

镁合金消失模铸造新技术研究

蒋文明, 樊自田

(华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 消失模铸造属于颇有特点的精密绿色铸造技术。但镁合金消失模铸造中存在充型能力差、孔洞缺陷严重、凝固组织粗大及力学性能偏低等问题。针对以上问题, 国内外开发了几种镁合金消失模铸造新技术, 本文主要介绍这些新技术的最新研究进展。真空低压消失模铸造技术, 可保证金属液充型平稳, 提高镁液充型和补缩能力, 保护其充型过程, 适于镁合金铸造成形。振动凝固消失模铸造技术, 可提高镁合金充型能力、细化组织、明显提高铸件力学性能。消失模壳型铸造技术, 可消除或减少消失模铸造易于出现的孔洞、夹杂等缺陷, 能生产高质量复杂镁合金精密铸件。镁/铝双金属消失模铸造技术, 可低成本直接成形复杂镁/铝双金属铸件。以上新技术都有其自身特点和应用前景。

关键词: 镁合金; 消失模铸造; 真空低压; 振动凝固; 壳型铸造; 双金属铸件

作者简介:

蒋文明 (1982-), 男, 博士/博士后, 副教授, 博士生导师, 研究方向为高性能镁、铝合金及其精密铸造成形技术。电话: 027-87540094, E-mail: wmjiang@hust.edu.cn

通讯作者:

樊自田, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为铝镁合金消失模铸造技术, 基于水玻璃砂的绿色铸造技术, 铸造装备及自动化等。电话: 027-87540094, E-mail: fanzt@mail.hust.edu.cn

中图分类号: TG249.6
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2021)01-0028-10

基金项目:

国家自然科学基金项目 (52075198, 51204124, 50275058); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2007AA03Z113)。收稿日期: 2020-09-10。

消失模铸造技术是一种近无余量、精确成形的新技术, 适合生产大型复杂零件, 被称为21世纪最可能实现绿色铸造的工艺技术^[1-4]。它是采用泡沫塑料制作成与零件结构和尺寸完全一样的实型模具, 经浸涂耐火粘结涂料, 烘干后进行干砂造型, 振动紧实, 然后浇入金属液使模样受热气化消失, 从而得到与模样形状一致的金属零件的精密铸造方法^[5-8]。与其他铸造工艺相比, 它具有诸多优点^[9]: ①铸件的尺寸精度高、表面粗糙度低; ②增大了铸件结构设计的自由度; ③散砂紧实、无粘结剂, 简化了铸件生产工序, 提高了劳动生产率; ④容易实现清洁生产等。

经过数十年技术发展, 消失模铸造技术的研究已从应用广泛、发展成熟的铸铁、铸钢转向铝、镁合金等轻合金。研究也表明^[10-12], 镁合金非常适合消失模铸造工艺, 其具有如下独特的优点。

(1) 在镁合金浇注过程中, 泡沫模样的分解产物主要是烃类 (烷烃、烯烃等)、苯类和苯乙烯等气雾物质, 它们对充型成形时极易氧化的液态镁合金具有自然的保护作用;

(2) 采用干砂负压造型, 避免了镁合金液与型砂中水分的接触和由此而引起的铸件氧化夹杂缺陷;

(3) 与目前普遍采用的镁合金压铸工艺相比较, 其投资成本大为降低, 干砂良好的退让性大大减轻了镁合金铸件凝固收缩时的热裂倾向; 金属液较慢和平稳的充型速度避免了气体的卷入, 使铸件可经热处理进一步提高其力学性能。然而, 镁合金消失模铸造技术发展也存在一定的难点^[13]。

(1) 金属液在充型浇注中, 泡沫模样的热解气化将吸收大量的热量, 造成合金流动前沿温度下降, 过度冷却易形成冷隔、皮下气孔等铸件缺陷。因此, 镁合金消失模浇注过程中, 提高充型能力对获得优质镁合金消失模铸件至关重要, 尤其是复杂薄壁镁合金铸件。

(2) 镁合金消失模铸造的浇注温度高达750~780 ℃, 较普通空腔浇注高30~50 ℃, 在此高温下, 镁合金的氧化燃烧加剧, 铸件疏松多。同时, 由于采用散干砂造型, 金属液降温速度慢, 造成镁合金铸件凝固组织粗大, 铸件性能偏低。此外, 镁合金消失模铸造需要低温气化的泡沫模样材料, 然而有关泡沫模样材料的基础研

究在我国进行的工作相对较少。同时,研制适合镁合金消失模铸造用强度高、透气性好的涂料,也是亟待解决的问题。

为了解决镁合金消失模铸造中充型浇注、氧化燃烧、孔洞缺陷和凝固组织粗大等问题,提高镁合金消失模铸件性能,近年来国内外也有一些关于镁合金消失模铸造方面的研究,但是取得的效果甚微,很多关键技术还没有得到有效解决,有关报道较少。尤其是镁合金消失模铸造的大量应用,国内外还没有相关报道。上海交通大学、华中科技大学等高校开展了镁合金消失模铸造技术研究。胡晶玉^[14]等研究了AZ91镁合金负压消失模铸造流动性,指出AZ91镁合金的流动性随模样厚度、浇注温度及施加真空度的增加而增加,但随涂料厚度和模样密度的增加而降低。刘子利^[15]等研究了镁合金负压消失模铸造金属-铸型间的传热行为,发现与不抽真空相比,抽真空明显降低了铸件开始凝固的温度。2015年山东蒙沃变速箱有限公司采用消失模铸造工艺试制了AZ91镁合金箱体^[16]。2002年6月美国铸造协会在位于威斯康星州的Eck公司浇注成功消失模AZ91镁合金铸件。Lombardi等^[17]研究了Si对消失模铸造AE42镁合金微观组织和力学性能的影响规律,指出Al-Si-Re相的形成促进了初生Mg相的形成,削弱了AE42镁合金的拉伸性能,却增加了其伸长率。Sin等^[18]研究了Ca对消失模铸造AE42镁合金铸造性能、微观组织和力学性能的影响规律,发现Ca的添加细化了镁合金凝固组织,但降低了镁合金的室温拉伸性能。Ho^[19]等通过向消失模铸造镁合金中添加Al和Si元素,提高了镁合金的流动性能,制备出薄壁周期性细胞镁合金铸件。

由于镁合金材料性能方面的原因^[20-22],其消失模铸造技术及控制难度更大,有关镁合金消失模铸造生产应用还没有报道,目前镁合金消失模铸造基本还停留在试制阶段。未来镁合金消失模铸造关键技术一旦获得突破,其将具有巨大发展和应用前景。

