

● 今日铸造 Today Foundry ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.02.018

轻合金铸造技术发展历程与展望

兰 乔¹, 刘保良², 常治宇¹, 袁灵洋¹, 韩盼文¹, 王嘉诚¹, 彭立明¹

(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院轻合金精密成型国家工程研究中心, 上海 200240; 2. 上海轻合金精密成型国家工程研究中心有限公司, 上海 201600)

摘 要:铸造是实现零部件成型的基础工艺之一。近几十年来,铸造技术发展十分迅速,涌现出一些新兴的铸造技术。本文结合国内外铸造技术发展史,以各类铸造工艺发明时间为轴线,对现有轻合金铸造技术进行分析,并在此基础上展望铸造技术未来发展方向。

关键词:轻合金;铸造技术;发展历程

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2021)02-0141-12

Development History and Prospect of Casting Technology for Light Alloy

LAN Qiao¹, LIU Baoliang², CHANG Zhiyu¹, YUAN Lingyang¹, HAN Panwen¹,
WANG Jiacheng¹, PENG Liming¹

(1. National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Light Alloys Net Forming National Engineering Research Center Co., Ltd., Shanghai 201600, China)

Abstract: Casting is one of the basic technologies to form parts and components. In recent decades, foundry technology has developed rapidly and some new casting technologies have emerged. Based on the development history of casting technology at home and abroad and the time of invention of various casting technologies, the present light alloy casting technology is analyzed, and on this basis, the future development direction of casting technology is forecasted.

Key words: light alloy; casting technology; development history

在汽车轻量化、节能减排的大背景下,采用铝、镁等轻质材料替代传统灰铸铁制造零部件已成为不可阻挡的趋势;除采用轻质材料外,优化产品结构设计也是实现轻量化的一个重要手段。然而,轻量化设计意味着零件结构复杂化,这就对零件的成形工艺提出了较高的要求。铸造是实现零部件成型的基础工艺之一,其具有生产效率高、一次成形复杂铸件、生产成本低等优点,被广泛应用于航空航天、汽车等领域。铸造过程不仅决定着能否获得所需的零件形状,同时也奠定了材料性能发挥的潜力。即使在科学技术迅猛发展的今天,由于铸造成形技术的特殊优势,复杂结构件的成形尚无其他工艺可替代。

近几十年来,铸造技术发展十分迅速,国内外涌

现出一些新兴的铸造技术。本文将结合国内外研究现状,按照发明时间轴线顺序(如图1所示),从工艺原理、工艺特色、工艺缺点、工艺应用等几个方面对现有轻合金铸造技术进行介绍。

1 轻合金铸造技术研究现状

1.1 重力铸造

重力铸造是传统的铸造工艺,早在公元前就已经存在,距今已有6000多年的历史。其定义是在重力作用下将金属液倒入型腔(砂型、金属型、石膏型、陶瓷型、泥型等)中,并使金属液在重力下结晶凝固的铸造工艺。其中砂型与金属型重力铸造用的较多,采用砂型可成形相对复杂的铸件,而金属型可获得较快的冷却速度。典型的金属型重力铸造工艺示意图如图2所示。由于金属型的导热能力强于砂型,该铸造方法具有铸件冷速高、铸件组织细密的特点,金属型铸件质量一般高于砂型铸件。但金属型导热强、不透气,铸件中易产生浇不足、裂纹、气孔等缺陷,因此必须合理设计浇注系统以避免缺陷产生。

出于脱模的考虑,金属型铸造工艺主要用于大批量生产简单形状的铸件,如铝合金活塞、缸体等。

收稿日期: 2020-10-28

作者简介: 兰 乔(1991-),四川成都人,博士生.研究方向:铸造工艺.电话:15221189391,
Email: lanqiao1018@sjtu.edu.cn

通讯作者: 彭立明(1972-),重庆璧山人,博士,博导,教授.研究方向:高性能轻合金材料设计与精密成型技术.
电话: 021-54742911, Email: plm616@sjtu.edu.cn

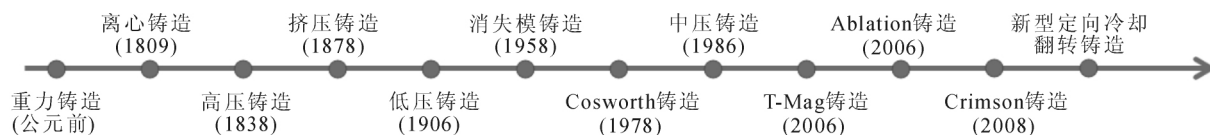


图1 铸造工艺发明时间线

Fig.1 Invention timeline for casting process

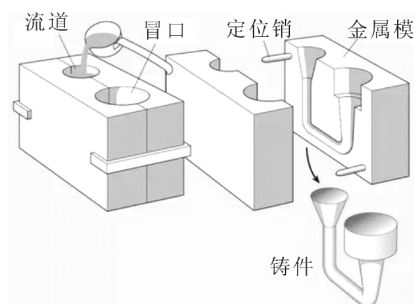


图2 金属型重力铸造示意图

Fig.2 Schematic diagram of metal mold gravity casting process

而大多数铸造厂采用外型金属型、内腔砂芯的方式,使得金属型铸造工艺灵活且操作简便。

重力倾转铸造工艺是近年来出现的新兴成形技术,其本质也是重力铸造的一种。重力倾转铸造是依靠铸型倾角的变化来使金属液在重力作用下流淌进入型腔的一种铸造工艺。在重力作用下,通过简单地机械手段,使金属液在不发生紊流的情况下进入铸型。法国人 Durville 最先用此法来铸造铝青铜法币。1961年,美国人 G.W.Stahl 推广了“倾斜浇注”的概念,用以成形铝合金金属型铸件,并在此基础上对浇口设计进行了总结^[1],其实质还是改善后的顶注式浇口设计。采用这种方法不仅可以避免普通重力铸造因金属液压头高、流速快造成的氧化飞溅,而且在倾转后金属液温度场分布合理,利于顺序凝固补缩。重力倾转铸造工艺示意图如图3所示。

重力倾转铸造的难点在于倾转速度难以合理控制。若倾转速度过快,金属液进入型腔后碰到芯子阻拦,则易产生飞溅;若转速过慢,则会因充型时间长导致降温严重,从而影响金属液充型能力。由于最优浇注速度在实际中很难依靠经验设定,工艺设计者往往需要在前期进行大量的模拟工作,寻找

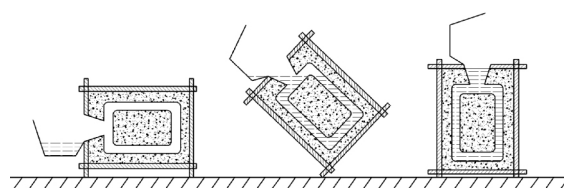


图3 重力倾转铸造工艺示意图

Fig.3 Schematic diagram of gravity tilting casting process

多阶段浇注工艺的最优参数。

对于铝镁等轻合金,一方面由于其密度低,其静水压力产生的压头有限,并且没有铸铁件“石墨化膨胀”现象,因此在工艺设计时,尤其需要关注金属液的补缩能力,合理设计浇冒系统;另一方面,铝镁等轻合金熔体化学性质活泼,易吸气氧化,如果凝固过程中冷却速度缓慢,则给氢气析出、枝晶长大、发达创造了条件。因此,针对轻合金的工艺设计,一般原则是铸件重要部分尽量置于铸型底部,同时避免冒口与铸件厚大部位重合,以避免氧化夹渣的富集与凝固缓慢带来的不利影响^[2]。

