

泡沫 Al 孔结构的影响因素 *

吴照金 何德坪

(东南大学)

摘 要 揭示了泡沫化过程中 Al 熔体泡沫孔隙率、导热系数的变化规律,研究了泡沫 Al 的孔隙率、孔径以及导热系数的变化规律及其对应关系.结果表明: Al 熔体泡沫的孔结构及导热系数随泡沫化时间而变化. Al 熔体泡沫的孔结构直接影响其凝固后的孔结构,而导热系数则间接影响孔结构.

关键词 泡沫 Al 熔体泡沫化 泡沫 Al 的液态孔隙率 导热系数

分类号 TG113, TB383

文章编号 1005-3093(2000)03-0277-06

INFLUENTIAL FACTOR ON THE CELL STRUCTURE OF ALUMINUM FOAM

WU Zhaojin** HE Deping

(*Department of Materials Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096*)

ABSTRACT The evolvement rule of the porosity and the thermal conductivity of molten aluminum foam in foaming process were revealed. In the meantime, the change of the porosity, pore diameter and the thermal conductivity of the solidified aluminum foam, and the relationship between these above were studied. The results indicated that the cell structure and the thermal conductivity of molten and solidified aluminum foam both change with the foaming time. The cell structure of the solidified aluminum foam is affected directly by the cell structure of molten aluminum foam and indirectly by the variation of thermal conductivity.

KEY WORDS foamed aluminum, melt foaming process, porosity of molten aluminum foam, thermal conductivity of foamed aluminum

泡沫 Al 使结构材料轻质并多功能化,有广泛的应用前景^[1,2]. Al 熔体泡沫化作为一种重要的制备方法已取得了重要进展^[3,4]. 泡沫 Al 的多功能性能具有强烈的孔结构敏感性,本文以类球形孔结构的泡沫 Al 为对象,研究其影响因素.

* 国家自然科学基金资助项目 19982001. 1999 年 8 月 24 日收到初稿; 2000 年 1 月 23 日收到修改稿.

本文联系人: 吴照金, 博士, 南京市 210096, 东南大学材料科学与工程系

** To whom correspondence should be addressed

1 实验方法

将一定量的工业纯 Al 熔化, 加热至一定温度后保温适当时间. 熔体经增粘处理、发泡搅拌, 按要求泡沫化一定时间后冷却凝固, 得到泡沫 Al 试样. 泡沫化装置的简图示于图 1. 文中用“ τ ”表示“熔体泡沫化时间”, 自发泡搅拌结束起计时; $\tau = \tau_s$ 时开始冷却凝固, τ_s 称为“开始冷却时间”.

用自制的装置测定 Al 熔体泡沫化过程中泡沫体顶面位置 H 随时间变化的动态关系. 在 τ_s 分别为 40、70、110、190 和 300s 时(冷却工艺相同), 将质量和制备工艺均相同的 5 组 Al 熔体泡沫冷却凝固, 在距离底面 10mm 处切割, 观察其横截面孔结构形貌.

Al 熔体泡沫化过程在横截面积沿高度方向不变的坩埚中进行. 将泡沫体顶面近似为平面, 则熔体泡沫的液态平均孔隙率 P_l 可用下式表示:

$$P_l = \frac{V - V_0}{V} = 1 - \frac{H_0}{H} \quad (1)$$

其中: V 为泡沫体的动态体积, V_0 为熔体初始体积, H_0 为熔体初始液面高度, H 为泡沫体顶面的动态高度. 由式 (1) 计算 Al 熔体泡沫化过程中液态平均孔隙率 P_l 的动态值. 泡沫 Al 的固态平均孔隙率 $P_s = \frac{V_s - V_{s0}}{V_s}$, 其中 V_s 为泡沫体体积, V_{s0} 为金属实体体积. 试样经线切割、表面处理, 用扫描仪采集截面图象信息, 经计算机统计分析, 获得截面上面孔径的平均值 d_s . 平均面孔径 $d_s = (\frac{\pi \cdot S_h}{4n})^{1/2}$, 其中 S_h 为截面上孔的总面积, n 为截面上孔的个数.

