams with different mass fractions of Mg at foaming temperature of 1 073 K: (a) Without Mg; (b) 0.2% Mg; (c) 0.6% Mg; (d) 1.0% Mg; (e) 1.4% Mg; (f) 1.8% Mg

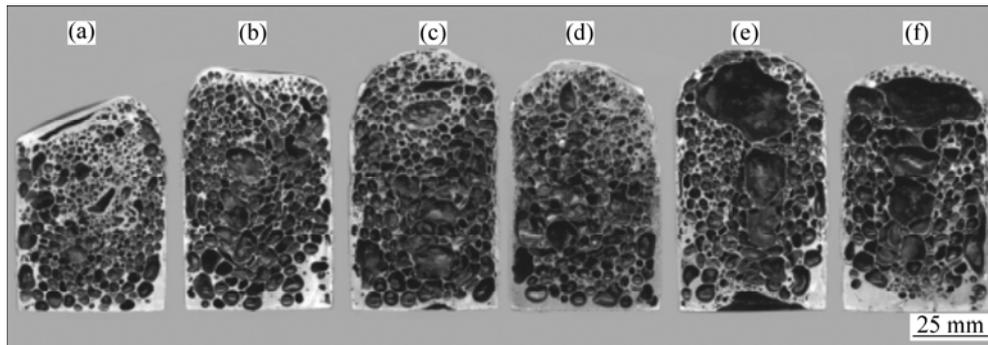


图3 不同 Mg 含量的泡沫铝的泡孔表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of cell walls of Al foams with different mass fractions of Mg: (a) Without Mg; (b) 0.2% Mg; (c) 0.6% Mg; (d) 1.0% Mg; (e) 1.4% Mg; (f) 1.8% Mg

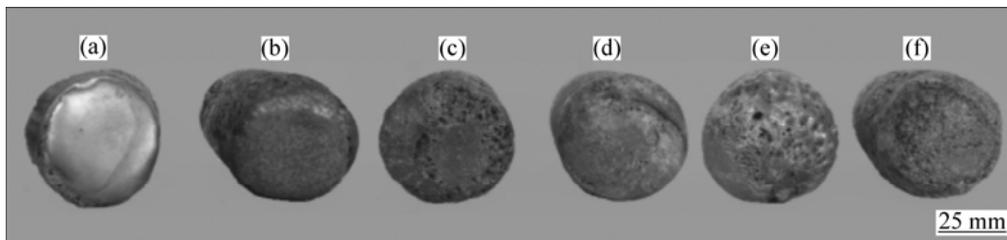


图4 不同 Mg 添加量的泡沫铝的顶部视图

Fig.4 Top views of Al foams with different mass fractions of Mg: (a) Without Mg; (b) 0.2% Mg; (c) 0.6% Mg; (d) 1.0% Mg; (e) 1.4% Mg; (f) 1.8% Mg

Mg 的团块发泡时间为 145 s 外)顶部氧化程度逐渐减小,但当 Mg 添加量超过了 0.6% 时会发现顶部形貌已经没有太大变化。图 4(a) 所示的样品顶部氧化比较严重,这是由于在没有 Mg 的情况下,Al 粉表面氧化铝不能跟铝液自身润湿,只能在熔融铝液中相互团聚形成大块氧化物或者被排斥到泡沫体的表面。因此,在 1073 K 的炉温条件下,没有添加 Mg 粉的前驱体上部由于处在空气中,排出的氧化物加上本来已经处在高温下的表面,使得氧化变得更加容易,再加上从铝熔体中排除出来的氧化铝,使得在泡沫体顶部形成了致密氧化层。在图 4(b) 所示的添加 0.2% Mg 粉的泡沫体上部已经没有出现图 4(a) 所示的光亮的氧化层,只出现含麻点的氧化层,说明添加 Mg 有效地减少了顶部泡沫体的氧化。

图 5 所示为没有添加 Mg 与添加了 1.0% Mg 的泡孔的 SEM 像。采用孔圆形成度来表征图 5 中的泡孔形貌,孔圆形成度定义为^[15]

$$c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i, c_i = \frac{l_i^2}{4\pi A_i} \quad (2)$$

式中: c 为孔圆形成度 c_i 的平均值; l_i 为泡孔边界长度;

