

熔体发泡法制备泡沫铝增黏过程优化及机理研究

赵凯芳¹, 王嘉峰¹, 王录才¹, 游晓红¹, 黄闻战¹, 米渊聪²

(1. 太原科技大学材料科学与工程学院, 山西太原 030024; 2. 山西顺源耐磨科技有限公司, 山西吕梁 030599)

摘要: 为进一步优化和精确控制泡沫铝的孔结构, 本文对熔体发泡过程的增黏阶段设计了正交试验, 通过对所得样品孔隙率和孔结构分析, 确定Ca添加量为2wt%, 增黏搅拌速度在700 r/min, 增黏温度为700 ℃, 增黏搅拌时间4 min为最佳增黏工艺参数, 四因素中Ca添加量对孔隙率影响最大。样品8的孔半径及孔圆形成度最佳, 试样8密度为0.45 g/cm³, 孔隙率为83.2%, 孔圆形成度集中在0.8~0.9之间, 占总体比例51.5%, 孔的等效半径集中在0.5~1 mm之间, 占总体的比例54.7%。增黏搅拌温度提高孔径变大, 增黏搅拌速度增加气孔圆形成度更好。对其机理进行研究分析表明: Ca与Al反应生成金属间化合物Al₄Ca对熔体增黏起主要作用; 生成相会阻碍气孔生长, 影响生长方向, 使气孔长成纺锤形。

关键词: 泡沫铝; 熔体发泡法; 增黏剂; 泡孔结构; 微观分析

作者简介:

赵凯芳(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向为先
进凝固加工技术及新材料。
E-mail: 15703413417@163.
com

通信作者:

王录才, 男, 教授, 博
士。E-mail: 283766362@
qq.com

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)
06-0767-09

基金项目:

吕梁市引进高层次科技人才
专业科技创新平台建设项目
(2023RC02)。

收稿日期:

2025-03-31 收到初稿,

2025-04-29 收到修订稿。

泡沫铝作为结构-功能一体化的泡沫金属材料, 其应用范围广泛, 涵盖了汽车、建筑、航空航天等多个领域^[1-5], 具有质轻、比强度大、吸音降噪、绿色环保和吸能缓冲等优点^[6-10]。美国人Soknik第一次在熔融铝液中加入汞制备出泡沫铝合金后, 随着材料科学的进步和市场需求的增加, 国内外开展了相关研究^[11-17], 并逐渐从实验室研究延伸到工业化实践, 进行产业化产出及应用。马浩源等人^[18]综述了不同种类增黏剂对气泡稳定的影响, 并对增黏剂在熔体中的增黏机理作了一定总结。WANG T等人^[19]用等量Ca含量的AlCa75代替纯Ca, 提高了AlSi12泡沫的稳定性。SINGH R等人^[20]通过添加Ca和B₄C两种不同的增黏剂制备了两种泡沫铝, B₄C添加的泡沫铝压缩性能更好。关于熔体发泡法制备泡沫铝已有很多研究, 但更多是集中在制备过程的工艺参数以及泡沫铝的结构性能上, 增黏环节作为影响熔体黏度的重要环节, 研究的深度和广度还远远不够。产业化制备泡沫铝通常采用熔体发泡法, 目前产业化生产仍然存在一些影响产品使用的问题, 如孔结构不均匀、底部实体层、大孔和坍塌等问题都会影响泡沫铝的性能。为了获得高质量高性能的泡沫铝, 本文采用熔体发泡法制备泡沫铝, 选取该制备方法过程中重要的增黏环节进行研究。采用正交试验方法, 以工艺参数为变量, 确定增黏阶段的最佳工艺参数, 对工艺进行优化; 对增黏机理及增黏对气孔生长的影响进行深入地分析讨论。

1 试验方法

1.1 试验过程

本研究采用熔体发泡法制备泡沫铝, 其工艺流程如图1所示。以纯铝(纯度≥99.6%)为基体, 增黏剂选用1~2 mm粒径大小的钙粒(纯度≥97%), 发泡剂选用经预处理的TiH₂(300目)。TiH₂在使用前需进行预处理, 通过高温烘焙处理来延缓TiH₂分解, 先在350 ℃处理2 h, 升温到400 ℃处理14 h, 再在450 ℃处理2 h。将称量好的铝锭放入电阻炉坩埚中加热熔化, 向熔化后的铝液中添加金属钙粒并施加机械搅拌进行增黏, 之后加入预处理后的TiH₂并施加机械搅拌使其充分分散, 搅拌结束后

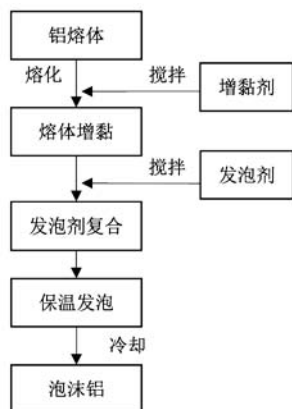


图1 工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram

在发泡炉中保温发泡，随后采用雾化冷却方法使其快速冷却，获得泡沫铝产品。

1.2 表征方法

1.2.1 密度

泡沫铝密度由泡沫铝质量和体积的比值计算得到，泡沫铝质量直接称量获得，泡沫铝体积根据阿基米德排水法获得，排水体积即为泡沫铝体积，式（1）为泡沫铝密度计算公式。

$$\rho = \frac{m_0}{V_0} \quad (1)$$

式中： ρ 为泡沫铝密度， g/cm^3 ； m_0 为泡沫铝质量， g ； V_0 为泡沫铝表观体积， cm^3 。

1.2.2 孔隙率

泡沫铝孔隙率是内部孔隙体积与泡沫铝自然状态下体积的比值，可通过阿基米德排水法得到，式（2）为其计算公式。

$$P = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中： P 为泡沫铝孔隙率，%； V 为铝基体密实体积， cm^3 ； V_0 为泡沫铝表观体积， cm^3 。这样计算的孔隙率也称为平均孔隙率、体孔隙率。通过截面图像扫描处理的则称为面孔隙率。

