

镁合金熔模铸造技术及其应用

赵鹏^{1,2}, 洪润洲^{1,2}, 周永江^{1,2}, 张喆^{1,2}, 范学焱^{1,2}, 左强^{1,2}, 姚惟斌^{1,2}, 陈明伟¹

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心, 北京 100095)

摘要: 梳理了镁合金熔模铸造技术所涉及的铸造镁合金类型、熔炼浇注方法、熔体与型壳界面反应机理研究、型壳制备工艺以及镁合金熔模精密铸件的应用情况, 提出了镁合金熔模铸造中存在缺乏型芯技术的技术问题。认为镁合金熔模精密铸造技术对于满足结构材料轻量化需求有着明显的优势, 具有良好的应用前景。

关键词: 铸造镁合金; 熔模铸造; 发展现状

镁合金是目前用于制造结构用铸件的各种金属材料中密度最小的金属(大约是铝合金的2/3、钢的1/4)^[1]。镁合金已应用于汽车、航空、航天、电子产品及体育用品等行业或领域。目前镁合金的铸造工艺主要是砂型铸造、压铸, 其他铸造工艺研究和应用的较少。熔模精密铸造工艺是金属材料铸造成形技术中重要的铸造工艺之一, 由于该工艺具有尺寸精度高、表面光洁度高的特点, 是航空、航天等精密铸件的主要生产工艺。熔模精密铸造工艺已广泛应用于铸铁、铸钢、铸造铝合金、铸造钛合金以及铸造高温合金, 但在镁合金方面还属于应用较少的生产工艺, 相应的研究工作开展得也不充分。本文将围绕镁合金熔模铸造工艺相关的铸造合金、熔炼浇注、型壳制备等重要工艺环节进行介绍和论述, 并对目前镁合金熔模铸造工艺主要的技术问题进行讨论, 对该工艺的未来发展进行展望。

1 铸造镁合金

目前的铸造镁合金基本都可用于熔模铸造。铸造镁合金按合金系可分为以下四类^[2]: ①镁-铝系合金, 国内的典型合金为ZM5合金; ②镁-锌-锆系合金, 国内的典型合金为ZM1合金、ZM2合金; ③镁-稀土-锆系合金, 国内的典型合金为ZM3合金、ZM4合金、ZM6合金; ④镁-锂系合金, 目前国内还没有镁-锂系合金的牌号。目前国内应用于熔模铸件的镁合金有ZM5合金以及WE43等国外合金。

欧美一些发达国家在铸造镁合金方面开展的研究工作较多。目前应用比较广泛的合金包括AZ91合金、EA31A合金、WE43合金、WE54合金等。其中, 美国的Elektron 21 (EV31A) 合金不仅具有较好抗拉强度, 还具有良好的抗反应性。在铸件壁厚比较大的情况下(最厚部位75 mm), 该合金熔体也没有与型壳表面发生反应^[3]。Elektron 21 (EV31A) 合金熔模铸造试样拉伸强度的结果表明与该合金的砂型铸造试样拉伸强度相近^[3]。在熔模铸造条件下, Elektron 21 (EV31A) 合金表现出了较好的工艺性和力学性能, 是非常适合熔模铸造的一种铸造镁合金。图1^[3]为Elektron 21 (EV31A) 合金熔模铸件。

目前铸造镁合金发展方向和研究的热点主要包括高性能耐热镁合金、镁锂合金等。其中高性能耐热铸造镁合金主要是含稀土镁合金, 包括Mg-Nd、Mg-Y、Mg-Gd等多个体系。目前国内的部分高校在含稀土高性能铸造镁合金方面进行了系统的研究, 其中的部分合金具有良好的综合力学性能, 并已实现在航空航天领域的应用^[4]。镁锂合金作为目前密度最小的金属结构材料, 在航空、航天领域有着很好的应用前

作者简介:

赵鹏(1979-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事铝合金熔模铸造工艺研究。E-mail: tercelxy@sina.com

中图分类号: TG146.2;
TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)
12-1542-06

收稿日期:

2023-03-11 收到初稿,
2023-06-30 收到修订稿。



图1 Elektron 21 (EV31A) 合金熔模铸件 (高350 mm, 最厚部位 75 mm)

Fig. 1 Elektron 21 (EV31A) investment casting (H: 350 mm, maximum thickness: 75 mm)

