

# 镁合金压铸成形技术 研究进展

清华大学机械工程系 熊守美



熊守美：

清华大学机械工程系教授、博士生导师，清华-东洋镁铝合金成形技术研究开发中心主任。入选2004年度教育部“新世纪优秀人才支持计划”。发表学术论文100余篇，出版专著1部，参编专著1部，主编出版材料工程大典第19卷第6篇。获奖成果4项，其中清华大学基础研究成果奖1项，国家教育部科技进步一等奖1项、二等奖1项，北京市科技进步二等奖1项。主要从事高性能镁铝合金压铸工艺及压铸过程宏/微观数值模拟等研究工作

镁合金以其具有的质量轻、比强度和比刚度高、减震性好、屏蔽和导热性优良、成形加工性好、易于回收等优点而被誉为“21世纪的一种绿色工程材料”，被广泛应用于航空、航

压铸工艺是镁合金零件成型的主要方法，采用数值模拟技术对镁合金压铸模具及其加热冷却系统的优化设计，开展镁合金压铸工艺试验研究和对压铸镁合金材料的开发，及对真空、超低速等压铸工艺的研究，对发展镁合金结构的应用具有重要意义

天、汽车和电子等行业。高压铸造是镁合金结构件的主要成形制造工艺，其研究和发展对镁合金结构件的应用具有重要的理论及实践意义。本文介绍了“清华-东洋镁铝合金成形技术研究开发中心”在镁合金压铸工艺试验研究、镁合金压铸工艺工程数值模拟及优化、高性能镁合金压铸工艺、压铸镁合金材料开发、镁合金熔炼气态保护机制及保护工艺试验研究等方面的研究进展。

镁合金是现有可以工业化生产金属材料中最轻的材料。我国是镁资源储藏大国，原镁储藏量占世界储藏量的1/3，2003年我

国原镁的生产已经超过35万t，其中大部分以低附加值的镁原材料形式出口到发达国家，镁合金制品出口相对较少。总体上，我国镁合金的生产和应用仍然处在低端的水平，只有提高我国镁合金产品的技术附加值，才能使我国从“镁资源大国”转变为“镁生产强国”。

用于镁合金结构件的比例约占原

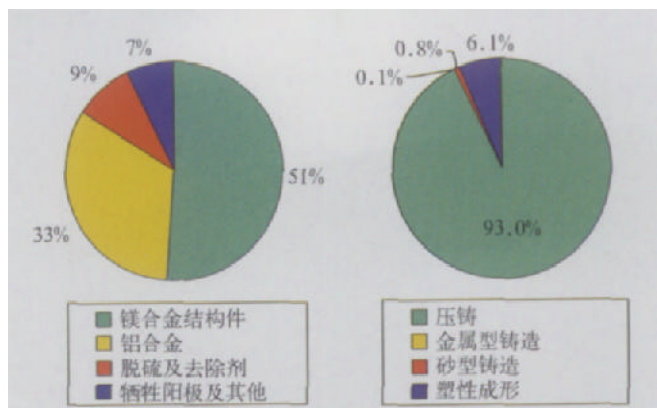


图1 2003年美国原镁消耗结构(左)及镁合金结构件成形方法(右)

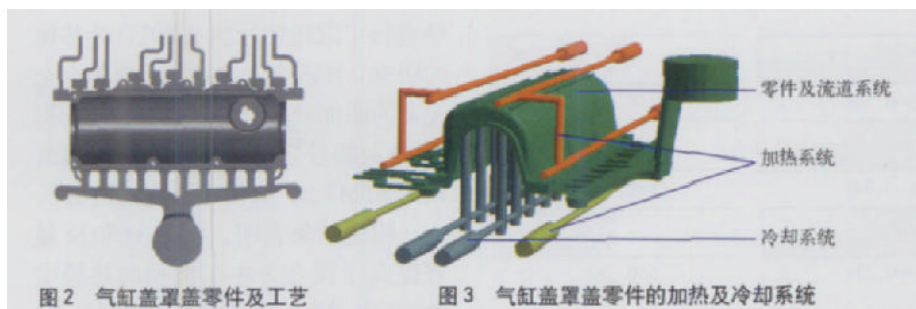


图2 气缸盖罩盖零件及工艺

图3 气缸盖罩盖零件的加热及冷却系统

镁消耗的50%左右,在镁合金结构件的成形方法中,压力铸造是其主要方法,占结构件的90%以上,见图1。

随着镁合金压铸生产设备的发展和压铸工艺的成熟,压铸镁合金的应用将更加广泛。然而,镁合金压铸工艺尚存在一些问题,限制了其应用的拓展。由于镁合金的热容较小,凝固过程与传统的铝合金及锌合金压铸有很大不同,在压铸过程中需要较高的充填速度,合金紊流强度较大,铸件的表面缺陷和内部气孔量都有所增加。

