

# 泡沫镁制备技术研究现状及其在 航空航天领域的应用前景

卢翰林, 陈乐平, 周全

(南昌航空大学 航空制造工程学院, 南昌 330063)

**摘要:** 泡沫镁作为一种新型功能材料, 近年来逐渐受到了国内外的广泛关注, 但由于镁过于活泼, 易引起爆炸, 难以在生产中被大量使用, 故关于泡沫镁的研究较少。主要综述了泡沫镁阻尼性能、吸声性能、吸能性能、散热性能、生物医学性能和电磁屏蔽性能等几种主要的性能特点, 进而综述了粉末冶金法、熔体发泡法、渗流铸造法等几种常见的泡沫镁材料制备工艺的研究进展, 并结合笔者的研究理解对几种制备工艺进行了对比, 分析了各种制备方法的优缺点。在此基础上对泡沫镁材料在航空航天领域上的应用进行了分析, 表明了其在航空航天领域有着广阔的应用前景。

**关键词:** 泡沫镁; 性能特点; 制备工艺; 航空航天; 应用前景

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.02.017

**中图分类号:** TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)02-0104-05

## Research Status and Aerospace Application Prospects of Foamed Magnesium Preparation Technology

LU Han-lin, CHEN Le-ping, ZHOU Quan

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**ABSTRACT:** As a new functional material, foam magnesium has attracted more and more attentions at home and abroad in recent years. But magnesium is too active, and it is likely to cause explosion and is difficult to be used in production. Therefore, there are few researches on foam magnesium. In this paper, the main properties of foam magnesium, such as damping capacity, sound absorption, energy absorption, heat dissipation, biomedical properties and electromagnetic shielding performance, were reviewed. The research progress of several common foam magnesium material preparation methods such as powder metallurgy method, melt foaming method and percolation casting method were reviewed. The advantages and disadvantages of various preparation methods were analyzed in combination with understanding of the authors. On this basis, the application of foam magnesium materials in aerospace field was analyzed, showing that it has broad application prospects in the aerospace field.

**KEY WORDS:** foam magnesium; performance characteristics; preparation technology; aerospace; application prospects

20世纪50年代以来, 泡沫金属因其密度低、比刚度和比强度高、阻尼性能良好等优点, 引起了国内外研究人员的广泛关注。铝由于其较稳定、储量丰富、

密度小等优点, 一直是泡沫材料中的热门。由于镁的密度比铝小, 电磁屏蔽性能比铝好, 泡沫镁同样是非常有潜力的一种材料, 但由于镁较活泼, 易引起氧化

收稿日期: 2020-01-12

基金项目: 南昌航空大学第十四届“三小”项目(2019HZ043)

作者简介: 卢翰林(1999—), 男, 材料成型及控制工程专业本科生。

作者简介: 陈乐平(1964—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为新型材料制备技术。

燃烧甚至爆炸,故关于泡沫镁的研究较少。文中主要介绍了泡沫镁的几种性能特点、制备方法,并对泡沫镁在航空航天领域的应用前景进行了展望。

## 1 泡沫镁的性能

泡沫镁作为一种多孔材料,与实体金属相比,有着更优良的阻尼性能和吸能性能,泡沫镁的特殊结构,使其兼具优良的结构性和功能性,其密度比泡沫铝还小,比强度和比刚度也比泡沫铝高,在功能上,其阻尼性能和抗电磁干扰能力比泡沫铝更好,在航空航天领域有着广阔的应用前景。

### 1.1 阻尼性能

泡沫镁材料由气孔与镁基体组成,其组织结构不均匀,内部存在许多孔隙,使其压缩应力应变曲线存在一段较长平台区,即泡沫镁具有优良的阻尼性能<sup>[1]</sup>。封伟民<sup>[2]</sup>测试了 AZ91 合金与泡沫镁的阻尼性能,应变相同的情况下,相较于 AZ91/SiC 复合材料,泡沫镁材料具有更大的阻尼值,其阻尼性能更优。