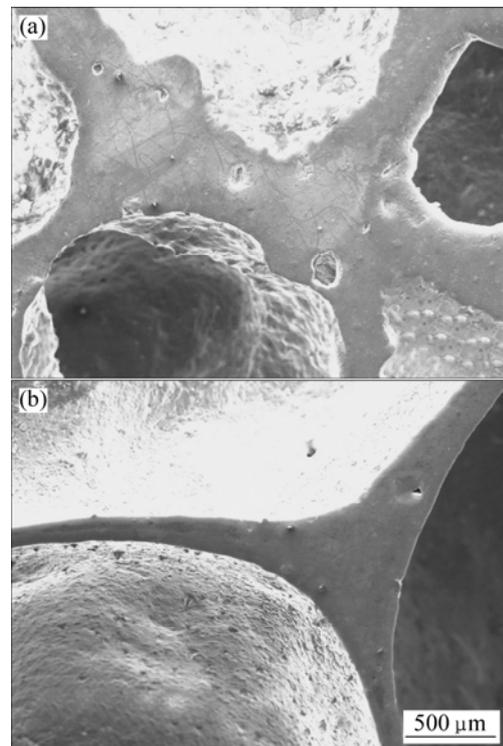


图5 不同 Mg 含量泡沫铝的泡孔的布拉德边界的 SEM 像
Fig.5 SEM images of Al foams with different mass fractions of Mg at Plateau borders: (a) Without Mg; (b) With 1.0% Mg

A_i 为泡孔面积; n 为泡孔的数目。 $c_i=1$ 的泡孔是圆孔。 c 越大, 则偏离圆形的程度越大。

目前, 文献所报道的稳定的液态金属泡孔结构为五角十二面体^[16], 因此, 圆孔或者其他孔型都是极不稳定的。从图 5(a)看出, 没有添加 Mg 粉的泡沫体气泡泡壁较厚, 泡孔较小, 布拉德边界几乎连成一片, 出现多处分叉结构, 泡壁厚度同布拉德边界厚度几乎相当, 泡壁边缘呈不规则形状, 由公式(2)可知圆形度 c 接近 1。而图 5(b)所示的属于典型的金属泡沫布拉德边界, 主要形成的是具有最低能量的近似正五边形泡孔^[16]。

由原位反应颗粒稳定机理可以知道, 通过添加高反应元素同基体材料中的物质反应所形成的细小氧化物颗粒同熔体之间的润湿性好坏是相当重要的。润湿性差的颗粒由于熔体的排斥作用将会以机械力的结合方式附着在泡孔内表面或者排斥到熔体表面, 起不到稳定泡沫的作用, 只有完全润湿性的颗粒才能够延缓气泡壁变薄, 减小重力排液和毛细作用的负面影响而稳定泡沫。图 6(a)所示为没有添加 Mg 的布拉德边界上的氧化物分布情况。在没有添加镁的情况下, 前驱体中只有空气雾化 Al 粉表面所形成的致密氧化铝层。在发泡期间, 这些氧化物同熔融铝液之间差的润湿性导致了大量的氧化铝之间的相互团聚并结块, 进而造成氧化物富集区和无氧区。无氧区的存在使得泡沫极不稳定。对于只有氧化铝存在的前驱体发泡后, 氧化物有的在冷却凝固过程中被保留在泡沫体中, 有的由于铝熔体的强烈排斥作用而达到泡沫体的表面。这种排斥作用最为明显的表现就是前驱体上端面跟空气充分接触的部分发泡后形成了致密的氧化物层(见图 4(a))。图 6(b)所示为添加 1.0%Mg 粉的布拉德边界上的氧化物分布情况, 可以看出 Mg 的添加导致原来团聚结块的氧化物均匀分散。由前面实验可以知道, 添加 1.0%Mg 粉后, 液态泡沫的稳定性得到有效提高, 而且膨胀率也明显增加, 同时减轻了泡沫体顶部氧化程度。

表面有一定程度氧化的 Mg 粉添加到具有一定氧化含量的 Al 粉中, 可能会出现如下反应:

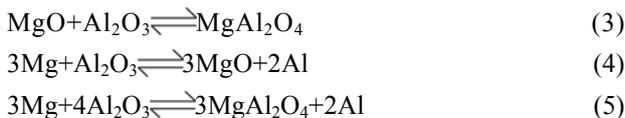


图 7 所示为上述 3 个反应方程式的吉布斯自由能变化趋势图。从图 7 中可以看出, 3 个反应的生成物与反应物的吉布斯自由能的差值在 1 000 K 以下都是负值。本实验采用的发泡温度为 1 073 K, 前驱体自身

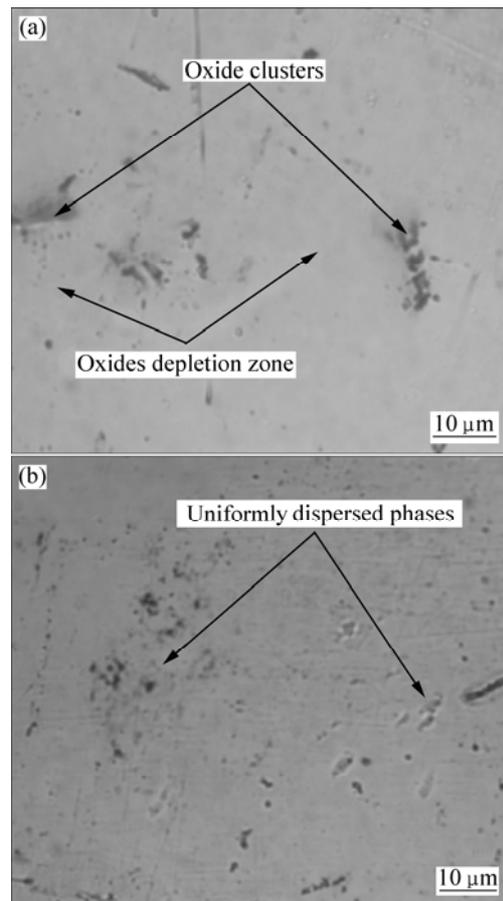


图 6 不同 Mg 含量的泡沫铝的布拉德边界光学照片
Fig.6 Optical photographs of Al foams at Plateau borders: (a) Without Mg ; (b) With 1.0%Mg

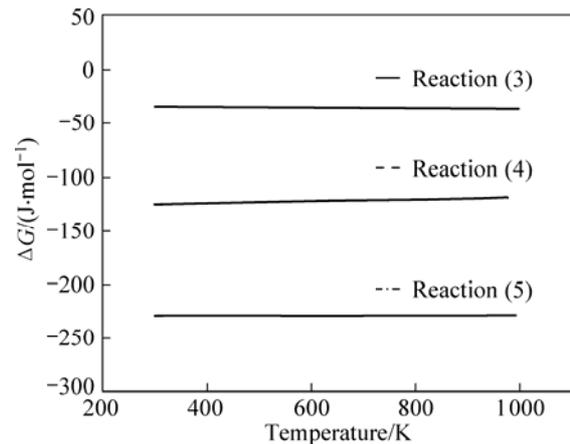


图 7 反应(3)、(4)和(5)的吉布斯自由能变化
Fig.7 Changes of Gibbs free energies for reaction equations (3), (4) and (5)

的温度一般在 973 K 左右, 因此说明这 3 个反应在热力学上都是可行的。在 1 073 K 的发泡温度下, 当表面氧化的 Mg 粉添加到空气雾化的 Al 粉中, Mg 粉表

面的 MgO 首先跟 Al_2O_3 反应生成镁铝尖晶石, 当反应进行到有单质 Mg 出现时, 反应(4)开始, 生成 MgO , 生成的 MgO 反过来又同 Al 粉表面的 Al_2O_3 反应形成镁铝尖晶石。所以可以认为反应式(3)和(4)是(5)的中间反应过程。从能量最低原理角度, 吉布斯自由能的差值越小说明反应的可能性越大, 从图 7 还可以发现反应式(5)的曲线在最下方, 说明了其生成物和反应物的 ΔG 最小, 式(5)是形成 $MgAl_2O_4$ 的主要反应。

为了进一步证明镁铝尖晶石的存在, 对添加了 1.0% Mg 粉的前驱体(没有添加发泡剂的前驱体)在 793 K 空气中烧结 1 h, 然后进行 XRD 分析, 如图 8 所示。从图 8 可以看出, 除了基体 Al 以外, 主要物质是 $MgAl_2O_4$ 尖晶石相, 说明主反应式(5)发生的必然性。

