

先进孔形微型泡沫铝及其复合结构研究现状与展望

王艳丽¹ 孙磊磊² 徐 宏¹ 王录才² 王 芳² 李国庆²
(1.中北大学材料科学与工程学院; 2.太原科技大学材料科学与工程学院)

摘 要 粉末压实熔化法(Powder Compact Melting,简称 PCM 法)是制备闭孔泡沫铝合金的方法之一。目前,通过对此方法进行改进,能够制备具有先进孔形(Advanced Pore Morphology,APM)的微型泡沫铝,所得产品内部为均匀的高孔隙率的多孔结构,并且利用所制得的微型泡沫铝,可以制备大尺寸的泡沫铝及其复合结构。综述了先进孔形微型泡沫铝及其复合结构的制备工艺,对其结构特征及力学性能进行了总结,分析了此工艺目前存在的问题,并对其发展前景进行了展望。

关键词 先进孔形微型泡沫铝;粉末压实熔化法;制备工艺;结构特征;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG496 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development Status and Prospect of Advanced Porous Micro Aluminum Foam and Its Composite Structure

Wang Yanli¹, Sun Leilei², Xu Hong¹, Wang Lucai², Wang Fang², Li Guoqing²
(1.School of Material Science and Engineering, North University of China;
2.School of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology)

Abstract: Powder compact melting (PCM) is one of the methods to produce aluminum alloy with closed pores. At present, micro aluminum foam with advanced pore morphology (APM) can be prepared by improving the method. The obtained products exhibit uniform porous structure with high porosity, and large-size aluminum foam and its composite structure can be prepared by utilizing the manufactured micro-aluminum foam. The preparation technology of advanced porous micro aluminum foam and its composite structure were reviewed, and its structural characteristics and mechanical properties were summarized. Meanwhile, the existing problems at the present stage were analyzed, and the development prospect was expounded.

Key Words: Advanced Pore Morphology (APM) Foam Aluminum, Powder Compact Melting(PCM), Preparation Process, Structural Characteristics, Mechanical Properties

泡沫金属是由金属基体和相互贯通或者封闭的气孔构成的多孔材料。泡沫金属中存在大量的孔洞,使其拥有不同于致密金属的特殊性能,如质量轻、高的吸能性、耐燃性、吸声性能等,成为兼具结构性与功能性的新型材料,极大地拓宽了泡沫金属的研究领域和应用范围。泡沫铝由于其质量轻、制造简便及成本低,成为研究及应用最广泛的一种泡沫金属,非常适合制备汽车的能量吸收元件、航空航天工业中的热量交换器,还可以作为过滤器、消音器,夹层结构中的核心材料和生物医用植入材料等^[1,2]。近年来,随着我国交通运输、航空航天和建筑业等的迅速发展,以及“一带一路”等战略的实施,对泡沫铝尤其是高质量泡沫铝有较大的需求,未

来 5 年泡沫铝的年需求量可能超 40 万 t,国内市场规模超过 200 亿元人民币^[3]。

泡沫金属制备方法主要分为直接发泡法和间接发泡法^[4]。直接发泡法是将气体注入液态金属获得气孔或添加化学发泡剂到熔体中通过化学发泡剂分解并释放气体获得气孔制备泡沫铝;间接发泡法通过熔化粉末压制的嵌入了气源的预制体金属材料,在熔化时释放气体并驱动发泡过程制备泡沫铝。在 20 世纪 50~60 年代 Ethyl 公司开发了可用于实际生产的泡沫金属^[5],到 20 世纪 70 年代,质量较高的泡沫铝才出现,但由于制造成本较高,在工业应用上受到限制。直到 20 世纪 80 年代,泡沫铝制备工艺迎来了第二次发展热潮,极大地

收稿日期:2020-10-06;修改稿收到日期:2020-10-18
基金项目:山西省自然科学基金资助项目(201901D111270);山西省重点研发(高新技术)资助项目(201803D121004)
第一作者简介:王艳丽,女,1985 年出生,博士研究生,太原(030024),E-mail:443976393@qq.com
通信作者:王录才,男,1965 年出生,教授,太原(030024),E-mail:283766362@qq.com
引用格式:王艳丽,孙磊磊,徐宏,等. 先进孔形微型泡沫铝及其复合结构研究现状与展望[J]. 特种铸造及有色合金, 2021,41(3):299-305.
WANG Y L, SUN L L, XU H, et al. Development status and prospect of advanced porous micro aluminum foam and its composite structure [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021,41(3):299-305.