### 1.2 吸声性能

入射到泡沫镁材料内部的声波在孔隙结构中传播时,会产生振动,进而引起孔隙内的空气运动,使孔壁与空气产生摩擦,由于流体具有粘滞性,孔壁表面的空气流速缓慢,此时一部分声能由于摩擦和粘滞力的影响转变为其他能量,空气与孔壁接触也会产生热交换,使声波衰减,从而使泡沫镁材料具有吸声性能。郑照彬<sup>[3]</sup>研究了开孔泡沫镁的吸声性能,研究表明开孔泡沫镁的孔隙率增大会增强其吸声性能。

### 1.3 吸能性能

泡沫镁受到外加应力作用而压缩时,由于其独特的孔洞结构,表面的塑性变形比实体金属的塑性变形大,且由于具有较长的应力平台,可吸收大量的能量,故具有优良的吸能性能,因此泡沫镁在缓冲吸能方面的应用较为广阔。郑照彬<sup>[3]</sup>研究了开孔泡沫镁的吸能性能,研究表明孔隙率增大会导致其吸能性能降低。

### 1.4 散热性能

由镁基体和孔隙组成的泡沫镁材料有较高的比表面积,热交换面积较大,故孔隙中的空气流通时,空气的热量能迅速且均匀地传导至泡沫镁各部分,因此泡沫镁可应用于散热器领域。王超星等<sup>[4]</sup>对强制对流下通孔泡沫镁的孔隙率、孔径和散热效果的关系进行了研究,发现泡沫镁孔径对其散热性能影响最大,其次为孔隙率。李贤昌等<sup>[5]</sup>也探讨了强制对流下泡沫镁散热器的散热情况,发现其散热效果比传统散热器的散热效果更好,且其孔径、孔隙率的增大会使其综

合散热性能增强。李楠楠等<sup>[6]</sup>对 LED 灯上泡沫镁合金散热器的散热效果进行了研究,发现其底座厚度、孔结构及孔径对散热效果影响最大,且与原散热器相比,泡沫镁合金散热器使 LED 灯的温度下降了 1.2~3.9 °C。南森<sup>[7]</sup>研究了自然对流和强制对流下孔隙率泡沫镁合金的散热性能,发现无论在自然对流还是强制对流条件下,泡沫镁散热器的散热效果都优于传统散热器。徐梦欣<sup>[8]</sup>分析了泡沫镁合金散热器的散热原理,并以泡沫镁材料为散热体,制作出了电脑 CPU 散热器。

### 1.5 生物医学性能

泡沫镁可作为生物材料应用于医学。例如泡沫镁可以用于制作骨架,因为人体体内含有镁元素,不会对泡沫镁产生免疫排斥。另外,从力学性能方面看,泡沫镁与人体骨骼的力学相容性好,故泡沫镁材料在骨骼工程方面有良好的应用前景<sup>[9-15]</sup>。沈剑<sup>[16]</sup>利用碱热处理法对泡沫镁表面进行改性,研究了不同孔隙率的泡沫镁经多孔镁碱热处理后在 SBF 中的耐腐蚀性能,结果表明泡沫镁经碱热处理后抗腐蚀性能明显加强,同时发现泡沫镁孔隙率提高时,弹性模量下降,这为泡沫镁的弹性模量与人体相匹配提供了可能。

### 1.6 电磁屏蔽性能

泡沫镁的多孔结构使其具有较大的比表面积。当电磁波传播至泡沫镁的孔洞中时,会发生多次反射和干涉,使得电磁波能量被大量消耗,故泡沫镁有着优良的电磁屏蔽能力,适用于航空航天等领域。

## 2 泡沫镁的制备方法

随着泡沫镁材料的开发越来越被重视,国内外发展起来了一系列泡沫镁制备技术,主要包括粉末冶金法、熔体发泡法和渗流铸造法等。

### 2.1 粉末冶金法

日本名古屋(AIST)研究所的 Wen 等<sup>[17]</sup>最早使用粉末冶金法制备泡沫镁。他们以镁粉为原料,加入尿素作为发泡剂,将两者混合均匀并压制成紧密的预制体,放入容器内加热烧结,待发泡剂受热分解即可获得带有孔隙结构的泡沫镁材料。后续也有一些研究人员进行了改善,郭权芬<sup>[18]</sup>使用的造孔剂为  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ,对工艺参数和原料进行了改进,运用粉末冶金法的原理,成功实现了开孔泡沫 Mg-6Al 合金的制备,成品的孔隙率为 30%~70%,平均圆度值为 0.75,平均孔径约为 1.1 mm,孔壁厚度约为 100~300  $\mu\text{m}$ 。孙红霞<sup>[19]</sup>采用的发泡剂为  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,为避免镁发生氧化燃烧甚至爆炸,在镁发泡时充入氩气,使其在惰性气体氛围中进行发泡。沈剑等<sup>[16]</sup>运用粉末冶金法原理成