1.2 离心铸造

离心铸造是将液体金属注入高速旋转(通常为250~1 500 r/min)的铸型内,使金属液在离心力的作用下充满铸型并凝固形成铸件的方法。1809年英国 Emhart 提出了第一个离心铸造法的专利;1849年英国 Andrew Shanks 发明了世界上第一台离心机,此后离心铸造工艺铸件淘汰了传统以手工制作的铸管砂型,标志了离心铸造的正式问世。根据回转轴方向的不同,离心铸造又可分为立式离心铸造与卧式离心铸造,示意图如图4所示。其中,立式离心铸造适用于高度不大的盘、环类铸件;卧式离心铸造适用于长度较大的套筒及管类铸件。

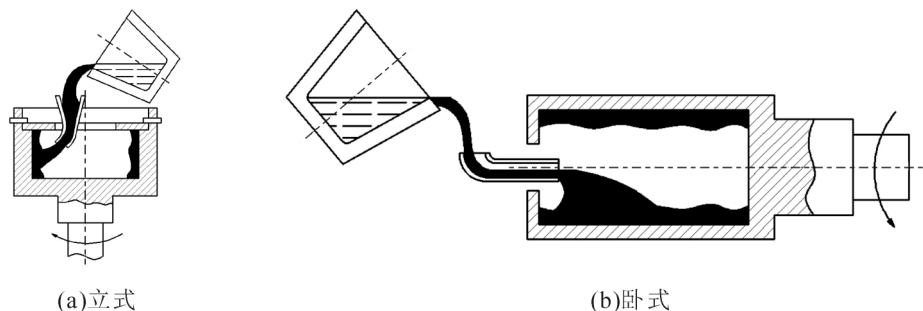


图4 离心铸造工艺示意图

Fig.4 Schematic diagram of centrifugal casting process

与其他技术相比,离心铸造具有以下特点:①在离心力的作用下,密度大的金属被推往外壁,而密度小的熔渣、气体则向内表面移动,部分疏松缩孔可在压力作用下弥合,且留在铸件内表面的杂质便于用机械加工的方法除掉;②离心铸造不需要浇口与冒口,金属利用率可达80%以上。

对于轻合金来讲,由于合金本身密度较低,在不施加外力的情况下通过金属液静水压头来补缩铸件比较困难。但利用离心力这种超重力的作用,使得轻合金铸件的高效补缩成为可能^[3]。针对初生颗粒的粘连、粗大的问题,林雪冬^[4]等人在离心铸造的基础上,在卧式离心铸造机铸型外对称安装了两块电磁铁,通过施加静磁场的方式对旋转的金属熔体产生电磁搅拌作用来改善凝固组织,所用设备示意图如图5所示。研究表明^[4],通过在离心铸造中加入电磁场可使铸件中已凝固的部分与未凝固熔体之间产生速度差,使凝固前沿受到熔体反复冲刷,从而达到细化晶粒的效果;并且电磁场干扰了初生相的物质浓度,进而影响了初生颗粒的长大与偏聚,表现为铸件凝固组织的改善。

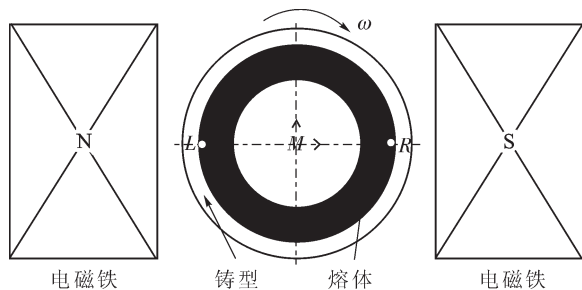


图5 电磁-离心铸造示意图

Fig.5 Schematic diagram of electromagnetic centrifugal casting process

尽管离心铸造对成形轻合金有着独特的优势,但受工艺特征的限制,离心铸造工艺仅适用于中空的回转类零件,而这类铸件的品种并不多。除此以外,轻合金离心铸造的其他应用也包括制备径向梯度功能材料^[5,6]等。

1.3 挤压铸造

挤压铸造又称液态模锻,它是将一定量的金属液直接浇入的型腔中,并持续施加机械静压力(2~100 MPa),使金属液充型、成形和结晶凝固,并产生一定塑性变形的工艺方法。在1819年,英国人James Hollingrake的一项专利中最先提到了挤压铸造技术,1878年,前苏联著名冶金学家D. K. Chernov也提出了相似的概念。一般认为,1937年前苏联人V. M. Plyatskii出版专著《液态金属模锻》,是挤压铸造技术完全确立的标志^[7]。

挤压铸造可分为两大类:直接挤压铸造和间接挤压铸造。直接挤压工艺类似于金属模锻,压力直接施加于液态金属的整个面上,这种施压方式适合生产壁厚较大,形状不太复杂的零件;间接挤压工艺与压铸接近,压力通过浇道间接作用于液态金属上,这种铸造工艺适合生产形状相对复杂、壁厚差较大的零件^[8]。典型的直接挤压铸造示意图如图6所示。

挤压铸造有以下特点:①通过外加压力可打破金属液凝固时形成的枝晶臂,便于补缩,因此铸件致密度高;②压力的作用改善了金属液与模具的接触状态,可以获得较快的冷却速度,晶粒得到细化;③相比于压铸来说,挤压铸造中尽可能将金属液以低速、层流形式充型,并且挤压铸造模具的设计考虑了排气结构,因此铸件卷气得到大幅度降低;同时铸件可热处理,力学性能进一步提升。但是,挤压铸造中采用金属型模具冷速较快,考虑到金属液充型能力,铸件侧壁厚度必须大于5 mm;此外,考虑到脱模能力的问题,铸件的形状也有一定限制。

近年来,在普通挤压铸造基础上还发展了一种双重挤压铸造技术,它以间接挤压完成金属液的平稳充型,并在此之后进行保压;与此同时,采用直接挤压对铸件中厚大部位施加高压,从而克服在铸件局部厚大截面处冲头挤压力不足、难以补缩的缺点。双重挤压铸造^[9]工艺示意图如图7所示。