拓宽了泡沫铝的应用范围,并出现一些优秀的泡沫铝制造公司,如 Pohltec Metalfoam GmbH、Cymat Corp、Aluinvent 和 Foamtech 等^[6]。我国自 20 世纪 80 年代中期开始对泡沫金属进行研究,先后对泡沫铝进行了大量的试验和系统性理论研究,并取得了一定的成果^[7~18]。目前,我国主要以直接发泡法生产泡沫铝板材。

国内外的学者对泡沫金属尤其是泡沫铝的制备工艺及相关性能进行了大量的研究^[19~41],尤其是利用粉末压实熔化法(Powder Compact Melting,简称 PCM 法)制备闭孔泡沫铝的研究。这种方法工艺简单,制造成本较低,但发泡剂的分解时间特别短,发泡过程不容易控制,在制备过程中存在排液现象,而且尺寸越大,排液现象越严重,容易导致气泡破裂或合并,出现特大孔,并且会出现上部气泡层,下部实体层的现象,整体气孔大小不均匀,造成孔结构不良甚至恶化。而且在制备大型或者异形结构时也存在诸多问题,如发泡过程中温度场差别大,传热现象复杂,难以精确控制,泡体的稳定性及孔结构的均匀性不易保证。几何结构的不稳定性导致物理性质的不一致,孔隙大小、形状变化甚至是较小的缺陷都会引起材料力学性能的不稳定。研究发现,将 PCM 法进行工艺改进,制备具有先进孔结构的小体积泡沫结构(Advanced Pore Morphology,简称 APM),将发泡过程和制造过程分开可以有效地解决这个问题^[42]。APM 微型泡沫铝制备工艺及理论研究的深入,为泡沫铝及其复合结构的制备提供了理论基础及生产经验,有望进一步促进泡沫材料的发展应用。

1 APM 微型泡沫铝制备工艺及原理

APM 微型泡沫铝制备工艺起源于传统的 PCM 法,其工艺过程为:将铝粉或铝合金粉和发泡剂的均匀混合,并压实成可发泡的小型预制体,放入加热炉中加热到一定温度,发泡剂发生热分解释放出气体并在预制体中形成气孔。随着气孔的形成及长大,预制体发生膨胀,然后对其快速冷却,得到孔隙结构均匀的 APM 微型泡沫铝。

在自由发泡过程中,预制体的外表面张力使得预制体膨胀为球形,内部气泡的表面张力使得泡沫铝内部为圆形或椭圆形的气孔。另外,发泡过程中铝液在重力的作用下会沿着气泡壁和柏拉图边界形成的通道向下流动和排液,但是由于 APM 微型泡沫铝尺寸小,膨胀过程快,气孔膨胀会克服重力引起的液态金属向下流动^[27,28,43,44],保证所得微型泡沫铝孔结构均匀。

STÖBENER K 等^[45]通过对预制体颗粒在连续发泡炉中加热得到最大直径为 15 mm,最小直径为 5 mm 的(APM)微型泡沫铝小球,所得试样表面完整、内部孔结构均匀。此工艺中,由于加热炉内的热量直接接触预制体,发泡时间很短,所得泡沫铝小球的孔结构非常均匀。而且,由于预制体和所得泡沫铝小球的几何形状很简单,发泡过程较容易控制,所得泡沫铝及其孔结构可重现性好,为泡沫铝复合结构的制备提供了思路和工艺基础。试验还发现,制备的泡沫铝小球为近球形,直径差异最高可达 20%,表面粗糙,甚至有微孔^[46],仍需进行工艺优化。

2 APM 泡沫铝小球结构特征

先进孔形(APM)微型泡沫铝小球具有类球形的表面和大量椭圆形闭孔的内部结构。ULBIU M 等^[43]通过显微扫描断层技术(μ CT)和数字图像处理对 $\phi 5$ mm 和 $\phi 10$ mm 的 APM 微型泡沫铝进行了分析。发现 $\phi 10$ mm 泡沫铝小球表面为一层薄的铝合金表层,内部被铝合金薄壁分割成大量的孔径不同的椭圆和球形孔,形成一个封闭的多孔结构,见图 1。对 APM 微型泡沫铝内部结构进行统计^[27,43],发现半径在 0.2~2 mm 之间的孔占有孔总体积的 99% 以上,而半径小于 0.2 mm 的孔体积仅占 1%,而且包含 10 000 多个微米级的孔,这些微孔位于孔壁中,导致孔结构互连。VESENJAK M 等^[27]制备的直径为 $\phi 5$ mm 的 APM 微型泡沫铝小球,包含 4 363 个孔,直径为 10 mm 的 APM 微型泡沫铝小球包含 13 793 个孔,直径为 10 mm 的 APM 微型泡沫铝最大孔的尺寸(2.045 mm)是直径为 5 mm 最大孔(1.174 mm)的 2 倍左右。

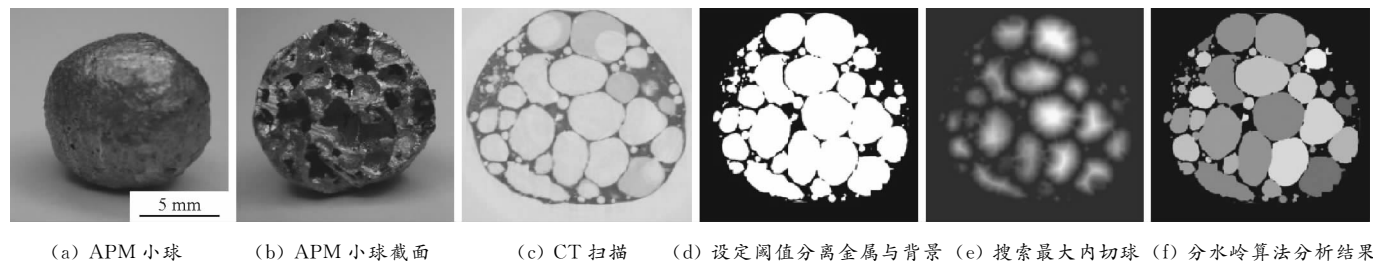


图 1 泡沫铝小球孔结构扫描及数字图像处理^[43]