景,但目前关于铸造镁合金开展的研究很少,关于镁合金熔模铸造的研究更少,因此加大镁锂合金熔模铸造的研究力度,推进镁锂合金铸件的应用是很有必要的。

2 熔炼保护

目前生产中常用镁合金的熔炼设备主要包括电阻炉、燃气炉,采用钢制坩埚。熔炼和浇注过程中要重点防范镁合金的过度氧化和燃烧,防止镁合金过度氧化和燃烧的方法有阻燃剂覆盖法、气体保护法、熔体合金化法^[5]以及真空熔炼和浇注。目前常用的阻燃剂有硫磺粉和硼酸的混合物,保护性气体有SF₆、SO₂、CO₂、Ar、N₂等。在熔体合金化方面,目前认为有增加阻燃效果的元素包括Be、Ca和一些稀土元素。

为了减少镁合金浇注过程中氧化、燃烧和与型壳反应,可以在型壳材料中添加有阻燃效果的碳粉、硫铁矿粉、硼酸等,这样有利于减少镁合金液体的氧化燃烧以及镁合金熔体与型壳之间的反应。如果在浇注前将热硼酸溶液涂灌到型壳中,这样得到的铸件表面质量更好^[6]。还有的方法是将型壳在焙烧后浸入到阻燃剂中(36.5%的NaBF₄溶液),风干后再入炉加热至350~400℃烘烤2~3 h,出炉后浇注^[7]。

镁合金熔模铸造的浇注方法包括重力浇注、真空吸铸、低压铸造等常用的浇注方法。已有的研究表明,真空吸铸、低压铸造比重力浇注更有利于消除镁合金铸件内部缺陷,可以制备内部致密、表面质量好的ZM5、WE43、WE54等中等尺寸规格的镁合金熔模铸件^[8-10]。

国外研究^[11]表明,采用真空浇注加氩气保护可以制备出质量优良的小尺寸复杂薄壁镁合金铸件。

3 界面反应

由于镁合金化学性质活泼,因此容易在浇注过程中与铸型发生反应。熔模铸造的型壳面层材料主要是

氧化物耐火材料,包括刚玉、锆英粉、硅砂等。镁合金在浇注过程中主要是与耐火材料中的氧元素结合,形成氧化镁及其他产物,这样导致镁合金铸件有粘砂、表面不光洁等问题,影响镁合金表面质量,这对于镁合金熔模铸件是难以接受的。关于镁合金熔体与陶瓷型壳的界面反应机理研究方面,根据面层材料的不同,镁合金熔体与陶瓷型壳的界面反应机理大概可以归纳为以下3种。

(1) 镁合金熔体与氧化硅反应。氧化硅是型壳材料中常用的耐火材料。相关的研究^[12]表明,浇注过程中,镁蒸汽容易进入型壳,与型壳材料中SiO₂发生如下反应 $4Mg+SiO_2=2MgO+Mg_2Si$ 。

(2) 镁合金熔体与锆英粉反应。当型壳面层耐火材料为锆英粉,粘结剂为硅溶胶时,镁合金熔体与型壳表面反应的产物主要是MgO、Zr和ZrSi₂^[13]。

(3) 镁合金熔体与刚玉反应。当型壳面层耐火材料为刚玉时,镁合金熔体与型壳表面反应的产物主要是MgO和MgAl₂O₄。

镁合金熔模铸造用陶瓷型壳的制备工艺与其他金属材料的基本相似,差别主要是面层的耐火材料。从热力学角度根据氧化物吉布斯自由能来判断氧化物与镁合金熔体反应性,目前几乎可用的所用氧化物都会与镁合金熔体反应。国外有研究表明^[14]CaO、ZrSiO₄、Al₂O₃、CaZrO₃四种耐火材料对AZ91镁合金的抗反应性依次降低。熔体在型壳表面的润湿性会影响镁合金熔体与型壳面层材料的反应。与锆英粉相比,电熔刚玉对于AZ91镁合金的抗反应性较好,这与AZ91镁合金熔体在电熔刚玉表面润湿性差于锆英粉有关系^[13]。