对于镁、铝等轻质合金来讲,由于其自身密度低,易吸气氧化等特性,在不施加外力作用下容易出现缩孔疏松、气孔等缺陷,而挤压铸造中平缓充型、

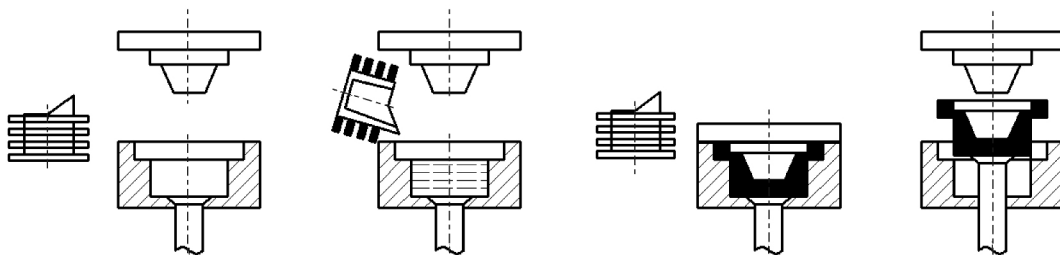


图6 直接挤压铸造工艺示意图

Fig.6 Schematic diagram of direct squeeze casting process

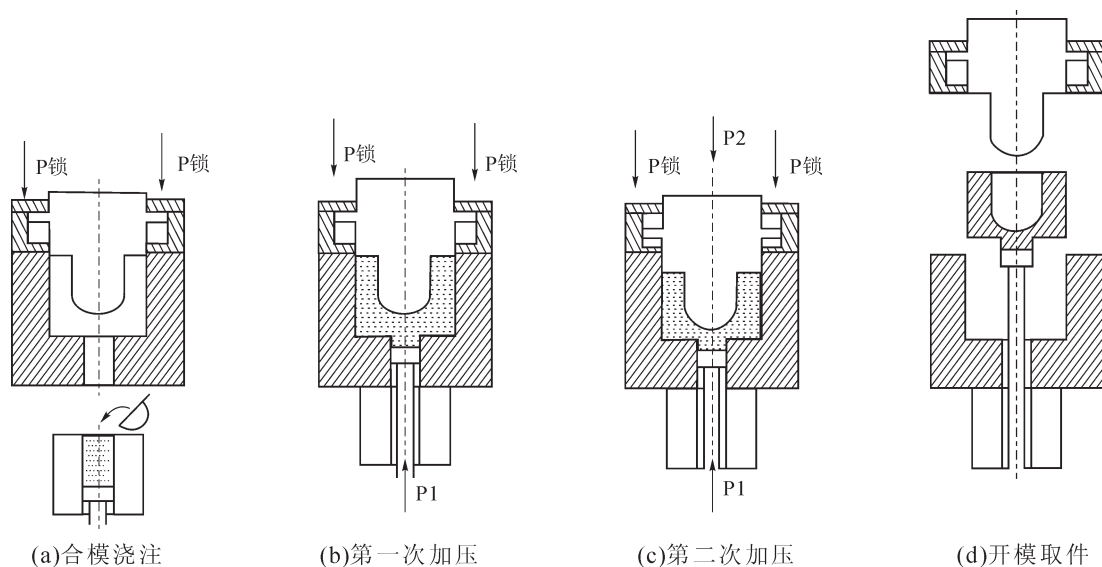


图7 双重挤压铸造工艺

Fig.7 Schematic diagram of dual squeeze casting process

机械压力下凝固成形的工艺特色,正好能够减少或消除缩孔缩松及气孔缺陷,使得轻合金铸件的力学性能要高于一般普通铸件。对于镁合金这种特别容易氧化的金属液,为了防止熔体转移过程中镁液氧化,开发了出密封性好的自动熔体输送装置^[10],使得工艺应用得到进一步扩大。

1.4 压力铸造

压力铸造是指在高压(40~80 MPa)作用下,使液态或半固态金属以高速(0.5~50 m/s)充填型腔,并在高压下凝固获得铸件的方法。压力铸造方法最早起源于1838年,格·勃鲁斯在美国 Bruce 公司发明的原始压铸机上,首先采用压铸法铸造铅字;1849年起,在机器制造业中开始使用 Sturges 热压式压铸机生产锡铅合金小零件,在此机器上活塞用手带动,压射压力可达1~1.5 MPa。1907年,E.B. Ven Wagner 研制了第一台市售的气压鹅颈管式压铸机^[11,12]。

压铸工艺流程如图8所示。由于金属液在高压、高速条件下充型,充型能力强,可获得薄壁件;且充型完成后在高压条件下补缩,铸件内部致密。

零件的工况条件与设计流程对轻量化零件提

出了轻质、薄壁、结构复杂的要求,使得压力铸造制造复杂薄壁零件具有独特的优势。但是,在金属液充填型腔时易将空气与金属液氧化膜卷入铸件中,导致产生卷气,因此压铸件一般不能热处理提高强度,否则会引起铸件鼓包、尺寸变化;此外,由于金属液在较大的压力下成形,对模具的要求高,且出于脱模考虑,因此压铸中只能采用形状简单的金属型芯,这就限制了压铸工艺无法制造内腔复杂的零件。对于发动机缸体缸盖这种复杂零件而言,压力铸造只能生产具有开舱结构的缸体^[13]与易于脱模的缸盖^[14]。

压铸件最常见的缺陷是内部气孔与缩松,其原因在于充型时,型腔内的气体没有完全排除,同时凝固时铸件也得不到高效补缩。针对这些问题,出现了一些特殊的压力铸造^[15,16],包括真空压铸、充氧压铸、精速密压铸、半固态压铸等等。

1.4.1 真空压铸

真空压铸即在压铸过程中运用真空技术,先在压铸模中建立起真空再充型,真空度一般在52~82 kPa(380~600 mmHg 柱)的范围内。这样的真空度可用机械泵来获得。采用真空压铸有以下特点:①可减少或消除铸件中的气孔,改善铸件的内部质量与力学

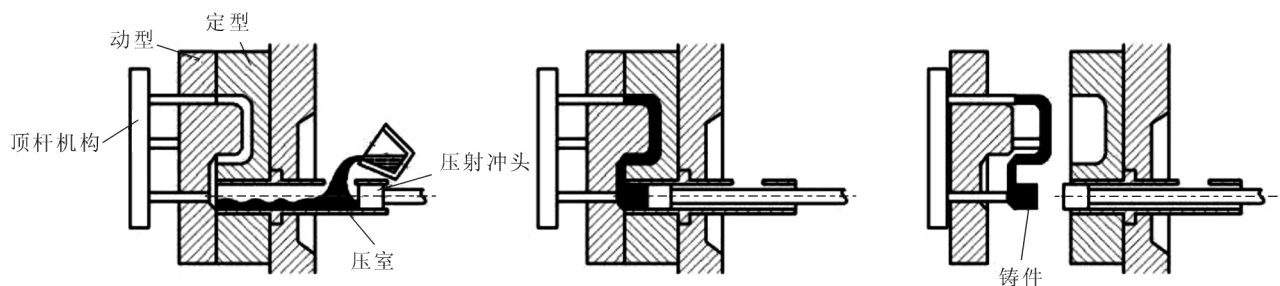


图8 压力铸造工艺示意图

Fig.8 Schematic diagram of high-pressure die casting process

性能;②真空压铸时由于减少了型腔内气体反压力的作用,可以使用较低的比压甚至小机器来成形铸件;③可使用铸造性能较差的合金,辅以真空加以成形。目前国内已有利用真空压铸技术生产大型复杂薄壁镁合金部件的相关报道^[17]。

1.4.2 充氧压铸

国外在分析铝合金压铸件气孔时发现,气孔中气体的成分主要是空气中的氮与涂料中碳氢化合物中的氢组成。而空气中约 20%为氧气,氮气及其它惰性气体约占 80%,这说明气泡中部分氧气与铝液发生反应生成了氧化物分散在金属中。充氧压铸工艺是指在压铸前将氧气冲入型腔,以置换出其中的空气,使压铸过程中残留在型腔中的氧与铝液反应形成氧化铝质点,以消除气孔的压铸工艺。充氧压铸具有以下特点:①消除或减少了压铸件内部气孔,生成的氧化物质点可作为强化相,因此铸态强度可提高 10%。②充氧压铸件由于少气孔,可进一步热处理提强;③与真空压铸相比,充氧压铸设备结构简单,操作方便。

1.4.3 精速密压铸

精速密压铸,是精密、快速、密实的简称,也成为双冲头压铸,其冲头是由两个套在一起的内外压射冲头组成。开始压铸时,两个压射冲头同时前进,当金属液充填完毕,型腔达到一定压力后限时开关启动,内压射冲头继续前进,进一步补充压实铸件。这种方法的基本特征为:①内浇口厚度大于普通压铸,一般为 3~5 mm,以便更好地传递压力;②不适用于小型压铸机,一般在合模力为 400 t 以上的压铸机上应用,并需要改造压射机构;③压射速度低,内浇口相对较大,因此内浇口处金属液流速低于普通压铸;低速可减轻压射过程中的涡流与喷射现象,从而减少卷气。

1.4.4 半固态压铸

在普通铸造中,初晶以枝晶的方式进行长大,当固相率达到 20%时,枝晶形成连续网络骨架,宏

观表现为失去流动性。如果在金属凝固过程中施加强烈搅拌,打碎树枝晶网格骨架,变成分散的颗粒悬浮在剩余液相中,则当固相率达到 50%~60%时这种浆料仍具有很好的流动性。采用这种浆料进行压铸则称为半固态压铸。

通常有两种方法获得半固态金属:一种是在金属液从液相降温到固相的过程中进行强烈搅动,将在获得的半固态浆料倒入料筒直接压铸成形的方 法,称为流变压铸成形;另一种是将半固态浆料预先凝固成铸锭,并使其重新加热(即坯料的二次加热)至金属的固液相之间,然后送入料筒进行压铸的方法,称为触变压铸成形。一般来说,半固态坯料的加热、运输很方便,因此触变压铸有广泛的应用。

