

超轻多孔金属的耐腐蚀性能

张勇明¹, 何思渊¹, 何德坪¹, 卢天健², 王 辉¹, 黄 可¹

(1. 东南大学 材料科学与工程学院, 南京 210096)

(2. 西安交通大学 航天航空学院, 西安 710049)

摘 要: 研究闭孔泡沫铝的孔结构、基体对耐蚀性能的影响, 探讨提高耐腐蚀性能的途径。结果表明: 其耐蚀性远低于实体金属, 在孔径相近情况下, 随孔隙率的增大, 表面积增大, 使耐腐蚀性能下降; Al-Mg-Re 基防锈泡沫铝具有优异的耐腐蚀性能; 添加适量稀土元素可以提高耐腐蚀性能。提高泡沫铝耐腐蚀性能的途径为: 降低小孔径泡沫铝的孔隙率; 采用防锈泡沫铝和添加适量稀土元素; 对泡沫铝进行喷漆处理或阳极氧化、化学转化处理等。

关键词: 闭孔泡沫铝, 耐腐蚀性, 防锈泡沫铝

中图分类号: TG 146

文献标识码: A

Corrosion resistance of ultra-light porous metals

ZHANG Yong-ming¹, HE Si-yuan¹, HE De-ping¹, LU Tian-jian², WANG Hui¹, HUANG Ke¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(2. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The effects of the pore structure and the component of the matrix of closed-cell foamed aluminum on its corrosion resistance were studied. The results indicate that the corrosion resistance of foamed aluminum is worse than that of compact aluminum and coarsened remarkably with the increase of the porosity in the average diameter stated; The foamed Al-Mg-Re alloy has excellent corrosion resistance compared with other foamed aluminum; The corrosion resistance can be improved by adding rare earth into aluminum and aluminum alloys. The feasible approaches to improve the corrosion resistance were also discussed.

Key words: closed-cell aluminum; corrosion resistance; anticorrosive foamed aluminum

超轻多孔金属具有优良的物理和力学性能^[1-3], 现在已经成为国际热点研究领域之一。因其具有轻质、高比强度^[4]、良好的能量吸收性能^[5]、隔热散热性能^[6]、优异的阻尼减振性能^[7]及消音降噪性能^[8], 在汽车^[9]、航空航天^[10]、化工及环境保护^[11]等领域有广泛的应用前景。超轻多孔金属与实体金属不同, 由于特殊的多样化孔隙结构使其有如下两个特点^[12]: 1) 比表面积大; 2) 表面粗糙度大。潜在的广泛应用和特殊的结构

使超轻多孔金属在各种环境下的腐蚀问题及其对策成为需要考虑的重要问题。但目前有关此类问题的研究较少^[13], 也没有统一、规范的标准来评价超轻多孔金属的腐蚀性能。超轻多孔金属的常用制备材料是铝和铝合金, 所以铝及铝合金的耐腐蚀性和实验方法可为超轻多孔金属的腐蚀性研究提供参考。铝和铝合金的腐蚀实验方法和评定标准主要有质量法、表面形貌观察法及电化学方法等。本文作者以应用较广的熔体发

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB601201); 国家自然科学基金重点资助项目(50231010); 国家自然科学基金资助项目(50471031)

收稿日期: 2007-04-15; **修订日期:** 2007-07-11

通讯作者: 何德坪, 教授; 电话: 025-83794119; E-mail: al_ym@163.com

泡法制备的闭孔泡沫铝及合金为研究对象, 采用质量法讨论其耐腐蚀性能与孔结构、表面积的关系, 同时研究基体成分对腐蚀性能的影响, 并探讨了提高泡沫铝及合金耐腐蚀性能的途径。

1 实验

1.1 样品制备

腐蚀实验样品主要为采用熔体发泡法制备的泡沫纯铝、Al-Cu 基泡沫铝合金(Al-4.8%Cu-0.7%Mn)、防锈 Al-Mg-Re 基泡沫铝合金, 其制备装置和实验方法参见文献[14-15]。基本原理是将 TiH_2 加入到增粘后的铝熔体中并混匀, 使发泡剂分解体产生气泡, 熔体泡沫化后凝固, 得到泡沫铝及泡沫铝合金。选择不同成分、不同孔径、不同孔隙率的样品, 用线切割按相同尺寸、不同成分、不同孔隙率加工多个片状质量损失腐蚀试样, 对试样进行化学清洗、烘干、用 HIMADZU AY120(Japan) 分析天平称量(精度为 $\pm 0.0001 \text{ g}$), 获得孔径、孔隙率, 按成分、孔径、孔隙率等取多组试样, 每组试样取 5 个进行标记。

