

文章编号: 1004 - 0609(2004) 12 - 2021 - 08

氢化钛热分解特性与小孔径低孔隙率泡沫铝合金^①

杨东辉, 何德坪

(东南大学 材料科学与工程系, 南京 210096)

摘要: 采用金属管道氩载气流中的程序升温分解装置获得了氢化钛的热分解特性; 运用位移传感器计算机系统获得了铝合金熔体保温泡沫化过程中孔隙率与保温发泡时间的关系; 用图像分析法研究了氢化钛在铝合金熔体中均匀分散时间对泡沫铝合金熔体孔结构的影响; 研究了不同孔隙率泡沫铝合金的压缩力学性能。结果表明: 在 940 K 时, 发泡剂氢化钛分解的 30~ 80 s 内, 随着均匀分散时间的延长, 铝合金熔体泡沫的孔隙率保持恒定, 但孔数增多, 孔径变小, 由此获得了制备高比刚度、小孔径和低孔隙率泡沫铝合金的新途径。

关键词: 高比刚度; 小孔径; 低孔隙率; 泡沫铝合金; 氢化钛热分解; 界面推移

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Thermal decomposition properties of titanium hydride and Al alloy foam with low porosity and small pore diameter

YANG Dong-hui, HE De-ping

(Department of Materials Science and Engineering,
Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Thermal decomposition properties of titanium hydride are acquired by temperature programmed decomposition (TPD) apparatus with metal tube structure, in which Ar is used as a carrier gas. The relationships between the porosity of Al alloy melt foam and foaming time at 940 K are gained by displacement sensor-computer system. Pore structures of Al alloy melt foam with different stirring time of titanium hydride in the Al alloy melt are studied by image analysis method. The compressive properties of the Al alloy foam are studied. The results show that at 940 K and during the stirring time period of 30 ~ 80 s, the porosity of the Al alloy melt foam is kept constant while the pore number increases and pore diameter decreases, which is a new method to fabricate Al alloy foam with high specific stiffness, low porosity and small pore diameter.

Key words: high specific stiffness; small pore diameter; low porosity; Al alloy foam; thermal decomposition of titanium hydride; interface displacement

以孔隙为特征的超轻型金属结构实现了结构材料的轻质多功能化, 它的相对密度 $\rho < 1$, 具有高比强度、高比刚度、能量吸收、吸声、隔声、隔热、电磁屏蔽及多功能兼容等性能, 因而成为当今研究热点之一^[1~8]。高速运动体高技术的需求使得较泡沫纯铝具有更高比强度的泡沫铝合金成为发展的重

点^[9, 10]。

以往研究的重点是高孔隙率($> 80\%$)、较大孔径($> 1 \text{ mm}$) 多边形孔的泡沫铝合金, 为了满足高技术领域对更高强度的需求, 用熔体泡沫化方法研制小孔径($< 1 \text{ mm}$)、低孔隙率($65\% \sim 75\%$)的泡沫铝合金就成为了前沿新方向。

① 基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(50231010); 国家自然科学基金重大基金资助项目(90205005); 国家自然科学基金资助项目(50081002, 19982001)

收稿日期: 2004-06-14; 修订日期: 2004-09-15

作者简介: 杨东辉(1976-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 杨东辉, 电话: 025-83596895; E-mail: gotak@sina.com

铝合金熔体泡沫化可以分为: 1) 在强力搅拌下, 发泡剂氢化钛在铝合金熔体中的均匀分散过程。该过程定义为泡沫化阶段 I, 其持续时间定义为 t_s ; 2) 保温泡沫化过程。该过程定义为泡沫化阶段 II, 其持续时间定义为 t_f 。在铝合金熔体粘度、熔体泡沫孔隙率实时测量和低孔隙率泡沫铝合金探索研究的基础上^[11-14], 为获得制备小孔径($< 1 \text{ mm}$)、低孔隙率(65%~75%)高强度泡沫铝合金的新途径应研究如下问题:

- 1) 氢化钛的热分解特性;
 - 2) 氢化钛的热分解特性和铝合金泡沫化的关系;
 - 3) 不同 t_s 对铝合金熔体泡沫化阶段 I 和泡沫化阶段 II 的影响;
 - 4) 不同孔隙率泡沫铝合金的压缩力学性能。
- 上述研究尚未见相关报道。

1 实验

1.1 小孔径低孔隙率泡沫铝合金的制备

制备小孔径低孔隙率泡沫铝合金可按如下步骤进行:

- 1) 将一定量的铝合金熔化并在 940 K 保温。该铝合金成分(质量分数)为: 8.00%~10.00% Si, 1.30%~1.80% Cu, 0.40%~0.60% Mg, 0.10%~0.35% Mn, 0.10%~0.35% Ti
- 2) 加入 Ca 增粘剂并搅拌, 用高精度扭矩仪-计算机系统实时测量和控制铝合金熔体的粘度^[11]。
- 3) 在铝合金熔体中加入适量的氢化钛粉末, 强烈搅拌使其在铝合金熔体中分散均匀, 氢化钛在铝合金熔体中分解, 产生气体形成气泡, 该过程即为泡沫化阶段 I。
- 4) 泡沫化阶段 I 结束后, 铝合金熔体泡沫进入保温泡沫化阶段, 即为泡沫化阶段 II, 保温温度为 940 K。
- 5) 将泡沫铝合金熔体冷却凝固后获得泡沫铝合金试样。