1.2.3 等效半径

二值化处理后的图片通过ImageJ软件可以直接得出孔隙的面积，将其视作圆形则可通过圆的面积公式推出等效半径的计算公式，即式（3）。

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (3)$$

式中： r 为单个孔洞的等效半径， mm ； S 为软件得出的单个孔隙面积， mm^2 。

1.2.4 圆形度

孔圆形度是衡量形状接近圆形程度的一个指标，完美圆形的圆度值为1，因为对于圆形来说，面积和周长的比值会达到最大，其计算公式为式（4）。

$$\text{Circ} = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (4)$$

式中： S 为单个孔隙面积， mm^2 ； L 为软件得出的单个孔隙周长， mm 。

1.2.5 微观表征

使用DK7735型电火花线切割机床切割泡沫铝样品，截面依次用从小到大目数的砂纸打磨并抛光。微观组织表征主要观察泡沫铝微观形貌及成分，本文使用扫描电镜进行观察分析。

2 试验方案

为了研究增黏阶段工艺参数对制备泡沫铝产品的影响，本文选取增黏阶段的四个因素作为变量，每个变量设置三个水平。发泡剂复合及保温发泡阶段的参数固定： TiH_2 含量1.5%、 TiH_2 复合温度 670°C 、复合搅拌转速 $800 \text{ r}/\text{min}$ 、复合搅拌时间 180 s 、发泡保温温度 690°C 、发泡保温时间 5 min ^[13]。正交试验因素如表1所示。正交试验方案如表2所示。

表1 正交试验因素
Tab. 1 Orthogonal test factors

水平	Ca添加量/%	增黏搅拌速度/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	增黏搅拌温度/ $^\circ\text{C}$	增黏搅拌时间/min
水平1	1.5	600	700	4
水平2	2	700	710	5
水平3	2.5	800	720	6

表2 正交试验设计
Tab. 2 Orthogonal experimental design

序号	Ca添加量/%	增黏搅拌速度/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	增黏搅拌温度/ $^\circ\text{C}$	增黏搅拌时间/min
1	1.5	700	710	5
2	2	600	710	6
3	2.5	800	710	4
4	1.5	800	720	6
5	2	700	720	4
6	2.5	600	720	5
7	1.5	600	700	4
8	2	800	700	5
9	2.5	700	700	6

3 试验结果与分析

以试样的孔隙率为评价指标，正交试验结果及极差计算值如表3，图2为孔隙率（密度）随各影响因素

的变化趋势图，所获试样的纵截面如图3所示，对试样孔结构进行了分析分别见图4和图5。

表3 泡沫铝正交试验结果分析表
Tab. 3 Analysis of orthogonal test results of the aluminum foam

样品编号	Ca添加量/%	增黏搅拌速度/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	增黏搅拌温度/ $^{\circ}\text{C}$	增黏搅拌时间/min	孔隙率/%	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
1	1.5	700	710	5	72.7	0.74
2	2	600	710	6	77.5	0.61
3	2.5	800	710	4	66.8	0.9
4	1.5	800	720	6	72.3	0.75
5	2	700	720	4	80.4	0.53
6	2.5	600	720	5	63.7	0.98
7	1.5	600	700	4	78.4	0.58
8	2	800	700	5	83.2	0.45
9	2.5	700	700	6	69.6	0.82
K_1	223.4	219.6	231.2	225.6		
K_2	241.1	222.7	217.0	219.6		
K_3	200.1	222.3	216.4	219.4		
k_1	74.5	73.2	77.1	75.2		
k_2	80.4	74.2	72.3	73.2		
k_3	66.7	74.1	72.1	73.1		
R	13.7	1.0	4.9	2.1		