剂制备出泡沫镁,其孔隙率最低为20%,最高可达55%,且研究了泡沫镁孔隙率对其压缩性能及抗弯强度的影响。

使用粉末冶金法制备泡沫镁方便快捷,制作周期较短,且可通过控制发泡剂的颗粒大小与含量调整泡沫镁的孔隙大小和孔隙率,是常用的制作泡沫镁的工艺方法之一,但是此方法制作的泡沫镁孔隙率一般较低,孔隙范围较窄。

## 2.2 熔体发泡法

熔体发泡法是制备泡沫镁的一项成熟工艺,其原理是熔融金属镁中的发泡剂受热会发生化学反应,分解出气体,金属液冷却凝固时气体逸出形成气泡,故泡沫镁材料最后会形成孔隙结构。

芦国强<sup>[20]</sup>运用熔体发泡法的原理,成功实现了泡沫镁合金的制备,并且研究了制备工艺对泡沫镁材料制备效果的影响,结果表明使用SiC和Ca作为复合增粘剂可以达到更好的效果,且总结了此情况下的最佳工艺参数。南昌航空大学周全等<sup>[21]</sup>以MgCO<sub>3</sub>为发泡剂, SiC为增粘剂,采用熔体发泡法制备出了泡沫镁材料。此方法以MgCO<sub>3</sub>为发泡剂,降低了熔体发泡法制作泡沫镁的成本,为泡沫镁通过熔体发泡法实现大批量生产提供了更多的可能。

熔体发泡法制备泡沫镁操作简单,成本低廉,有利于大批量生产,然而发泡过程受影响较多,易导致泡沫镁孔隙率、孔隙大小等不稳定。

## 2.3 渗流铸造法

泡沫镁材料的制备方法中,渗流铸造法也是较为成熟的一种方法,其原理是铸型中带有孔隙的预制体由水溶性盐颗粒制成,铸型上部与大气接触时,控制底部气压小于大气压,存在一定压力差,此时将熔融的金属镁或镁合金注入铸型中,金属液就被吸进预制体中,待其冷却凝固后取出,再进行必要的机械加工得到需要的形状后,用温水溶解除去填料颗粒,即得到带有孔隙结构的泡沫镁材料。

NaCl和MgSO<sub>4</sub>常被用作渗流铸造法的填料颗粒,但NaCl对镁具有一定的腐蚀性,故MgSO<sub>4</sub>被用作填料颗粒的频率更高。陈乐平等<sup>[22]</sup>对真空渗流法制备泡沫镁合金的工艺进行了研究,制备出了孔径为1~2 mm的开孔泡沫镁合金,并对填料进行了比较,发现相比于NaCl, MgSO<sub>4</sub>合金基体的腐蚀较少。不过也有学者采用了特别的填料颗粒, WANG等<sup>[23]</sup>以盐-面粉混合料为填料,运用熔体渗透法原理成功实现高纯度、高质量的开孔泡沫镁制备。Jiang G等<sup>[24]</sup>采用了渗流铸造法和酸腐蚀相结合制备出了孔隙率为58.5%,平均孔径为490 μm,具有双层结构的多孔钛镁复合材料。

渗流铸造法工艺流程中的影响因素少,便于控

制,操作也较为简单,有利于泡沫镁产品的大批量机械化生产。缺点是镁作为活泼金属,在渗流过程中易被氧化,导致燃烧甚至爆炸,故对设备的安全防护能力具有较高的要求。陈乐平等<sup>[25]</sup>对真空渗流法制备泡沫镁合金的工艺安全性进行了研究,分析了渗流时和渗流后镁合金发生燃烧和爆炸的原因,发现渗流时镁液会与水或氧气接触反应而燃烧甚至爆炸,渗流后镁合金的周围温度过高而引起镁燃烧甚至爆炸。