1.2 孔结构描述方法

将泡沫铝合金熔体快速凝固, 用图像分析法研究试样截面, 获得了 t_s 对泡沫化阶段 I 的影响; 通过位移传感器计算机系统^[12, 14] 测算泡沫铝合金熔体的孔隙率 Pr_1 对时间 t_f 的关系, 研究不同 t_s 对泡沫化阶段 II 的影响。

2 氢化钛的热分解特性

铝合金熔体泡沫长大的驱动力来自于氢化钛分解产生的氢气, 因此, 氢化钛热分解特性直接影响铝合金熔体的泡沫化过程。使用日本岛津产 XD-3A 型 X 射线衍射仪, 在 Cu 靶、管压为 40 kV、管电流为 30 mA 的条件下对铝合金进行 X 射线衍射分析。图 1 所示为粒度 50 μm 氢化钛粉末的 X 射线衍射谱, 对应该谱特征峰的氢化钛化学式为 $\text{TiH}_{1.924}$ ^[15]。

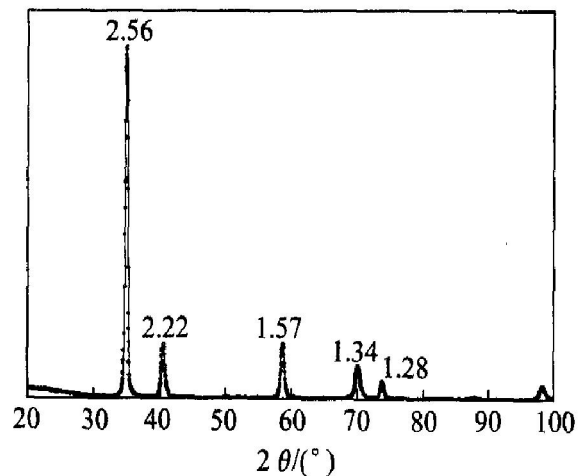


图 1 氢化钛的 X 射线衍射谱
Fig. 1 XRD pattern of titanium hydride

迄今为止, 作为铝合金熔体泡沫化驱动力来源的氢化钛的研究报道尚未涉及求解氢化钛热分解反应动力学参数这一核心问题^[16], 更未研究过其与铝合金熔体泡沫化过程之间的关系。本文作者利用自制的金属管道氩载气流中的程序升温分解(TPD)装置^[17, 18], 以热导池为鉴定器测得氢化钛的 TPD 谱线。实验流程是: 称取粒度 50 μm 的氢化钛粉末 74.0 mg 放入自制的金属管中, 粉末上下充填经盐酸处理过的石英砂, 然后将该金属管放入大小合适的加热炉中并通入流速为 40 mL/min 的纯氩气 ($\geq 99.99\%$); 待基线稳定后, 将氢化钛粉末从室温程序升温至 1 100 K, 其分解产物和载气送入热导池检测并绘制出 TPD 谱线。实验中, 层析室温度为 413 K, 桥流为 81 mA, 升温速率为 10 K/min。用德国产 NETZSCH4 Balzers MID 型质谱仪对氢化钛 TPD 过程中的产物进行检测。结果表明: 氢化钛分解产物主要是氢气。经过冷阱处理(即氢化钛分解产物进入热导池检测前, 先流经一个温度为 123 K 的冷阱)后得到的 TPD 谱线和未经冷阱处理得到的

TPD 谱线相同, 这表明所得的 TPD 谱线纪录的就是氢化钛热分解产物中氢气的信号。运用查表法、谱线重叠法和预分解差谱技术^[17, 18]对该 TPD 谱线进行了分峰拟合(见图 2), 并求得了氢化钛热分解反应动力学参数, 包括热分解反应级数、热分解活化能、指前因子和对应的热分解反应方程组(见表 1)。

表 1 中 No. 为谱线序号; n 为反应级数; N_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 为物质的量; E_d 为热分解活化能, kJ/mol;

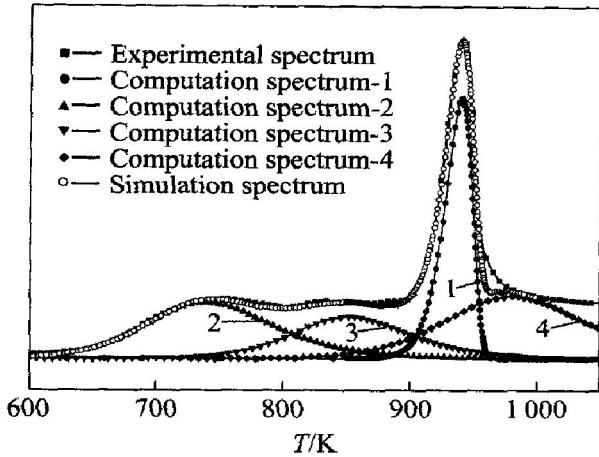


图 2 氢化钛 TPD 谱线的分峰拟合

Fig. 2 Separation and simulation of TPD spectrum of titanium hydride

k_0 为指前因子, s^{-1} ; T_m 为氢化钛谱线的峰巅温度, K。图 3 所示为根据表 1 中氢化钛热分解方程组计算得到的 940 K 时氢化钛的分解量与时间的关系。