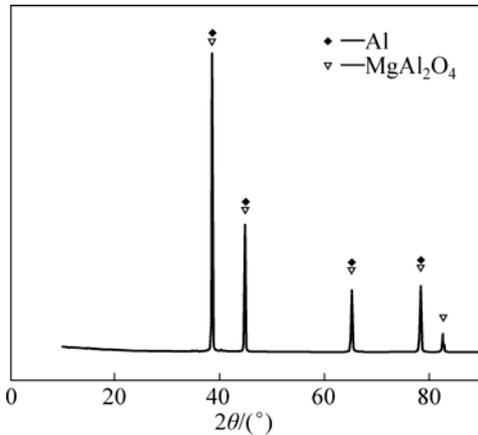


图 8 添加 1.0% Mg 粉的前驱体在 793 K 烧结 1 h 后的 XRD 谱

Fig.8 XRD pattern of precursor with 1.0% Mg annealed at 793 K for 1 h

添加 1.0% Mg 粉的前驱体发泡后泡壁上的 SEM 像如图 9(a)所示。图 9(a)中点状和块状物质的 EDS 谱如图 9(b)所示。从图 9 可以得出, 这些灰色均匀分散的点状或者块状物质为镁铝尖晶石; 镁铝尖晶石能被铝熔体完全润湿, 而且广泛地分布于布拉德边界和泡壁上。图 9(a)中少量的白色物质为氮化铝, 这主要是由于在空气中发泡, 氮气进入铝熔体后, 同铝反应形成氮铝化合物, 这些物质的存在对于稳定也起到了一定的辅助作用。

添加的 Mg 粉同铝粉表面的氧化物反应生成镁铝尖晶石, 镁铝尖晶石的出现破坏了铝粉表面的氧化物结构和氧化铝颗粒自身之间的结块, 形成广泛分布于布拉德边界和泡壁上的均匀分散的细小氧化物颗粒; 尖晶石相的生成还提高了其自身同铝熔体之间的润湿

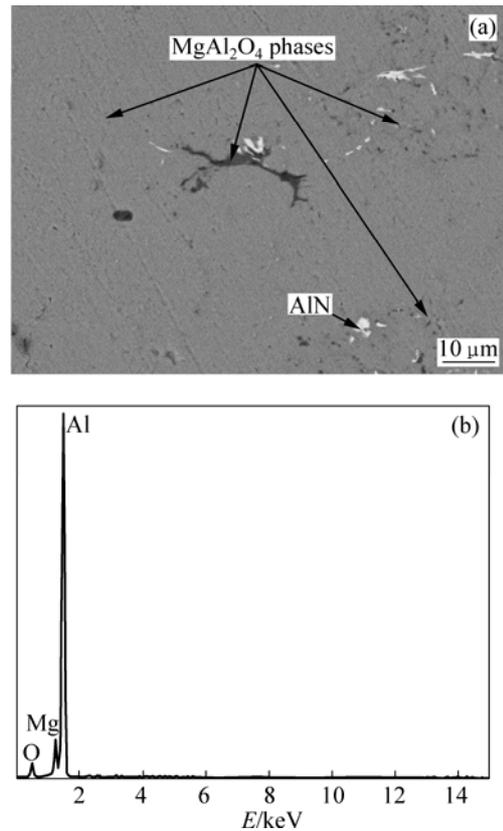


图 9 添加 1.0% Mg 的泡沫体泡壁 SEM 像及 EDS 谱

Fig.9 SEM image (a) of cell walls in Al foam with 1.0% Mg and EDS spectrum (b) of $MgAl_2O_4$ phases

性, 这样在一定程度上增加了熔体的表观黏度, 使得熔体流动性变差, 重力排液、毛细作用和气泡流动所带来的不利影响会在一定程度上得到抑制, 从而延长了泡沫寿命, 提高了液态铝泡沫的稳定性。

3 结论

1) 没有添加 Mg 粉的前驱体发泡后样品顶部氧化严重并且形成了致密的氧化层, 使得前驱体在高度方向上的自由膨胀受到阻碍, 相应地延长了发泡时间。随着 Mg 粉添加量的增加, 发泡后样品表面氧化程度逐渐减轻, 膨胀率明显增大。