## 2.4 其他方法

金属-气体共晶定向凝固法也在多孔金属材料的制备方法中占了一席之地,也称GASAR法。此方法的制备原理是先真空环境下熔化金属,然后向金属液中通入高压气体,气体浓度达到饱和后,由于氢气或其他气体在金属固液两相中的溶解度不同,故金属液凝固时,气体会析出形成气泡并与固相金属协同定向生长,形成莲藕状的气孔组织。与传统方法制备的多孔镁相比, GASAR法制备的多孔镁有着更优异的声学、热学、力学和吸震等性能,不过其凝固过程难以控制,金属的孔隙分布、孔隙大小较不均匀。Kang等<sup>[26]</sup>选用NaCl为造孔剂,利用放电等离子体烧结(SPS)技术成功制备了泡沫镁材料,其孔径约为240 μm,孔隙率分别为60%, 70%, 80%。放电等离子体烧结(SPS)技术可提高泡沫镁在SBF溶液中的耐蚀性,缺点是放电等离子体烧结工艺设备复杂,成本较高。陈勇<sup>[27]</sup>采用微波烧结技术制备了泡沫镁,并对其进行了SiC颗粒增强(形成SiC/Mg复合材料)和微弧氧化表面改性研究。微波烧结技术的优点是快速高效、节能无污染,并可提高材料综合力学性能和促进致密化,缺点是技术复杂,操作难度大。

## 3 泡沫镁在航空航天领域的应用前景

泡沫镁材料在航空航天领域有着广阔的应用前景。航空航天构件材料的重要发展方向之一就是轻量化,目前实际应用的最轻金属结构材料就是镁合金。泡沫镁具有多孔结构,比一般的镁合金更轻,且拥有许多优良性能,可作为结构和功能材料应用于飞行器和航天器上,大大减轻飞行器和航天器的重量,带来巨大的减重效益。减重相同质量的条件下,商用飞机带来的燃油费用节省是汽车燃油费用节省的近100倍,而战斗机的燃油费用节省又是商用飞机的近10倍,尤其是提高战斗机的机动性能及速度可大大提高其生存能力和战斗力。泡沫镁的高比刚度、高比强度,使其可作为飞机的尾翼、直升机的减速器机匣、航天器的电控箱等的制造材料之一,可以减轻较多重量<sup>[28]</sup>。泡沫镁优良的阻尼性能、吸能性能,使其可作为飞机防震座椅的佳选材料,为乘客提供更加舒适的体验<sup>[29]</sup>。

泡沫镁由于其独特的孔洞结构，塑性变形比实体金属的塑性变形大，且具有较长的应力平台，能吸收大量的能量，吸能性能良好，可用于制作飞机起落架和航天器回收舱的舱底，减缓着陆时的冲击<sup>[30]</sup>。泡沫镁亦可看作是由三维网状金属骨架和孔洞所组成的复合材料，当其受到外力作用时，基体会产生复杂的不均匀应变，造成能量耗散，故泡沫镁可以作为一种新型轻质高阻尼材料应用于喷气机控制盘的外壳等<sup>[31]</sup>。人造卫星、火箭飞船等软着陆时依然会承受较大的冲击，泡沫镁材料则可以用于制作着陆器，减缓冲击，保护航天器。优良的电磁屏蔽性能和吸声性能也可使其作为飞机夹层结构填充在蒙皮间，降低外界对飞机内部的干扰<sup>[29]</sup>。

泡沫镁材料的良好散热性能可使其用于飞机发动机外壳，加快散热，延长发动机的工作时间。

## 4 结语

泡沫镁具有诸多优良性能，无论是作为结构材料还是功能材料，都领先于许多传统材料，其制备方法也较多，有广阔的应用前景，特别是在航空航天领域有着很大的潜力。主要介绍了泡沫镁材料的阻尼性能、吸能性能、电磁屏蔽性能等性能特点；简述了泡沫镁制备方法中的粉末冶金法、熔体发泡法、渗流铸造法，并分析了每种方法具备的优势及存在的问题；概括了泡沫镁材料在航空航天领域的应用前景。由于镁的化学性质活泼，泡沫镁易在制备过程中被氧化，引起燃烧甚至爆炸，所以现今国内外对泡沫镁材料基本还停留在研究阶段，较少有应用实例，但泡沫镁材料优势巨大，相信随着其研究的继续深入及制备工艺的不断完善，泡沫镁材料必会更加广泛地被应用于生产生活中。