图 3 表明, 氢化钛在 940 K 时分解产气大致可以分为 3 个阶段: 快速分解产气阶段(I)、减缓分解产气阶段(II)和慢速分解产气阶段(III)。在阶段 I, 氢化钛快速分解, 产生大量氢气, 该阶段持续时间约为 115 s; 在阶段 II, 氢化钛的产气速率减缓, 该阶段持续时间约为 125 s; 在阶段 III, 氢化钛的产气速率进一步减小, 并随着时间延长氢化钛分解产气的增量越来越小。

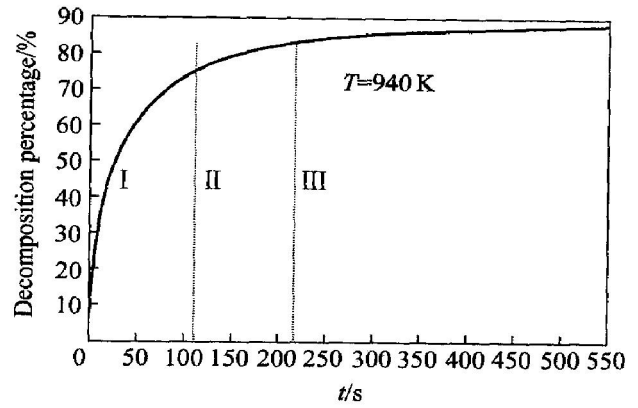


图 3 940 K 时氢化钛分解量与时间的关系

Fig. 3 Relationship between decomposition percentage and time for titanium hydride at 940 K

3 氢化钛热分解特性与铝合金熔体泡沫化过程的关系

用位移传感器计算机系统测量了铝合金熔体在泡沫化阶段 II 中的界面高度 H 对保温时间 t_f 的关系。由于坍塌的横截面积沿高度方向不变, 而泡沫顶面近似为平面, 故铝合金熔体泡沫在该阶段的液态孔隙率 Pr_1 可表示为:

$$Pr_1 = Pr_1 = \frac{V - V_0}{V} = 1 - \frac{H_0}{H} \quad (1)$$

式中 V 为泡沫体的动态体积; V_0 为熔体初始体积; H_0 为熔体的初始高度; H 为泡沫体顶面的动态高度。

图 4 所示为将 $H - t_f$ 曲线中的数据代入式 (1), 得到的在泡沫化阶段 II 中, 铝合金熔体泡沫的孔隙率与泡沫化时间的关系。

从图 3 和图 4 可知, 氢化钛分解量对时间的关系和铝合金熔体泡沫长大的趋势一致, 即氢化钛在铝合金熔体中搅拌分散时间和保温阶段铝合金熔体泡沫的孔隙率迅速长大的时间之和约为 115 s, 随后的缓慢长大时间约为 120 s, 此后, Pr_1 极少增大,

表 1 氢化钛的热分解反应动力学方程组

Table 1 Thermal decomposition kinetics equations of titanium hydride

No.	n	T_m/K	$E_d/(kJ \cdot mol^{-1})$	k_0	Thermal decomposition equation
1	1	940	677	7.15×10^{35}	$-\frac{dN_1}{dt} = 7.15 \times 10^{35} \cdot \exp\left(-\frac{677000}{RT}\right) \cdot N_1$
2	2	740	125	3.07×10^6	$-\frac{dN_2}{dt} = 3.07 \times 10^6 \cdot \exp\left(-\frac{125000}{RT}\right) \cdot N_2^2$
3	2	852	184	9.23×10^8	$-\frac{dN_3}{dt} = 9.23 \times 10^8 \cdot \exp\left(-\frac{184000}{RT}\right) \cdot N_3^2$
4	2	980	230	1.99×10^{10}	$-\frac{dN_4}{dt} = 1.99 \times 10^{10} \cdot \exp\left(-\frac{230000}{RT}\right) \cdot N_4^2$

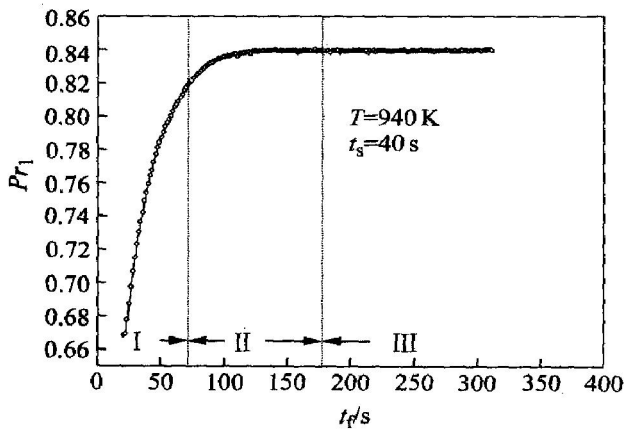


图4 泡沫铝合金熔体的 Pr_1 与 t_f 的关系
Fig. 4 Relationship between Pr_1 and t_f

甚至基本不变。因此，氢化钛分解量对时间的关系曲线可以看作铝合金熔体泡沫生长的理论曲线，根据该曲线可以准确地预测泡沫铝合金熔体的长大趋势，从而为获得小孔径、低孔隙率、高比刚度泡沫铝合金提供了依据。