近年来,随着国内外对镁合金消失模铸造技术的重视和研究,镁合金消失模铸造技术得到了快速发展,开发出一些镁合金消失模铸造新技术,取得了显著的效果,本文围绕几种镁合金消失模铸造技术的最新研究成果和进展进行介绍。

1 镁合金真空低压消失模铸造技术

镁合金真空低压消失模铸造技术是将真空消失模铸造与低压铸造有机地结合起来,其工艺特点:①将消失模铸造模样放入底注式砂箱,加入型砂振动紧实,随后开启抽真空装置;②镁合金液送入浇注炉,并通入保护性气体;③浇注炉内通入可控压力的惰性气体,在其作用下镁合金液进入砂箱,将消失模铸造模样气化,实现浇注。图1是镁合金真空低压消失模铸

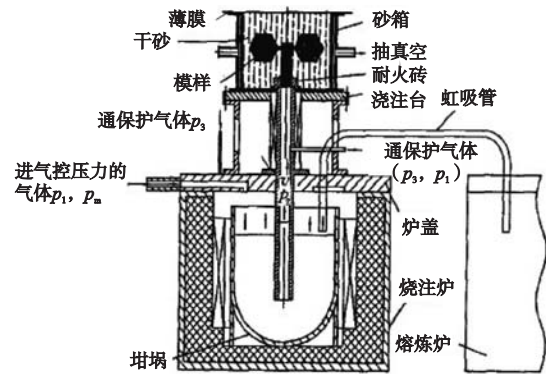


图1 镁合金真空低压消失模铸造技术原理图

Fig. 1 Schematic diagram of LFC under low pressure and vacuum for Mg alloys

造技术工作原理图^[23]。

镁合金真空低压消失模铸造综合了低压铸造与真空消失模铸造的技术优势,在可控的气压下完成充型过程,大大提高了合金的充型能力。与压铸相比,设备投资小、成本低、铸件可热处理强化;与砂型铸造相比,铸件的精度高、表面粗糙度低、生产率高、性能好。在反重力作用下,直浇道成为补缩通道,浇注温度的损失小,液态合金在可控的压力下进行补缩凝固,合金铸件的浇注系统简单有效、成品率高、组织致密。由于需要的浇注温度低,适合多种有色合金浇注成形^[24-26]。

图2为采用两种不同消失模铸造工艺获得的电机壳体(最小壁厚2.5 mm,浇注温度750℃)铸件。可以看出,采用真空低压消失模铸造可成形出形状完好、轮廓清晰的镁合金电机铸件,而采用重力消失模铸造时,铸件不能完全充型,出现了严重的浇不足缺陷。因此,真空低压消失模铸造技术在生产薄壁复杂铸件时相比重力消失模铸造具有明显优势。

此外,镁合金在压力下凝固,外力对枝晶间液相金属的挤滤作用以及使初凝枝晶发生显微变形,可大幅提高冒口补缩能力,使镁合金铸件内部疏松得到改善。图3为压力下凝固下镁合金消失模铸件缩松的变化规律。明显看出,压力下凝固可以显著减少镁合金消失模铸件的缩松缺陷,使得铸件致密性大大提高。

2 镁合金振动消失模铸造技术

镁合金振动消失模铸造技术是在消失模铸造过程中施加一定频率和振幅的振动^[27],使铸件在振动场的作用下凝固。由于消失模铸造凝固过程中对金属液施加了一定时间的振动,振动力使液相与固相间产生相对运动,从而使枝晶破碎,增加了液相内结晶核心,使铸件最终凝固组织细化、补缩提高,力学性能改善,其原理图见图4所示。该技术利用消失模铸造中现

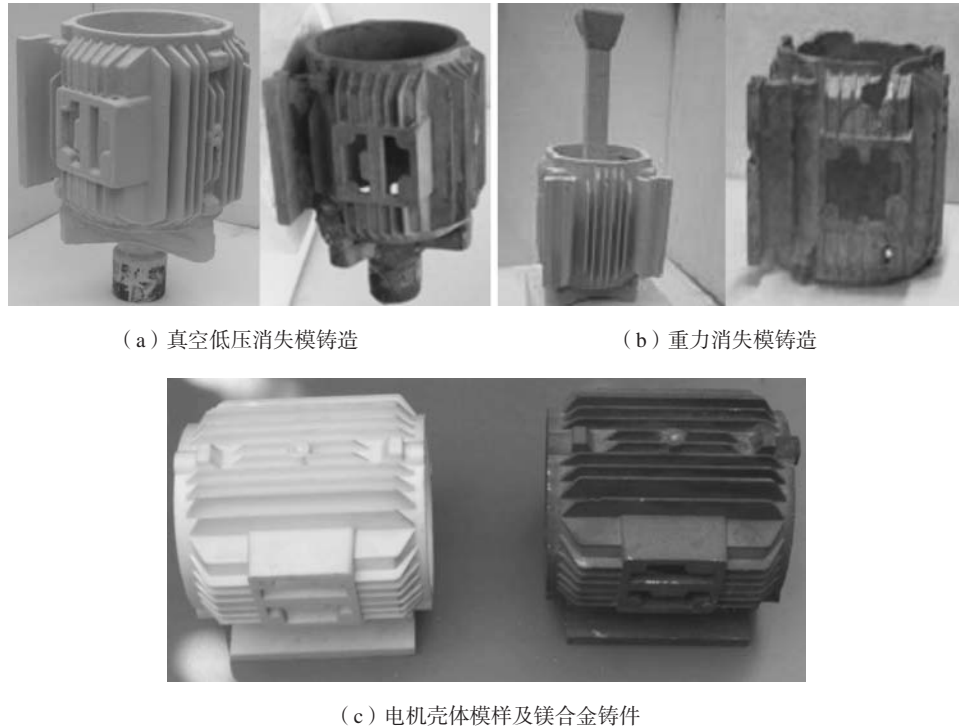


图2 不同铸造工艺获得电机壳体镁合金铸件

Fig. 2 Mg alloy motor castings obtained by using different casting processes

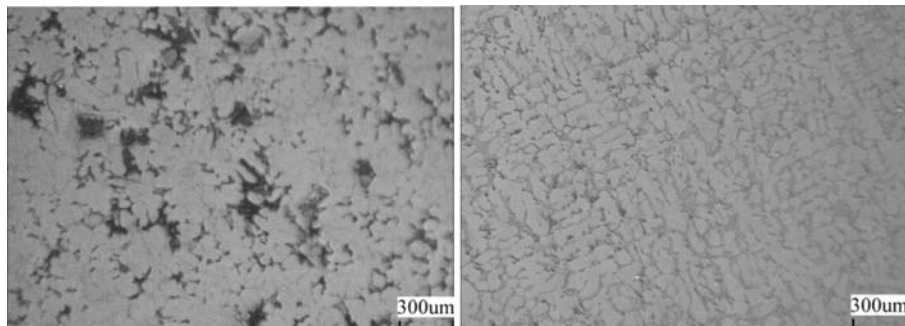


图3 压力凝固对镁合金消失模铸件微观组织的影响

Fig. 3 Microstructure of LFC Mg alloy casting

成的紧实振动台，通过振动电机产生的机械振动，使金属液在动力激励下生核，达到细化组织的目的，是一种操作简便、成本低廉、无环境污染的方法^[28-32]。相比之下，砂型铸造过程中，如对铸型施以机械振动，很容易把铸型振垮；在金属型铸造过程中，由于其冷速过快，振动对结晶的影响作用不大^[33]。