1.2 腐蚀实验方法

因为泡沫铝及铝合金表面多孔、粗糙, 没有光滑表面, 所以不能进行微观分析、不容易进行精确定量实验和电化学实验。为此, 其腐蚀实验以相对比较为目的, 采用快速腐蚀方法, 进行全浸实验, 以质量损失对实验结果进行表征。腐蚀介质采用 3%氯化钠+1%过氧化氢(质量比)溶液(每隔 24 h, 补加 0.25%过氧化氢溶液), 实验温度为室温, 腐蚀时间视情而定。腐蚀后先宏观检察试样表面腐蚀情况, 然后在室温下用 5%硝酸+1%重铬酸钾溶液(质量分数)清除腐蚀产物, 最后用自来水冲洗干燥, 称量。

质量损失用质量损失率 A 表示, 计算公式为

$$A = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\%$$

式中 A 为腐蚀质量损失率; m_0 为试样初始质量, g; m_1 为试样腐蚀后质量, g。

2 结果与分析

2.1 表面对耐腐蚀性能的影响

表 1 所列为 Al-Cu 合金实体和 Al-Cu 基泡沫铝合

金耐腐蚀性能的实验结果。在实验中, 试样尺寸为 $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 腐蚀介质为 3.5% NaCl+1% H_2O_2 , 腐蚀时间为 192 h, 腐蚀后试样用 5% HNO_3 +1% $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 清洗。结果发现, 在模拟海水的长时间加速腐蚀实验中, Al-Cu 基泡沫铝合金的腐蚀程度要比实体 Al-Cu 合金大得多。

表 1 Al-Cu 合金与 Al-Cu 基泡沫铝合金腐蚀性能

Table 1 Corrosion resistances of Al-Cu alloy and foamed Al-Cu alloy after corrosion

Sample	m_0/g	m_1/g	$A/\%$
Al-Cu alloy	6.376 5	6.224 6	2.39
Foamed Al-Cu alloy	1.474 1	0.713 5	27.47

表 2 所列为不同孔隙率泡沫铝的腐蚀实验结果。为使对比效果明显, 试样孔径相近, 尺寸为 $70 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 腐蚀介质为 3.5%NaCl+1% H_2O_2 , 腐蚀时间为 192 h, 腐蚀后试样用 5% HNO_3 +1% $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 清洗。从表 2 可以看出, 孔隙率高的泡沫铝的质量损失率明显高于孔隙率低的泡沫铝的。

表 2 不同孔隙率泡沫铝的腐蚀实验结果

Table 2 Corrosion results of foamed aluminum with different porosities

Porosity/%	m_0/g	m_1/g	$A/\%$
43	28.523 5	26.555 2	6.9
72	14.216 9	12.140 8	14.6
81	9.794 5	6.500 9	33.6

当孔形状为球形孔时, 其表面积为

$$S_R = S(1 + 3P_V) - \frac{\pi(\bar{D})^2}{2} N \int_0^a F(x) dx + \Delta S_C \quad (1)$$

孔形状为十四面体时, 其表面积为

$$S_R = S(1 + 5.14P_V) - 0.766\pi(\bar{D})^2 N \int_0^a F(x) dx + \Delta S_C \quad (2)$$

式中 S_R 为泡沫铝的实际表面积; S 为假设泡沫铝表面光滑无孔的表面积; P_V 为体孔隙率; \bar{D} 为平均孔径; N 为表面孔的个数; $F(x)$ 为孔径分布函数; ΔS_C 为表面粗糙度引起的表面积的增加值。

从式(1)和(2)可以看出, 孔结构和表面积关系密

切。在考虑粗糙表面的情况下,无论是孔洞为球形孔还是多面体孔的情况,其平均孔径 \bar{D} 一定,体孔隙率 P_V 越大,实际表面积 S_R 越大;体孔隙率 P_V 一定,平均孔径 \bar{D} 越小,实际表面积 S_R 越大。泡沫铝的表面积越大,与腐蚀介质接触的面积就越大,所以腐蚀就越严重,表面积为造成表 1 和表 2 腐蚀性能实验结果显著差异的原因。因此,孔结构对泡沫铝合金腐蚀性能影响明显。