4 不同 t_s 对泡沫铝合金孔结构的影响

4.1 t_s 对泡沫化阶段 I 的影响

对于泡沫化阶段 I，以往的研究工作都未涉及氢化钛在铝合金熔体中均匀分散时间对泡沫铝合金熔体孔结构的影响。本研究采用经过不同 t_s 后，快速冷却铝合金熔体泡沫，在距所得泡沫铝合金试样底部 10 mm 处用线切割切开、磨平，用扫描仪将截面图像输入计算机并作二值化处理，用专用软件对二值化处理后的图像进行分析以获得该截面的孔结构参数(孔径 D 、孔洞个数 n 和面孔隙率 Pr_s)。由于面孔结构与体孔结构有明确的对应关系^[19]，因此也就可以获得相应泡沫铝合金熔体的孔结构参数。

图 5 所示为氢化钛均匀分散时间分别为 30、40、50、60、70 和 80 s 时，试样截面的二值化图，图中黑色为孔洞，白色为金属胞壁。

图 6 所示为对图 5 的二值化图像进行分析得到的不同 t_s 时，泡沫铝合金试样截面上孔径的分布。从图可见， t_s 较大时， D 较小的试样截面孔洞个数 n 较多。

图 7 所示为搅拌时间对孔洞个数和面孔隙率的影响。

图 6 和图 7 表明，随着 t_s 的延长，泡沫铝合金的孔洞个数和小孔径孔洞个数增多，但面孔隙率基本不变。由于泡沫铝合金的面孔结构对应于其体孔

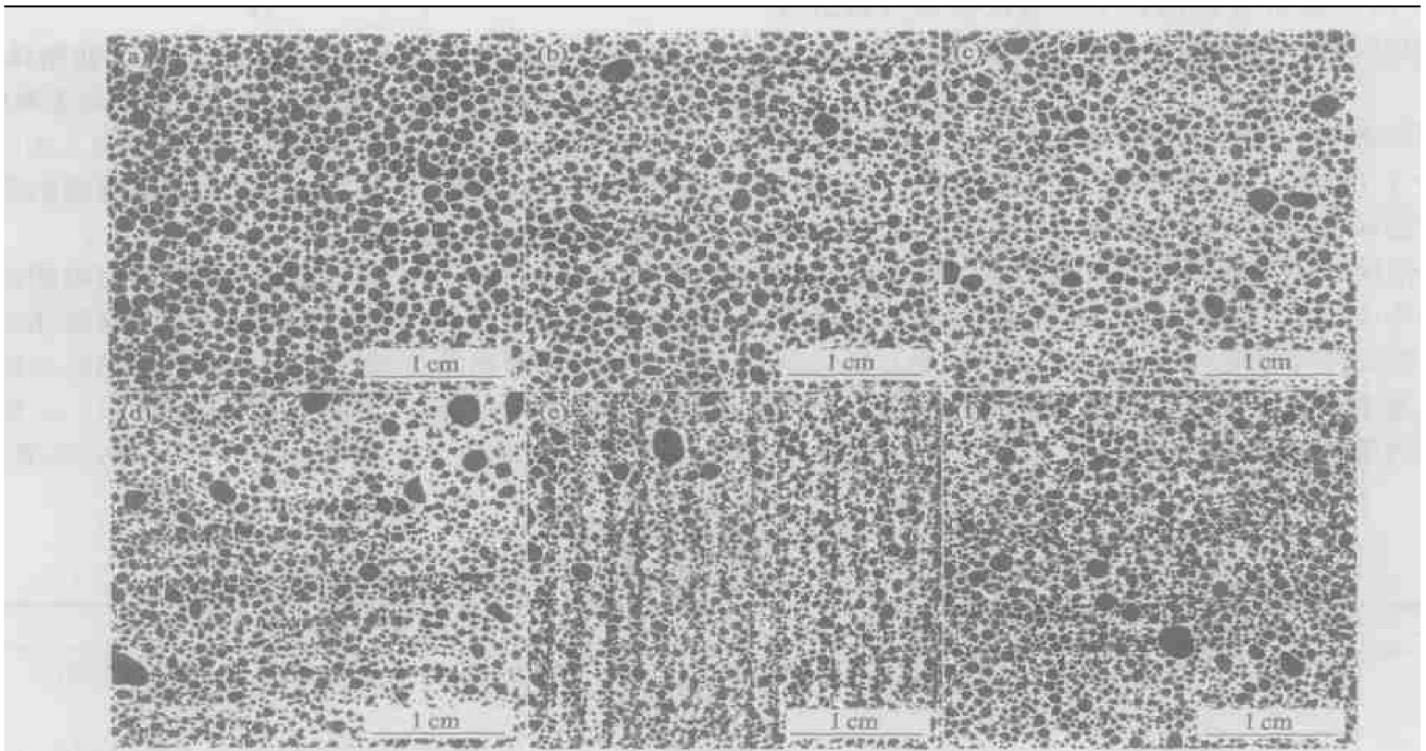


图 5 不同 t_s 的试样截面二值化图

Fig. 5 Sections of Al alloy foam corresponding to different stirring time t_s
 (after contradistinction treatment)

(a) — $t_s = 30$ s; (b) — $t_s = 40$ s; (c) — $t_s = 50$ s; (d) — $t_s = 60$ s; (e) — $t_s = 70$ s; (f) — $t_s = 80$ s