图5为在振动凝固过程中不同振幅下得到的消失模铸造AZ91D合金的光学显微组织^[34]。可以看出，在未振动条件下，消失模铸造镁合金的凝固组织较为粗大， α -Mg初生相呈现明显的树枝晶形态。作为对比，在振动条件下，消失模铸造AZ91D合金的微观组织得到显著细化， α -Mg初生相转变为等轴晶，晶粒尺寸随着振幅的增大而不断减小。

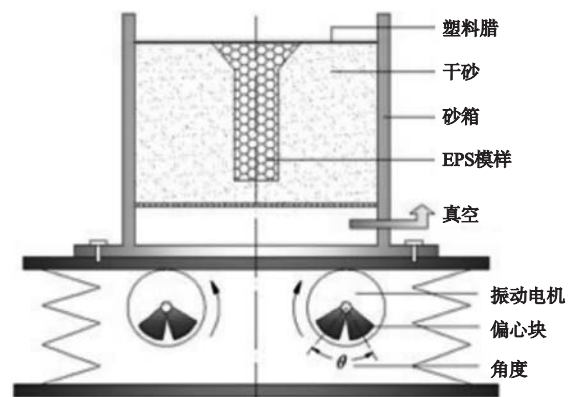


图4 振动消失模铸造技术原理图

Fig. 4 Schematic diagram of LFC process under mechanical vibration

表1是不同条件下获得消失模铸造AZ91D镁合金的力学性能^[34]。由表可知,经过振动后,消失模铸件的综合力学性能较未振动前明显提高。

此外,研究表明,对AZ91D镁合金消失模浇注过程中进行机械振动,可以提高液态金属的充型能力^[34],充型能力随着振动频率和振幅的增大而增大(图6a)。由

图6b可知,当振动峰值加速度小于1 g时,振动对AZ91D的充型能力影响很小。而当振动峰值加速度大于4 g时,振动力过大,消失模铸造过程中易出现工艺不稳定,产生严重粘砂、试样变形等缺陷,反而使金属液充型能力下降。因此,振动峰值加速度选择在1 g~4 g之间,可以明显提高AZ91D消失模铸造充型能力。

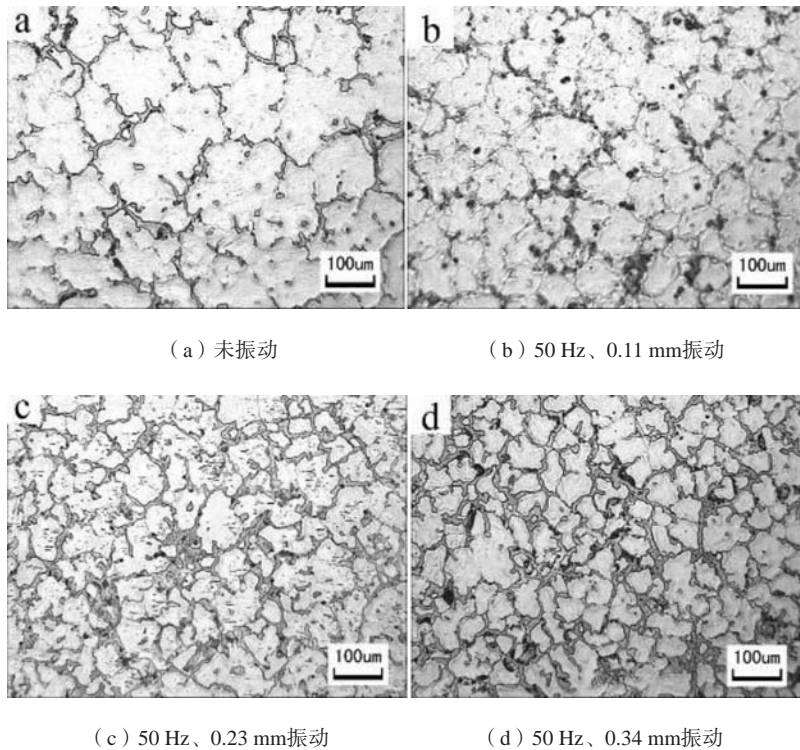


图5 不同振动频率及振幅下消失模铸造AZ91D镁合金的凝固组织

Fig. 5 Microstructure of LFC AZ91D alloy obtained by using different vibration frequencies and amplitudes

表1 不同条件下获得的消失模铸造AZ91D镁合金的力学性能(铸态)
Table 1 Mechanical properties of LFC AZ91D alloy with and without mechanical vibration (as-cast)

	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
未振动	99.4	134.48	1.85
振动(频率50 Hz, 振幅0.34 mm)	110.34	165.72	2.24

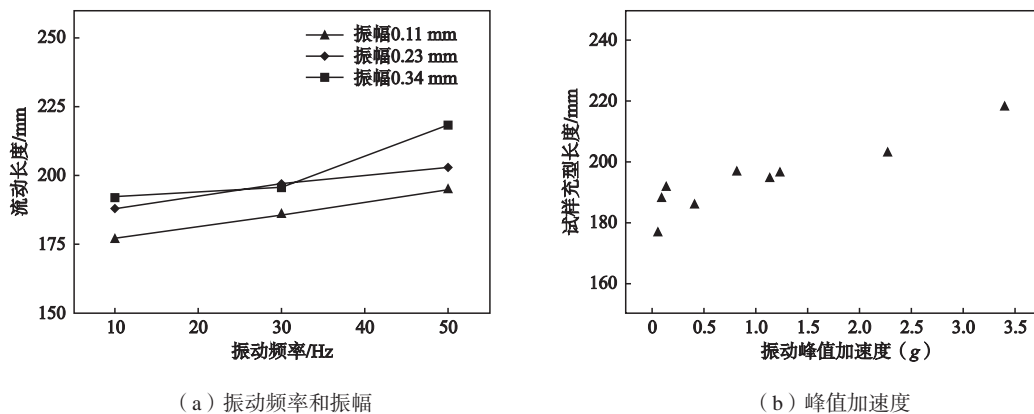


图6 振动对消失模铸造AZ91D镁合金充型能力的影响

Fig. 6 Effect of vibration on filling ability of LFC AZ91D Mg alloy

3 镁合金消失模壳型铸造技术

消失模壳型铸造技术是熔模铸造技术与消失模铸造结合起来的新型铸造方法。该方法是将用发泡模具制作的与零件形状一样的泡沫塑料模样表面涂上数层耐火材料，待其硬化干燥后，将其中的泡沫塑料模样燃烧气化消失而制成型壳，经过焙烧，然后在重力下（反重力）浇注，从而获得较高尺寸精度铸件的一种新型精密铸造方法^[35-36]，其工艺流程见图7所示。