此外,由于孔隙率高,孔的连通和裂纹增加,孔的缺陷增多,孔壁厚度变薄,容易导致阴离子聚集,导致穿孔及剥落,所以,高孔隙率泡沫铝的腐蚀速度要快于低孔隙率泡沫铝的。

总体看来,Al-Cu 基泡沫铝合金在含有 Cl^- 的介质中是不耐腐蚀的,腐蚀程度要比实体 Al-Cu 合金严重得多。这可能由于泡沫铝及合金是以金属为骨架的多孔结构,表面粗糙,容易引起 Cl^- 和氧的聚集,使腐蚀加快。当点蚀到一定程度,会引起穿孔,继而导致剥落。

2.2 不同基体成分的泡沫铝的耐腐蚀性能比较

表 3 所列为泡沫铝及泡沫铝合金腐蚀实验结果。试样尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,腐蚀介质为 $3.5\% \text{NaCl} + 1\% \text{H}_2\text{O}_2$,腐蚀时间为 96 h,腐蚀后试样用 $5\% \text{HNO}_3 + 1\% \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 清洗。从表 3 中看出,3 种泡沫铝及泡沫铝合金中 Al-Cu 基泡沫铝合金耐腐蚀性能最差,Al-Mg-Re 基防锈泡沫铝耐腐蚀性能最好。在相同的实验条件下,Al-Cu 基泡沫铝合金的质量损失率达到了 13.68%,泡沫纯 Al 为 7.95%。而 Al-Mg-Re 基防锈泡沫铝合金没有质量损失,反而有增质现象。可能是因为表面无腐蚀产物,而在含有 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 的溶液中被氧化,表面形成氧化膜造成的。图 1 所示为 3 种泡沫铝样品腐蚀后的外观形貌。可以看出,泡沫纯铝(图 1(c))和 Al-Cu 基泡沫铝合金(图 1(b))的样品腐蚀比较

严重,呈黑灰色,仔细观察发现表面呈溃疡状全面腐蚀,而防锈泡沫铝(图 1(a))的外表光亮,没有腐蚀痕迹,耐腐蚀性能优异。

从表 3 可知,泡沫铝的物理化学性能与基体成分关系密切。基体铝合金中的耐蚀性与合金中各种相的

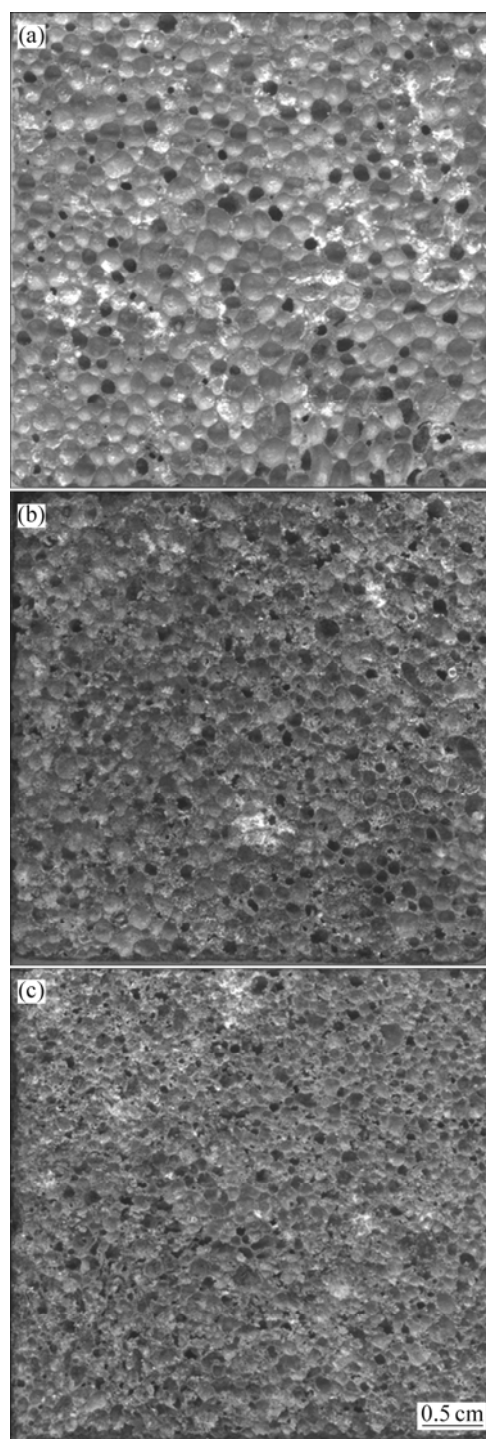


图 1 不同泡沫铝腐蚀外观形貌

Fig.1 Morphologies of foamed aluminum and alloys after corrosion: (a) Anticorrosive closed-cell foamed Al-Mg-Re alloy; (b) Foamed Al-Cu alloy; (c) Foamed aluminum