Fig.1 Structure scanning and digital image processing of pellet holes in aluminum foam

ULBIN M 等^[43]还发现基体材料为 AlSi10 的 APM 微型泡沫铝比基体材料 AlSi7 的 APM 微型泡沫铝具有略高的孔隙率、更多的球形孔、更少的大孔数量,其整体孔结构较优。说明通过提高铝合金中的 Si 含量,可改善孔径大小、球形度、取向和空间分布的均匀性,与文献[4,6]试验结果类似。

目前所研究的 APM 微型泡沫铝最大直径为 15 mm,最小直径为 5 mm,随着泡沫铝小球直径增大,最大孔的直径也越大,孔数量也越多。泡沫铝小球的孔隙率为 0.63~0.82,密度为 500~1 000 kg/m³,与传统 PCM 法制备的泡沫铝的密度相近^[47],但其具有更多的球形孔,更少的大孔数量,孔结构更均匀,而且整个球体实体层很薄,排液现象基本消除。

3 APM 微型泡沫铝复合结构

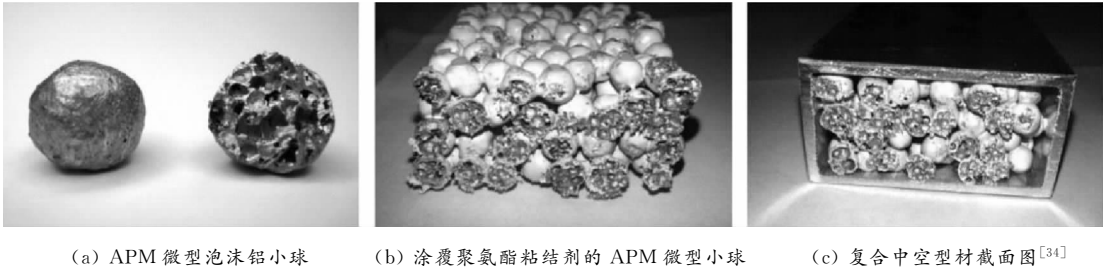
APM 微型泡沫铝小球具有高度重复性的几何结构,可以克服常规多孔材料几何特征的随机性所导致的力学性能不稳定的缺点。不同 APM 微型泡沫铝之间的力学性能基本一致^[30],所以可在致密金属形成的空腔中进行随机或者规则排列来获得性能稳定的复合结构件,增加零件刚度和提高冲击能量吸收能力,减少模具使用,降低废品率和制造成本。通常使用的填充方法有自由填充法、胶粘法和发泡粘结法。

3.1 自由填充法

自由填充法制备 APM 微型泡沫铝小球复合材料是将 APM 微型泡沫铝小球随机填充到中空件内,经过振动实现密排。该方法的特点是工艺简单,直接填充,无需粘结,但由于 APM 微型泡沫铝小球容易自由移动,整体结构不稳定。