消失模壳型铸造技术具有消失模铸造中的模样尺寸大、精密度高的特点，又有熔模精密铸造中结壳精度、强度等优点^[37-39]。与普通熔模铸造相比，其特点是泡沫塑料模料成本低廉，模样粘接组合方便，气化消失容易，克服了熔模铸造模料容易软化而引起的熔模变形的问题，可以生产较大尺寸的各种合金复杂铸件。同时，该技术不仅解决了普通消失模铸造易出现的气孔、夹杂等缺陷，还能保证铸件具有较高的尺寸精度和表面粗糙度以及良好的内在质量和成品率。如果再结合反重力和真空铸造，使得金属液在真空与充型气体的双重压力下进行充型，充型能力大大提高，在生产大型复杂薄壁铸件时具有明显的优势，且金属液在压力下凝固，铸件得到了充分的补缩，减少了气孔、缩松、针孔等缺陷，提高了组织致密性，因此适合生产高质量较大尺寸的复杂薄壁镁合金精密铸件^[31]。

彭乔元^[40-41]等研究了镁合金消失模壳型铸造中型壳的制备及工艺，表明当粉液比为3.2，焙烧温度为1 200 ℃时，硅溶胶-刚玉型壳具有较高的强度，型壳抗弯强度达到4.3 MPa。但考虑镁合金的特性和对型壳的性能要求，800 ℃焙烧型壳镁合金性能最优。

陈果^[42-43]等研究了消失模壳型铸造AZ91D镁合金的凝固组织与力学性能。指出浇注温度、铸件壁厚、

浇注压力等参数对镁合金凝固组织和力学性能有较大影响，其中铸件壁厚对铸件组织及力学性能影响最大。随着铸件的壁厚增大，铸件的力学性能呈下降趋势；随着浇注温度的提高，铸件力学性能有略微的下降趋势；负压方式浇注的铸件力学性能明显优于重力浇注的铸件。铸件浇注负压增大可以有效提高镁合金充型效果，提高铸件致密度，还可细化铸件组织晶粒。

图8为消失模壳型铸造和消失模铸造获得的进气歧管零件对比^[44]。易见，消失模壳型铸造获得的进气歧管铸件轮廓清晰，形状完整，表面光洁，内部致密，铸件表面粗糙度为3.2~6.3 μm。相比较，消失模铸造获得的铸件存在冷隔和孔洞缺陷，铸件表面粗糙度达到6.3~12.5 μm。可见，消失模壳型铸造成形高质量复杂薄壁铸件具有明显优势。

在消失模壳型铸造技术的基础上，将振动凝固应用到消失模壳型铸造技术也可以进一步细化镁合金凝固组织，提高镁合金的力学性能^[45-46]。图9是机械振动对消失模壳型铸造镁合金凝固组织的影响^[47]。明显看出，未振动时，消失模壳型铸造镁合金的凝固组织较为粗大，初生相为枝晶形态，第二相为连续的网络结构；经过机械振动以后，镁合金的凝固组织得到明显细化，初生相转变为细小的等轴晶，第二相变为细小的颗粒状分布于晶界处。

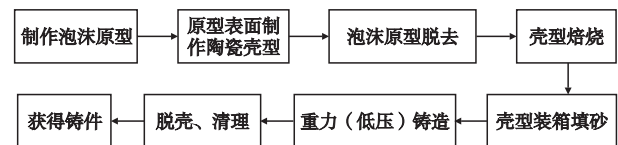
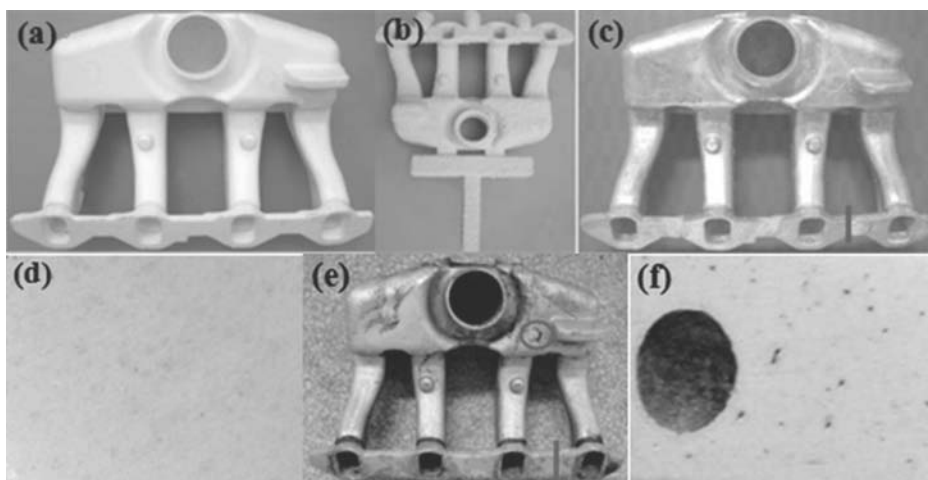