注： K_i 为第*i*个水平的孔隙率之和； k_i 为第*i*个水平的平均孔隙率； R 为极差。

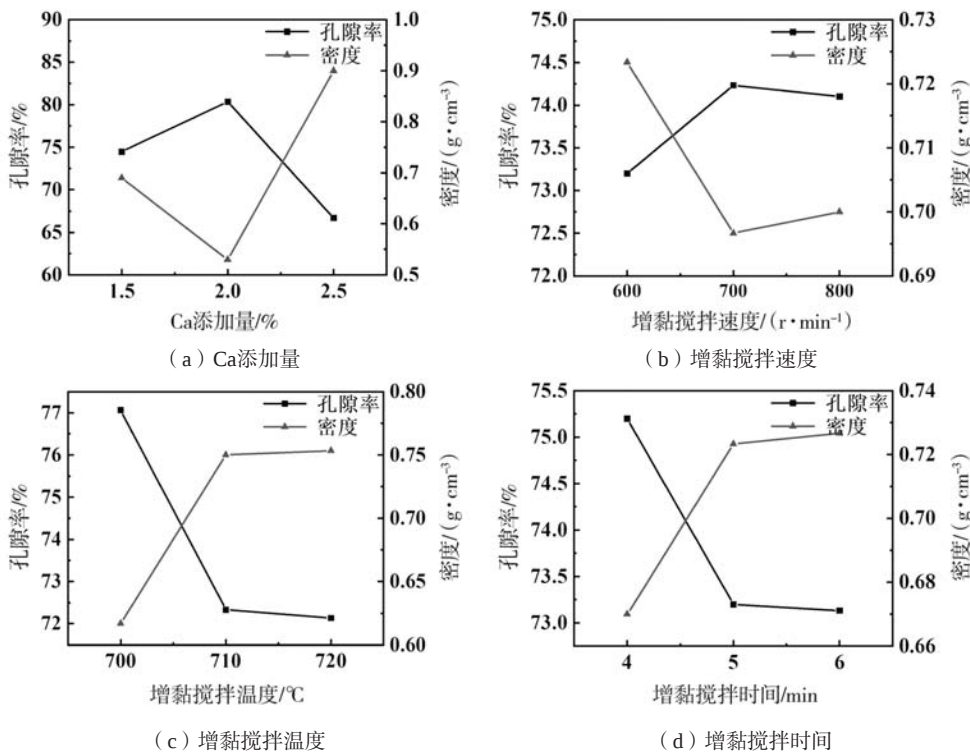


图2 孔隙率（密度）随各影响因素的变化趋势图

Fig. 2 Variation trend of porosity (density) with each influencing factor

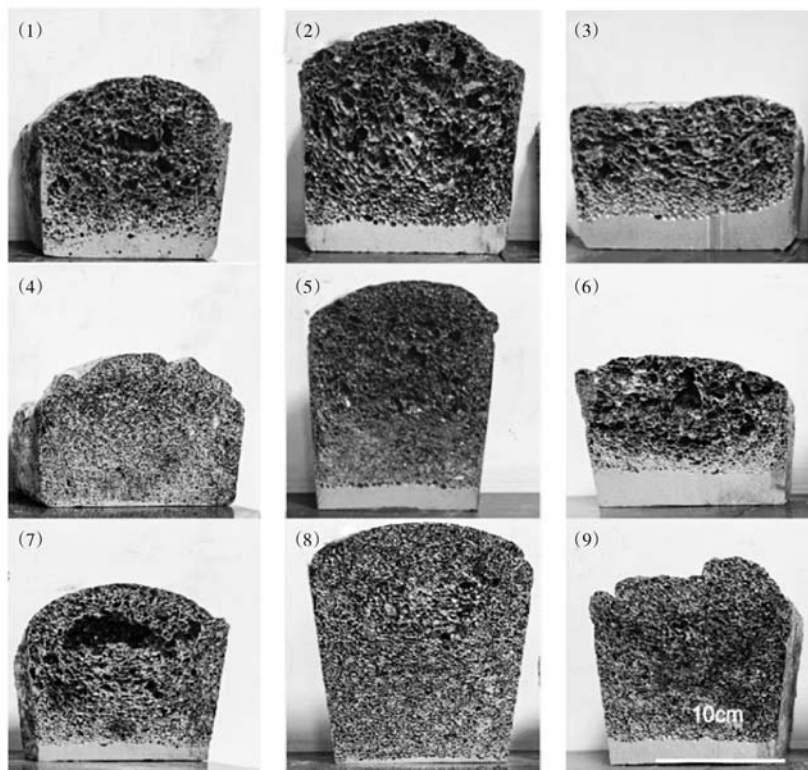


图3 正交试验样品截面图

Fig. 3 Cross-sectional view of the orthogonal test samples

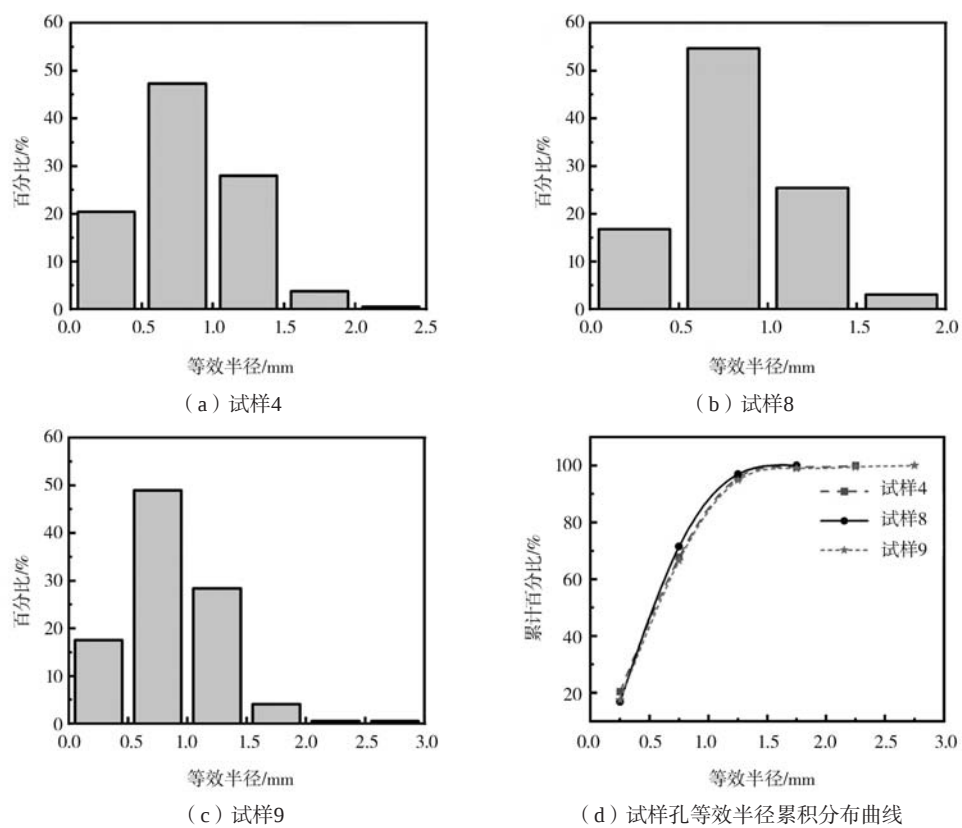


图4 试样孔等效半径分布图

Fig. 4 Distribution diagram of pore equivalent radius of the samples

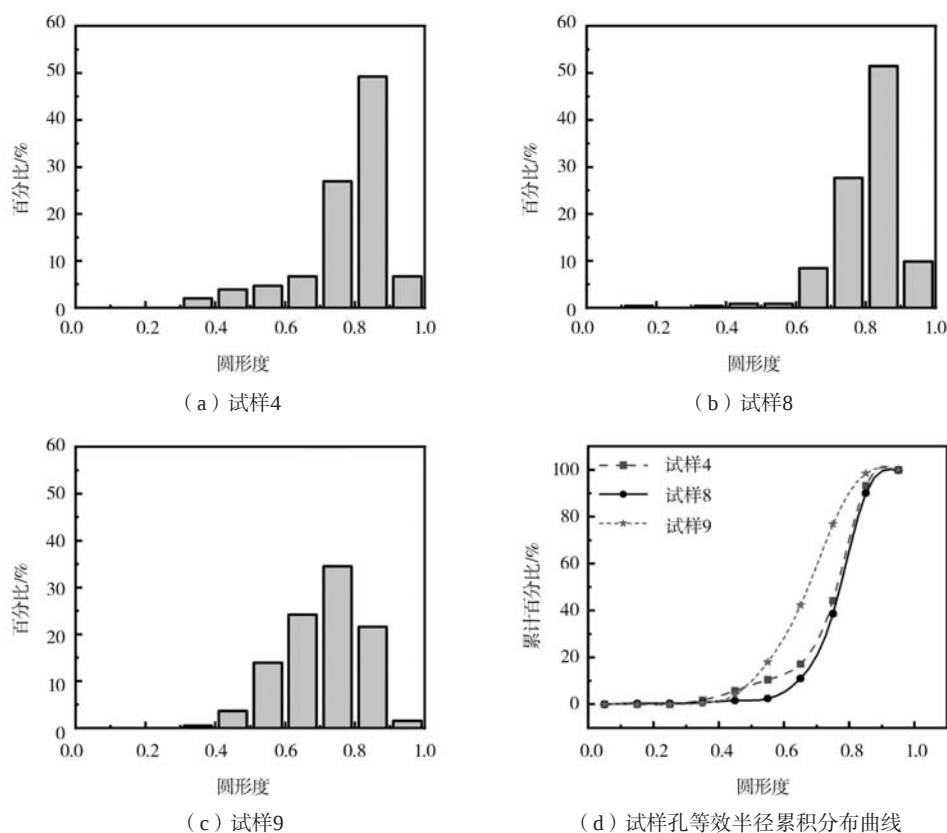


图5 试样孔圆形度分布图

Fig. 5 Distribution diagram of pore circularity of the samples

3.1 工艺因素影响分析

由表3可以看出, 各正交试样的孔隙率均在63%~84%。由表中极差计算值可知, 四个因素对泡沫铝孔隙率的影响程度最大的是Ca粒含量, 其次依次是增黏搅拌温度、增黏搅拌时间和增黏搅拌速度。极差值分别是13.7、4.9、2.1、1.0。