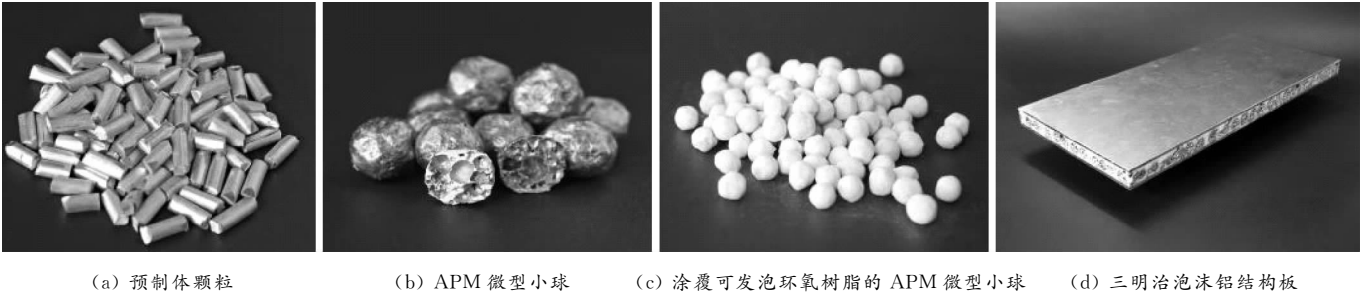
3.2 胶粘法

胶粘工艺制备 APM 微型泡沫铝小球复合材料是通过粘结剂将 APM 微型泡沫铝小球与致密金属板材、管材或其他几何形状的外壁进行粘接制备,粘结剂一般选用聚酰胺或环氧树脂^[30,42~49]。其工艺过程为:首先用酒精和砂纸清洁 APM 微型泡沫铝表面和复合管,使得有效接触面积增加;接着用粘结剂将泡沫铝芯体和金属外壁粘接起来,通过随机注入 APM 微型泡沫铝小球到复合结构中并振动,获得更密实的排布,也可将微型泡沫铝通过周期性排布实现 APM 微型小球密集地填充到复合组件中;最后将复合组件在固化温度以上或者室温下短时间放置(取决于粘合剂材料的类型),通过粘合剂熔化粘合(或固化)使 APM 微型泡沫铝固定到复合组件中。图 2 为 APM 微型泡沫铝小球-聚氨酯填充中空型材截面图。图 3 为 APM 微型泡沫铝小球三明治结构的制备步骤,首先制备预制体颗粒,通过发泡获得 APM 微型泡沫铝,涂聚合物获得 APM 涂覆单元,最



(a) APM 微型泡沫铝小球 (b) 涂覆聚氨酯粘结剂的 APM 微型小球 (c) 复合中空型材截面图^[34]
图 2 胶粘工艺 APM 微型泡沫铝小球复合结构及其在中空型材中的填充^[49]

Fig.2 Composite structure prepared of APM micro aluminum foam pellets by adhesive technology and its filling in hollow section



(a) 预制体颗粒 (b) APM 微型小球 (c) 涂覆可发泡环氧树脂的 APM 微型小球 (d) 三明治泡沫铝结构板
图 3 APM 泡沫铝小球三明治结构的制备^[31]

Fig.3 Manufacture of sandwich structure in APM aluminum foam pellets

后将涂覆单元和板材粘结到一起得到三明治泡沫铝结构板。

STÖBENER K 等^[45]介绍了基于 APM 泡沫铝-环

氧树脂复合材料的粘接剂涂覆 APM 微型泡沫铝的半自动化生产线,见图 4。原料(铝合金粉、发泡剂粉末)混合均匀后,通过连续粉末压实挤压成直径为 3 mm 的

棒料,切割成颗粒长度为 2 mm 的颗粒,在电阻炉中发泡成微型泡沫铝小球。将直接膨胀后的微型泡沫铝小球利用余热在粘结剂涂覆机上涂覆热塑性树脂胶粘剂,该粉末状粘合剂在填充零件后经过加热到一定温度使粘结剂活化,随后冷却固化以使微型泡沫铝小球彼此粘合并与零件内壁粘结。该生产线不仅能够节约成本,在中空部件的填充时甚至能够忽略填充体的几何形状,零件的制备十分灵活。

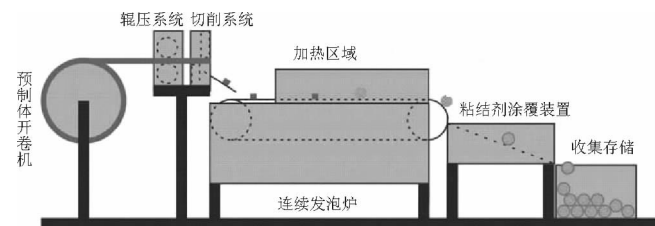


图 4 粘接剂涂覆 APM 微型泡沫铝的半自动化生产线^[45]

Fig.4 Semi-automatic manufacture line for adhesive coated APM micro aluminum foam

胶粘法工艺简单,容易实现自动化,成本较低,且最终产品精度较高。但在胶粘过程中,加热液化的粘结剂由于重力作用容易从泡沫铝小球间的接触处流失,导致涂覆粘结剂的 APM 泡沫铝小球有效直径减小,可能形成新孔或增大原有孔隙,而后在振动密排中填充体整体体积收缩,收缩率最高可达 10%^[45],造成填充不完全,因此对于复杂型腔的填充体需要补充微型泡沫铝小球补全填充体。

3.3 发泡粘结法

WANG Y L 等^[50]采用室温胶粘发泡的方法制备 APM 微型泡沫铝小球复合件。工艺过程为将环氧树脂和环氧树脂发泡剂以一定的质量比进行配比,然后加入固化剂,随后在 APM 微型小球表层涂覆预发泡环氧树脂,将其倾倒入中空管中,置于常温下一段时间,待环氧树脂发泡完全并固化,可获得充填完满的泡沫铝复合填充管。该方法解决了零件成形过程中由于粘结剂液化导致的孔隙增大和整体填充不完全的问题^[45]。

4 泡沫铝小球及复合结构的力学性能

4.1 APM 微型泡沫铝小球的力学性能

APM 微型泡沫铝小球的压缩性能符合典型的多孔材料压缩性能,见图 5,其应力-应变曲线包括弹性变形阶段,屈服平台阶段和致密化阶段。但是 APM 微型泡沫铝的弹性区不太明显,屈服强度比较低,而且非常平滑地过渡到平台区域。载荷随变形量的增加缓慢上升,到达致密化阶段后,变形量的增加引起载荷显著上升^[51]。