图7 消失模壳型铸造工艺流程图

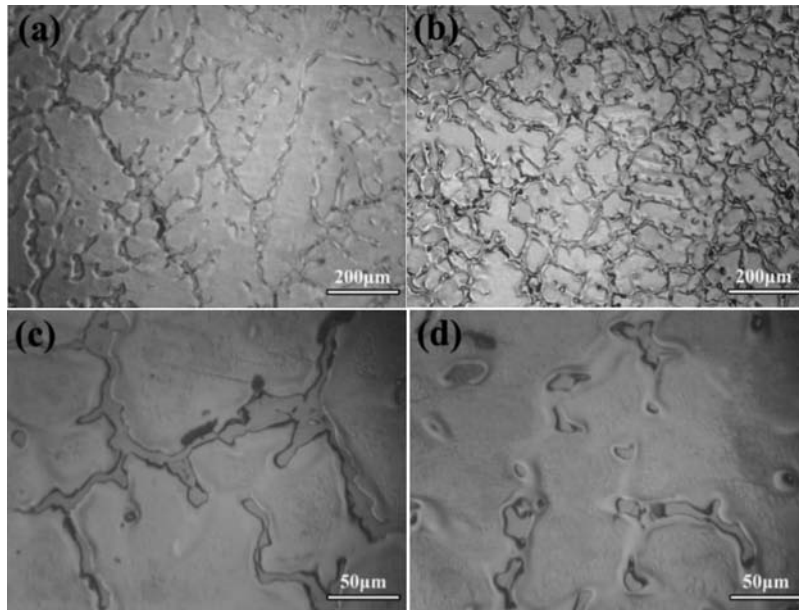
Fig. 7 Flow chart of expendable shell casting technology



(a) 泡沫模；(b) 型壳；(c) 消失模壳型铸件；(d) 消失模壳型铸件内部质量；(e) 消失模铸件；(f) 消失模铸件内部质量

图8 不同铸造工艺获得的进气歧管铸件

Fig. 8 Intake manifold castings produced by using different casting processes



(a)、(c) 未振动；(b)、(d) 振动

图9 机械振动对消失模壳型铸造镁合金凝固组织的影响^[47]

Fig. 9 Effect of vibration on microstructures of AZ91D Mg alloy produced by expendable shell casting

4 镁/铝双金属消失模铸造技术

镁/铝双金属是将镁合金与铝合金相复合，其结合了镁合金与铝合金的优点，可做到扬长避短，在航空航天、汽车等领域具有较大应用前景^[48-50]。镁/铝双金属消失模铸造技术是将消失模铸造技术应用于镁/铝双金属铸件的制备中^[51-53]，可结合消失模铸造的技术特点，获得的双金属铸件尺寸精度高、表面粗糙度低、结构设计自由度大、易实现清洁生产、成本低、泡沫模分解出小分子还原性气体对双金属界面具有很好的保护作用，可直接成形复杂的镁/铝双金属铸件，可解决其他工艺在制备镁/铝双金属铸件遇到的成本高以及金属易于氧化的问题，并可进行热处理强化^[54]。其工艺原理见图10所示，首先将一种固定合金嵌体装入泡沫模样中，经过涂刷涂料、烘干、造型后浇注，待凝固后即可获得双金属铸件。

图11为消失模铸造获得的镁/铝双金属铸件界面的显微组织形貌^[55-57]。可以看出，镁合金和铝合金在界面

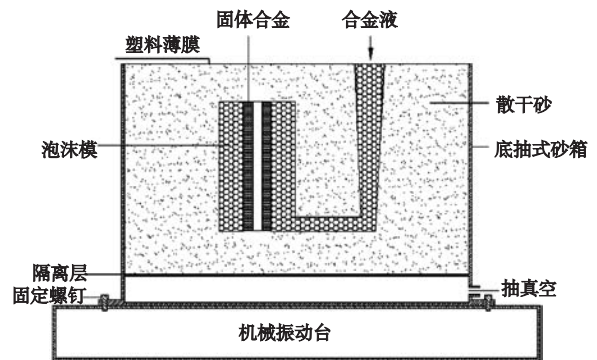
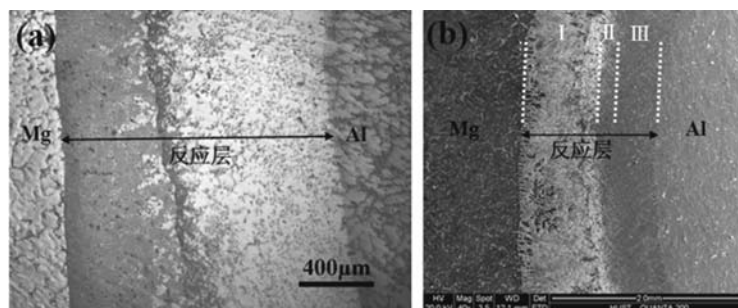


图10 消失模铸造镁/铝双金属制备技术原理图

Fig. 10 Schematic diagram of preparation technology of Mg/Al bimetallic casting based on LFC process



(a) OM形貌

(b) SEM形貌

图11 镁/铝双金属消失模铸件界面层微观组织形貌

Fig. 11 Microstructure of interface layer of Mg/Al bimetallic casting produced by LFC process

处生成了明显的冶金反应层，界面层厚度较为均匀，界面结合紧密，未发现孔洞缺陷，经测定界面层的平均厚度约为 $1\ 400\ \mu\text{m}$ 。另外，界面层不同位置呈现出不同的形貌，这说明界面层由不同的物相组成，镁合金和铝合金反应生成了不同的金属间化合物，大致可以分成三个不同的区域，分别为靠近镁侧的区域I，中间部位的区域II和靠近铝侧的区域III。

图12为镁/铝双金属铸件界面处元素线扫描结果^[55-56]。镁元素和铝元素在界面层处的含量存在明显波动，从镁侧到铝侧Mg元素含量逐渐降低，而Al元素的变化规律正好相反，界面层处也含有Si元素。对I、II、III区域分别进行高倍下观察（图13），并使用EDS和TEM对三个不同区域的组织进行元素定量分析（图14）^[57]。可以得出，镁侧的反应层（I区域）主要由共晶反应产生的 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} + \delta(\text{Mg})$ 共晶组织组成；中间层（II区域）主要由 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 金属间化合物和少量 Mg_2Si 组成；铝侧的反应层（III区域）主要由 $\text{Al}_3\text{Mg}_2 + \text{Mg}_2\text{Si}$ 组成。

5 结束语

随着航空航天、汽车、军工等行业的迅速发展，复杂镁合金铸件具有巨大的应用需求。消失模铸造作为一种适合生产复杂镁合金铸件的精密铸造技术必将大有可为。镁合金消失模铸造新技术是消失模铸造技术与其他技术复合而成的新技术，用来解决现有镁合金消失模铸造过程中主要存在的液态合金的充型能力差、孔洞缺陷严重、凝固组织粗大以及铸件的力学性能偏低等问题，其各有技术特点和应用前景。总体来说，镁合金消失模铸造新技术今后还存在如下挑战。

(1) 如何将现有消失模铸造工艺与低压铸造工艺以及压力凝固结晶技术相结合，综合低压铸造、压力凝固与真空消失模铸造技术优势，使得金属液在可控的气压下完成充型和凝固过程，明显提高金属液的充型能力和补缩能力，解决浇不足、针孔、夹渣、缩孔缩松等缺陷，获得组织致密、细小、力学性能优异的镁合金消失模铸件，研发出高效、成品率高、投资少的真空低压消失模铸造技术与装备系统，装备结构简单、升压速度快、设备投资少、所需气压压力低的镁合金消失模铸造压力凝固关键技术装备系统具有一定挑战。