我国在镁合金压铸的模具设计及工艺方面与国外有较大的差距。此外,镁合金材料,特别是压铸应用最普遍的AZ和AM系列镁合金的高温力学性能尚不够理想,长期

工作温度一般不能超过120

。而且,镁合金熔炼过程的保护气体SF<sub>6</sub>具有较为严重的温室效应(24000倍于CO<sub>2</sub>)。因此,全面开展镁合金压铸工艺、

镁合金压铸材料及镁合金熔炼气体保护的研究对于发展我国镁合金结构件的应用具有重要的理论和实际意义<sup>[1]</sup>。

### 镁合金压铸工艺试验研究

随着镁合金压铸应用的不断发展和压铸设备的日趋完善,对铸件质量

的要求越来越高,可供压铸工艺设计人员选择的工艺方案变得更加细化。为了合理利用压铸设备,制作出高质量的铸件,需要对压铸过程的各个阶段以及相关工艺参数进行深入系统的研究。

在镁合金压铸工艺研究方面,与一汽集团联合开发了一汽首件镁合金气缸盖罩盖零件,通过2002年装车试运行,现正常生产,为一汽红旗世纪星轿车批量供货。图2为镁合金气缸盖罩盖零件及其工艺设计,图3为模具加热及冷却系统布置。同时,结合气缸盖罩盖零件,系统地研究了压铸工艺参数,如低速速度、高速速度、低速-高速转换位置、压射压力、增压压力、增压时间等对铸件质量的

表1 工艺参数对铸件表现质量和力学性能的影响规律

项 目	表面质量	抗拉强度	密度	气孔	气缩孔
低速速度↑	O	O	X	X	X
高速速度↑	O	O	O	X	O
低速高速转换位置↑	X	X	O	X	X
铸造压力↑	O	O	O	O	O
增压位置↑	U	O	U	O	O
匀加速低速压射工艺	U	U	O	O	U
增压升压时间↑	X	X	X	X	X
料柄厚度↑	X	O	X	U	O

注: ↑表示工艺参数增加, O表示有利, X表示不利, U表示规律不明显

影响,总结了镁合金压铸工艺参数对铸件表面质量、密度、气孔及强度等的影响规律<sup>[2-5]</sup>,如表1所示。

### 镁合金压铸过程模拟仿真及工艺优化

在镁合金压铸生产过程中,液态

或半固态的金属在高速、高压下充型,并在高压下迅速凝固,容易产生气孔等铸造缺陷。

由于镁合金压铸充型速度比铝合金更高,同时,凝固速度更快,因而对镁合金压铸模具的流道系统及热平衡设计提出了更高的要求。对数值模拟技术优化模具设计、加热冷却系统设计以及对模具寿命和铸件尺寸精度等进行控制,在实际压铸生产中具有重要的指导意义。

中心开发了压铸充型过程、凝固过程、模具热应力及变形等过程的模拟分析系统,并成功应用于镁合金压铸过程的模具优化设计及压铸工艺优化。

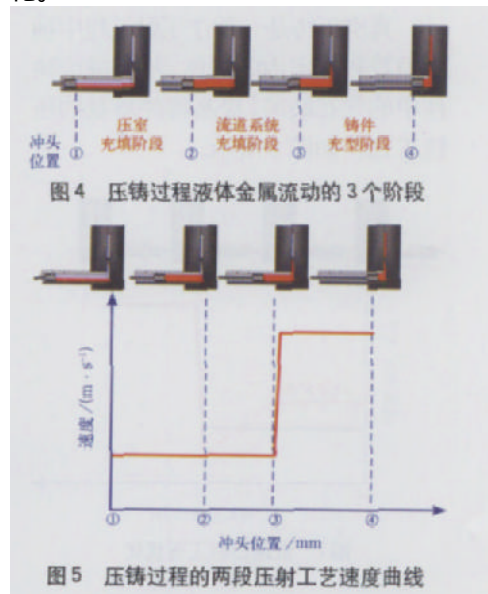


图4 压铸过程液体金属流动的3个阶段

图5 压铸过程的两段压射工艺速度曲线

特别值得一提的是将压铸过程中液态金属的流动分为3个阶段:压室充填阶段、流道系统充填阶段和铸件充型阶段(见图4),并针对压室充填阶段开发了考虑移动边界条件的压室液态金属流动的模拟分析系统<sup>[6-8]</sup>。对于压铸过程典型的两段压射工艺(图5),分析了低速阶段的压射速度对压室液态金属流动形态及压室中气体的卷入情况(图6),发现存在一个临界低速速度。在该速度条件下,液体金属在压室中的流动将不会卷入气体。在此基础上,提出了优化的低速压射工艺(图7)。在压射充填阶段采