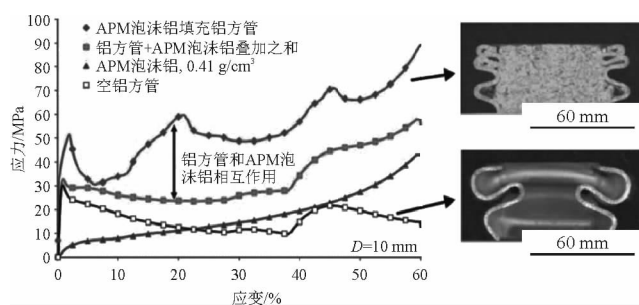


图 5 APM 泡沫铝胶粘填充和未填充铝方管的压缩

应力-应变曲线^[45]

Fig.5 Compressive stress-strain curves of APM aluminum foam filled or unfilled with aluminum square tubes

VESENJAK M 等^[27,28]使用红外热成像仪采集大量压缩数据,研究了 APM 微型泡沫铝内塑性屈服的传播规律,发现塑性屈服起源于 APM 微型泡沫铝和压头之间的接触区域,并且在朝向微型泡沫铝下部的 45°角的剪切带中传播。SULONG M A 等^[44]利用计算机断层扫描成像和有限元结合研究 $\phi 5$ mm 和 $\phi 10$ mm APM 微型泡沫铝小球的变形机制。模拟结果表明,塑性变形不是均匀发生在整个小球内,而是集中在接触区域附近的相对较小的体积中,而且变形不限于球形单元的表面,也在单元内部泡沫结构中。塑性变形从压头和球体的接触区域以 45°剪切锥内向小球内部传播。通过内部微观结构变形分析,发现 45°剪切锥内的薄壁结构和细杆等薄弱结构可承受较高的塑性变形。 $\phi 10$ mm 的 APM 微型泡沫铝的结构刚度是 $\phi 5$ mm 单元的 3.3 倍,表明较大的泡沫铝小球可以承受较高的载荷。另外,没有去除外表面包裹层的结构刚度是去除 APM 微型泡沫铝外表面铝包裹层的单元的 1.4 倍,说明泡沫小球的表面包裹层有助于提高 APM 微型泡沫铝小球的力学性能。LEHMHUS D 等^[48]研究在准静态和动态压缩载荷下改变粘合剂(环氧基粘合剂和聚酰胺)和密度对 APM 泡沫铝力学性能的影响。结果表明,环氧基粘合剂粘合的 APM 微型泡沫铝小球的动态初始强度略高于准静态初始强度,而聚酰胺粘合的 APM 微型泡沫铝小球的动态初始强度高于准静态初始强度。研究还发现,无论是准静态还是静态,APM 微型泡沫铝压缩强度与密度的关系与传统的 PCM 泡沫铝相似,在强度、刚度、能量吸收的力学性能表现上分散性较小。

4.2 APM 微型泡沫铝小球复合结构的力学性能

对 APM 微型泡沫铝小球自由填充来说^[52],小球的随机排列导致其可在压力作用下在管中自由移动。在压缩阶段开始时,管内随机排列的小球受压重新进行排列,趋于形成致密化堆积,从而导致球与球之间的空隙减小,进一步增大压力导致某些部位小球局部应力集

中,从而率先进行变形直至压溃。自由填充管的压缩变形行为与传统泡沫铝填充管类似,最终形貌与传统填充管基本相同^[30,44,48]。

APM 微型泡沫铝小球胶粘复合管通过添加5%~10%的粘合剂以使泡沫小球彼此连接并与中空管连接,可以极大改变变形行为。环氧树脂粘接 APM 微型泡沫铝小球,环氧树脂在管壁的某些点上与 APM 微型泡沫铝小球相互连接,而且每个 APM 微型泡沫铝小球由于胶粘作用有固定的位置,重新排列需要克服球与球之间的胶粘作用力。随着压缩过程进行,APM 微型泡沫铝小球的弹性变形和环氧树脂各个连接处的撕扯达到极限,应力克服管壁和 APM 小球的摩擦,粘接点发生剥离,载荷波动。

与直接粘接相比,APM 微型泡沫铝小球发泡胶粘复合管^[50]的环氧树脂发泡工艺增强了载荷传递,由点接触的应力传递网络变为面接触的应力传递网络^[53],也增强了与管壁之间的摩擦效应,进一步提高了管与芯体的相互作用。由于环氧树脂发泡之后,泡沫体将小球与小球之间、小球与管之间填满,应力不再以点接触的方式传递,而以面接触的方式传递,形成应力网格,在一定程度上削弱了应力集中,载荷波动较小,而且提高了载荷水平。

不同的填充结合方式可以改变管件压缩的变形方式^[50,54],薄壁空管在变形过程中表现出明显的非对称变形模式,形成的褶皱以菱形为主;环氧胶粘-APM 填充管以混合模式进行变形,最终形成的褶皱既有菱形又有六角状;环氧发泡-APM 填充管表现出较典型的六角变形模式,形成的皱褶均为六角状,且后二者褶皱数目要多于薄壁空管。