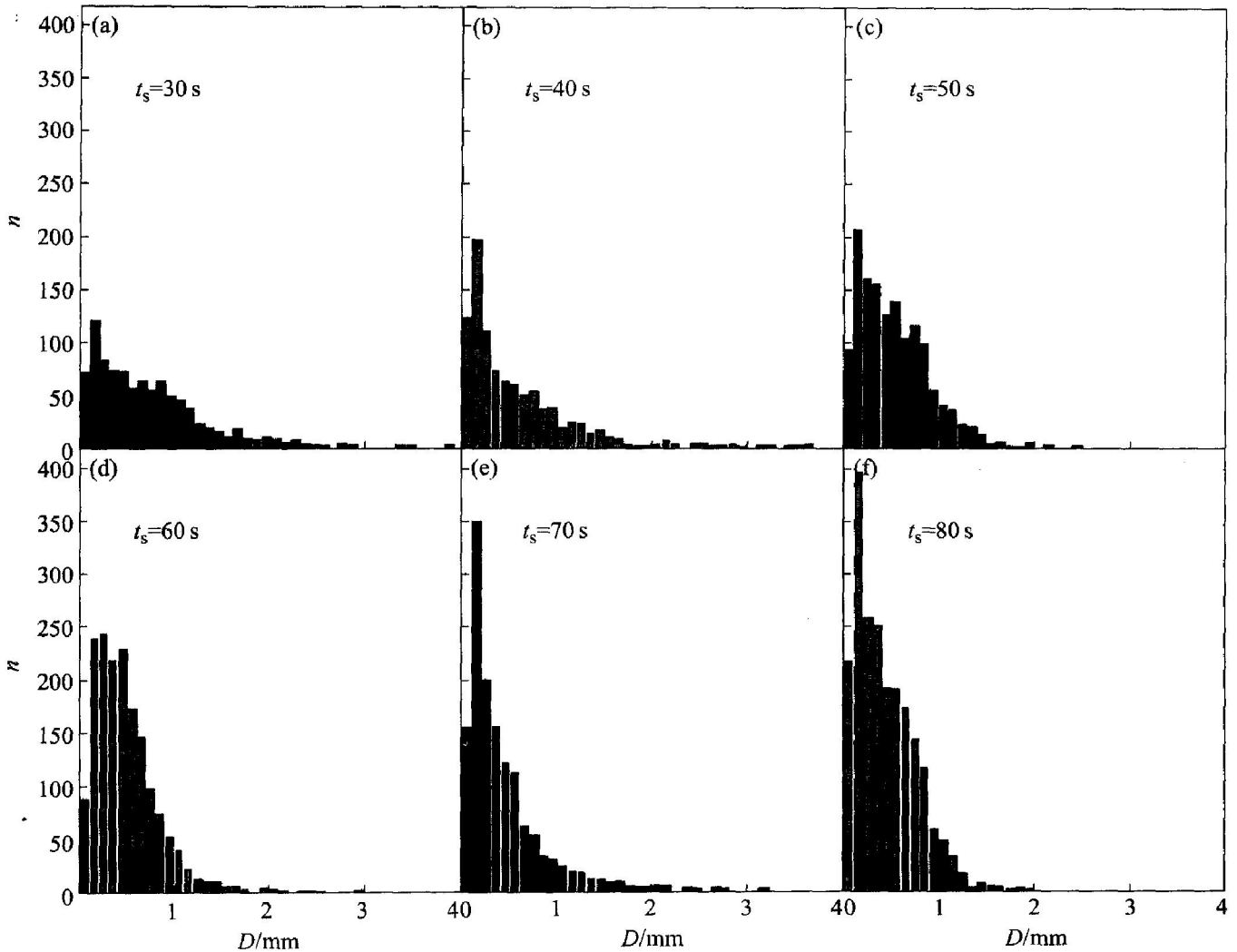


图 6 不同 t_s 的泡沫铝合金试样截面上的孔径分布

Fig. 6 Distributions of pore diameter on sections of Al alloy foam corresponding to different stirring time t_s

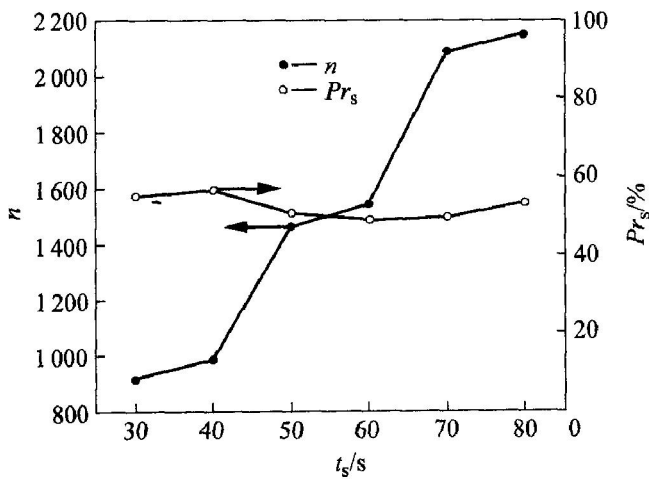


图 7 t_s 对 n 和 Pr_s 的影响

Fig. 7 Effects of stirring time on pore number n and surface porosity Pr_s

结构^[19], 所以氢化钛在铝合金熔体中均匀分散的 30~ 80 s 内, 铝合金熔体泡沫的体孔隙率保持不

变, 但孔洞个数随 t_s 的延长而增多, 孔径变小。

4.2 t_s 对泡沫化阶段 II 的影响

在泡沫化阶段 I 结束后, 铝合金熔体泡沫即进入保温泡沫化阶段。在其他工艺参数不变的情况下, 本文作者研究了不同 t_s 对 Pr_1-t_f 曲线的影响。用位移传感器计算机系统实时测量了不同 t_s 条件下, 泡沫铝合金熔体 Pr_1 对时间 t_f 的关系, 结果如图 8 所示。