半固态压铸与全液态压铸相比有如下特点:①半固态区间温度低,且在形成半固态浆料时已有 50%的结晶潜热得到释放,因此大大减少了对料筒、压铸型腔的热冲击,模具寿命得到提高;②半固态金属粘度比全液态金属大,且在工艺设计时铸件内浇道截面积更大,因此半固态充型时流速低,充型时金属液卷气少,无紊流;同时由于半固态浆料温度低,充填型腔后体、线收缩小,铸件不易出现疏松,缩孔;同时也降低了铸件热裂倾向性。

1.5 低压铸造

低压铸造是一种介于重力铸造与高压铸造的一种铸造方法。低压铸造的最早起源可追溯至 1906 年美国 S.P.Wetherill 与 J.P.Wetherilljr 提交了一份专利,该专利采用低压设备铸造了一系列锌铝合金铸件;1910 年,英国人 E.F.Lake 发明了可达 300 ℃的铅和锡合金铸造用设备的专利,这被认为是公开文献报道中低压铸造技术的起源^[18,19]。但直到 1956 年,德国 Karl Schmidt 公司生产了小轿车用空冷发动机铝汽缸盖,低压铸造方法才被重视起来,因此在 国外,低压铸造也被称作叫做 Schmidt 法^[19]。

低压铸造工艺过程如图 9 所示,首先将铸型放置在密闭坩埚上方,向坩埚中通入压缩气体,在较低

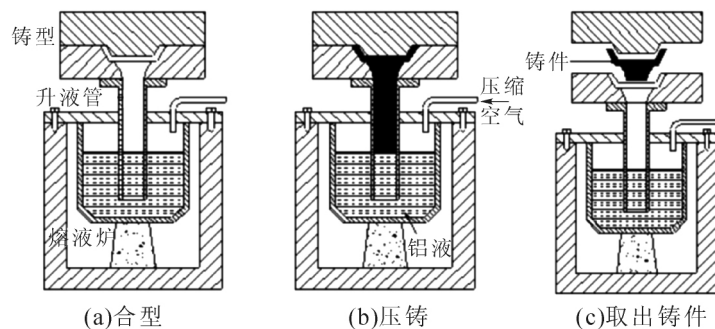


图 9 低压铸造工艺示意图

Fig.9 Schematic diagram of low-pressure casting process

气体压力(0.06~0.15 MPa)的作用下,坩埚内的熔融金属顺着升液管自下而上进入型腔,并使型腔中的金属液在一定气体压力下结晶凝固。

与压力铸造相比,低压铸造采用底注式充型,施加的压力小、充型速度便于调节,因此金属液流动平稳,减少了卷气夹渣等缺陷;但较重力铸造而言,又能在一定压力下实现顺序凝固补缩。虽然低压充型时间仅有10~15 s,但保压占用时间多达3~6 min,整个生产循环可达10 min左右,铸造生产效率较低;且大量生产时往往需要多台设备及模具,设备前期投资很大。此外,也需要注意铸件在低压铸型中的摆放位置,若铸件关键部位位于铸型上方(即远离升液管口位置),则远离压力源端,关键部位补缩困难,且氧化浮渣多;若铸件关键部位靠近升液管口,则容易受到浇口处不利热影响,晶粒粗大,力学性能低。因此在工艺设计时,需充分考虑铸件摆放方式与浇口位置,既实现补缩功能,同时尽可能减少浇口的热影响。

相较于铝合金而言,镁合金热容小,凝固区间大,成形中容易出现裂纹、充型不完整等铸造缺陷,低压铸造既可实现金属液充型速度可控,并在压力下能够增强铸件的补缩能力,尤其适合镁合金的成形,但需要注意镁合金充型过程中的氧化燃烧问题。针对这一问题,西北工业大学^[20]与沈阳铸造研究所^[21]先后研制出镁合金铸造专用混合气体保护气体系统、多元组分防燃保护剂及其反应速度控制装置,减少镁合金浇注充型时的氧化、防止了镁合金的燃

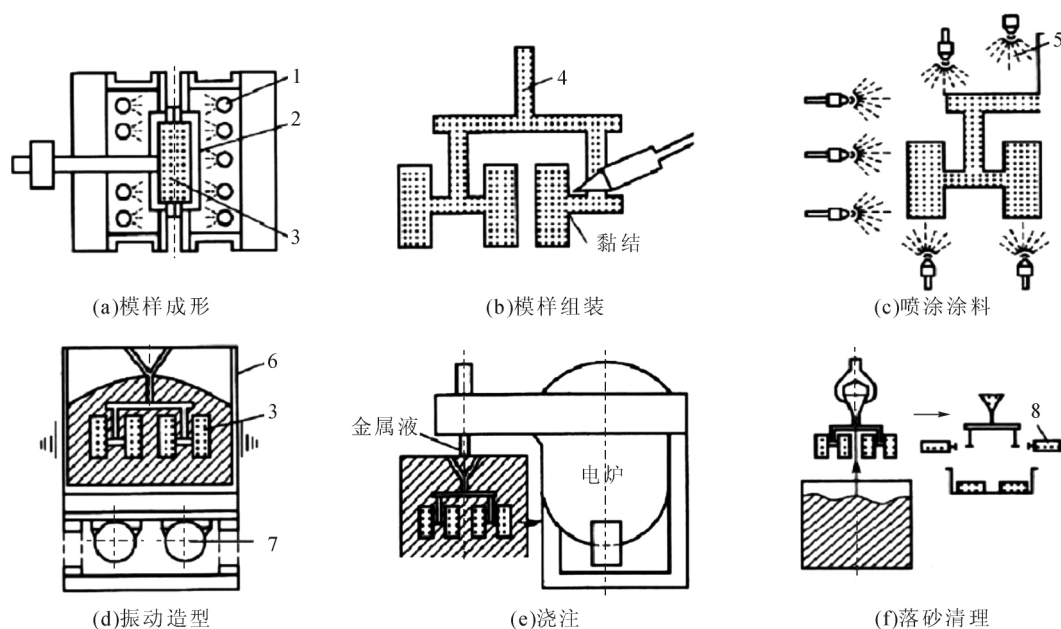
烧,从而推进了镁合金低压铸造工艺的进一步应用。

1.6 消失模铸造

1956年,由美国人H.F.Shoyer开始了将聚苯乙烯用于铸造的试验,并获得成功;1958年以专利的形式公布于众,当时称之为“无型腔铸造”。1962年德国人G.Hartmann从美国引进专利,消失模铸造才开始被开发。1968年,在西德亚琛工业大学教授A.Wittmoser的指导下,实现了工业化应用^[1,22,23]。

有别于传统砂型铸造中造型、制芯、合型以留出铸型空腔等步骤,消失模铸造具有以下特征:①用聚苯乙烯代替木模制成与所需铸件形状完全相同的泡沫模样(该模样已考虑铸件收缩率);②将泡沫模样放置在用干砂等材料制成的负压砂型中不取出(不留出铸件空腔);③将金属液浇入铸型中的泡沫模样上,模样燃烧、气化、消失,金属液取代原来泡沫模样空间位置,凝固形成理想铸件。消失模铸造工艺示意图如图10所示。

消失模铸造不仅可以直接铸出螺纹铸件上的复杂特征,且减少了传统造型中因型芯组合而引起的铸件尺寸误差,因此它被认为是一种近净成形工艺,特别适合发动机缸体缸盖这种形状复杂的铸件;尽管消失模铸造模样制备过程中增加了发泡工序,但该工艺减少了型砂的制备、制芯、造型、下芯等许多繁琐工序,总体而言简化了工艺流程。然而,由于泡沫模样在制作过程中存在收缩、同时金属液凝固时也存在收缩,这就导致了消失模的收缩尺寸难以确定。加上泡沫模样气化或碳化时,易在铸件中留下气