HOHE J 等^[55]分别进行了关于梯度 APM 泡沫材料的试验和数值模拟,将梯度 APM 泡沫夹层板与传统泡沫夹层板进行比较。结果表明,设计具有中等厚度和较为缓和的密度梯度的 APM 泡沫体芯,可以提高夹层板的抵抗穿孔性能。BAUMEISTER J 等^[31]制备的 APM 泡沫铝小球复合三明治板在电动汽车电池外壳中应用,通过准静态和动态压缩试验,发现在 50% 的应变范围内,三明治板没有显著的应变率敏感性,平台应力随着 APM 泡沫铝密度的增加而增加,而且较高的涂层厚度显现较高的平台应力。

5 APM 泡沫铝目前应用及存在问题

APM 微型泡沫铝的主要优点是可以用作中空部分的填料单元,从而增加零件的刚度和提高冲击能量吸收的能力。APM 微型泡沫铝单元由于结构重现性高和良好的阻尼特性,可填充复杂形状的缓冲器和吸振

器,并能降低加工难度。而且 APM 微型泡沫铝与传统泡沫铝性能相差不大,故可替代传统泡沫铝充填复杂大型零件,大大降低生产大型泡沫铝时的困难。研究者对 5 mm 三明治结构的 APM 泡沫铝板材进行了分析,发现密度为 0.94 g/cm^3 ,是 Al 的 $1/3$;其抗弯刚度是 $3.54 \times 10^8 \text{ N/mm}^2$,而 3.3 mm 厚铝板的抗弯刚度是 $2.1 \times 10^8 \text{ N/mm}^2$;导热系数测量值为 $0.4 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,仅为固体铝导热系数 $[220 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}]$ 的约 $1/500$,能有效防止火灾的发生^[31]。

APM 微型泡沫铝小球呈现椭圆球形状,表面不是完全均匀的,最大的直径差异可达 20%,而且 APM 微型泡沫铝复合结构中能观察到 3 种类型的孔隙率:① APM 微型泡沫铝小球的内部孔隙;②在 APM 泡沫单元之间的外部孔隙,孔隙的大小随不同的 APM 泡沫单元的大小而不同;③整体孔隙率。这在标准化生产中存在一定挑战。APM 微型泡沫铝复合结构中的粘结剂,因其使用温度的限制,在一些温度变化较大的场合无法使用,而且粘结剂的老化速度远远高于金属,限制了 APM 微型泡沫铝的长时间使用,因此还需开发更为优异的复合技术。

6 结 语

APM 技术作为 PCM 技术的改进,具有工艺更简单、成本更低的优势,其关键技术为将泡沫金属膨胀的步骤和零件成形步骤分离。APM 微型泡沫铝作为泡沫铝的一种结构衍生物,克服了发泡过程中由排液引起的泡体不稳定及孔结构的不均匀性,可以获得几何特征近乎一致的单元体,且性能与传统泡沫铝相差无几。利用微型泡沫铝单元能够实现中空部件的填充,获得良好的充型,解决传统填充方法结合过程中的技术困难。

另外,APM 微型泡沫铝制备和复合结构制备的过程分离,生产过程容易实现自动化,也可实现跨时空跨地域生产,大大改进工艺条件,提高零件生产的灵活性,因此可提高零件制备效率,使金属泡沫零件价格显著降低。也可以根据工程设计量身定制的 APM 微型泡沫铝小球组合方式,满足不同工况条件使用。

参 考 文 献

- [1] 姜玉敬. 世界泡沫铝的发展及其市场分析[J]. 中国金属通报, 2017(4): 25-27.
- [2] 田俊, 宫蓝波. 车用闭孔泡沫铝的研发进展与应用[J]. 中国高新区, 2017(9): 24.
- [3] LM 立木信息咨询. 中国泡沫铝市场调研与投资战略报告(2020 版)[EB/OL]. <http://www.lmcmr.com/gongyecailliaozhipin/xin-cailliao/2019-03-23/13517.html>.
- [4] BANHART J. Light-metal foams-history of innovation and technological challenges[J]. Advanced Engineering Materials, 2013, 15