在镁合金熔模型壳材料的选用方面,研究人员开展了一系列的试验研究。面层耐火材料涉及氧化钇、镁砂^[15]、氧化锆^[9]、刚玉^[6]、铝矾土粉和砂^[6],粘结剂主要为硅溶胶^[9]、硅酸乙酯^[6]、水玻璃^[6],背层的耐火材料为常用的铝矾土^[9]、刚玉^[6]、莫来石、煤矸石等,粘结剂包括硅溶胶、水玻璃^[6]。采用这些材料制备的型壳可以满足镁合金铸造的要求,但都难以阻止镁合金熔体与型壳的界面反应。

实际生产中,国外选用了锆英石(ZrSiO₄)和熔融石英作为面层材料,莫来石作为背层材料,或者采用碳酸锆铵作为粘结剂,氧化锆作为面层材料^[10]。国内有生产单位采用氧化钇作为面层材料,获得了表面良好的铸件^[16]。但是目前绝大部分镁合金型壳在浇注前都要涂灌硼酸、氟硼酸^[9]等阻燃材料,这样可以防止浇注过程镁合金燃烧,又有助于镁合金铸件获得良好的表面质量。

综上所述,选用抗反应性好的氧化钇、氧化锆等面层材料和无硅粘结剂,再辅以硼酸等阻燃材料,制

备的镁合金铸件表面质量最好。

4 镁合金熔模铸件的组织、性能

与其他金属材料相似，镁合金铸件的组织和性能受铸型（冷却速度）影响较大。目前的一些研究结果表明，与其他铸型工艺相比，熔模铸件的拉伸性能低于金属型，与砂型接近^[3, 6]。

镁合金熔模铸件的组织和性能受浇注温度、型壳温度、铸件壁厚等因素影响，相关研究表明，壁厚对铸件组织、性能影响较大。WE43壳体熔模铸件的组织、性能研究结果表明，较薄的侧壁处（6 mm厚）冷却速度快于厚大棱柱部位（32 mm厚），其晶粒尺寸小于棱柱处，力学性能高于棱柱处^[17]。WE43铸件本体室温拉伸力学性能见表1^[17]，铸件金相组织见图2^[17]。AZ91合金熔模铸造阶梯试样的分析表明，同一型壳温

表1 WE43铸件本体室温拉伸力学性能
Table 1 Tensile mechanical properties at room temperature of the WE43 castings

取样位置	状态	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
棱柱	铸态	136.5	172.6	2.1
	T4	137.2	197.7	5.9
	T6	198.3	224.8	0.6
侧壁	铸态	148.4	196.8	4.2
	T4	147.1	221.8	11.5
	T6	215.5	254.7	0.8