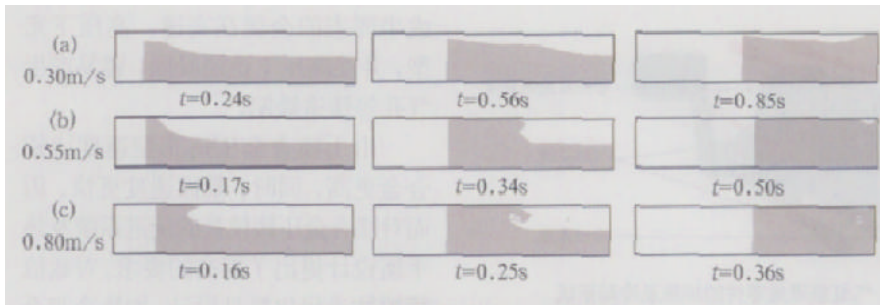


图6 不同慢压射速度下的流动形态

用优化的低速速度,而在流道系统充填阶段将速度降低以保证流道系统的平稳充填。同时,结合镁合金压铸试验和铸件密度检测对优化工艺进行了验证。

### 镁合金真空压铸

真空压铸是一种在压射过程中抽除型腔和压室内的气体,从而减少铸件中的气孔缺陷,提高铸件质量的压铸工艺,如图8所示。

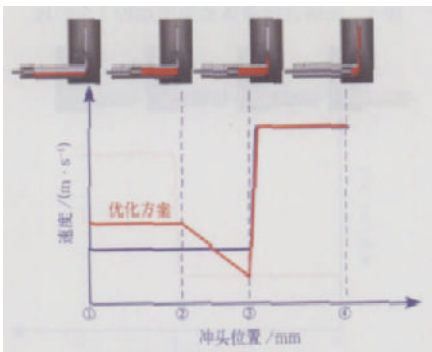


图7 低速压射工艺优化

通过在试验模具上加装真空压力传感器,对各种不同的模具密封工艺进行了对比研究,在型腔中得到了稳定小于5kPa的高真空度,试验中的真空系统及密封方案如图9所示。

在此基础上,选取不同的真空度条件以及铸造压力参数进行了镁合金真空压铸工艺试验,总结出了镁合金真空压铸件的密度、力学性能等指标与工艺条件的对应规律<sup>[9-10]</sup>。图10为用于真空压铸的试验模具,图11和图12分别显示了真空压铸条件下真空度及铸造压力对压铸件的密度和抗拉强度的影响规律。

### 压铸镁合金材料开发

耐热性差是阻碍镁合金广泛应用

的主要原因之一,当温度升高时,其强度和抗蠕变性能大幅度下降,使它难以作为关键零件(如发动机零件)材料在汽车等工业中得到更广泛

的应用。考虑到高压铸造是镁合金成型的主要方法,因此,镁合金材料研究方面的主要研究目标是通过添加合金化元素,提高常用压铸镁合金(AZ91D, AM50, AM60)的高温蠕变性能。

研究方法是通过对实验室金属型试验研究,并选择性能较好的新合金,然后进行压铸试验检测铸造性能、常温力学性能和高温蠕变性能。目前已

经进行了以压铸材料AZ91D为基体的研究,并研究了Ca, Si, Sr等合金元素的添加对合金高温蠕变性能的影响(合金编号分别为M11, M12, M13, M22和M32),取得了一定的进展<sup>[9]</sup>。

研究结果表明, Ca、Sr和Si显著提高了镁合金中二次相的热稳定性,其中元素Ca的作用较为明显。Ca元素的引入使得在初生相 $\beta$ -Mg之后发生 $\beta$ -Mg、 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>和Al<sub>2</sub>Ca的三元共晶在晶界和晶界附近呈现发达的网状分布,经固溶处理后由于晶界