由图2可以观察到, 泡沫铝平均孔隙率随不同工艺参数变化的趋势, 随Ca添加量的增加先增后减, 在2wt%时最佳达到了80.4%; 随增黏搅拌速度的加快先增后减, 在700 r/min时最佳达到了74.2%; 随增黏剂添加温度的升高而减小, 700 °C时最佳达到了77.1%; 随增黏剂搅拌时间的延长而减小, 4 min时最佳达到了75.2%。

Ca添加量对孔隙率影响最大, 孔隙率指标的极差值为13.7。Ca添加量为1.5wt%、2wt%和2.5wt%时, 对应的试样平均孔隙率分别是74.5%、80.4%和66.7%, Ca添加量为2wt%时, 所制备的泡沫铝平均孔隙率最大, 由此可见, 过少或过量增黏剂添加都对孔隙率提高起到抑制作用。与Ca添加量为2wt%时试样的平均孔隙率相比较, Ca添加量为1.5wt%时降低5.9%, Ca添加量为2.5wt%时降低13.7%, 尽管添加量差值同样是0.5wt%, 过高的增黏剂含量对泡沫孔隙率提高的抑制影响更

大。添加2wt%Ca粒的试样与添加1.5wt%Ca粒和添加2.5wt%Ca粒的试样相比, 试样孔结构直观总体情况更佳。

增黏搅拌温度的影响次之, 孔隙率指标的极差值为4.9。增黏搅拌温度为700 °C的试样7、8、9孔结构最佳, 试样平均孔隙率为77%, 试样高度较高且底部实体层较薄。与增黏搅拌温度700 °C时试样的平均孔隙率相比较, 增黏搅拌温度分别升高10 °C和20 °C时, 孔隙率分别降低了4.7%和4.9%, 降低程度差别不大。