表 3 不同成分泡沫铝腐蚀实验结果

Table 3 Corrosion results of several foamed aluminum and alloys

Sample	Porosity/%	m_0/g	m_1/g	$A\%$
Al-Mg-Re	80.9	8.503 6	9.240 6	-8.67
Al	77.4	10.042 0	9.243 4	7.95
Al-Cu	77.9	9.852 3	8.504 1	13.68

电极电位有很大关系。一般基体相为阴极相, 第二相为阳极相, 合金具有较高的耐蚀性; 若基体相为阳极相, 第二相为阴极相, 则第二相电极电位越高, 数量越多, 铝合金腐蚀越严重^[16]。与纯铝相比, 含镁的固溶体为阳极, 而含铜的固溶体为阴极。因此, Al-Mg 合金具有较好的耐蚀性, 而 Al-Cu 基泡沫铝合金的耐蚀性能不好。Al-Mg 合金中, 在固溶状态, 镁全部溶解, 合金成为单一的 α 固溶体, 整个铸件构成一个等位体, 在腐蚀介质中不易发生电化学腐蚀。同时, 镁和稀土元素是被广泛认为具有抗蚀性的元素, 化学活性很高, 析出的镁和稀土在合金中浓集在晶胞或枝晶间, 对降低铝的电极电位有积极作用。经过镁和稀土的双重作用, 使得防锈闭孔泡沫铝合金具有优异的耐腐蚀性能。而 Al-Cu 基泡沫铝合金中, 因铜元素的存在, 造成成分的不均匀(如杂质等)、组织结构的不均匀、物理状态的不均匀等, 构成微电池容易造成局部腐蚀, 因而耐腐蚀性能较差。

2.3 稀土对泡沫铝及合金耐腐蚀性的影响

表 4 和表 5 所列分别为不同含量稀土对泡沫铝及合金耐腐蚀性能影响的实验结果。试样固态孔隙率为 82.5%、孔径相近, 试样尺寸为 40 mm×20 mm×5 mm, 腐蚀介质为 3.5%NaCl+1%H₂O₂, 腐蚀时间为 96 h, 腐蚀后试样用 5%HNO₃+1%K₂Cr₂O₇ 清洗。可以看出, 在泡沫纯铝和铝合金中添加稀土元素对其耐腐蚀性能有一定的影响。稀土含量较低时, 随着稀土含量的增加, 泡沫铝的耐腐蚀性能也随之有所提高。当稀土含量达到 0.6%时, 耐腐蚀性能最好。当稀土含量超过 0.6%时, 泡沫铝的耐腐蚀性能有所下降。当稀土含量超过 0.8%时, 腐蚀程度随稀土元素含量的增加, 腐蚀加剧明显。在所有的试样中, 腐蚀现象均很明显, 表面产生胶状腐蚀产物, 最短腐蚀时间少于 6 h。

表 4 不同稀土含量的泡沫纯铝腐蚀实验结果
Table 4 Corrosion results of foamed aluminum with different contents of RE

w(RE)/%	<i>m</i> ₀ /g	<i>m</i> ₁ /g	<i>A</i> /%
0	1.987 9	1.914 7	3.68
0.4	2.014 3	1.940 6	3.66
0.6	1.996 8	1.946 3	2.53
1.0	2.134 6	2.065 4	3.24
1.5	2.221 3	2.093 4	5.76

表 5 不同稀土含量的 Al-Cu 基泡沫铝合金腐蚀实验结果
Table 5 Corrosion results of foamed Al-Cu alloy with different contents of RE

w(RE)/%	<i>m</i> ₀ /g	<i>m</i> ₁ /g	<i>A</i> /%
0	1.998 1	1.892 2	5.3
0.4	1.997 4	1.921 5	3.8
0.6	2.046 9	1.983 4	3.1
0.8	2.155 6	2.078 0	3.6
1.0	1.979 9	1.785 9	9.8
1.2	1.998 3	1.768 5	11.5
1.6	2.424 3	2.130 9	12.1