2 结果与讨论

2.1 Al 熔体泡沫的液态孔隙率和固态泡沫 Al 的孔隙率

将自不同的 τ_s 起冷却得到的泡沫 Al 试样, 沿与冷却面距离 $h=10\text{mm}$ 处切割, 其截面形貌及孔径 (d_s) 示于图 2.

Al 熔体泡沫化过程中, 泡沫体顶面位置 H 随时间变化的动态关系示于图 3. 将图 3 的实验数据代入式 (1), 得到 Al 熔体泡沫的平均孔隙率随泡沫化时间的变化曲线 $P_l \sim \tau$ (图 4).

根据图 4, 将 P_l 的变化过程分为 3 个阶段: 匀速增大阶段 (I)、减速增大阶段 (II) 和稳定阶段 (III). 这 3 个阶段对应于泡沫化过程中气泡长大的不同情况, 它们的划分由气泡壁所受的气

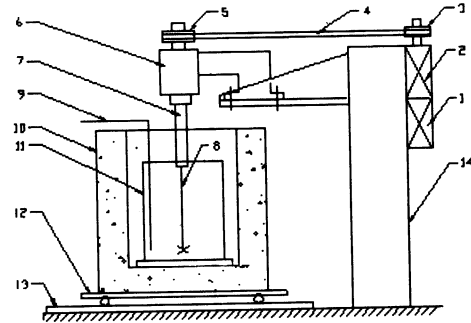


图 1 铝熔体泡沫化装置示意图

Fig.1 Schematical diagram of the device for molten aluminum foaming process (1. triphase asynchronous electromotor; 2. alternating electromagnetism governing electromotor; 3. strap wheel; 4. strap; 5. strap wheel; 6. stirring node; 7. main stirring axis; 8. stirring bar; 9. thermocouple; 10. resistance furnace; 11. crucible; 12. platform cart; 13. guideway; 14. main bracket)

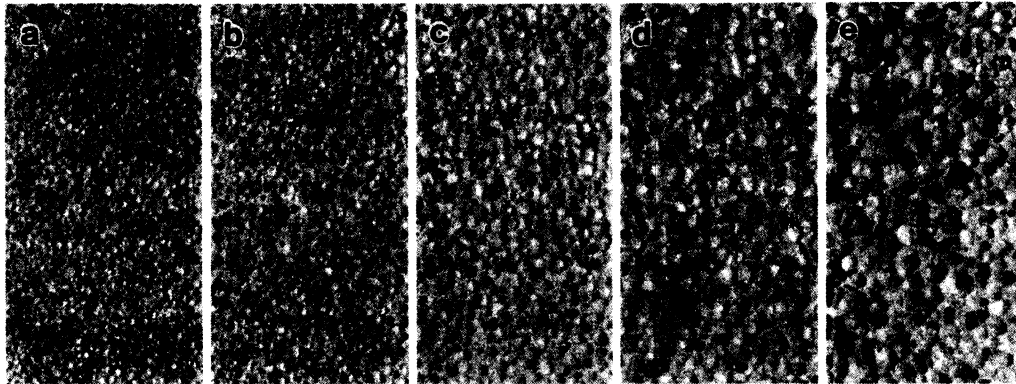


图 2 不同时刻 τ_s 开始冷却获得的试样的截面孔结构 (截面距冷却面 10mm)

Fig.2 Cell structures on transections of 10mm to the cooled side of the samples cooled at different time (objective scanning, resolution: 600 pixels/inch, 1 \times)

(a) $\tau_s=40s$, $d_s=0.95mm$; (b) $\tau_s=70s$, $d_s=1.22mm$; (c) $\tau_s=110s$, $d_s=1.82mm$; (d) $\tau_s=190s$, $d_s=1.98mm$; (e) $\tau_s=300s$, $d_s=2.53mm$