2) 添加的 Mg 粉与 Al 粉表面的 Al_2O_3 反应, 生成与铝熔体有良好润湿性的 $MgAl_2O_4$ 相。 $MgAl_2O_4$ 相均匀分散到泡沫体的布拉德边界和泡壁上, 部分或完全地消除了无氧区。润湿性的 $MgAl_2O_4$ 相增加了熔体的表观黏度, 减少了重力排液、毛细作用和气泡流动, 延缓了气泡壁变薄, 稳定了液态泡沫。

3) 在 Al 粉含氧量为 $(0.34 \pm 0.01)\%$ 的条件下, Mg

粉添加量在(0.6%~1.0%)的条件下,能够有效减弱重力排液和毛细作用并可以获得最佳的膨胀率和均匀的泡孔结构。

REFERENCES

- [1] BANHART J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams[J]. *Prog Mater Sci*, 2001, 46: 559–632.
- [2] LEHMHUS D, BANHART J. Properties of heat-treated aluminium foams[J]. *Mater Sci Eng A*, 2003, 349: 98–110.
- [3] DUARTE I, BANHART J. A study of aluminium foam formation-kinetics and microstructure[J]. *Acta Mater*, 2000, 48: 2349–2362.
- [4] BANHART J. Metal foam: Production and stability[J]. *Adv Eng Mater*, 2006, 8(9): 781–794.
- [5] KENNEDY A R, ASAVAVISITHCHAI S. Effect of ceramic particle additions on foam expansion and stability in compacted Al-TiH₂ powder precursors[J]. *Adv Eng Mater*, 2004, 6(6): 400–402.
- [6] 李兵, 曹卓坤, 王永, 姚广春, 华中胜. 泡沫铝制备过程中无泡层的形成与控制[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(7): 1268–1273.
LI Bing, CAO Zhuo-kun, WANG Yong, YAO Guang-chun, HUA Zhong-sheng. Formation and control of bubble-free layer during preparation of Al foam by foaming in melt[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(7): 1268–1273.
- [7] SCHWINGEL D, SEELIGER H W, VECCHIONACCI C, ALWES D, DITTRICH J. Aluminium foam sandwich structures for space applications[J]. *Acta Astronaut*, 2007, 61: 326–330.
- [8] FUGANTI A, LORENZI L, HANSEN A G, LANGSETH M. Aluminium foam for automotive applications[J]. *Adv Eng Mater*, 2002, 2(4): 200–204.
- [9] DUDKA A, GARCIA-MORENO F, WANDERKA N, BANHART J. Structure and distribution of oxides in aluminium foam[J]. *Acta Mater*, 2008, 56: 3990–4001.
- [10] KAPTAY G. Interfacial criteria for stabilization of liquid foams by solid particles[J]. *Colloids Surf A*, 2002, 230: 67–80.
- [11] SUN Y Q, GAO T. The optimum wetting angle for the stabilization of liquid-metal foams by ceramic particles: Experimental simulations[J]. *Metall Trans A*, 2002, 33: 3285–3292.
- [12] KÖRNER C, ARNOLD M, SINGER R F. Metal foam stabilization by oxide network particles[J]. *Mater Sci Eng A*, 2005, 396: 28–40.
- [13] LANDRY K, KALOGEROPOULOU S, EUSTATHOPOULOS N. Wettability of carbon by aluminum and aluminum alloys[J]. *Mater Sci Eng A*, 1998, 254: 99–111.
- [14] LUMLEY R N, SERCOMBE T B, SCHAFFER G B. Surface oxide and the role of magnesium during the sintering of aluminum[J]. *Metall Trans A*, 1999, 30: 457–463.
- [15] BONACCORSI L, PROVERBIO E. Powder compaction effect on foaming behavior of uni-axial pressed PM precursors[J]. *Adv Eng Mater*, 2006, 8(9): 864–869.
- [16] GERGELY V, CLYNE T W. Drainage in standing liquid metal foams: Modeling and experimental observations[J]. *Acta Mater*, 2004, 52: 3047–3058.

(编辑 杨华)