### 参考文献：

- [1] 张铭显. 两步法制备泡沫镁工艺的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.  
ZHANG Ming-xian. Preparation of Foam Magnesium by Two Step Method[D]. Nanchang: Nanchang Aeronautical University, 2012.
- [2] 封伟民. 泡沫镁材料的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
FENG Wei-min. Preparation and Properties of Foam Magnesium Materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [3] 郑照彬. 球形孔开孔泡沫镁的性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.  
ZHENG Zhao-bin. Properties of Spherical Porous Magnesium Foam[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [4] 王超星, 王芳, 武建国, 等. 泡沫镁 CPU 散热性能的影响因素分析[J]. 铸造设备与工艺, 2012(4): 11—13.  
WANG Chao-xing, WANG Fang, WU Jian-guo, et al. Factors Affecting the Heat Dissipation Performance of Foamed Magnesium CPU[J]. Casting Equipment and Technology, 2012(4): 11—13.
- [5] 李贤昌, 张瑛, 王芳. 泡沫镁散热器强制对流散热性能模拟研究[J]. 铸造设备与工艺, 2017(3): 19—22.  
LI Xian-chang, ZHANG Ying, WANG Fang. Simulation Study on Forced Convection Heat Dissipation Performance of Foam Magnesium Radiator[J]. Casting Equipment and Technology, 2017(3): 19—22.
- [6] 李楠楠, 庞晓军, 王芳, 等. 泡沫镁合金散热器对 LED 灯散热性能影响因素分析[J]. 铸造设备与工艺, 2015(2): 43—45.  
LI Nan-nan, PANG Xiao-jun, WANG Fang, et al. Factors Affecting the Heat Dissipation Performance of LED Magnesium Alloy Radiator[J]. Casting Equipment and Technology, 2015(2): 43—45.
- [7] 南森. 中孔隙率泡沫镁合金散热性能研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2016.  
NAN Sen. Heat Dissipation Performance of Medium Porosity Foam Magnesium Alloy[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2016.
- [8] 徐梦欣. 泡沫镁合金的制备与性能研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2010.  
XU Meng-xin. Preparation and Properties of Foamed Magnesium Alloy[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2010.
- [9] NAKAJIMA H, HYUN S K, OHASHI K, et al. Fabrication of Porous Copper by Unidirectional Solidification Under Hydrogen and Its Properties[J]. Colloids and Surfaces, 2001, 179: 209—214.
- [10] GENG F, TAN L L, ZHANG B C, et al. Study on Beta-TCP Coated Porous Mg as a Bone Tissue Engineering Scaffold Material[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2009, 25(1): 123—129.
- [11] CARBONERAS M, GARCÍA-ALONSO M C, ESCUDERO M L. Bio-degradation Kinetics of Modified Magnesium-based Materials in Cell Culture Medium[J]. Corrosion Science, 2011, 53(4): 1433—1439.
- [12] XIN Y, HU T, CHU P. In Vitro Studies of Bio-medical Magnesium Alloys in a Simulated Physiological Environment: a Review[J]. Acta Biomaterialia, 2011, 7(4): 1452—1459.
- [13] 高家诚, 乔丽英. 镁基可降解硬组织生物材料的研究进展[J]. 功能材料, 2008, 39(5): 705—708.  
GAO Jia-cheng, QIAO Li-ying. Research Progress of Magnesium Based Degradable Hard Tissue Biomaterials[J]. Functional Materials, 2008, 39(5): 705—708.
- [14] YANG J, CUI F, LEE I S. Surface Modifications of Magnesium Alloys for Biomedical Applications[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2011, 39(7): 1857—1871.