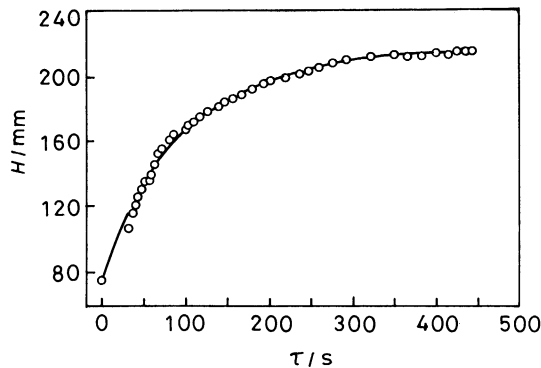


图 3 Al 熔体泡沫化过程 $H \sim \tau$ 曲线

Fig.3 $H \sim \tau$ curve of molten aluminum in foaming process

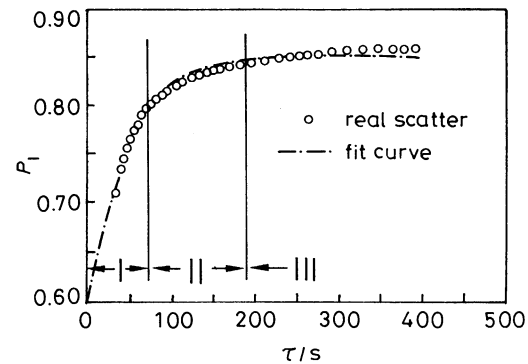


图 4 Al 熔体泡沫的液态孔隙率与时间的关系

Fig.4 Change of the liquid porosity of foaming aluminum vs foaming time

泡长大驱动力和阻力的相对强弱变化决定. 气泡长大的驱动力来自发泡剂分解产生的增量气体引起的气泡内压, 阻力为气泡所受的液相静压力和表面张力. 当发泡剂大量分解使驱动力处于主导地位时, 气泡匀速长大, 表现为 P_l 匀速增大阶段, 即阶段 I ($\tau: 0 \sim 70s$, $P_l: 0.60 \sim 0.79$); 随着泡沫化时间的延长, 发泡剂分解速度减缓, 驱动力渐弱, 气泡长大变慢, 表现为 P_l 的增大减缓阶段, 即阶段 II ($\tau: 70 \sim 190s$, $P_l: 0.79 \sim 0.85$); 发泡剂分解结束, P_l 基本不再增大, 即阶段 III ($\tau: >190s$), 依据最小自由能原理, 气泡相互合并, 其平均孔径继续增大. 在阶段 I、阶段 II, 由于气泡尺寸较小, 相互作用力较弱, 其形状保持近似球状 (即类球形); 在阶段 III, 气泡间相互作用增强和合并使其形状和大小均发生变化. 相应 3 个阶段的泡沫 Al 试样的截面孔结构见图 2.

对图 4 作最小二乘拟合, 得:

$$P_l = 0.8527 - \frac{5.079}{1 + e^{\frac{\tau + 147.6}{50}}} \quad (2)$$

由式 (2) 可获得 Al 熔体泡沫化过程中任何时间 τ 对应的液态平均孔隙率 P_l (表 1), 表 1 还列出了相应时间开始冷却凝固 ($\tau_s = \tau$) 获得的固态泡沫 Al 的平均孔隙率 P_s 的实测值.