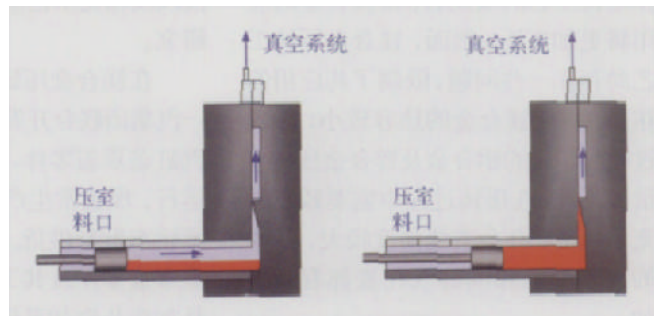


图8 真空压铸示意图

(MgAlCa)化合物的存在(如图13所示),提高了晶界的热稳定性,从而提高了合金的高温蠕变性能。图14显示了采用简易蠕变装置在175和50MPa拉应力作用下的不同合金的高温蠕变性能。

### 镁合金熔炼气体保护

镁合金在熔炼和加工过程中极易

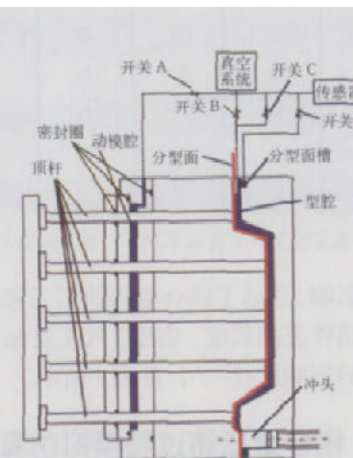


图9 模具真空系统及密封

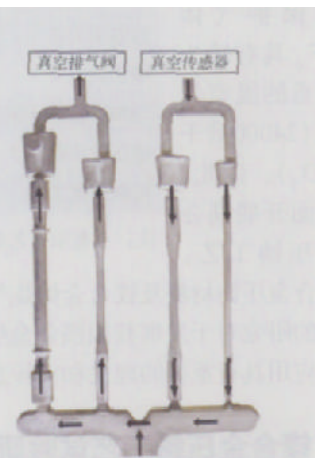


图10 真空压铸试验模具及真空条件下气体流动方向

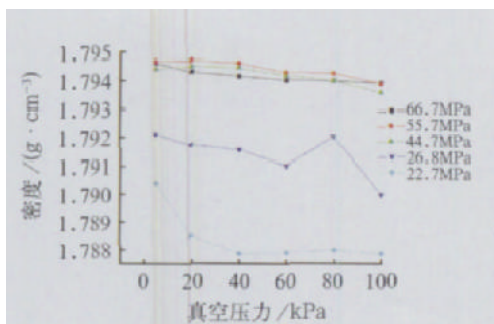


图11 镁真空压铸密度与真空度、铸造压力的关系

氧化燃烧,长期以来,工业界使用 $SF_6$ 气体对熔态镁合金进行保护。由于 $SF_6$ 气体对臭氧层有严重的破坏作

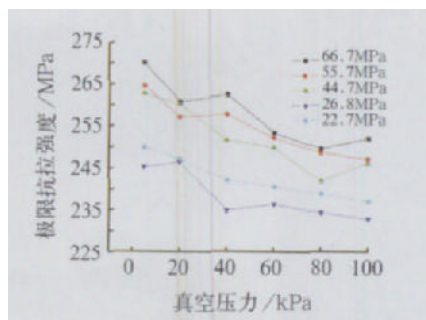


图12 镁真空压铸抗拉强度与真空度、铸造压力的关系



图13 固溶处理16h后M32的组织形貌

用,限制其使用直到禁止使用是大势所趋。 $HFC134a$ 能够有效保护熔态镁合金,对环境的影响远小于 $SF_6$ ,可以用来替代 $SF_6$ 。

本课题研究了在封闭和开放的体系下 $HFC134a$ 气体在不同气体( $CO_2$ ,  $N_2$ )稀释条件下对镁合金的保护工艺,对保护效果进行了观察和评价,并且研究了保护膜的结构、成分、形成机理和保护机理。

$HFC134a$ 保护下的镁合金表面存在一层致密均匀的薄膜(图15),成

分测定表明,保护膜由 $MgO$ 和 $MgF_2$ 组成,保护膜厚度在 $0.1 \sim 0.6 \mu m$ 之间。同时能够看出在保护膜和镁合金基体之间存在许多半圆颗粒,其直径在 $1 \sim 8 \mu m$ 之间,这些半圆颗粒的成分是 $MgF_2$ 。镁合金表面存在很多片状物,这些片状物呈山脉状聚集,并且环绕着一些直径为几个微米的凹陷区域(图16)。这些片状物显然是一个渐变的长大过程,因为在边缘区域的片