- (3): 82-111.
- [5] RIDGWAY J A. Cellularized metal and method of producing same; USA, 3,297,431[P]. 1967.
 - [6] BANHART J, VINOD-KUMAR G S, KAMM P H, et al. Light-metal foams: Some recent developments[J]. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 2016, 28(1): 1-4.
 - [7] 袁文文, 陈祥, 刘源, 等. 熔体发泡法批量制备泡沫铝板材关键技术的研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(S3): 306-310.
 - [8] 徐方明, 王倩, 许庆彦, 等. 熔体吹气发泡法制备泡沫铝的试验研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2007, 27(7): 563-565.
 - [9] 刘源, 李言祥, 张华伟, 等. 金属-气体共晶定向凝固制备藕状多孔金属的研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2005, 25(1): 1-5.
 - [10] 袁建宇. 基于吹气法的泡沫铝制备工艺、结构特征与力学性能研究[D]. 北京:清华大学, 2012.
 - [11] 朱梦蛟. 泡沫铝的制备、结构表征及其压缩性能研究[D]. 上海:上海交通大学, 2017.
 - [12] 杨逸民. 抗高速冲击泡沫铝夹芯复合材料设计及数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
 - [13] 李伟青. 铝基泡沫材料结构均匀化控制方法研究[D]. 沈阳:东北大学, 2017.
 - [14] 王辉. 基于新型缓释发泡剂的闭孔泡沫铝制备、表征与工程化[D]. 长沙:中南大学, 2014.
 - [15] 高凯. 泡沫铝-聚氨酯复合材料压缩及拉伸力学性能试验研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
 - [16] 谭彪. 多孔铝过滤材料的结构与性能研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2019.
 - [17] 朱世婷. PCM法泡沫铝及其复合结构制备工艺优化研究[D]. 太原:太原科技大学, 2015.
 - [18] 韩福生. 一种新型的物理功能材料——泡沫铝[J]. *中外技术情报*, 1996(6): 3-6.
 - [19] LORNA J, GIBSON M F A. *Cellular Solids: Structure and Properties*[M]. UK:Cambridge University Press, 1997.
 - [20] ASHBY M F, EVANS T, FLECK N A, et al. *Metal Foams: A Design Guide*[M]. US: Society of Automotive Engineers Inc, 2000.
 - [21] BONFANTI A, BHASKAR A, ASHBY M F. Plastic Deformation of Cellular Materials[A]. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*[C]. USA, 2016.
 - [22] BANHART J, BAUMEISTER J, WEBER M. Damping properties of aluminum foams[J]. *Materials Science and Engineering*, 1996, A205(1): 221-228.
 - [23] BANHART J, BELLMANN D, CLEMENS H. Investigation of metal foam formation by microscopy and ultra small-angle neutron scattering[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(17): 3 409-3 420.
 - [24] BANHART J, EBERT H. First-principles calculation of the thermoelectric power of disordered alloys[J]. *Solid State Communications*, 1995, 94(6): 445-449.
 - [25] BABCSÁN N, MORENO F G, BANHART J. Metal foams-High temperature colloids Part II: In situ analysis of metal foams[J]. *Colloids and Surfaces*, 2007, A309(1-3): 254-263.
 - [26] BABCSÁN N, LEITLMEIER D, BANHART J. Metal foams-High temperature colloids Part I. Ex situ analysis of metal foams[J]. *Colloids and Surfaces*, 2005, A261(1-3): 123-130.
 - [27] VESENJAK M, BOROVINŠEK M, FIEDLER T, et al. Structural characterization of advanced pore morphology (APM) foam elements[J]. *Materials Letters*, 2013, 110: 201-203.
 - [28] VESENJAK M, GAČNIK F, KRSTULOVICH-OPARA L, et al. Mechanical properties of advanced pore morphology foam elements[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2014, 22(5): 359-366.
 - [29] BAUMEISTER J, BANHART J, WEBER M. Aluminum foams for transport industry[J]. *Materials & Design*, 1997, 18(4): 217-220.
 - [30] BAUMEISTER J, MONNO M, GOLETTI M, et al. Dynamic behavior of hybrid APM (Advanced Pore Morphology Foam) and aluminum foam filled structures[J]. *Metals*, 2012, 2(2): 211-218.
 - [31] BAUMEISTER J, WEISE J, HIRTZ E, et al. Applications of aluminum hybrid foam sandwiches in battery housings for electric vehicles[J]. *Procedia Materials Science*, 2014, 4: 317-321.
 - [32] DUARTE I, FERREIRA J. 2D quantitative analysis of metal foaming kinetics by hot-stage microscopy[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2013, 16: 33-39.
 - [33] DUARTE I, BANHART J. A study of aluminum foam formation-kinetics and microstructure[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(9): 2 349-2 362.
 - [34] 王磊, 姚广春, 张晓明, 等. 粉末冶金泡沫铝发泡参数及准静态压缩性能[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(2): 221-224.
 - [35] HAN F, ZHU Z, GAO A J. Compressive deformation and energy absorbing characteristic of foamed aluminum[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1998, A29: 2 497-2 502.
 - [36] 刘培生, 杨春艳, 程伟. 多孔材料性能模型研究 3: 数理推演[J]. *材料工程*, 2019, 47(8): 59-81.
 - [37] 刘培生, 夏凤金, 程伟. 多孔材料性能模型研究 2: 实验验证[J]. *材料工程*, 2019, 47(7): 35-49.
 - [38] 刘培生, 崔光, 程伟. 多孔材料性能模型研究 1: 数理关系[J]. *材料工程*, 2019, 47(6): 42-62.
 - [39] 胡中芸, 杨东辉, 李军, 等. 泡沫铝的制备方法及其发展现状[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(1): 24-28.
 - [40] YANG X D, AN T, WU Z Q, et al. The effect of outer tube on quasi-static compression behavior of aluminum foam-filled tubes[J]. *Composite Structures*, 2020, 245: 112 357.
 - [41] 王录才, 吕猛, 王芳, 等. 基于挤出成形无约束条件下泡沫铝的发泡行为及气孔结构的演变[J]. *铸造*, 2015, 64(10): 945-949.
 - [42] STÖBENER K, BAUMEISTER J, RAUSCH G, et al. Forming metal foams by simpler methods for cheaper solutions[J]. *Metal Powder Report*, 2005, 60(1): 12-16.
 - [43] ULBIN M, BOROVINŠEK M, HIGA Y, et al. Internal structure characterization of AlSi7 and AlSi10 advanced pore morphology (APM) foam elements[J]. *Materials Letters*, 2014, 136: 416-419.
 - [44] SULONG M A, VESENJAK M, BELOVA I V, et al. Compressive properties of advanced pore morphology (APM) foam elements[J]. *Materials Science and Engineering*, 2014, A607: 498-504.
 - [45] STÖBENER K, RAUSCH G. Aluminum foam-polymer composites: processing and characteristics[J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44(6): 1 506-1 511.