表 1 Al 熔体泡沫在不同泡沫化时间 τ 的液态平均孔隙率及相应时间开始冷却凝固的固态平均孔隙率
Table 1 Average porosity of liquid aluminum foam in different foaming time and that of solid aluminum foam cooled at homologous time

τ/s	40	70	110	190	300
P_l	0.736	0.788	0.823	0.846	0.852
P_s	0.761	0.812	0.834	0.850	0.855

由表 1 可知:

(1) 随着泡沫化时间的延长, 液态泡沫孔隙率 P_l 从 0.736 提高至 0.852;

(2) P_l 的提高使固态平均孔隙率 P_s 从 0.761 增至 0.855;

(3) 固态平均孔隙率 P_s 总是大于开始冷却时的液态平均孔隙率 P_l , 即 $\Delta P = P_s - P_l > 0$, 但 ΔP 随 τ_s 的延长而减小. 这是因为: ① Al 熔体泡沫的综合导热系数 λ_1^* 远小于纯 Al 的导热系数, 且随泡沫化时间的延长而减小, 因此凝固时间较长. 在凝固时间内, 熔体泡沫的孔隙率继续增大, 从而使 $P_s > P_l$; ② 随着 τ_s 增大, 液态泡沫的孔隙率的增长速率减缓 (图 4), 凝固过程中固态泡沫的孔隙率的增量减小, 因此 ΔP 逐渐减小.

2.2 泡沫 Al 的孔径

由图 5 可知: 随着 τ_s 的延迟, Al 熔体泡沫得以充分长大, 与表 1 中 P_s 的变化相对应, 孔径 (测量位置为距冷却面 10mm 的截面) 由 0.95mm 增加至 2.53mm. 图 2 直观地反映出了这一趋势.

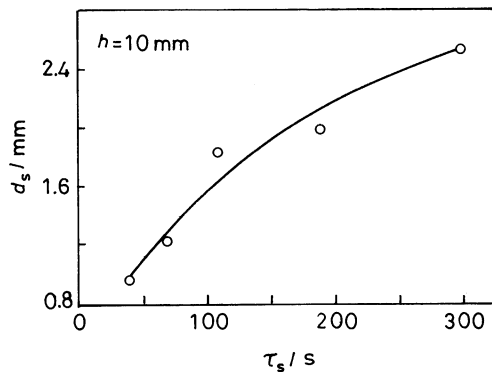


图 5 平均孔径与开始冷却时间的关系

Fig.5 Change of the average pore diameter of foamed aluminum vs start-cooling time

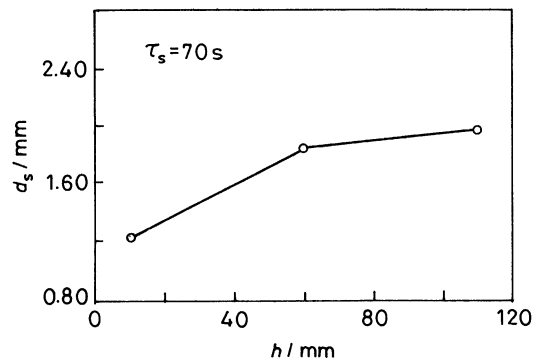


图 6 平均孔径与截面高度的关系

Fig.6 Change of the average of the pore diameters vs the height of the transections

将在相同 $\tau_s(70s)$ 开始冷却凝固的试样沿距冷却面不同高度 (h) 切割, 由截面上孔径 d_s 的变化趋势 (图 6) 可见, 在 Al 熔体泡沫的凝固过程中, 随着截面位置与冷却面距离增大, 截面上孔径 d_s 也不断增大. 高孔隙率的 Al 熔体泡沫及固态泡沫 Al 具有更低的导热系数, 使凝固时间延长, 从而间接地影响了孔结构的变化. 熔体泡沫冷却面在 τ_s 时开始凝固, 距冷却面为 h 的截面则在 $\tau_s + \Delta\tau_h$ 时开始凝固, $\Delta\tau_h$ 为 h 位置与冷却面相比凝固延迟的时间. 在 $\Delta\tau_h$ 时间内, h 位置的 Al 熔体泡沫得以充分地进行泡沫化长大, 使孔径 d_s 增大. 与纯金属凝固时不同位置的凝固时间差相比, 此处的 $\Delta\tau_h$ 主要是由于泡沫体的导热系数随时间的延长而减小引起的, 显然, 在一定条件下促进及抑制熔体泡沫化进程的因素都影响泡沫 Al 的孔结构. 因而有必要认识 Al 熔体泡沫及凝固后的泡沫 Al 的导热系数 λ_1^* 及 λ_s^* 随熔体泡沫化时间的变化关系.