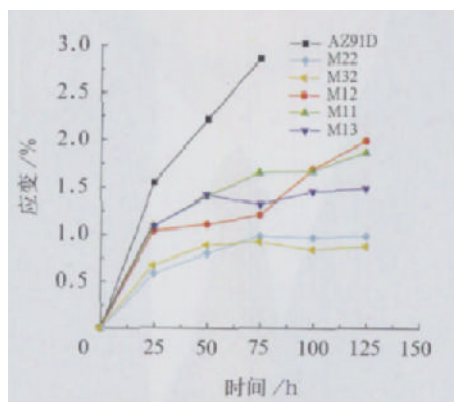


图14 不同试验合金的高温蠕变性能

状聚集物尺寸明显较小。成分测定表明,凹陷区域为 $MgF_2$ 聚集区域,对应于侧面图中的半圆颗粒,而片状物为 $MgO^{[10]}$ 。

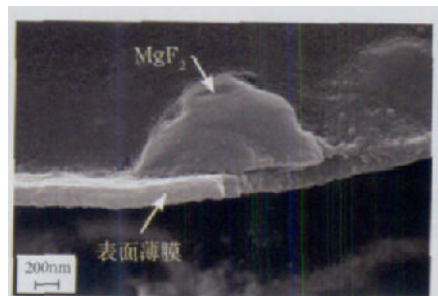


图15 保护膜断面形貌

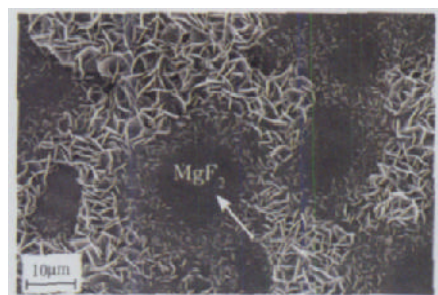


图16 保护膜表面形貌

## 结束语

试验研究了镁合金压铸工艺参数对镁合金压铸成形质量的影响规律,可用于指导实际生产。采用数值模拟技术对镁合金压铸的低速压射工艺进行了优化。系统地研究了真空压铸过程中真空度及铸造压力等参数对镁合金铸件性能的影响。采用金属型模具,通过Ca、Sr、Si等元素的复合添加,改善了AZ91D镁合金的高温蠕变性能。研究了 $HFC134a$ 气体在不同气体( $CO_2$ ,  $N_2$ )稀释条件下对镁合金的保护工艺,并且研究了保护膜的结构、成分和形成机理。

## 参考文献

- 熊守美,苏仕芳. 镁合金成形技术研究进展. 铸造, 2005, 54(1): 20 ~ 23
- 刘文辉,刘艳改,熊守美,等. 镁合金与铝合金压铸过程中型腔压力的变化特性. 金属学报, 2005, 41(1): 103 ~ 107
- 刘文辉,张新平,熊守美,等. 孔洞对AZ91D镁合金铸件性能的影响. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(6): 872 ~ 875
- 刘文辉,刘艳改,熊守美,等. 减压工艺对镁合金铸件质量与性能的影响. 中国有色金属学报, 2004, 14(7): 1162 ~ 1167
- Lui W H, Liu Y G, Xiong S M, et al. Influences of casting pressure condition on the quality and properties of a magnesium cylinder head cover die casting. Journal of Materials Science & Technology, 2005, 21(2): 170 ~ 174
- 李朝霞,熊守美,刘文辉,等. 压铸镁合金模具温度场分布的研究. 铸造, 2003, 52(6): 400 ~ 404
- 袁焱,熊守美,柳百成. 压室液态金属流动耦合温度场三维数值模拟. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(10): 590 ~ 592
- 王罡,袁焱,熊守美. 压室慢压射过程流场模拟. 铸造, 2004, 53(11): 909 ~ 912
- Wang Y, Xiong S M, Liu W H, et al. Effect of Si, Ca and Sr on the creep-resistance of AZ91D alloy. Materials Science Forum, 2005, 488-489: 767 ~ 770
- 聂书红,胡泊,熊守美,等. 熔态镁合金(AZ91D)在空气/ $SF_6$ 保护气氛中形成的膜特征. 材料保护, 2005, 38(8): 1 ~ 3

(责编 咏智)