结合图 3、图 4 和图 8 可知: 由于氢化钛热分解产生的气体是泡沫铝合金熔体长大的驱动力, 当泡沫铝合金熔体进入保温泡沫化阶段时, 若氢化钛分解速率减缓, 则铝合金熔体泡沫的体孔隙率的增长也相应减缓; 若氢化钛粉末仍处于高速分解阶段, 则相应的铝合金熔体泡沫的 Pr_1 也快速增长。

从以上结果可见, 在保温泡沫化阶段, 若氢化钛分解产气速率变缓, 则铝合金熔体泡沫的 Pr_1 增

长速度变缓(见图8中曲线3),气泡长大速度也相

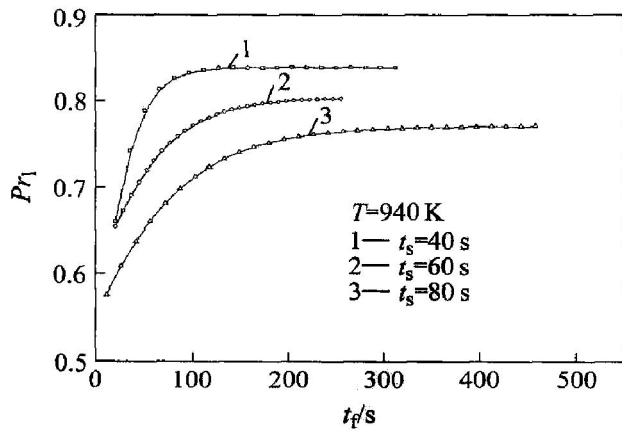


图8 不同 t_s 的铝合金熔体泡沫 Pr_1 对 t_f 的关系
Fig. 8 Relationships between Pr_1 and t_f of Al alloy melt foam corresponding to different stirring time t_s

应变缓。由于在氢化钛高速分解阶段, t_s 的延长使得铝合金熔体泡沫中孔洞个数增多, 孔径变小而孔隙率基本不变, 这对制备具有小孔径、球形孔、孔隙率为 65%~75% 的泡沫铝合金有利; 反之, 若泡沫化阶段 I 结束后, 氢化钛仍处于高速产气阶段, 则铝合金熔体的 Pr_1 仍保持快速增长(见图8中曲线1), 气泡快速长大, 形成多边形孔, 对制备具有大孔径、多边形孔、孔隙率大于 80% 的泡沫铝合金有利。图9(a)和(b)所示分别为 t_s 为 40 s、保温泡沫化时间为 120 s 和 t_s 为 80 s、保温泡沫化时间为 80 s 制备的泡沫铝合金试样体视显微图。由图可见, t_s 为 80 s 制备的泡沫铝合金试样具有球形孔孔结构, $D < 1$ mm; 而 t_s 为 40 s 制备的泡沫铝合金试样具有多边形孔孔结构, $D > 1$ mm。

5 低孔隙率泡沫铝合金的单向压缩性能

用长春试验机研究所产 SS-2202 型万能机测得了泡沫铝合金单向压缩的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线(见图10), 实验中压头下降速率为 2 mm/min。

由图10可知, 泡沫铝合金的单向压缩 $\sigma-\varepsilon$ 曲线可以大致分为线性变形、屈服平台和致密化3个阶段, 用 q^* 表示进入屈服平台阶段所对应的应力。对于承受弯曲负载的装置, 所用材料应具有较高的比强度, 即 $\sigma_s^{2/3}/\rho$ (对梁构件) 或 $q^{1/2}/\rho$ (对板构件) 的比值较高(其中, σ_s 和 ρ 分别为材料的屈服强度(MPa)和密度(kg/m^3))。

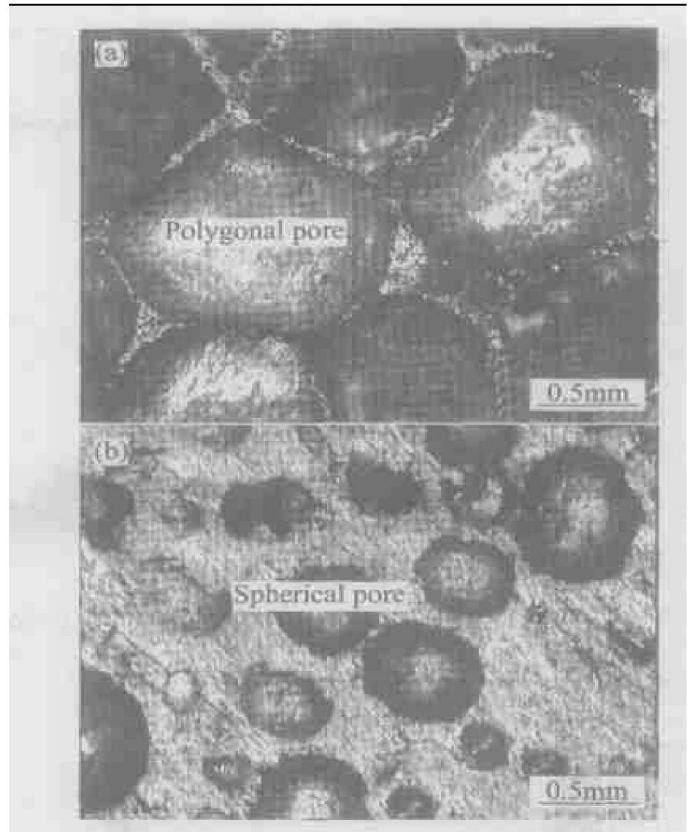


图9 不同 t_s 制备的泡沫铝合金孔洞形状
Fig. 9 Stereo micrographs of Al alloy foam corresponding to different stirring time t_s
 (a) — $t_s = 40$ s; (b) — $t_s = 80$ s