2.3 Al 熔体泡沫的导热系数 λ_1^* 及固态泡沫 Al 的导热系数 λ_s^* 的变化

本文根据 Al 熔体泡沫化过程中孔隙率变化的实验规律, 计算推演出 Al 熔体泡沫化过程中导热系数 λ_1^* 及固态泡沫 Al 的导热系数 λ_s^* 的变化规律, 为凝固控制提供必要依据. 由 Al 熔体和气泡孔隙组成的 Al 熔体泡沫, 在恒温泡沫化过程中的综合导热系数 λ_1^* 随熔体 Al 和气泡的相对百分数而变化.

L.J.Gibson 及其合作者^[5]指出, 泡沫材料的孔径小于 10mm 的情况下, 气泡内气体的对流传热系数、导热系数以及辐射换热系数都很小, 可以忽略. 因此, 泡沫材料的等效导热系数 λ^* 的表达式近似为:

$$\lambda^* = \phi_s[1 - P]\lambda \quad (3)$$

其中 ϕ_s 为气泡的形状系数 (0~1 之间, 与气泡的形状有关). P 为泡沫材料的平均孔隙率, λ 为泡沫材料骨架的导热系数 (W/m·K).

式 (3) 应用于泡沫 Al, 可得到 Al 熔体泡沫和固态泡沫 Al 的导热系数的表达式. 将 P_s 及固态纯 Al 的导热系数 $\lambda_{Al(s)}$ 代入式 (3), 固态泡沫 Al 的等效导热系数 λ_s^* 的表达式为:

$$\lambda_s^* = \phi_s[1 - P_s]\lambda_{Al(s)} \quad (4)$$

式中 ϕ_s 约为 0.21 (平均孔隙率 90%~92% 的泡沫 Al 的导热系数为 3.5~4.5W/m·K^[6], 可算出 ϕ_s). 将式 (2) 代入式 (3), 得到 Al 熔体泡沫的等效导热系数 λ_1^* 随泡沫化时间 τ 的变化规律:

$$\lambda_1^* = \phi_s[1 - P_1]\lambda_{Al(l)} = \phi_s\left(\frac{5.079}{1 + e^{\frac{\tau+147.6}{50}}} + 0.1473\right)\lambda_{Al(l)} \quad (5)$$

式中 P_1 为 Al 熔体泡沫的平均孔隙率, $\lambda_{Al(l)}$ 为液态 Al 的导热系数 (W/m·K). 取 $\lambda_{Al(l)}=91W/m·K$, $\phi_s=0.21$, 由式 (5) 可得 Al 熔体泡沫的导热系数随泡沫化时间的变化 (图 7).

为便于比较, 将一定温度下 Al 熔体泡沫化时间 τ 与 Al 熔体泡沫孔隙率 P_1 (计算值)、导热系数 λ_1^* (计算值) 及相应时间开始冷却凝固的泡沫 Al 的孔隙率 P_s (实测值)、平均孔径 d_s (实测值) 和导热系数 λ_s^* (计算值) 列于表 2, λ_1^* 和 λ_s^* 随泡沫化时间的变化趋势见图 8.

由表 2 和图 8 可知: (1) Al 熔体泡沫导热系数 λ_1^* 及泡沫 Al 的导热系数 λ_s^* 均随孔隙率的增加而减小. (2) 在孔隙率相近的情况下, λ_s^* 远大于 λ_1^* . 这表明在相同的冷却条件下, Al 熔体泡沫的冷却速率比固态泡沫 Al 中的小, 使 Al 熔体泡沫的凝固时间延迟, 从而促进 Al 熔体泡沫化的程度, 使孔隙率和孔径增大.