在泡沫铝及 Al-Cu 基泡沫铝合金中添加稀土元素时, 可能因稀土金属的原子半径大, 极易失掉最外层 2 个 s 电子和次层 5d 的一个电子或 4f 的一个电子, 而成三价离子。因此稀土金属在化学反应中异常活泼, 在盐水中极容易与 Cl⁻或 O₂²⁻ 反应, 生成致密稀土氧化物或氯化层, 从而对泡沫铝有一定的保护作用^[17]。宫素珍等^[18]的研究表明, Al-Cu 合金中添加适量混合稀土元素后其击穿电位值普遍升高, 不同程度地提高了合金的耐蚀性。当稀土含量较多(>0.6%)时, 耐腐蚀性下降。这可能是由于过量稀土的加入, 导致稀土偏聚, 不能发挥稀土作用。

总体看来, 虽然稀土元素的加入对泡沫铝及 Al-Cu 基泡沫铝合金的耐腐蚀性能有影响, 但影响较为有限。

2.4 改善泡沫铝及泡沫铝合金耐腐蚀性能的途径

泡沫铝的耐蚀性(腐蚀稳定性)是一种既决定于金属本身, 又决定于介质特性和环境条件的相对性质。综合这些因素, 提高耐腐蚀性能的可能途径有:

1) 在可能的条件下, 尽可能采用低孔隙率球形孔泡沫铝及合金

从式(9)、(10)及表 1 和表 2 可见, 孔隙率低、孔径小的泡沫铝及低孔隙率的球形孔泡沫铝及合金具有较小的表面积, 具有较好的耐腐蚀性能。而孔隙率低、孔径小的泡沫铝及合金常表现为球形孔。所以在应用过程中, 在其它性能指标满足需要的前提下, 尽可能采用低孔隙率的球形孔泡沫铝合金。

2) 添加适量稀土元素, 必要时采用防锈泡沫铝
改善金属材料耐腐蚀性的原理是从提高材料的热

力学稳定性角度出发,改善合金组成,基本原理是用在某种介质中热力学稳定组元使不耐蚀金属合金化,以实现保护的目的。在泡沫铝及合金中添加稀土元素,对提高耐腐蚀性能有一定的作用,但较为有限(表 4)。相对于其它成分的泡沫铝及合金,防锈泡沫铝具有优异的耐腐蚀性能(表 3)。所以,在应用过程中,可添加稀土金属,调整基体成分,改善其耐腐蚀性能,必要时可采用防锈泡沫铝。

3) 对泡沫铝进行表面处理

借鉴铝的表面处理工艺,泡沫铝的表面处理途径有:阳极氧化、化学转化膜、有机高聚物涂装、电镀、珐琅和搪瓷涂层技术等。刘兵^[19]采用阳极氧化和化学转化膜工艺对通孔泡沫铝进行了表面处理,实验结果见表 6。结果表明,阳极氧化和化学转化膜工艺对提高泡沫铝耐腐蚀性能有一定的效果。其中,阳极氧化处理膜要远比化学转化膜的厚度大,阳极氧化处理后的泡沫铝耐蚀性要强于化学转化膜。但是在阳极氧化过程中由于泡沫铝的表面积较大,氧化电流远大于一般情况下铝合金的氧化电流,因此大尺寸的泡沫铝如何在阳极氧化过程中保证强电流也是有待解决的重要问题。化学转化处理工艺简单,对耐蚀性要求不高的场合,仍然可采用化学转化处理的方法。

表 6 化学转化处理和阳极氧化处理泡沫铝试样腐蚀前后的耐腐蚀性能

Table 6 Corrosion resistances of porous aluminum after anodic oxidation and chemical transform

Surface treatment	m_0/g	m_1/g	$A/\%$
Chemical transform	8.715 3	8.504 3	2.42
	8.376 4	8.172 5	2.41
	8.705 7	8.504 1	2.32
Anodic oxidation	8.873 7	8.741 5	1.49
	8.446 2	8.319 5	1.50
	8.417 6	8.291 1	1.50

某单位通过人造海水全浸实验、中性盐雾实验、乙酸加速盐雾实验,对比评价表面喷漆的泡沫铝试样的耐腐蚀效果的实验结果表明,喷漆试样的腐蚀明显轻于未喷漆试样的腐蚀,即泡沫铝表面喷漆后,可明显改善其耐腐蚀性能。

3 结论

1) 孔结构对耐腐蚀性能影响明显,表面积不同是主要原因。超轻多孔金属的耐腐蚀性远低于实体金属;在孔径相近情况下,孔隙率高的泡沫铝,其表面积大,耐腐蚀性能较差。

2) 基体成分对超轻多孔金属耐腐蚀性能有明显差异。Al-Mg-Re 基防锈泡沫铝具有优异的耐腐蚀性能,而其它泡沫 Al 合金的耐腐蚀性能较差;在泡沫铝及合金中添加适量稀土元素,可改善其耐腐蚀性能。