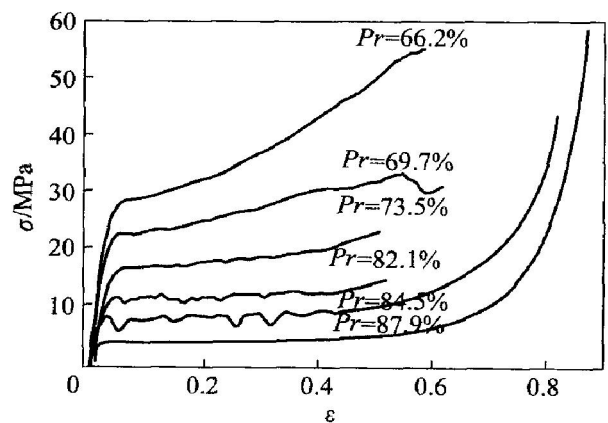


图10 泡沫铝合金的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线
Fig. 10 $\sigma-\varepsilon$ curves of Al alloy foam

图11所示为泡沫铝合金的孔隙率 Pr 与 q^* 的关系, 图12所示为泡沫铝合金的比刚度对孔隙率的关系。

从图11和图12可知, 随着 Pr 的减小, 泡沫铝合金的 q^* 和比刚度升高。当 Pr 小于 78% 时, 泡沫铝合金的 $q^{*1/2}/\rho$ 的值大于 1.8^[20], 当 Pr 小于 67% 时, 泡沫铝合金的 $q^{*2/3}/\rho$ 值大于 4.3^[20]。因此 Pr 值小的泡沫铝合金的比刚度高于钢。