1- 蒸汽管;2- 型腔;3- 模样;4- 浇注系统;5- 涂料;6- 砂箱;7- 振动台;8- 铸件

图10 消失模铸造工艺示意图
Fig.10 Schematic diagram of lost foam casting process

孔或碳污染等缺陷,因此消失模铸造在发动机缸体缸盖这种质量要求高的铸件中应用有限。

镁合金非常适合消失模铸造工艺:镁合金液与泡沫模样反应分解产物(主要是烃类、苯类等气雾物质)能对极易氧化的液态镁合金具有保护作用,此外,干砂负压造型避免了镁合金液与型砂中水分接触和由此引起的缺陷;再者由于镁合金凝固区间宽,易热裂,干砂良好的退让性能够大大减轻镁合金热裂倾向。但由于泡沫模样热解气体会吸收热量,造成流动前沿温度降低,因此不得不提高铸件的浇注温度。对于铝合金来说,高温下吸氢严重;对镁合金来说,氧化燃烧严重。

为了克服上述问题,华中科技大学樊自田等人开发了如下几种特种消失模技术^[24-26]:

(1)真空低压消失模铸造技术:将低压铸造和真空消失模技术结合起来,利用可控的气压完成充型,直浇口成为补缩短通道,浇注温度损失小,大大提高了合金的铸造充型能力,且液态金属能够在一定压力下进行补缩凝固,铸件成品率高;

(2)压力消失模铸造技术:将消失模铸造技术与压力凝固结晶技术结合。其原理是在带砂箱的压力罐中,当金属液填充泡沫模样后,通过密封压力罐并通入一定压力的气体,使金属液在压力下凝固结晶的铸造方法。这种方法能够显著减少铸件中的缩孔,并通过加压凝固抑制氢气孔的析出,从而提高铸件致密度,改善铸件性能。

(3)振动消失模铸造技术:在消失模金属液凝固过程中施加一定频率的振动,振动力使枝晶破碎,增加液相内结晶核心,在细化组织的同时,提高补缩能力。

1.7 Cosworth 铸造

Cosworth 由英国伯明翰大学 John.Campbell 教授于 1978 年发明,由于其最先在英国 Cosworth 铸造厂得到推广,因此将其命名为 Cosworth 法^[1]。它是一种在可控气氛、可控压力下使金属液自下而上充

型的铸造工艺,其工作原理如图 11(a)所示。这种方法与低压铸造类似,但不同之处在于:①材料选择上,砂芯采用锆砂替代传统的石英砂,膨胀率小而恒定,避免石英砂在 573 °C 因相变带来的体积膨胀;同时锆砂型产生的凝固速率类似于金属模,对铝合金的晶粒细化有利;②砂型制作方法上,与冷芯盒精密组芯工艺结合起来制作砂型,在满足灵活性要求的同时,进一步提高了铸型精度;③使用电磁泵代替气压为金属液充型提供动力,从而用电脑精确控制浇注过程(本质上属于低压底注式);④Cosworth 法使用的炉子是一种具有熔化、保温以及均匀化成分功能的炉子,如图 11(b)所示;如果产量很大,也可以将熔化和保温功能分开,但为了减少铝液从熔炼炉向保温炉输送时产生的紊流,从而减少氧化物夹杂,需要在保温炉上方配备气体保护装置,如图 11(a)所示。

采用这种方法能够确保金属液的质量,减少金属液转移与充型过程中因产生紊流出现吸气、氧化物的可能性(氧化物与金属液凝固组织不润湿,被认为是裂纹萌生的核心)。20 世纪 80 年代初,美国福特汽车公司引进 Cosworth 法,并将“翻转铸造”模式引入其中,如图 11(b)所示:在确保金属液充型平稳的前提下,将浇口从铸型的底部改到了铸型的侧面。工艺过程为:①利用电磁泵从铸型的侧底面注入铝液,直到型腔被充满;②保持电磁泵充型力不变,以浇注管出口轴心为中心,180°翻转铸型;③铸型翻转后,电磁泵开始降低压力,使处于铸型横浇道中的铝液返回到浇注管中。而盛有金属液的铸型被拿走,在冷却区冷却。

改良后的 Cosworth 法结合了底注式充型流动平稳与顶注式易建立合理温度梯度便于补缩的优点;此外通过翻转“浇注系统”变为“冒口”,同时又提高了工艺出品率。但是 Cosworth 具有以下不足:①锆砂的导热性极好,金属液在流动过程中降温严重,因此难以浇注出壁厚小于 4 mm 的铸件。②需要配

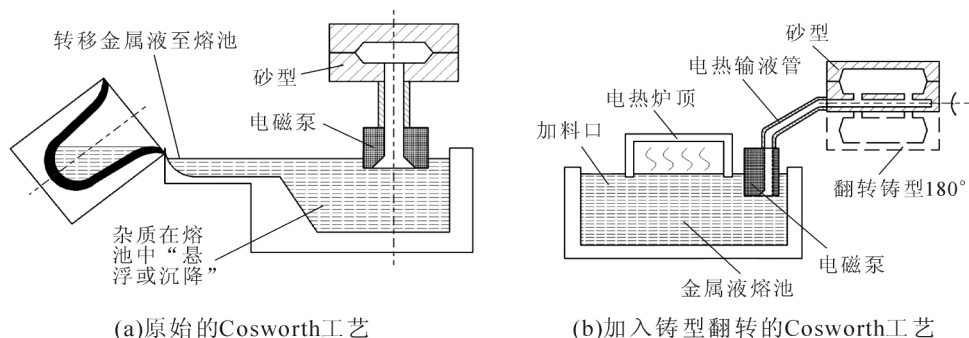


图 11 Cosworth 铸造法示意图
Fig.11 Schematic diagram of Cosworth casting process

套的砂型生产线及相关的铸造设备,前期投资巨大。

Cosworth 工艺主要用于生产高性能、轻质铸件,特别适合如气缸盖这类有致密性要求的复杂汽车铝铸件。Cosworth 法最初应用于铸造一级方程式赛车用发动机缸体缸盖及航空铸件的小批量生产;在 20 世纪 80 年代初,福特公司引进了翻转铸造,使其得到大批量生产应用。福特公司采用四工位转盘式浇注机(配一台电磁泵),每小时可浇注多达 100 型^[27]。

Cosworth 技术已成为国外高品质发动机缸盖的主流生产技术,福特、通用、大众、马自达、雪铁龙等汽车公司都成功地运用该工艺^[27-31];而国内对使用此工艺的报道案例很少。

1.8 中压铸造

目前对于中压铸造没有明确的定义,可以认为它是在铸件凝固过程中提供适中压力(介于低压铸造与高压铸造压力之间)以达到高效补缩的铸造方法。

为了解决压力铸造受脱模的限制无法生产复杂铸件的问题,日本 Honda 汽车公司与 Toukei 公司于 1986 年在压力铸造的基础上提出新压铸法与中压铸造^[27,32]。他们采用砂芯替代金属芯,并使用适中的压射比压(5~30 MPa),成形具有闭舱结构的缸体。其示意图分别如图 12 与图 13 所示。

采用这种方法自动化程度高,采用砂芯可生产内腔复杂的零件,且补缩力比低压铸造高。但目前

该方法并没有得到大范围应用,推测原因可能有两点:①砂芯高温强度不足。受高温金属液作用,砂芯强度下降,成形过程中砂芯容易断裂且铸件易于夹砂。②设备投资较大。由于工艺要求与设备吨位限制,市面上难以有直接可用的设备,前期的投资与开发成本大、耗时长。