3) 提高泡沫铝耐腐蚀性能的途径有 3 种:一是尽可能采用低孔隙率球形孔泡沫铝及合金;二是采用 Al-Mg-Re 防锈泡沫铝,或在泡沫铝及合金中添加适量稀土元素;三是对泡沫铝进行喷漆处理或阳极氧化、化学转化处理等。

REFERENCES

- [1] Banhart J. Manufacture, characteristic and application of cellular metals and metal foams[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46(6): 559-632.
- [2] Ramamurty U, Paul A. Variability in mechanical properties of a metal foam[J]. Acta Materials, 2004, 52(4): 869-876.
- [3] Papadopoulos D P, Konstantinidis I Ch, Papanastasiou N, et al. Mechanical properties of Al metal foams[J]. Materials Letters, 2004, 58(21): 2574-2578.
- [4] 何德坪, 何思渊, 尚金堂. 超轻多孔金属的发展与物理学[J]. 物理学进展, 2006, 26(3): 346-350.
HE De-ping, HE Si-yuan, SHANG Jin-tang. Progress in ultra-light porous metal and physics[J]. Progress in Physics, 2006, 26(3): 346-350.
- [5] 何思渊, 臧晓云, 何德坪. 轻质能量吸收器[J]. 中国科学 B 辑, 2005, 35(4): 265-267.
HE Si-yuan, ZANG Xiao-yun, HE De-ping. Super light weight energy absorber[J]. Science in China (Series B), 2005, 35(4): 265-267.
- [6] Azzi W, Roberts W L, Rabiei A. The study on pressure drop and heat transfer in open cell metal foams for jet engine applications[J]. Materials and Design, 2007, 28(2): 569-574.
- [7] Banhart J, Baumeister J, Weber M. Damping properties of aluminum foams[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, A205(1/2): 221-228.
- [8] Csilla K, Frantisek C, Zsuzsanna R, et al. Acoustic emission measurements on metal foams[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004, 378(1/2): 145-150.

- [9] Baumeister J, Banhart J, Weber M. Aluminum foams for transport industry[J]. *Materials and Design*, 1997, 18(4/6): 217–220.
- [10] Thoma K, Schafer F, Hiermaier S, et al. An approach to achieve progress in spacecraft shielding[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(5): 1063–1–75.
- [11] Ashby M F, Lu T J. Metal foams: a survey[J]. *Science in China(B)*, 2003, 46(6): 521–532.
- [12] Gibson M A, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*[M]. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 15–24.
- [13] 张勇明, 何德坪, 戴 戈. 稀土对泡沫铝及泡沫铝合金耐腐蚀性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2006, 30(7): 19–21.
ZHANG Yong-ming, HE De-ping, DAI Ge. Effect of rare earths on the corrosion resistance of aluminum and aluminum alloy foam[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2006, 30(7): 19–21.
- [14] 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 Chemistry*, 2004, 47(5): 407–413.
- [15] 何德坪, 张勇明, 尚金堂, 等. 防锈泡沫铝合金及其制备方法. CN 200610085404.0[P]. 2006–06–13.
HE De-ping, ZHANG Yong-ming, SHANG Jin-tang, et al.. anticorrosive foamed aluminum and its methods for manufacture. CN 200610085404.0[P]. 2006–06–13.
- [16] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 1985.
CAO Chu-nan. *Principle of erosive electrochemistry*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1985.
- [17] 范树清. 金属防锈及其实验方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
FAN Shu-qing. *Metal rust preventives and experimental method*[M]. Beijing: China Machine Press, 1985.
- [18] 宫素珍, 赵敏寿, 唐定骧. 稀土对铝合金耐腐蚀性能影响的研究[J]. *稀土*, 1987, 8(5): 36–40.
GONG Su-zhen, ZHAO Min-shou, TANG Ding-xiang. Effect of rare earth on the corrosion resistance of Al alloy[J]. *Journal of Rare Earths*, 1987, 8(5): 36–40.
- [19] 刘 兵. 铝合金熔体在多孔介质中的二维微管渗流过程[D]. 南京: 东南大学, 2006: 57–59.
LIU Bing. *The process of Al-alloy melt infiltrating in two-dimen micro-tube of porous medium*[D]. Nanjing: Southeast University, 2006: 57–59.

(编辑 何学锋)