增黏搅拌时间影响更次之, 孔隙率指标的极差值为2.1。增黏搅拌时间为4 min的试样3、5、7的平均孔隙率为75.2%, 其中试样5的孔结构情况最好, 试样7孔隙率较高但有大孔存在, 试样3孔隙率较低。与增黏搅拌时间为4 min试样的孔隙率比较, 增黏搅拌时间分别延长1 min和2 min, 平均孔隙率分别降低了2%和2.1%, 降低程度差不多。

增黏搅拌速度的影响最小, 孔隙率指标的极差值为1.0。增黏搅拌速度为700 r/min和800 r/min的试样的整体发泡效果都很好, 孔隙率均达到74%。增黏搅拌速度为600 r/min的试样, 孔隙率低, 且实体层厚, 孔径差距大, 有大孔存在。

3.2 宏观结构分析

由图3试样截面宏观观察, 试样3和试样6不仅上部泡沫层出现了部分坍塌, 同时下部有厚的实体层, 实体层厚度是正交试样中所占比例最大的, 上部泡孔比下部大且多为扁条形状的泡孔。这两个试样的Ca粒添加量都是2.5%, 较高的增黏剂添加使得熔体黏度增加, 较大黏度使 TiH_2 不能充分分散, 在熔体中分布不均匀。在发泡剂复合阶段, TiH_2 少的熔体部位分解的气体少, 该部分密度大故而在底部形成了一定厚度的无泡层; 气孔成长阶段排液和重力现象使液体通过通道流向底部, 形成底部无泡层。试样7上部中心区域出现了明显的巨大孔洞, 该试样增黏剂含量低且搅拌速度小, 导致熔体的黏度较低, Ca粒不能充分分散, 气孔形成的核心数量减少且容易扩散合并生成大孔。

3.3 孔结构分析

由图3可以观察到, 正交试验试样中, 有些产生了大孔, 有些发生了坍塌现象, 孔结构差。相较而言, 试样4、8、9中没有明显大孔, 孔径小且分布较均匀, 因此选择这3个试样对孔结构作进一步分析。在三个试样相同部位截取相同大小的样品, 经扫描和二进制处理, 然后用Image-J软件计算得到孔结构参数。

图4(a)、(b)、(c)分别为试样4、8、9的孔等效半径分布图, 试样4、试样8和试样9孔的等效半径范围分别在0~2.5 mm、0~2 mm和0~3 mm, 孔等效半径分布集中在0.5~1 mm, 占总体的比例分别为47.3%、54.7%和49%, 虽然3个试样等效半径分布占比最高, 都在0.5~1 mm, 但是试样8所占比例最多, 可以明显看出, 试样8等效半径的分布范围窄且分布最集中。试样4孔等效半径的分布范围较宽, 试样9孔等效半径的分布范围最宽, 有少数泡孔的等效半径超出2 mm, 说明有少数大孔存在。图4(d)为试样孔等效半径的累积分布曲线, 试样4、8、9孔等效半径小于1 mm的孔数量分别占总体85.06%、88.05%和83.84%, 试样8小孔径气孔的占比最多。

图5(a)、(b)、(c)为试样4、8、9孔圆形成度分布图, 试样4、试样8孔圆形成度集中在0.8~0.9, 所占比例分别为49.2%和51.5%, 分布较为集中; 试样9孔圆形成度集中在0.7~0.8, 所占比例为34.5%, 分布分散且峰值低。图5(d)为试样孔圆形成度累积分布曲线, 试样4、8、9孔圆形成度在0.8~1.0的气孔数量占比分别为55.86%、61.39%和23.2%, 试样8圆形成度高的气孔数量所占比例是最多的。

试样8小孔径的气孔数量和圆形成度高的气孔数量占比最高, 具有最优的孔结构, 所对应的工艺参数为: Ca添加量2wt%、增黏搅拌温度700 °C、增黏搅拌速度800 r/min、增黏搅拌时间5 min。综合来看, 采用2wt%的Ca添加量是最合适的, 黏度不足时泡孔内气体容易通过液膜扩散合并扩大, 在凝固时维持理想泡孔形状的能力弱, 黏度过大时, 发泡剂容易聚集, 泡沫铝中会有少量大孔, 在搅拌作用下泡孔形状被破坏, 出现尖角、长条形泡孔等, 孔圆形成度大幅降低。

3.4 增黏物质分析

图6为泡沫铝SEM和EDS成分分析, 本试验采用的基体材料为纯铝, 在泡沫铝的EDS成分图中除主要元素Al外, 还存在O、Ca、Ti等元素, 其中O元素认为是空气进入熔体与金属发生氧化反应而来, Ca元素来自增黏过程中钙粒添加, Ti元素来自发泡剂复合阶段 TiH_2 的添加。由于Ti元素来自 TiH_2 , 所以认为增黏阶段黏度增加主要与O、Ca元素在铝熔体中的反应有关。

图7为铝钙二元相图^[21], 钙在铝中的溶解度极低, 本试验中钙的添加量在3%以下, 钙粒加入到熔体中后与铝反应生成了 Al_4Ca 金属间化合物^[22], Al_4Ca 熔点低, 以半熔化状态存在于熔体中, 在图8泡沫铝孔壁的金相图中可以观察到, α -Al周围骨骼网状的 Al_4Ca 相。金属间化合物 Al_4Ca 的晶格参数与铝的晶格参数更接近, 其晶格失配率更小, 相应的与铝的界面张力小, 润湿性好, 在铝熔体中能够更好的分散, 从而起到增加铝熔体黏度的作用。此外, 高温下金属Ca和Al与空气中的