氧化铝基陶瓷型芯溶失性的研究进展

罗 凌 芦 刚 严青松 占红星 黄普英
(南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室)

摘 要 介绍了涡轮空心叶片用铝基陶瓷型芯的应用背景,探讨了铝基陶瓷型芯强化及溶失性能的重要意义。阐述了造型材料、成孔剂、脱芯方法对氧化铝基陶瓷型芯溶失性能增强的研究现状,并展望了铝基陶瓷型芯未来发展面临的挑战。

关键词 空心叶片;铝基陶瓷型芯;溶失性能

中图分类号 TG249.5 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Alumina-based Ceramic Cores' Dissolution

Luo Ling, Lu Gang, Yan Qingsong, Zhan Hongxing, Huang Puying
(National Defense Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,
Nanchang Hangkong University)

Abstract: The application background of aluminum-based ceramic cores for turbine hollow blades was described, and the important significance of aluminum-based ceramic core strengthening and melting loss performance was expacnded. The research status of alumina-based ceramic core dissolution loss enhanced by molding materials, pore-forming agents and core removal methods were described. The challenges to the future development of alu-minum-based ceramic cores were prospected.

Key Words: Hollow Blade, Aluminum-based Ceramic Core, Dissolution Loss Performance

目前,先进航空发动机涡轮前温度要求越来越高,空心叶片的耐高温性能要求也随之提高,高温合金的承

温能力有限,通过优化合金材料来提高叶片的承温能力效果并不明显^[1]。涡轮发动机用叶片的冷却结构已从

收稿日期:2020-09-18;修改稿收到日期:2020-10-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51861027);江西省优势科技创新团队重点资助项目(20181BCB19001)
第一作者简介:罗凌,男,1997 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail: 1146670581@qq.com
通信作者:芦刚,男,1982 年出生,副教授,南昌(330063),E-mail: aimulalg@163.com
引用格式:罗凌,芦刚,严青松,等. 氧化铝基陶瓷型芯溶失性的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(3):305-309.
LUO L, LU G, YAN Q S, et al. Research progress in alumina-based ceramic cores' dissolution[J]. Special Casting &. Nonferrous Alloys, 2021,41(3):305-309.

[46] STÖBENER K, LEHMHUS D, AVALLE M, et al. Aluminum foam-polymer hybrid structures (APM aluminum foam) in compression testing[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(21): 5 627-5 641.

[47] DUARTE I, OLIVEIRA M S A. Aluminum Alloy Foams: Production and Properties[M]. Powder Metallurgy: In Tech., 2012.

[48] LEHMHUS D, BAUMEISTER J, STUTZ L. Mechanical characterization of particulate aluminum foams-Strain-rate, density and matrix alloy versus adhesive effects[J]. Advanced Engineering Materials, 2010, 12: 596-603.

[49] KOVAČIĆ A, REN Z. On the porosity of advanced pore morphology structures[J]. Composite Structures, 2016, 158: 235-244.

[50] WANG Y L, GUO Q Y, WANG L C, et al. Evaluation of compression performance of APM aluminum foam-polymer filled pipes prepared via different epoxy resin bonding processes[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019(9): 1-10.

[51] WANG Y L, WANG L C, XU H, et al. Preparation and compressive properties of advanced pore morphology (APM) foam elements[J]. Physics and Engineering of Metallic Materials, 2019, 38: 383-390.

[52] DUARTE I, VESENJAK M, KRSTULOVIĆ-OPARA L, et al. Compressive performance evaluation of APM (Advanced Pore Morphology) foam filled tubes[J]. Composite Structures, 2015, 134: 409-420.

[53] KWEON J H, JUNG J W, KIM T H, et al. Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding[J]. Composite Structures, 2006, 75(1-4): 192-198.

[54] 郭养毓. 泡沫铝复合结构制备工艺及力学性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.

[55] HOHE J, HARDENACKE V, FASCIO V, et al. Numerical and experimental design of graded cellular sandwich cores for multi-functional aerospace applications[J]. Materials &. Design, 2012, 39: 20-32.

(编辑:栗万仲)