(2) 如何将现有消失模铸造工艺与振动凝固技术相结合，在消失模铸造过程中施加一定频率和振幅的振动，使铸件在振动场的作用下凝固，利用振动力使液相与固相间产生相对运动，从而使枝晶破碎，增加液相内结晶核心，使铸件最终凝固组织细化，力学性能改善，研发出一种操作简便、成本低廉、颇有应用

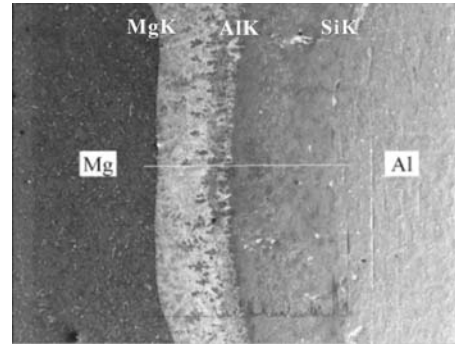
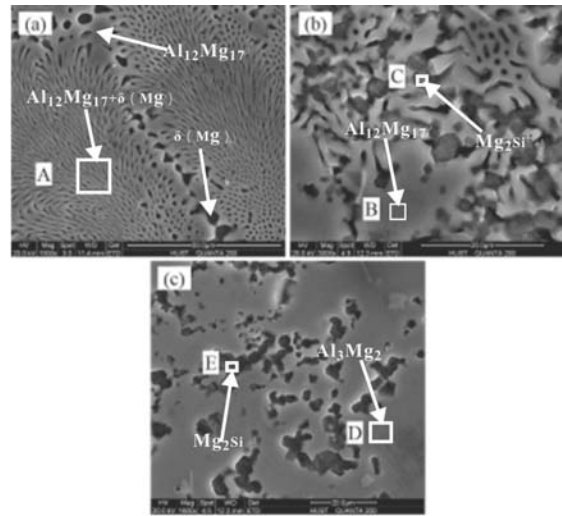


图12 镁/铝双金属消失模铸件界面处元素线扫描结果
Fig. 12 EDS line scan analysis of interface layer of Mg/Al bimetallic casting produced by LFC process.



(a) I区域; (b) II区域; (c) III区域

图13 镁/铝双金属铸件界面层不同区域SEM高倍图像
Fig. 13 High magnification SEM images of interface layer of Mg/Al bimetallic casting produced by LFC process

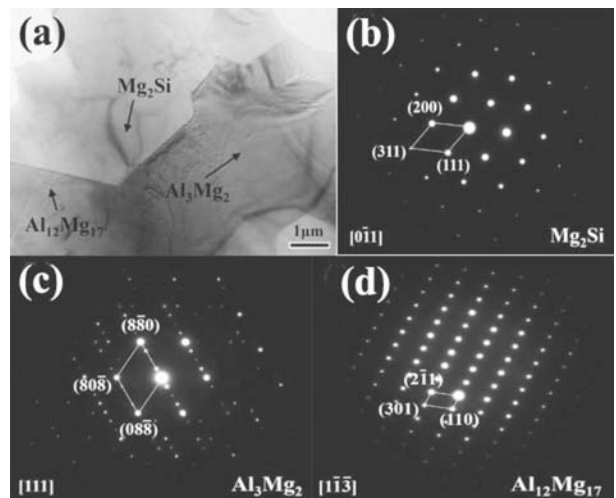


图14 镁/铝双金属铸件界面层TEM分析结果
Fig. 14 TEM analysis results of interface layer of Mg/Al bimetallic casting produced by LFC process

前景的镁合金消失模铸造振动凝固关键技术与装备系统也具有一定挑战。

(3) 如何利用消失模铸造工艺制备Mg-Al、Mg-Cu、Mg-Fe等双金属铸件, 获得界面结合良好、界面致密均匀、脆性金属间化合物少、结合强度高的复合双金属铸件, 研发出消失模铸造复合双金属铸件成形关键技术与装备系统是今后消失模铸造技术领域的研究热点和发展趋势, 具有较大挑战。

此外, 针对镁合金的消失模铸造技术, 需要研究和发展的技术还有: 适合消失模铸造的镁合金材料、特种涂料、新型泡沫模材料、热处理工艺、废气净化技术等。因此, 随着消失模铸造技术的不断革新和进步, 它对推动我国的国防、航空航天和汽车工业的发展具有非常重要的实际意义。

参考文献:

- [1] 黄乃瑜, 叶升平, 樊自田. 消失模铸造原理及质量控制 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004: 2-6.
- [2] GRIFFITHS W D, AINSWORTH M J. Instability of the liquid metal-pattern interface in the lost foam casting of aluminum alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47: 3137-3149.
- [3] 樊自田, 蒋文明. 消失模铸造技术现状及发展趋势 [J]. 铸造, 2012, 61(6): 583-591.
- [4] 吴国华, 刘子利, 樊昱, 等. 消失模铸造AZ91镁合金组织及耐蚀性研究 [J]. 铸造, 2005, 54(8): 767-771.
- [5] TORU M, MITSUYOSHI T, KEISUKE N, et al. Effect of molten metal temperature on mold filling in evaporative pattern casting[J]. International Journal of Metalcasting, 2019, 13(3): 611-617.
- [6] MARTIN W, ANDREAS M, MARION E, et al. Thermomechanical fatigue of lost foam cast Al-Si cylinder heads-assessment of crack origin based on the evaluation of pore distribution [J]. Metals, 2019, 9: 821.
- [7] LI X, YIN Y, ZHOU J X, et al. Pyrolysis characteristics and thermal kinetics of expanded polystyrene (EPS) and styrene-methyl methacrylate (St-MMA) copolymer in LFC process [J]. China Foundry, 2018, 15(6): 428-435.
- [8] OZNUR K, SERHAT A, ALPTEKIN K, et al. Investigation of carbon contamination in lost foam castings of low carbon steel [J]. China Foundry, 2018, 15(5): 384-389.
- [9] 王萍萍. 铝、镁合金消失模铸造涂料的制备及其性能研究 [D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [10] FAN Z T, JIANG W M, LIU F C, et al. Status quo and development trend of lost foam casting technology [J]. China Foundry, 2014, 11(4): 296-307.
- [11] JIANG W M, FAN Z T. Novel technologies for the lost foam casting process [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2018, 13(1): 37-47.
- [12] 郭广思, 谢凤涛, 王玉健, 等. 镁合金消失模铸造铝矾土基涂料的研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(11): 1218-1220.
- [13] 樊自田, 蒋文明, 赵忠. 铝(镁)合金消失模铸造近净成形技术研究进展 [J]. 中国材料进展, 2011, 30(7): 38-47.
- [14] 胡晶玉, 刘子利, 王渠东, 等. AZ91 镁合金负压消失模铸造流动性的研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2000(3): 16-19.
- [15] 刘子利, 王守仁, 刘希琴, 等. 镁合金负压消失模铸造金属-铸型间的传热 [J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(3): 390-394.
- [16] 张志东, 郭洪军, 王守仁, 等. 利用消失模铸造工艺生产AZ91镁合金箱体的研究 [J]. 铸造设备与工艺, 2015(2): 41-43.
- [17] LOMBARDI A, SIN S L, RAVINRAN C. Influence of silicon on the microstructure and mechanical properties of lost foam cast AE42 magnesium alloy [J]. Transactions of the American Foundry Society, 2010, 118: 331-338.
- [18] SIN S L, LOMBARDI A, RAVINRAN C. Influence of calcium on the castability, microstructure and mechanical properties of lost foam cast AE42 MAGNESIUM Alloy [J]. Transactions of the American Foundry Society, 2009, 117: 651-658.
- [19] HO S, HIBBARD G D, RAVINDRAN C. Production of magnesium thin-wall cellular castings through lost foam casting [J]. Transactions of the American Foundry Society, 2009, 117: 857-865.
- [20] 丁文江. 镁合金科学与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-3.
- [21] 陈家明, 宋登辉, 周涛, 等. 累积叠轧焊温度对AZ31镁合金板材组织与性能的影响 [J]. 精密成形工程, 2019, 11(4): 129-133.
- [22] 陶健全, 李晓松, 柴舒心, 等. 真空增压铸造对Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr合金工艺性能和力学性能的影响 [J]. 精密成形工程, 2017, 9(5): 139-143.
- [23] 樊自田, 董选普, 黄乃瑜, 等. 镁、铝合金反重力真空消失模铸造方法及其设备: ZL 02115638.7 [P]. 2002-12-04.

- [24] FAN Z, JI S. Low pressure lost foam process for casting magnesium alloys [J]. *Materials Science and Technology*, 2005, 21 (6) : 727-734.
- [25] LI J, ZHAO Z, FAN Z, et al. Study on typical hole defects in AZ91D magnesium alloy prepared by low pressure lost foam casting [J]. *China Foundry*, 2013, 10 (4) : 232-236.
- [26] 吴和保. 可控气压下镁合金消失模铸造充型凝固特征的基础研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005
- [27] 樊自田, 李继强, 田学峰, 等. 消失模铸造振动凝固方法: 200710168429.1 [P]. 2008-05-21.
- [28] 肖伯涛. 振动消失模铸造铸铁合金的组织及性能特征 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [29] 赵见知, 胡芳友, 杨琦楠, 等. 机械振动对消失模铸造铝合金组织与性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2017, 37 (2) : 166-169.
- [30] 冯清梅, 谭建波, 孙高钢. 振动频率对消失模铸造AlSi9Mg组织及性能影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2018, 38 (7) : 64-69.
- [31] XIAO B T, FAN Z T, JIANG W M, et al. Effect of vibration frequency on primary phase and properties of grey cast iron fabricated by lost foam casting [J]. *China Foundry*, 2020, 17 (1) : 1-7.
- [32] 李旋. 振动压力对铝合金消失模铸造组织及性能的影响研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2014.
- [33] ZHAO Z, FAN Z T, JIANG W M, et al. Microstructural evolution of Mg9AlZnY alloy with vibration in lost foam casting during semi-solid heat treatment [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20 (3) : 768-773.
- [34] 赵忠. 振动压力下铝(镁)合金消失模铸造组织性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [35] 蒋文明. 铝(镁)合金真空低压消失模壳型铸造技术基础研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [36] 樊自田, 蒋文明, 廖德锋, 等. 一种用于消失模壳型铸造的泡沫模样表面成膜方法: ZL 201010292109.9 [P]. 2012-03-07.
- [37] 袁子洲, 张劲松, 陈秀娟. 消失模精密铸造工艺研究 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2003 (4) : 46-47.
- [38] 沈桂荣, 黄景福, 曹健, 等. 气化模-精铸-负压复合铸造工艺研究 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2002 (4) : 54-60.
- [39] JIANG W M, FAN Z T, LIAO D F, et al. A new shell casting process based on expendable pattern with vacuum and low-pressure casting for aluminum and magnesium alloys [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 51 (1-4) : 25-34.
- [40] 彭乔元, 郑开宏, 张新明, 等. 镁合金消失模壳型铸造中型壳的制备及工艺研究 [J]. *铸造技术*, 2013, 34 (2) : 187-189.
- [41] 彭乔元. AZ91D镁合金消失模壳型铸造工艺研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [42] 谭海林, 赖春明, 周家林, 等. 消失模-壳型复合铸造AZ91D镁合金的凝固组织与性能 [J]. *铸造*, 2015, 64 (9) : 846-850.
- [43] 陈果. 镁合金消失模-壳型复合铸造工艺研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012.
- [44] JIANG W M, FAN Z T. Novel technologies for the lost foam casting process [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2018, 13 (1) : 37-47.
- [45] 蒋文明, 樊自田, 吴和保, 等. 基于泡沫塑料模的消失模壳型铸造振动凝固方法: ZL 201210246894.3 [P]. 2012-07-17.
- [46] JIANG W M, FAN Z T, CHEN X, et al. Combined effects of mechanical vibration and wall thickness on microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy produced by expendable pattern shell casting [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2014, 619 (12) : 228-237.
- [47] JIANG W M, FAN Z T, CHEN X, et al. Effects of mechanical vibration and wall thickness on microstructure and mechanical properties of AZ91D magnesium alloy processed by expendable pattern shell casting [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, 46 (4) : 1776-1788.
- [48] MOLA R, BUCKI T, DZIK M G. The effect of a zinc interlayer on the microstructure and mechanical properties of a magnesium alloy (AZ31)-aluminum alloy (6060) joint produced by liquid-solid compound casting [J]. *JOM*, 2019, 71 (6) : 2078-2086.
- [49] CHEN Y Q, ZHANG H, ZHU Z, et al. Inhibiting brittle intermetallic layer in magnesium/aluminum bimetallic castings via in situ formation of Mg₂Si phase [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2019, 50: 1547-1552.
- [50] TAYAL R K, SINGH V, GUPTA A, et al. Experimental investigation and evaluation of joint strength of A356/Mg bimetallic fabricated using compound casting process [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2019, 13 (3) : 686-699.
- [51] EMAMI S M, DIVANDARI M, HAJJARI E, et al. Comparison between conventional and lost foam compound casting of Al/Mg light metals [J]. *Int J. Cast Metal. Res.*, 2013, 26: 43-50.
- [52] GULER KA, KISASOZ A, KARAASLAN A. Fabrication of Al/Mg bimetals by lost foam technique and liquid-solid process [J]. *Mater. Test*, 2014, 56: 700-702.