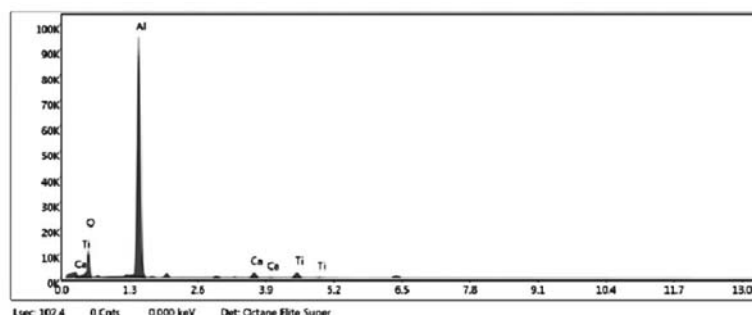
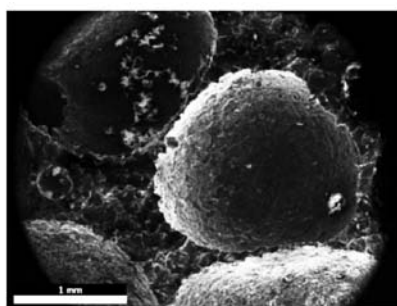


图6 泡沫铝试样EDS成分分析

Fig. 6 EDS composition analysis of the aluminum foam sample

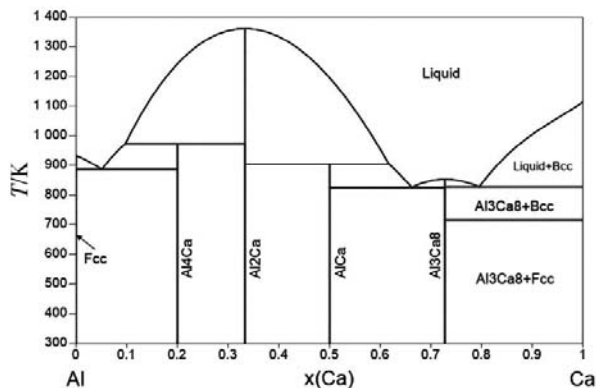


图7 Al-Ca二元相图

Fig. 7 Al-Ca binary phase diagram

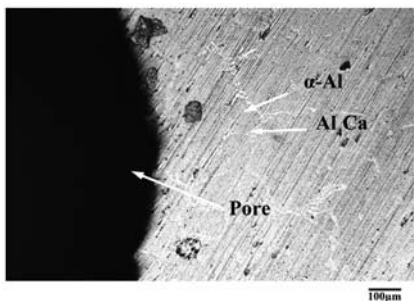


图8 泡沫铝金相图

Fig. 8 Metallographic image of the aluminum foam

氧气接触,生成氧化物及复合氧化物^[23],氧化物熔点高,润湿性差,通常作为异质形核点起到促进气孔形核作用,能够降低表面张力,提高泡孔稳定性,微小的氧化物颗粒在铝熔体中分散也起到了一定的增黏作用。

3.5 气孔生长及增黏的影响

泡沫铝气孔生长示意图如图9所示。首先是气孔的形成阶段,发泡剂 TiH_2 加入到铝熔体并通过搅拌快速均匀地分散在熔体中,发泡剂受热开始分解释放氢气,以 TiH_2 颗粒为核心形成了最开始的气泡核,相同体积下圆球的表面积最小,所以铝熔体中的气孔在表面张力的作用下趋向于形成球形以达到最稳定的状态。随着 TiH_2 持续分解释放剩余氢气,熔体中氢气的量不断增加,该阶段气孔内部扩张力持续增大,大于外部熔体收缩力,气孔逐渐长大,在这一阶段,相邻的气孔可能会接触合并长大。熔体中发泡剂并不是理想状态下的均匀分散和同时释放,实际情况中熔体中同一时刻气孔的尺寸往往不同。根据Laplace定律^[12],即式(5),气孔半径越小,内部压强越大,不同尺寸两气孔之间存在压强差,压强差的存在导致小气孔中的气体通过液膜向大气孔扩散,最终合并长大。当扩张力与收缩力相当形成力学平衡时,气孔停止扩张,此时

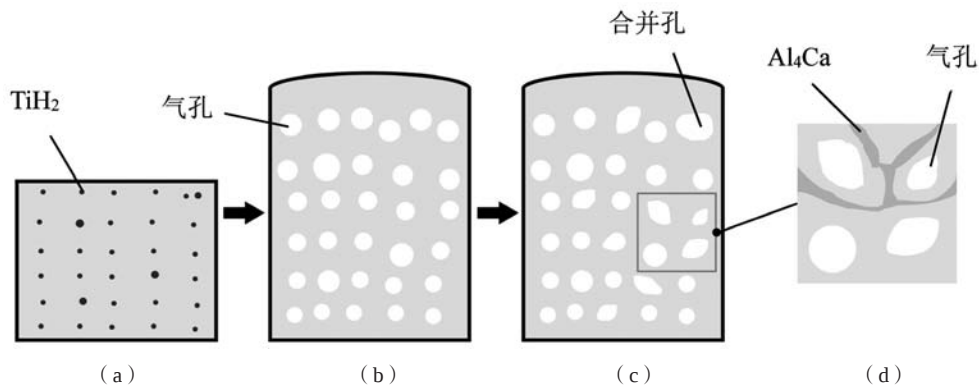


图9 气孔生长示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the pore growth

气孔稳定。

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{\Delta r} \quad (5)$$

式中: ΔP 为压力差, Pa; σ 为表面张力, mN/m; Δr 为曲率半径差, mm。

最终泡孔形貌受增黏物质的影响,气孔扩张受第二相聚集带来的相阻力影响,气孔形态更趋向于纺锤形形状,这与图10中泡沫铝孔壁的SEM图像和元素分布图中观察到的相符,Ca和O元素在左下和右上位置聚