北京航空航天大学张虎在 2017 年提出了另一种金属液在中高压下凝固的铸造方法^[33],主要用于反重力铸造机或挤压铸造机。其原理是:在铸造模具内部设有一可上下移动的分流锥;充型时,分流锥起到分流导向的作用,使金属熔体以层流方式平稳充型;充型结束后,控制分流锥下行压住浇口套,形成密封空间;此后采用机械加压装置对金属熔体进行高增压,使金属熔体在压力下凝固。压力范围可达 0.1~160 MPa,避免了缩孔缩松、夹杂夹渣等缺陷。该法主要用于壳体类、框架类、筒体类零件的铸造。

1.9 T-Mag 铸造

澳大利亚联邦科学和工业研究组织(CRISO) Nguyen 等人在 2006 年提出了一种 T-Mag 倾斜铸造法^[1,34,35],其中 T 代表倾斜, Mag 代表镁合金。T-Mag 铸造工艺示意图如图 14 所示。

T-Mag 铸造的原理为:使用可加热的转移管连接到装置组件与金属模具;当整个组件倾斜时,熔体在保护气氛环境下被轻轻转移到金属模具中,从底部填充模具模腔,以减少充型过程中紊流和氧化物

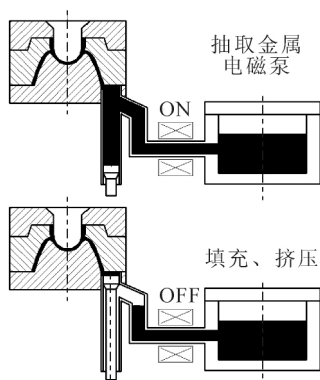


图 12 新压铸法示意图

Fig.12 Schematic diagram of new pressure die casting process

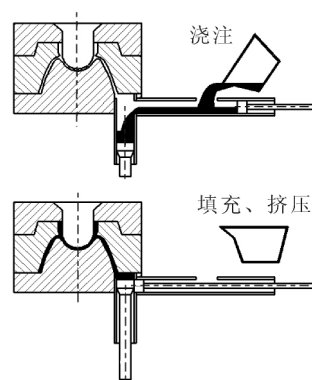


图 13 中压铸造示意图

Fig.13 Schematic diagram of middle-pressure casting process

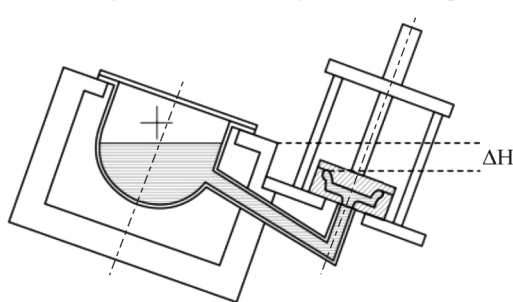
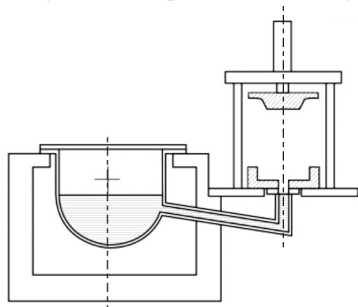


图 14 T-Mag 法示意图

Fig.14 Schematic diagram of T-Mag casting process

的形成;充型完毕后,由于液面存在着 ΔH 的高度差,铸件在静水压力下凝固;凝固完成后,整个组件转回初始位以降低熔体液面,随后打开模具取出铸件。

T-Mag 铸造可参考类似低压铸件内浇口的设计。但与低压铸造相比,在不额外施加外部压力的前提下,铸件就能实现压力下的凝固,确保了其内部质量;同时仍保留了低压铸件的良好工艺出品率优势。再者,由于整个系统环境相对封闭,针对镁合金这种活泼合金,大大降低了所需的保护气体消耗量。

这种铸造工艺比大多数的镁合金铸造工艺表现得更好,被认为是一种有潜力的镁合金铸造工艺。尽管这种方法是针对性质活泼的镁合金提出,但其重力倾转的充型模式与静(金属)液压力下凝固模式也同样适用于其他种类的合金。

1.10 Ablation 铸造(又称水爆铸造、水蚀铸造)

Ablation 铸造是一种相对较新的技术,由 Alotech 机构的 John. Grassi 与 John. Campbell 在 2006 年专利中提出^[34,36-37]。常规铸造中由于金属液收缩的影响,铸件与铸型将产生气隙,影响铸件与铸型之间的换热,铸件冷速有限,导致铸件内部组织不理想。

Ablation 铸造工艺原理为:采用能溶于水的无机粘接剂制作砂型,在金属液浇入铸型后的凝固阶段,采用冷却水定向喷射在砂型表面,以实现定向快速冷却的效果。

由于采用了水溶性粘接剂,砂型将慢慢溃散,冷却水可直接作用在铸件上冷却铸件,铸件冷却速度得到大幅度提升^[36];采用这种方法可以减小或消除气隙,提高铸件的冷却速率,细化枝晶与第二相,表现为铸件性能上的提高;同时也便于清理落砂,获得干净的铸件。Ablation 铸造过程如图 15 所示。

Ablation 铸造目前主要应用于铝合金,但也适用于其他合金,如镁,但需要有良好的工艺控制;这种铸造方法适用于大小不等、厚度不均的铸件,尤其

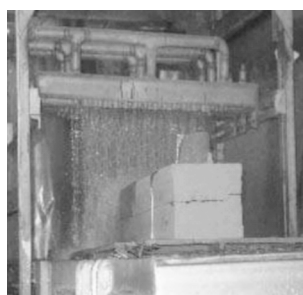
对复杂铸件的成形与控性表现出极大的潜力。但在 Ablation 铸造中需要很好地控制喷水工艺参数,如果砂型溃散过慢,当喷水作用在大部分已经完全凝固的铸件上,则发挥不了冷速对合金的改善作用;但如果砂型溃散迅速,喷水能量超过该温度下已凝固金属的壳层强度,则会出现铸件失效的情况。

1.11 Crimson 法(又称 RIMLock 法)

Crimson 法(Constrained Rapid Induction Melting Single Shot Up-casting)即约束快速感应熔炼单射上铸,可认为是一种背离传统铸造的工艺。这种方法最开始在 1996 年由 P.Bird 与 W.Savage 提出,叫做 Rimlock 法(Rapid Induction Melting Lost Crucible Process),即快速感应熔炼失坩埚工艺,但直到 2008 年,英国伯明翰大学 Mark. Jolly 教授因商业原因将其改名为 Crimson 法,这种方法才开始受到世人关注^[1]。

传统熔炼过程往往时间长,造成能源的浪费以及熔体质量的恶化(吸氢、元素烧损等),Crimson 法主要是为了减少熔炼能量消耗、改善铸件质量而提出的^[38]。它包括以下步骤:①熔炼:选取适量的金属锭,放入特制的陶瓷纤维坩埚里(坩埚底部可活动),在封闭的感应炉里快速熔炼至合适温度;②转移:将盛有金属液的坩埚转移到工作位上(工作位底部设有一可上下移动的活塞),并夹紧坩埚,使坩埚顶部开口端与铸型浇道相接;③浇注:采用计算机控制活塞的方式,推高坩埚底部,使盛放在其中的金属液进入铸型内;当金属液充满型腔后,活塞与模具整个旋转 180°改为重力下凝固,必要时也可在活塞压力下完成凝固。工艺示意图如图 16 所示。

与传统技术相比,Crimson 法具有以下特征:①金属液质量好。由于该工艺快速熔炼、快速转移、快速充型的特征,熔融金属液存在时间被大幅度缩短,在降低能源消耗的同时,也减少了熔融金属的吸氢与氧化,因此也不需要除气和除渣。②控制精度高。采用计算控制活塞运动以控制充型速度,以电