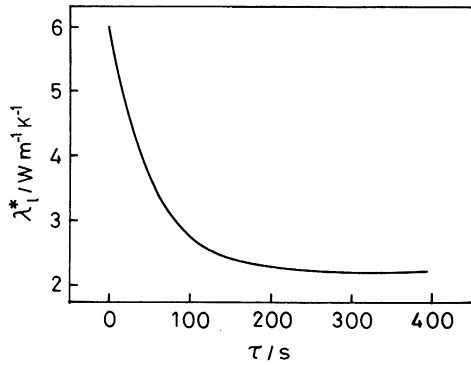


图 7 Al 熔体泡沫的导热系数与泡沫化时间的关系

Fig.7 Change of the thermal conductivity of foaming aluminum vs foaming time

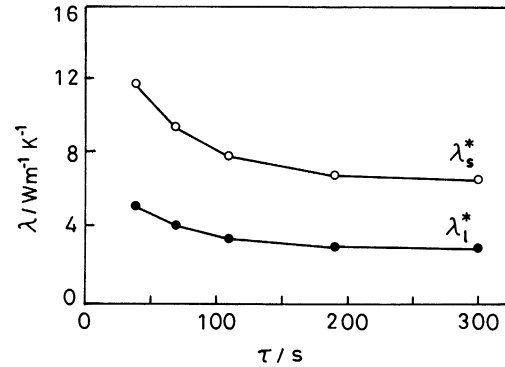


图 8 液态、固态泡沫 Al 的导热系数随泡沫化时间的变化

Fig.8 Change of thermal conductivity of liquid and solid aluminum foam vs foaming time

表 2 Al 熔体泡沫化时间 τ 与 P_l 、 P_s 、 d_s 、 λ_l^* 及 λ_s^* 的关系
Table 2 Change of P_l , P_s , d_s , λ_l^* and λ_s^* vs foaming time τ

τ/s	40	70	110	190	300
P_l	0.736	0.788	0.823	0.846	0.852
$\lambda_l^*/W(m \cdot K)^{-1}$	5.05	4.05	3.37	2.93	2.83
P_s	0.761	0.812	0.834	0.850	0.855
d_s/mm	1.11	1.67	2.06	2.27	3.15
$\lambda_s^*/W(m \cdot K)^{-1}$	11.7	9.39	7.81	6.79	6.56

3 结 论

Al 熔体泡沫的孔隙率随熔体泡沫化时间的延长而呈指数关系增大, 导热系数随泡沫化时间的延长而呈指数关系减小. 固态泡沫 Al 的孔隙率和孔径随开始冷却时间的增大而变大, 导热系数则减小. Al 熔体泡沫孔结构的变化直接影响凝固后泡沫 Al 的孔结构; 导热系数的减小则使熔体泡沫凝固时间滞后, 促进泡沫化的程度, 从而间接地影响固态泡沫 Al 的孔结构.

参 考 文 献

- 1 吴照金, 王艳明, 何德坪, 铸造, (4), 1(1999)
- 2 J.Banhart, M.F.Ashby, N.A.Fleck, *Metal Foams and Porous Metal Structures* (Verlag MIT Publishing, Bremen, Germany, 1999) p.5
- 3 上野英俊, 秋山茂, 轻金属 (日), 37(1), 42(1987)
- 4 宋振纶, 何德坪, 材料研究学报, 11(3), 275(1997)
- 5 L.J.Gibson, M.F.Ashby, *Cellular Solids Structure and Properties*, Second edition (Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1997) p.202
- 6 M.F.Ashby, A.G.Evans, J.W.Hutchinson, N.A.Fleck, *Metal Foams* (to be published)