- [15] HAO G L, HAN F S, LI W D. Processing and Mechanical Properties of Magnesium Foams[J]. *Journal of Porous Materials*, 2009, 16(3): 251—256.
- [16] 沈剑. 孔生物镁的制备、性能及其表面改性的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.  
SHEN Jian. Preparation, Properties and Surface Modification of Porous Biological Magnesium[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [17] WEN C E, YAMADA Y, SHIMOJIMA K, et al. Compressibility of Porous Magnesium Foam: Dependency on Porosity and Pore Size[J]. *Materials Letters*, 2004(58): 357—360.
- [18] 郭权芬. 泡沫镁合金的制备及其性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.  
GUO Quan-fen. Preparation and Properties of Foamed Magnesium Alloy[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [19] 孙红霞. 多孔镁的制备及镁合金表面磷酸钙涂层的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2005.  
SUN Hong-xia. Preparation of Porous Magnesium and Study of Calcium Phosphate Coating on Magnesium Alloy[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2005.
- [20] 芦国强. 闭孔泡沫镁的制备及其压缩性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.  
LU Guo-qiang. Preparation and Compression Properties of Closed Cell Magnesium Foam[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [21] 周全, 陈乐平. 熔体发泡法制备泡沫镁材料的研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2009, 29(3): 224.  
ZHOU Quan, CHEN Le-ping. Foamed Magnesium Prepared by Melt Foaming Method[J]. *Special Casting and Non-ferrous Alloys*, 2009, 29(3): 224.
- [22] 陈乐平, 周全, 庄建平. 真空渗流法制备泡沫镁合金的工艺研究[J]. *铸造*, 2008(4): 334—336.  
CHEN Le-ping, ZHOU Quan, ZHUANG Jian-ping. Preparation of Foam Magnesium Alloy by Vacuum Infiltration Method[J]. *Casting*, 2008(4): 334—336.
- [23] WANG X, LI Z, HUANG Y, et al. Processing of Magnesium Foams by Weakly Corrosive and Highly Flexible Space Holder Materials[J]. *Materials and Design*, 2014, 64: 324—329.
- [24] JIANG G, LI Q, WANG C, et al. Fabrication of Graded Porous Titanium-Magnesium Composite for Load-bearing Biomedical Applications[J]. *Materials & Design*, 2015, 67: 354—359.
- [25] 陈乐平, 周全. 真空渗流法制备泡沫镁合金的工艺安全问题[J]. *特种铸造及有色合金*, 2008(8): 591—593.  
CHEN Le-ping, ZHOU Quan. Process Safety Problems of Foam Magnesium Alloy Prepared by Vacuum Infiltration Method[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2008(8): 591—593.
- [26] KANG M H, JUNG H D, KIM S W, et al. Production and Bio-corrosion Resistance of Porous Magnesium with Hydroxyapatite Coating for Biomedical Applications[J]. *Materials Letters*, 2013, 108(5): 122—124.
- [27] 陈勇. 多孔镁的微波烧结制备及改性研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.  
CHEN Yong. Preparation and Modification of Porous Magnesium by Microwave Sintering[D]. Nanchang: Nanchang University of Aeronautics, 2015.
- [28] 吴国华, 陈玉狮, 丁文江. 镁合金在航空航天领域研究应用现状与展望[J]. *载人航天*, 2016, 22(3): 281—292.  
WU Guo-hua, CHEN Yu-shi, DING Wen-jiang. Research and Application of Magnesium Alloy in Aerospace[J]. *Manned Space Flight*, 2016, 22(3): 281—292.
- [29] 袁源平, 陈舸, 陈乐平, 等. 泡沫镁的制备及应用前景[J]. *上海航天*, 2019, 36(2): 78—83.  
YUAN Yuan-ping, CHEN Ge, CHEN Le-ping, et al. Preparation and Application Prospect of Foam Magnesium[J]. *Shanghai Aerospace*, 2019, 36(2): 78—83.
- [30] 胡中芸, 杨东辉, 李军, 等. 泡沫镁的制备及其性能和应用[J]. *材料导报*, 2014, 28(1): 79—85.  
HU Zhong-yun, YANG Dong-hui, LI Jun, et al. Preparation of Foam Magnesium and Its Performance and Application[J]. *Material Guide*, 2014, 28(1): 79—85.
- [31] 杨慧华, 郝刚领, 季先雨. 泡沫镁的制备及其性能与应用[J]. *价值工程*, 2015, 34(23): 141—142.  
YANG Hui-hua, HAO Gang-ling, LI Xian-yu. Preparation, Properties and Application of Foamed Magnesium[J]. *Value Engineering*, 2015, 34(23): 141—142.