综上所述, 在本研究条件下, 通过延长 t_s 值,

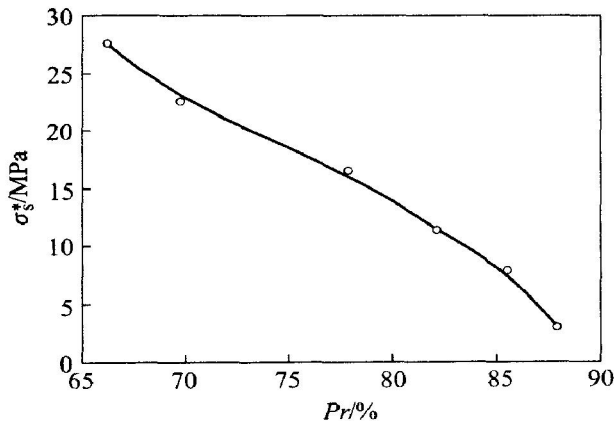


图 11 泡沫铝合金 σ_s^* 与 Pr 的关系

Fig. 11 Relationship between σ_s^* and Pr

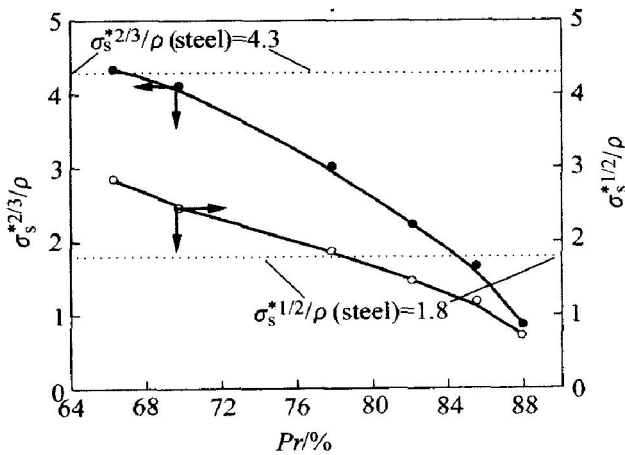


图 12 泡沫铝合金比刚度与 Pr 的关系

Fig. 12 Relationship between specific stiffness and Pr

可以获得高比强度、小孔径、球形孔结构和低孔隙率的泡沫铝合金。

6 结论

1) 获得了氢化钛热分解动力学参数和热分解动力学方程组, 据此方程组计算获得了 940 K, 氢化钛分解量对时间的关系曲线。

2) 在氢化钛高速分解的 30~ 80 s 内, 铝合金熔体泡沫的孔隙率随氢化钛在铝合金熔体中均匀分散时间的延长保持恒定, 而其孔径下降, 孔洞个数增多。

3) 氢化钛分散过程结束后, 若氢化钛分解速率进入缓慢分解阶段, 有利于制备具有小孔径、球形孔结构的低孔隙率($Pr < 80\%$)的泡沫铝合金。

4) 具有小孔径、球形孔结构的低孔隙率泡沫铝合金具有高的屈服强度, 孔隙率值小的低孔隙

率泡沫铝合金具有比钢高的比刚度。

REFERENCES

- [1] Ashby M F, Lu T J. Metal foams: a survey[J]. Science in China (series B), 2003, 46(6): 521 - 532.
- [2] Seeliger H W. Aluminum foam sandwich(AFS) —ready for market introduction[A]. Banhart J, Fleck N A, Mortensen A. Cellular Metals: Manufacture, Properties, Applications[C]. Berlin: Verl MIT, 2003. 5 - 12.
- [3] Maine E, Ashby M F. Cost estimation and the viability of metal foams[A]. Banhar J, Ashby M F, Fleck N A. Metal Foams and Porous Metal Structure[C]. Berlin: Verl MIT, 1999. 63 - 70.
- [4] Ashby M F, Evans A, Fleck N A, et al. Metal Foams: A Design Guide[M]. Boston: Butterworlr-Heinemann, 2000. 217 - 225.
- [5] WU Zhaor-jin, HE Der-ping. Changes in porosity of foamed aluminum during solidification[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(18): 1667 - 1672.
- [6] YANG Dong-hui, HE Der-ping. Porosity of porous Al alloys[J]. Science in China (series B), 2001, 44(4): 411 - 418.
- [7] 吴照金, 何德坪. 泡沫 Al 孔结构的影响因素[J]. 材料研究学报, 2000, 14(3): 277 - 282.
WU Zhaor-jin, HE Der-ping. Influential factor on the cell structure of aluminum foam[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2000, 14(3): 277 - 282.
- [8] 宋振伦, 何德坪. 金属熔体泡沫形成过程中粘度对孔结构的影响[J]. 材料研究学报, 1997, 11(3): 275 - 279.
SONG Zhen-lun, HE Der-ping. Effects of viscosity on pore structure in foaming process of molten aluminum [J]. Chinese Journal of Materials Research, 1997, 11 (3): 275 - 279.
- [9] ZHENG Ming-jun, HE Der-ping, DAI Ge. Additional force field in cooling process of cellular Al alloy[J]. Science in China (series B), 2002, 45(6): 598 - 607.
- [10] 郑明军, 何德坪. 新型高比强胞状铝合金的压缩及能量吸收性能[J]. 材料研究学报, 2002, 16(5): 473 - 478.
ZHEN Ming-jun, HE Der-ping. Deformation and energy absorption characteristic of high strength cellular Al alloy [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2002, 16 (5): 473 - 478.
- [11] 戴 戈. AFSi 合金泡沫形成过程中粘度测量及温度场数值模拟探索[D]. 南京: 东南大学, 2001.
DAI Ge. Viscosity Measurement During the Foaming Process of AFSi Alloy and Study on Numeric Simulation

- of Temperature Distribution [D]. Nanjing: Southeast University, 2001.
- [12] 邹毅, 何德坪, 蒋家桥. 新型球形孔低孔隙率高强度泡沫铝合金[J]. 中国科学(B辑), 2004, 34(2): 168 - 176.
- ZOU Yi, HE De-ping, JIANG Jia-qiao. New type of spherical pore Al alloy foam with low porosity and high strength[J]. Science in China(series B), 2004, 34(2): 168 - 176.
- [13] 何德坪, 邹毅, 尚金堂. 低孔隙率闭孔泡沫铝合金的制备方法[P]. 中国专利 200310106496. 2, 2003 - 12 - 03.
- HE De-ping, ZOU Yi, SHANG Jin-tang. A Preparation Method of Al Alloy Foam with Closed Pore and Low Porosity[P]. CN 200310106496. 2, 2003 - 12 - 03.
- [14] 何德坪, 尚金堂, 邹毅, 等. 测量闭孔泡沫铝或合金液态平均孔隙率的方法及装置[P]. 中国专利 200310106495. 8, 2003 - 12 - 03.
- HE De-ping, SHANG Jin-tang, ZOU Yi, et al. An Apparatus and Method for Measuring the Average Porosity of Al Melt Foam or Al Alloy Melt Foam[P]. CN 200310106495. 8, 2003 - 12 - 03.
- [15] McClune W F, Mrose M E, Post B, et al. Powder Diffraction File, Alphabetical Index, Inorganic Materials [M]. Searthmore, Pennsylvania, USA: JCPDS Press, 1979. 341.
- [16] von Zeppelin F, Hirscher M, Stanzick H, et al. Desorption of hydrogen from blowing agents used for forming metals[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 2293 - 2300.
- [17] 何德坪, 杨东辉, 杨上闰. 金属氢化物粉末热分解特性鉴定方法及装置[P]. 中国专利 20041001421. X, 2004 - 03 - 05.
- HE De-ping, YANG Dong-hui, YANG Shang-run. An Apparatus and Method for Determining the Thermal Decomposition Properties of Metal Hydride Powder[P]. CN 20041001421. X, 2004 - 03 - 05.
- [18] 杨东辉, 何德坪, 杨上闰. 氢化钛热分解反应动力学及铝合金熔体泡沫化研究[J]. 中国科学(B辑), 2004, 34(3): 195 - 201.
- YANG Dong-hui, HE De-ping, YANG Shang-run. Thermal decomposition kinetics of titanium hydride and Al alloys melt foaming process[J]. Science in China (series B), 2004, 34(3): 195 - 201.
- [19] 宋振伦. 泡沫铝的胞状组织及其物理性能研究[D]. 南京: 东南大学, 1998.
- SONG Zhen-lun. Study on the Cellular Structure and Physical Properties of Foamed Aluminum[D]. Nanjing: Southeast University, 1998.
- [20] Ashby M F, Evans A, Fleck N A, et al. Metal Foams: A Design Guide[M]. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. 50.

(编辑 陈爱华)