(a)受水蚀作用的铸型



(b)最终获得的铸件

图 15 Ablation 铸造工艺
Fig.15 Ablation casting process

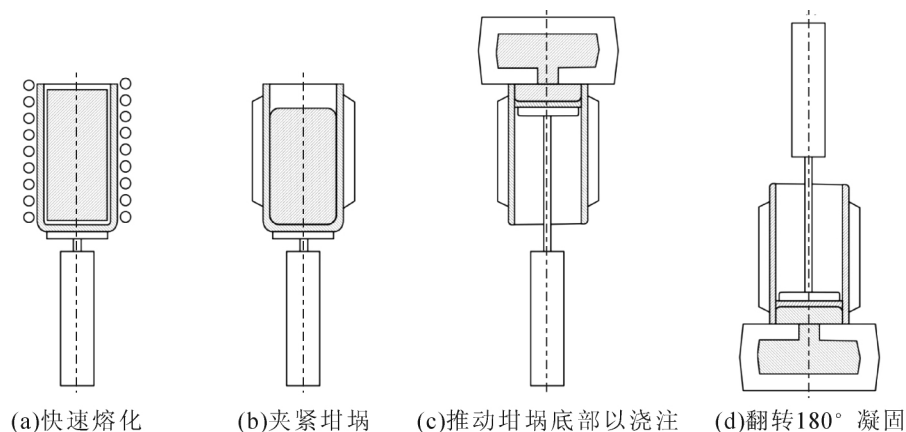


图 16 Crimson 铸造工艺示意图

Fig.16 Schematic diagram of Crimson casting process

驱动机械(齿轮、齿条或螺杆等)代替传统铸造中空气或液压驱动,控制精度更高,表现为金属液平稳充型。

这种技术特别适合镁合金等轻金属,出于安全考虑,铸造厂需要把金属液量控制在最小。由于Crimson法金属液质量高、能耗小、安全系数高等特点,被认为是一种符合未来铸造的模式,对轻质高强铸件的规模化生产表现出极大的潜力。目前,该工艺已开发出用于可重复使用的耐火坩埚和可移动的基座^[1]。

1.12 新型定向冷却翻转铸造技术

新型定向冷却翻转铸造技术由上海交通大学彭立明等人提出,主要是为成形发动机缸盖等具有关键部位的复杂铸件。在缸盖服役过程中,希望缸盖具有良好的力学性能与疲劳性能,而这样的性能与燃烧室组织中二次枝晶臂间距(SDAS)有关。成形过程中高的冷却速率有利于获得细小的SDAS,从而有助于提高性能。

为了获得高的冷却速度,传统的做法是利用冷铁(或在冷铁中加循环水)成形缸盖燃烧室部位,但随着过程的进行,冷铁的换热能力发生衰减,表现为成形过程中冷速下降。即使采用冷铁中加循环水的方式也有其弊端:①循环水需先冷却冷铁,再通过冷铁冷却铸件,二次传热效率低;②在凝固时,因金属模

具材料与成形金属液收缩率不同,相对铸件而言,冷铁有产生“离模”或产生气膜隔离的可能性,从而增加了中间热阻。

为了改善传统铸件成形时冷速不高的弊端,提出了用冷铁+喷水强制定向冷却的冷却方式;同时引入了翻转铸造模式,希望进一步发挥工艺优势。该工艺示意图如图 17 所示。

通过这样的工艺技术,希望在实现平稳充型的同时,通过定向喷水冷却调控温度场并细化晶粒;利用翻转“浇注系统”变“冒口”,达到更高的工艺出品率,以及冷铁+喷水快速冷却,获得更短的生产周期。

2 总结与展望

铸造过程可以大致分为充型、凝固两大阶段,各阶段发展呈现出以下特点与趋势。

(1)充型阶段 控制金属液的充型流动状态是获得优质铸件的先决条件,使金属液尽可能以层流形式充满铸型是充型阶段追求的目标。与重力铸造相比,低压底注式充型模式通过控制气压力的方式来间接控制金属液的流态,具有较好的效果。然而,在气压低压铸造中,由于检测频率与设备响应时间的缘故,实际压力相应往往滞后于设置的压力曲

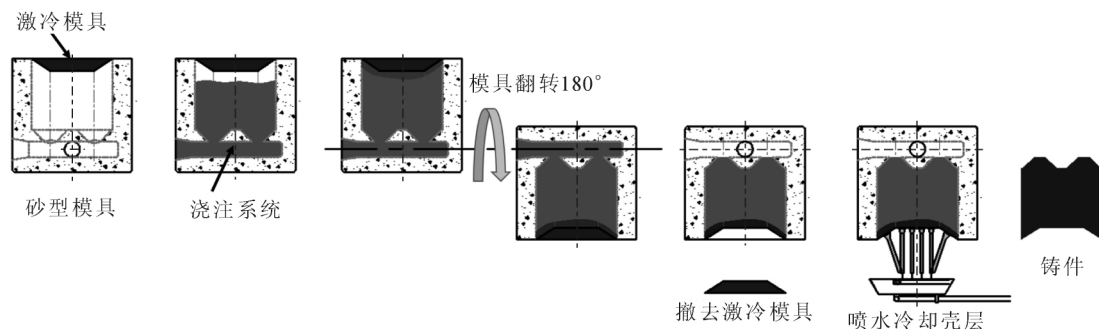


图 17 新型翻转定向冷却铸造工艺示意图

Fig.17 Schematic diagram of new directional cooling casting process based on rolling over pattern

线,导致金属液面存在波动。随着科技的发展,在气压低压铸造的基础上还发展出了电磁泵充型,其本质上也可认为是金属液的低速充型,只是将气压力改为更容易控制的电磁力。电磁泵充型能够减轻或消除传统气压低压铸造中液面波动的问题。同样的,Crimson 铸造方法中,也采用计算机控制机构运动来代替传统充型过程中的气体与液压驱动,以实现精确控制流态。

从铸造技术的发展历程来看,采用底注式的浇注模式,并且通过外力(如电磁力、机械力等)代替重力、气压力实现充型似乎已成为趋势,因为这样能够更好地控制充型动力,从而控制金属液流态。但目前来看,将电磁泵充型成功运用到实际生产的企业很少,大多仍是采用低压或重力的方式生产厚壁复杂铸件。为进一步推广新型、更平稳的充型模式,相关设备还需要在工业实践中不断完善。

(2)凝固阶段 合理的凝固工艺是减小铸件缩孔、控制组织形态从而奠定铸件后续性能潜力的关键环节。一方面,在凝固过程中保持合理的温度梯度,能够在力的作用方向上使高温金属液对低温金属液逐级补缩,达到获得致密铸件的目的。尽管充型过程中金属液流动产生的温度降能够在初期获得较好的温度梯度,但往往由于铸件的几何因素,局部冷却速度有所不同,会干扰或破坏初期形成的温度场。合理运用冒口、冷铁,或通过外部定向强制冷却等方式是改善凝固温度场的重要手段,但前者往往需要积累大量工艺设计经验,后者如 Ablation 喷水铸造法则相对简便。另一方面,铸件凝固时提供足够的补缩力也是保证铸件致密度的关键环节。理论上来说,补缩力越高越好,不仅能够打破凝固形成的枝晶网络,促进金属液流动补缩,还能改善铸件与模具的接触状态,减小或消除凝固收缩产生的热阻。但实际过程中,考虑到铸件脱模(要求用砂型,无法承受高压)、设备锁模力的因素,外加压力大小也存在一定的限制。采用一定的外加压力,结合金属液自身重力来实现补缩是一种很好的补缩模式,如 Crimson 铸造法中翻转加压凝固。由此可以预见,通过工艺设计或外界强制冷却调控铸件凝固温度场与加压补缩相结合模式将是未来生产高品质铸件的有效途径。

当然,各种铸造方式都有其优缺点,需要根据产品结构与实际生产条件综合考虑选择适当的铸造方式。可以预见的是,未来铸造一定是优质、高效、清洁、自动化技术与计算机结合的模式。目前我国铸造水平仍与发达国家存在一定差距,但国际市场对我国铸件需求量不断增加也给我国铸造行业创造了