- [53] 蒋文明, 李广宇, 樊自田, 等. 一种消失模铸造液-液复合铝-镁双金属铸件的方法: ZL 201610486767.9 [P]. 2017-12-12.
- [54] JIANG W M, FAN Z T, LI G Y, et al. Effects of melt-to-solid insert volume ratio on the microstructures and mechanical Properties of Al/Mg bimetallic castings produced by lost foam casting [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47 (12) : 6487-6497.
- [55] JIANG W M, LI G Y, FAN Z T, et al. Investigation on the interface characteristics of Al/Mg bimetallic castings processed by lost foam casting [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47 (5) : 2462-2470.
- [56] LI G Y, YANG W C, JIANG W M, et al. The role of vacuum degree in the bonding of Al/Mg bimetal prepared by a compound casting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 265: 112-121.
- [57] LI G Y, JIANG W M, YANG W C, et al. New insights into the characterization and formation of the interface of A356/AZ91D bimetallic composites fabricated by compound casting [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50 (2) : 1076-1090.

Study on New Technologies of Lost Foam Casting Process for Mg Alloys

JIANG Wen-ming, FAN Zi-tian

(School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:

Lost foam casting (LFC) belongs to a green precision casting technology with some special advantages. However, some problems were exposed in the LFC process of Mg alloys, including poor filling ability, serious pore defects, coarse microstructure as well as low mechanical properties, etc. Based on above problems, some new LFC technologies for Mg alloys were developed. This paper mainly introduces the latest research progress of these new LFC technologies. The LFC under low pressure and vacuum can make the filling of the molten metal stable, improve the filling ability of the molten metal and protect the filling process of Mg liquid metal. By means of mechanical vibration in the LFC process, the filling ability of liquid alloy, microstructure and the mechanical properties of castings can be improved. The expendable shell casting technology can eliminate or reduce some pinhole and slag inclusion defects in the castings. It is a new process for manufacturing complicated Mg alloy precision castings. The complicated Mg/Al bimetallic castings can be directly produced by using the LFC technology with a low cost. All the above LFC techniques for Mg alloys have their own characteristics and application prospects.

Key words:

Mg alloy; lost foam casting (LFC); vacuum and low pressure; vibration solidification; shell casting; bimetallic castings

金属熔体凝固过程中固-液界面能的计算

田梅娟^{1,2}, 坚增运¹, 海 瑞²

(1. 西安工业大学材料与化工学院, 陕西西安 710021; 2. 宝鸡文理学院化学化工学院, 陕西宝鸡 721013)

摘要: 归纳了固-液界面的特点, 介绍了固-液界面能的实验测量方法、分子动力学计算方法, 分析了这些方法的优缺点, 并重点阐述了固-液界面能的模型。提出目前借助于计算机模拟和相关理论模型可以计算绝大部分金属的固-液界面能及其各向异性。在展望其应用前景的基础上, 指出了计算界面能未来的发展方向。

关键词: 金属凝固; 固-液界面能; 计算; 测量

界面是指不同相间的交界面, 根据接触相的类型, 界面可以分为固-液、固-固、固-气、液-液、液-气五种界面。固-液界面是固相与液相的交界区域, 广泛存在于材料的制备和应用过程中, 厚度仅为纳米量级^[1], 但其特性在很大程度上影响和决定了材料的凝固形核、浸润、润湿、晶体生长等现象^[2]。因此, 对固-液界面特性的研究和认识, 不仅对完善材料科学领域的理论框架具有重要的意义, 而且为许多实际工程应用中存在的问题提供了有价值的理论指导。

金属熔体凝固过程中, 界面区域原子会同时受到固-液两相原子的作用, 使得界面区域的结构与相内部的结构不同。因此, 固-液界面不能简单地被看作是固相和液相的结合面, 而是一个具有复杂结构的过渡区域^[3-7]。晶体凝固后呈现不同的形状, 按原子尺寸把固-液界面分为两类: 粗糙界面和光滑界面^[8-9], 如图1所示^[10]。光滑界面中, 固-液界面上的原子排列比较规则, 界面处固-液两相截然分开, 在微观尺度上是光滑平整的, 宏观上是由不同位向的小平面所组成, 呈现锯齿状的折线状, 又被称为小平界面; 在粗糙界面中, 固-液界面上的原子排列比较混乱, 原子分布高低不平, 存在几个原子层厚的过渡层, 在过渡层中, 固相原子占据了半数位置, 由于过渡层很薄, 宏观上看界面反而是平直的, 即非小平界面。

固-液界面能作为基本的热力学参量, 是一个非常重要的物理量, 指产生单位面积的界面所需要的自由能大小。其对晶体在熔体中的形核和生长以及许多结晶工艺过程有很大的影响, 对凝固过程中的微观组织稳定性及相变动力学都起着关键性的作用, 是凝固组织形态选择的重要影响因素。研究固-液界面能, 就可以对凝固过程中诸如形核率^[11-13]、生长速率^[14-15]和生长方式^[16-18]等许多问题进行分析和研究, 也能对由凝固特性所决定的材料组织与性能进行有效调控。

1 金属熔体固-液界面能的测量与计算方法

1.1 实验测量法

固-液界面能在本质上是由于固-液两相结构上的差异引起的, 数值较小, 一般只有几十到几百 (mJ/m^2), 并且两相都是凝聚相, 而它的各向异性又很微弱, 其值很难进行直接测量。为此, 发展了一些间接测量方法, 例如, 均质形核过冷法^[19]、平衡形态法^[20]、晶界凹槽法^[21], 下面对这些方法进行简单的介绍。

1.1.1 形核过冷度法

通过测定金属的最大形核过冷度, 利用均质形核率公式计算过冷状态下界面能

作者简介:

田梅娟 (1985-), 女, 博士生, 主要研究方向为铝合金材料。E-mail: tianmeijuan549@126.com

通讯作者:

坚增运, 男, 教授, 博士, 博士生导师。电话: 029-86173323, E-mail: jianzengyun@xatu.edu.cn

中图分类号: TG111.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)

01-0038-06

基金项目:

国家自然科学基金 (51971166)。

收稿日期:

2020-05-24。