集状态较高,弥散第二相物质在该区域聚集阻碍气孔扩张长大,在左上和右下处于低聚集状态,气孔在该方向扩张明显,是气孔扩张的主要方向,气孔从圆形逐渐演变为纺锤形。在增黏过程中新加入的钙和氧元素起到主要作用, Al_4Ca 分散在熔体中增加黏度,氧化物吸附在气孔界面处,改变局部曲率,减缓毛细管吸力并阻碍液体的析液,改善泡沫稳定性。除Ca和O外还有钛元素的存在,其含量相对较低,因此它对气孔生长的影响是辅助性的。

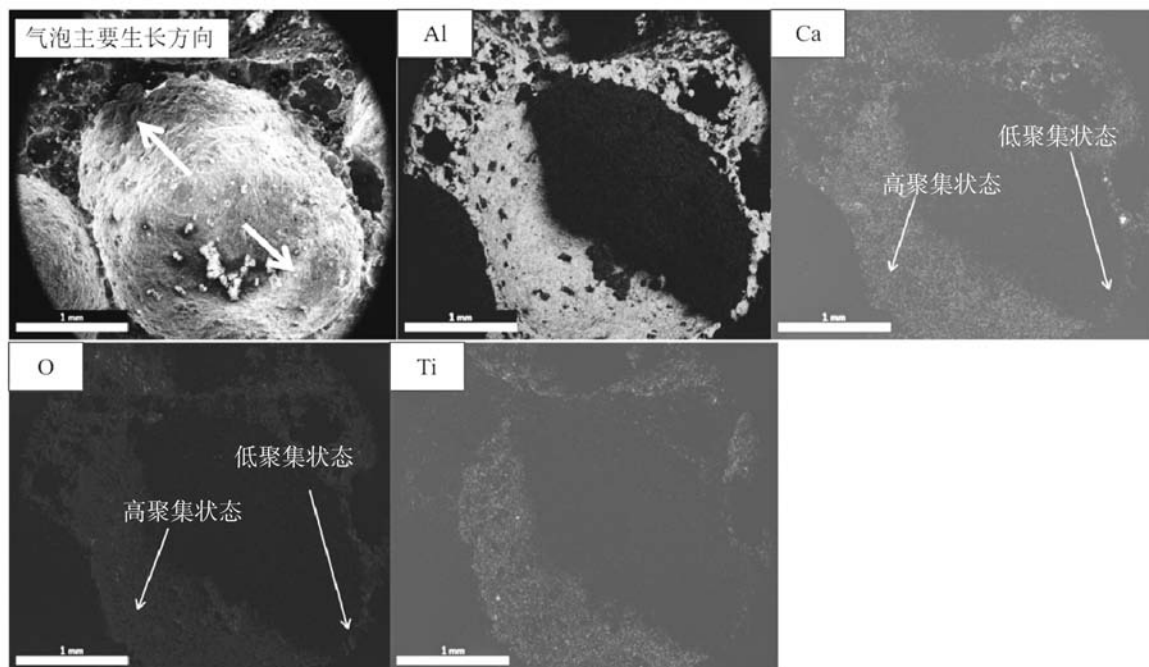


图10 泡沫铝SEM和元素面扫结果
Fig. 10 SEM and element mapping of the aluminum foam

4 结论

(1) 正交试验得出的增黏最佳工艺参数为: Ca添加量为2wt%, 增黏搅拌速度为700 r/min, 增黏搅拌温度为700 ℃, 增黏搅拌时间为4 min。增黏阶段各因素对泡沫平均孔隙率影响程度从大到小依次是Ca添加量、增黏搅拌温度、增黏搅拌时间和增黏搅拌速度。

(2) 试样8的孔隙率和孔结构最佳, 孔隙率达到83.2%, 小孔径气孔的数量最多且圆形度高。试样8等效半径分布在0.5~1 mm的孔数量最多, 累积小于1 mm

的孔数量占比88.05%。试样8圆形度集中在0.8~0.9, 圆形度在0.8~1.0的气孔数量占比61.39%。适宜Ca添加量提供合适黏度, 增黏搅拌温度提高, 孔径变大, 增黏搅拌速度增加, 气孔圆形度更好。

(3) 钙粒与铝熔体反应生成的金属间化合物 Al_4Ca 在熔体中弥散存在, 处于半熔化状态, 增加了铝熔体的黏度, 颗粒氧化物有助于稳定气孔, 生成的第二相有阻碍气孔扩张的作用。

参考文献:

- [1] 张国强. 泡沫铝在建筑行业的应用及其制备技术进展 [J]. 铸造技术, 2014, 35 (12): 2824-2826.
- [2] 邓剑锋. 泡沫铝在新能源汽车车架结构设计中的应用研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2020 (5): 137-143.
- [3] 吕文达, 唐鹏, 王东昀, 等. 泡沫铝基耗能装置在铁路桥墩防撞中的应用研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44 (5): 1041-1050, 1061.
- [4] 石建. 航空泡沫铝合金的制备与吸能性能研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2016.
- [5] BANHART J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metalfoams [J]. Progress in Materials Science, 2001, 46 (6): 559-632.
- [6] JÓZSEF K, ZOLTÁN N, PéTER P, et al. Investigation of the energy absorption of the aluminium foam [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2315 (1): 51-32.
- [7] 凤仪, 朱震刚, 陶宁, 等. 闭孔泡沫铝的导热性能 [J]. 金属学报, 2003, 39 (8): 817-820.
- [8] 张冰冰, 李耀宙, 李华波, 等. 复合泡沫填充管的高g值冲击防护特性 [J]. 包装工程, 2023, 44 (21): 54-61.
- [9] 盖晓玲, 陈祥, 徐颖, 等. 开孔泡沫铝无规则入射的吸声性能研究 [J]. 声学技术, 2024, 43 (2): 249-252.

- [10] YANG X, HU Q, DU J, et al. Compression fatigue properties of open-cell aluminum foams fabricated by space-holder method [J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 121, 272–280.
- [11] 魏莉, 罗洪杰, 姚广春, 等. 粉末冶金法制备泡沫铝材研究进展 [J]. *轻金属*, 2003 (11) : 59–62.
- [12] 张鹏飞. 无增黏熔体发泡法制备泡沫铝的稳定成形研究 [D]. 山东: 山东理工大学, 2021.
- [13] 周晓庆. 熔体发泡法制备泡沫铝及孔结构优化 [D]. 太原: 太原科技大学, 2023.
- [14] LEI H, YANXIANG L, XU Z, et al. Characterization of as-cast microstructure of aluminum foams by melt foaming method [J]. *Materials Letters*, 2022, 308 (PA) : 131112.
- [15] THULASIKANTH V, PADMANABHAN R. Fabrication of sustainable closed-cell aluminium foams using recycled fly ash and eggshell powder [J]. *Materials Today Communications*, 2023, 37, 107302.
- [16] 王嘉峰, 王录才, 黄闻战, 等. 基于熔体发泡法泡沫铝填充管力学性能研究 [J]. *铸造*, 2024, 73 (8) : 1123–1130.
- [17] 曹梦真, 邱田伟, 安钰坤. 泡沫铝有限元仿真模型研究现状 [J]. *中国材料进展*, 2024, 43 (4) : 323–330.
- [18] 马浩源, 张均闪, 安钰坤. 增黏剂在泡沫铝孔泡稳定成形机制研究现状 [J]. *功能材料*, 2022, 53 (6) : 6040–6048, 6066.
- [19] WANG T, ZUO X, ZHOU Y, et al. Stability mechanism of AlSi12 aluminum foam under the action of Al-Si-Ca second phase [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 11: 1991–2002.
- [20] SINGH R, ARORA R, SHARMA J D. Effect of viscosity enhancing agents on quasi-static compression behavior of aluminum foams [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 39 (4) : 1661–1666.
- [21] KUMARI S S S, PILLAI R M, PAI B C. Role of calcium in aluminium based alloys and composites [J]. *International Materials Reviews*, 2005, 50 (4) : 216–238.
- [22] 杨国俊, 姚广春. Ca增黏熔体发泡法制备闭孔泡沫铝的研究 [J]. *轻金属*, 2006 (9) : 48–50.
- [23] 李兵. 熔体直接发泡法制备纯铝基泡沫铝材料的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.

Research on Optimization and Mechanism of Viscosity Enhancement Process in Aluminum Foam Preparation by Melt Foaming Method

ZHAO Kai-fang¹, WANG Jia-feng¹, WANG Lu-cai¹, YOU Xiao-hong¹, HUANG Wen-zhan¹, MI Yuan-cong²

(1. School of Material Science and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. Shanxi Shunyuuan Wear-resistant Technology Co., Ltd., Lvliang 030599, Shanxi, China)

Abstract:

In order to further optimize and accurately control the pore structure of aluminum foam, orthogonal experiments were designed for the viscosity increasing stage during the melt foaming process. Through the analysis of the porosity and pore structure of the obtained samples, it was determined that the optimal viscosity increasing parameters were 2% Ca addition, 700 r/min viscosity increasing stirring speed, 700 °C viscosity increasing stirring temperature and 4 min viscosity increasing stirring time. Among the four factors, Ca addition had the greatest influence on porosity. The pore radius and roundness of the sample 8 were the best. The density of the sample 8 was 0.45 g/cm³, the porosity was 83.2%, the pore roundness was concentrated between 0.8 and 0.9, accounting for 51.5% of the total, and the equivalent radius of the pores was concentrated between 0.5 and 1mm, accounting for 54.7% of the total. When the viscosity enhancement stirring temperature was increased, the pore size became larger; when the viscosity enhancement stirring speed was increased, the roundness of the pores was better. The mechanism of the reaction between Ca and Al showed that the intermetallic compound Al₄Ca played an important role in increasing the viscosity of the melt. The formation phase obstructed the growth of bubbles, affected the growth direction, and made bubbles grow into spindle shapes.

Key words:

closed-cell aluminum foam; melt foaming method; viscous agent; pore structure; micro-analysis