度浇注出的试样随着壁厚增大，铸件的抗拉强度、屈服强度、伸长率呈下降趋势；而在相同壁厚条件下，不同型壳温度浇注出的铸件的力学性能基本在同一水平（图3）^[6]。

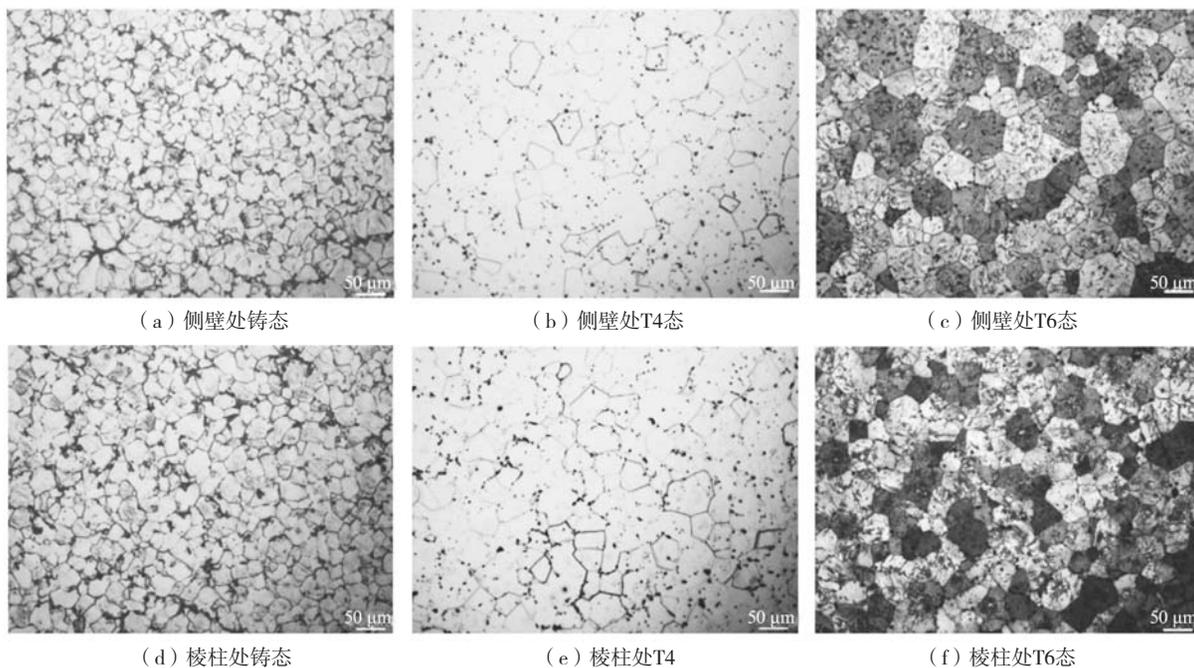


图2 铸件金相组织

Fig. 2 Metallographic microstructures of the castings

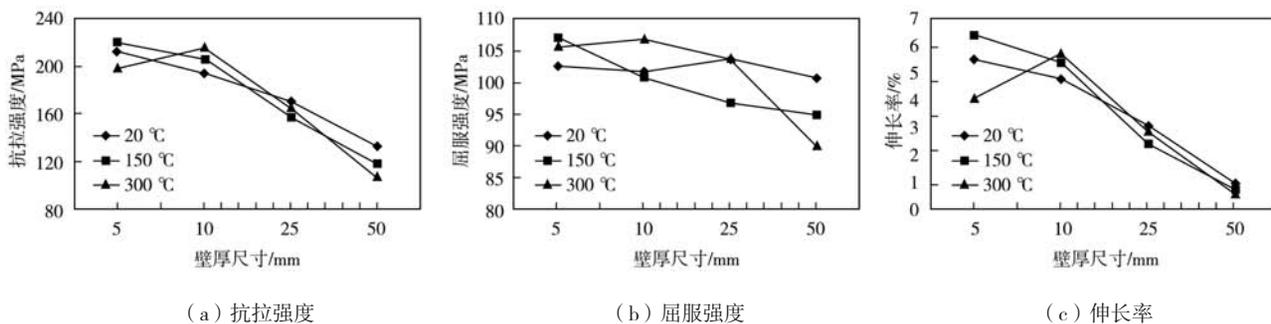


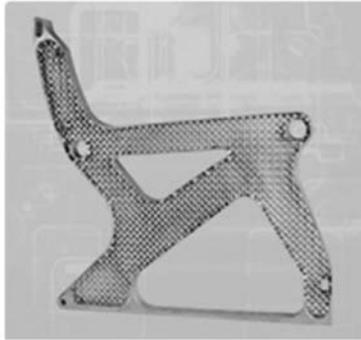
图3 不同型壳温度下浇注的阶梯形熔模铸件的力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of step-like investment castings at different mold temperatures

5 铸件应用情况

由于熔模铸造工艺可以铸造结构复杂、壁薄、尺寸精度高的精密铸件，镁合金熔模铸件主要应用于航空、航天等先进装备构件的制造。目前国内应用的镁合金熔模铸件有航空发动机的附件机匣铸件、航天飞行器电子舱体^[18]等。国外已用于航空发动机机匣、航

空座椅^[19]、机械手臂、微型无人机骨架等。这些镁合金铸件^[20]（图4）壁薄，结构复杂，反映出了国外制造厂很高的工艺水平。特别需要指出的是，国外的一些镁合金熔模铸造厂已经比较多地应用快速成形（3D打印）蜡模来进行复杂薄壁结构铸件（如图4a、b）的生产，铸件的表面质量和尺寸精度都很好。



(a) 航空座椅支架 (442 mm × 432 mm × 20 mm)



(b) 无人机骨架 (48 mm × 48 mm × 28 mm)



(c) 机器人臂 (362 mm × 69 mm × 44 mm)



(d) 汽车雨刷电机零件 (101.6 mm × 165 mm, 壁厚1 mm)