机遇,铸造技术系统的升级换代正在发生,我们应把握时代的潮流,完成铸造生产从经验走向科学理论指导的转型,使我国由铸造大国变为铸造强国。

参考文献:

- [1] Campbell J. Casting [J]. Complete Casting Handbook (Second Edition), 2015:821-882.
- [2] 周麟升. 浅谈“轻合金金属型重力铸造”的“浇注位置”[C]. 2008 重庆市铸造年会论文集, 2008:204-205.
- [3] 王艳光,彭晓东,赵辉,等. 离心铸造镁合金的研究现状及展望[J]. 热加工工艺, 2011, 40 (23): 22-24.
- [4] 林雪冬,孙建,唐立超,等. 电磁-离心铸造 Al-19Si-11Ni 梯度复合材料的组织与性能研究 [J]. 轻合金加工技术, 2019, 47(9): 13-23.
- [5] 张坚,张官兵,赵龙志,等. 梯度功能材料制备技术的现状与展望[J]. 热加工工艺, 2013(4): 7-10.
- [6] 林雪冬. 自生颗粒增强铝基复合材料汽缸套的制备技术及其应用研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [7] 张卫文,赵海东,张大童,等. 金属材料挤压铸造成形技术的研究进展[J]. 中国材料进展, 2011, 30(7): 24-32.
- [8] 罗继相,白旭白. 铝合金挤压铸造技术的研究与应用[J]. 铸造, 2002, 51(8): 464-469.
- [9] 万志国. 铝合金双重挤压铸造成型工艺研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2010.
- [10] 肖泽辉,罗吉荣,陈愚,等. 镁合金熔体输送装置的设计及应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2007(s1): 136-137.
- [11] 林柏年. 压力铸造发展概况[J]. 电子工艺技术, 1981(7): 11-20.
- [12] 宋遵奎. 国外铸造设备发展史记事 (3)[J]. 中国铸机, 1995, 000 (3): 18-23.
- [13] 邹智厚,卢宏远,乐虎,等. 铝合金汽车发动机缸体的压铸生产 [C]. 2009 重庆市铸造年会论文集, 2009: 210-212.
- [14] 谭伟,程芳. 发动机汽缸盖压铸模具 3D 设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(6): 57-58.
- [15] 周健波,田福祥. 我国压力铸造技术的现状与发展[J]. 电加工与模具, 2006(s1): 17-21.
- [16] 赖华清. 压铸工艺及模具[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [17] 付彭怀,彭立明,丁文江. 汽车轻量化技术:铝/镁合金及其成型技术发展动态[J]. 中国工程科学, 2018, 20(1): 84-90.
- [18] 刘孝福,姜延春,齐笑冰,等. 低压铸造技术在铜合金和黑色金属领域的发展和应用 [J]. 铸造, 2006, 55(6): 585-588.
- [19] 朱奕庆,周培莉. 国外低压铸造工艺发展概况 [J]. 贵州机械, 1978(3): 54-69.
- [20] 李新雷,郝启堂,蔡增辉,等. 镁合金低压铸造连续化生产技术的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(4): 718-722.
- [21] 张杰,贾怡,马英勃,等. 铸造镁合金在工业领域的研究应用现状与展望[C]. 2017 中国铸造活动周论文集, 2017: 1-6.
- [22] 佚名. 国外消失模铸造的发展简史[J]. 热加工工艺, 2005(5): 20.
- [23] 张万红,方亮. 消失模铸造工艺的发展和研究现状[J]. 铸造设备研究, 1998(6): 29-32.
- [24] 樊自田,蒋文明,赵忠. 铝(镁)合金振动压力消失模铸造技术[C]. 中国机械工程学会铸造分会第十届消失模与 V 法铸造学术年会论文集, 2011: 8-15.
- [25] 樊自田,赵忠,唐波,等. 铝合金或镁合金消失模铸造加压凝固

- 方法及其装置: 中国, 101391298 [P]. 2009-03-25.
- [26] 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: 中国, 1382542 [P]. 2002-12-04.
- [27] 吴凌郊. 轿车发动机铝合金缸体和缸盖的铸造技术 [J]. 铸造技术, 2002(5): 273-275.
- [28] 邵京城, 李俊涛, 艾国, 等. 汽车铝合金缸体缸盖铸造工艺研究现状[J]. 热加工工艺, 2011, 40(3): 57-59, 63.
- [29] 吴勤芳. 用组芯技术生产汽车铸件的最新工艺 [J]. 中国铸造装备与技术, 2000(4): 6-10.
- [30] 赖华清. Cosworth 铸造工艺及其在汽车生产中的应用 [J]. 铸造设备与工艺, 2005(6): 33-35.
- [31] 樊自田, 黄乃瑜, 董选普. 从 Cosworth Process 新工艺看现代铸造生产的绿色集约化特点及其发展趋势 [J]. 铸造技术, 1999, (5): 37-39.
- [32] 金仲信. 日本铸造设备发展简史及动向 [J]. 中国铸造装备与技术, 2001(5): 9-10.
- [33] 张花蕊, 张虎. 一种低压增压铸造机用低压充型高压凝固的铸造装置与铸造方法: 中国, 108080601A [P]. 2018-05-29.
- [34] Polmear I, Stjohn D, Nie J F, et al. Casting of light alloys [J]. Light Alloys (Fifth Edition), 2017: 109-156.
- [35] Wang L, Lett R, Felicelli S D, et al. Microstructure characterization of magnesium control arm castings[M]. Shape Casting. John Wiley & Sons, Inc. 2011.
- [36] Grassi J, Campbell J, Hartlieb M, et al. The ablation casting process[J]. Materials Science Forum, 2009, 618: 591-594.
- [37] Taghipourian M, Mohammadaliha M, Boutorabi S M, et al. The effect of waterjet beginning time on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy during the ablation casting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 89-95.
- [38] Konstantinos Salonitis, Mark R. Jolly, Bin Xu Zeng, et al. Improvements in energy consumption and environmental impact by novel single shot melting process for casting [J]. Journal of Cleaner Production. 2016: 137:1532-1542.



襄阳聚力新材料科技有限公司

一、招聘销售工程师

任职要求:

1. 本科及以上学历, 铸造、耐火材料、冶金、有色金属专业, 熟悉二维、三维绘图软件者优先考虑。
2. 2年以上铸造行业耐火材料销售或铸造涂料销售经验者。
3. 2年以上铸造行业用中频炉或压铸行业工业炉销售经验者。
4. 2年以上铸造行业铁合金生产或销售经验者。
5. 2年以上耐火材料技术研发或产品应用经验者。
6. 2年以上铸造涂料技术研发或产品应用经验者。
7. 2年以上有在铸造厂工作经验, 对中频炉熔炼或造型工艺熟悉者。
8. 在压铸厂或铝厂工作2年以上, 对有色金属铜铝熔炼工艺流程熟悉者。

二、招聘销售经理

任职要求:

1. 大专及以上学历, 铸造、耐火材料、冶金、有色金属专业, 熟练掌握办公软件, 懂产品市场宣传, 营销策划者优先考虑。
2. 5年以上铸造行业耐火材料销售、铸造涂料或类似工业品销售经验者。
3. 5年以上铸造行业用中频炉或压铸行业工业炉销售经验者。
4. 性格外向, 诚信可靠, 乐观向上, 抗压力强。
5. 逻辑思维清晰, 做事干净利落, 工作效率高。
6. 善于多部门或多层次沟通协调。

三、销售助理

任职要求:

1. 男性, 30岁以下, 本科学历, 身体健康, 适合经常出差。
2. 性格外向, 诚信可靠, 乐观向上, 抗压力强。
3. 逻辑思维清晰, 做事干净利落, 工作效率高。
4. 善于多部门或多层次沟通协调。

有意向者请将简历发送至邮箱 wuhaiyan@xyjllc.com