(e) 踏板



(f) 箱体

图4 优质镁合金熔模铸件

Fig. 4 Magnesium alloys investment castings

6 存在的技术问题

由于镁合金容易燃烧，这导致镁合金的熔炼和浇注过程存在一定的安全风险。此外，镁合金熔体易与一般的铸型材料反应，影响铸件表面质量。这些因素限制了镁合金熔模铸造工艺的应用和快速发展。总体来讲，相对于其他金属材料，镁合金的熔模铸造研究工作开展的还不够充分。以下方面的技术问题需要进一步研究和解决。

6.1 镁合金熔模铸造用型芯技术

目前还缺乏镁合金熔模铸造用型芯的制备技术。由于熔模铸造工艺的特点，镁合金熔模铸造用型芯需要在蜡模制备阶段就嵌入蜡模中，之后还需要经过涂料、脱蜡、焙烧这些工艺环节。这是不同于砂型铸造型芯的。砂型铸造型芯在完成制芯后，合型后即可浇注。熔模铸造型芯则需要经受压蜡过程中蜡料的冲击、脱蜡时蜡料的膨胀挤压和焙烧的高温，因此要求镁合金熔模铸造用型芯有较好的强度和耐热性，而且

还要便于浇注后清理。综上所述,镁合金熔模铸造型芯需要强度、耐热性、溃散性、抗反应性、尺寸稳定性等诸多特性进行匹配,最终具有良好的综合性能,因此可见镁合金熔模铸造型芯制备技术难度很大。目前镁合金铸造所用的型芯,如可溶性盐芯、有机可溶型芯以及可溶性耐火材料型芯等存在强度低或者发气量大或者吸潮等问题^[21],都不适用于镁合金熔模铸造工艺。由于目前缺乏镁合金熔模铸造型芯技术,因此这一点限制了镁合金熔模铸造技术的应用范围,对于具有复杂内腔结构的镁合金铸件,比如航空发动机机匣类铸件,就难以采取镁合金熔模铸造工艺铸造。

6.2 镁合金熔模铸件的力学性能数据补充

目前的铸造镁合金力学性能数据大部分是砂型和金属型铸造试样的数据,很多牌号的铸造镁合金缺少熔模铸造试样的力学性能数据,应该开展相关测试、研究工作,补充熔模铸造工艺条件下铸造镁合金的力学性能数据,为镁合金构件设计人员提供参考数据。

7 总结与展望

综上所述,高强耐热镁合金是目前铸造镁合金的主要发展方向之一。镁锂合金作为一种新型铸造镁合金,因其低密度,展示了良好的应用前景而受到关注,但目前开展的研究还不充分,特别是熔模铸造

条件下的铸造工艺性和铸造工艺还鲜有研究,因此有必要开展这方面的研究工作。限制镁合金熔模铸造工艺快速发展的主要原因是镁合金浇注过程容易燃烧并与铸型材料反应。浇注过程的阻燃方法目前主要是采用保护性气体, SF_6 、 SO_2 、 CO_2 、Ar是目前常用的保护性气体。已有的研究表明,目前型壳的面层材料以氧化钇的抗反应效果最好,如果能够辅以硼酸、氟硼酸盐等阻燃材料效果更佳。浇注过程如果是采用真空环境,会更有利于镁合金的充型,适宜制备小尺寸复杂薄壁镁合金铸件。镁合金熔模铸件厚大部位的晶粒尺寸一般会大于薄壁部位的晶粒尺寸,经过固溶处理后,晶粒会有所长大。目前欧美的镁合金熔模铸造技术水平较高,国内与之还有较大差距。

全球对于减少能源消耗的要求越发迫切,轻质材料将被更广泛地应用。镁合金作为目前应用的最轻的金属结构材料将有更广泛的需求。随着镁合金熔模铸造相关研究工作广泛、深入地开展和各项技术问题的逐步解决,加大蜡模增材制造、真空熔炼和浇注等先进加工方法在镁合金熔模铸造工艺过程的应用,以及进一步提高镁合金熔模铸件的力学性能,镁合金熔模铸造会像其他金属材料的熔模铸造工艺一样成为镁合金铸造的重要工艺手段,展现出良好的应用前景。镁合金熔模铸件也会因其尺寸精度高、表面质量好的优势得到产品设计方的青睐。

参考文献:

- [1] 李传斌. 镁合金铸件生产技术的发展概况 [C]//2007年中国压铸、挤压铸造、半固态加工学术年会专刊, 2007: 4-9.
- [2] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册第3卷: 铸造非铁合金 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [3] LYON, ISMET Syed, STEVE Heaney et al. Elektron 21-an aerospace magnesium alloy for sand cast and investment cast applications [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2007, 9 (9): 793-798.
- [4] 丁文江, 吴国华, 李中权, 等. 轻质高性能镁合金开发及其在航天航空领域的应用 [J]. *上海航天*, 2019, 36 (2): 1-8.
- [5] 丁文江, 吴玉娟, 彭立明, 等. 高性能镁合金研究及应用的新进展 [J]. *中国材料进展*, 2010, 29 (8): 37-45.
- [6] 林志勋. 镁合金熔模铸造成型工艺与组织性能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [7] 刘珍君, 吴海龙, 邢昌勇, 等. 一种精铸镁合金模壳制备工艺, 中国: CN105014011A [P]. 2015.11.04.
- [8] 刘廷芬, 朱世俊. 镁合金熔模真空吸铸的研究 [J]. *昆明工学院学报*, 1994, 19 (4): 71-76.
- [9] 冯志军, 占亮, 李宇飞, 等. WE43镁合金铸件低压-熔模铸造 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2012, 3 (3): 259-261.
- [10] 林志勋, 蒋海燕, 付彭怀, 等. 镁合金薄壁复杂零件熔模铸造成形工艺研究 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2008, 28 (6): 457-459.
- [11] LOPES V, PUGA H A, GOMES IV, et al. Magnesium stents manufacturing: experimental application of a novel hybrid thin-walled investment casting approach [J]. *Journal of Materials Processing Tech.* 2022 (299): 1-11.
- [12] SIN S LUN, DUBE'D, TREMBLAY R. Interfacial reactions between AZ91D magnesium alloy and plaster mould material during investment casting [J]. *Materials Science and Technology*, 2006, 22 (12): 1456-1463.
- [13] VYAS AV, AYAR VS, SUTARIA M.P., et al. Investigation on reactive wetting during investment casting of magnesium alloy AZ91 [J]. *Materials Today: Proceedings*: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.521>.
- [14] SHAEKWANG Kim, MYOUNGGYUN Kim, TAEWHAN Hong, et al. Investment casting of AZ91HP magnesium alloy [J]. *Metals And Materials*, 2000, 6 (3): 275-279.

- [15] 陈果, 曾大新, 周家林. 镁合金铸型界面反应及阻止反应技术 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (15) : 47-52.
- [16] 吴海龙, 莫雪妍, 郑宗文, 等. 镁合金熔模铸造技术发展现状 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (2) : 236-240.
- [17] 刘清, 闫宏, 单智伟, 等. WE43镁合金壳体熔模铸造工艺数值模拟与试验研究 [J]. 铸造, 2019, 68 (11) : 1273-1277.
- [18] 李飞, 孔振, 杨力祥, 等. 镁合金电子舱体浇注系统设计及快速熔模铸造 [J]. 航天制造技术, 2018 (2) : 6-10.
- [19] 飞机靠背椅框架铸件获得美国铸造协会2017年年度铸件奖 [J]. 铸造, 2017, 66 (7) : 768-769.
- [20] ARRUEBARRENAS, IÑAKI Hurtado, JUKKA Väinölä, et al. Development of investment-casting process of Mg-Alloys for aerospace applications [J]. Advanced Engineering Materials, 2007, 9 (9) : 751-756.
- [21] 刘富初. 复杂镁合金铸件的型芯材料及清理技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.

Magnesium Alloys Investment Casting Technology and Its Application

ZHAO Peng^{1,2}, HONG Run-zhou^{1,2}, ZHOU Yong-jiang^{1,2}, ZHANG Zhe^{1,2}, FAN Xue-yi^{1,2}, ZUO Qiang^{1,2}, YAO Wei-bin^{1,2}, CHEN Ming-wei¹

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Beijing Advanced Engineering Technology and Application Research Center of Aluminum Alloys, Beijing 100095, China)

Abstract:

In this paper, casting magnesium alloys, melting and pouring, melt/mould reaction mechanisms, preparation of mould and application of magnesium alloys investment casings are all introduced. Core preparation as a key technology of magnesium alloys casting process should be developed. For the properties of magnesium alloys and advantages of investment casting, it can be believed that magnesium alloys investment casting can make components lighter and be widely applied.

Key words:

casting magnesium alloys; investment casting; development status
