

综 述

半固态压铸技术的现状与前景

赵立津¹, 门海豹², 赵高瞻^{1,3}, 陈强^{1,3}, 鲁美琪¹, 王艳彬^{1,3}, 赵志翔^{1,3}

(1. 中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039;

2. 北方通用动力集团公司, 山西 大同 037036;

3. 国防科技工业精密成形技术研究应用中心, 重庆 400039)

摘要: 综述国内外半固态压铸技术的现状与前景, 并按照半凝固压铸→半熔融压铸→半凝固压铸的发展特点来介绍各阶段主要半固态压铸技术的优缺点, 同时分析、比较了各自的工艺和设备特点。最终得出半固态压铸加速普及的迹象已经越来越明显, 其应用前景不可估量的结论。

关键词: 半固态; 压铸; 现状; 前景

中图分类号: TG249.2⁺6 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2012)04-0031-08

The Status and Prospects of Semi-solid Die Casting Technology

ZHAO Li-jin¹, MEN Hai-bao², ZHAO Gao-zhan^{1,3}, CHEN Qiang^{1,3},
LU Mei-qi¹, WANG Yan-bin^{1,3}, ZHAO Zhi-xiang^{1,3}

(1. No. 59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China;

2. North General Dynamic Group Corporation, Datong 037036, China;

3. National Defence Research and Application Center of Precision Plastic Forming Technology, Chongqing 400039, China)

Abstract: This paper is an overview for the situation and future of semi-solid die casting technology in China and abroad, and the advantages and disadvantages of the major technology in each stage are introduced in order of the development from semi-solid to semi-molten, then back to semi-solid. Meanwhile their technology and equipment characteristics are also compared and analysed. Finally come to the conclusion that with the trend that semi-solid die casting is developing exceedingly rapidly becoming clearer and clearer, its application prospect will be inestimable.

Key words: semi-solid; die casting; situation; prospect

压铸法是指将熔融金属加压注入金属铸型的铸造方法。在悠久的铸造历史中, 与每次铸造都要破坏的砂型相比, 金属模具可反复使用, 它的出现是一场重大的变革。金属模具具有可反复使用, 尺寸精度高, 铸件表面质量好等优点, 但由于冷却速度快, 存在熔液流动填充能力差的缺点。为解决这一问

题, 研究者将熔融金属加压高速注入金属模具, 这成为压铸的起源。压铸的变迁史如图1所示, 从高压高速填充到压铸的阶段, 空气的卷入导致铸件内部存在气孔, 机械强度的可靠性随之降低^[1-2]。于是人们开始了对压铸的本身特征——高速填充的摸索, 来避免气孔的出现。这方面的技术研发有真空

收稿日期: 2011-08-23

作者简介: 赵立津(1966—), 女, 河北抚宁人, 工程师, 主要研究方向为压铸技术。

压铸法、层流压铸法、充氧压铸法等^[3-6]。这些技术都是熔液的填充,必然涉及高熔点金属的课题。

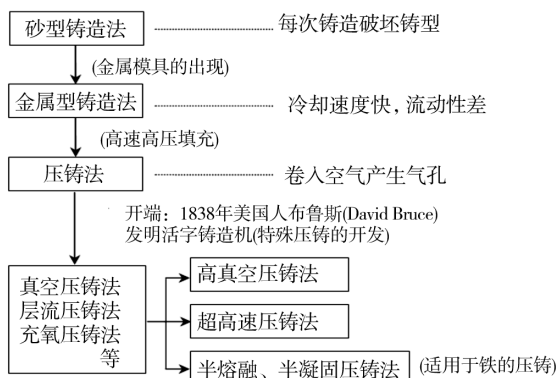


Fig. 1 The development of die casting

与此相比,以半固体状态金属而非熔融态进行压铸的方法倍受关注。它是将金属在固液共存区射入并填充的,与以往的熔液压铸法相比,气孔和偏析极少,并且由于是低温浇铸,金属模具的寿命还可得到延长。

1 半固态压铸简介

所谓半固态金属是指具有固、液两相混合状态的金属,如图2所示。制备方法如图3所示,借助搅拌装置使熔液在搅拌中凝固,进而生成初晶并作为固相粒子分散在熔液中^[3]。随着冷却速度和搅拌速度的变化,固相粒子的尺寸和固相率随之变化。该过程在平衡相图的固液两相区进行,固、液相线温差越大,半固态越容易获得。

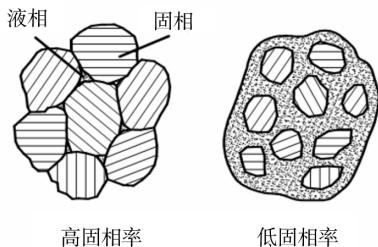


图2 半固态金属的内部结构

Fig. 2 The internal structure of semi-solid metal

用如图3所示方法,在降低金属熔液温度的凝固过程中,固、液两相混合的状态称为半凝固状金属。将该状态金属急冷凝固得到的材料再次加热,

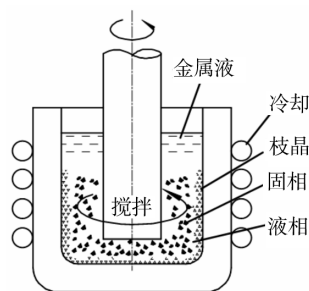


图3 半固态金属的制法

Fig. 3 The preparation of semi-solid metal

并维持在固、液共存区域,再次成为固液相混合状态,称为半熔融状金属。半凝固状金属的制备方法有机械搅拌法、电磁搅拌法、机械振荡法、超声波振荡法等。

半固态金属具有多种优良特性,其应用大多处在研究阶段,工业化正在开展的多为铝合金压铸。半固态压铸有以下2种方法。

1) 流变法,如图4所示。将搅拌凝固得到的半凝固状金属直接注入压铸机的压射套筒并射入成形。二战前后,日本的搅拌铸造用的就是这种方法。

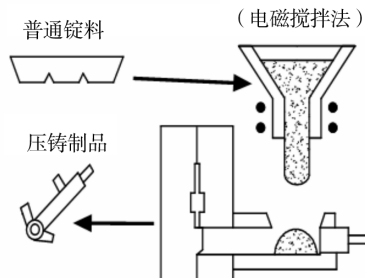


图4 流变铸造法工序

Fig. 4 Steps of rheocasting method

2) 触变铸造法,如图5所示。将搅拌凝固得到

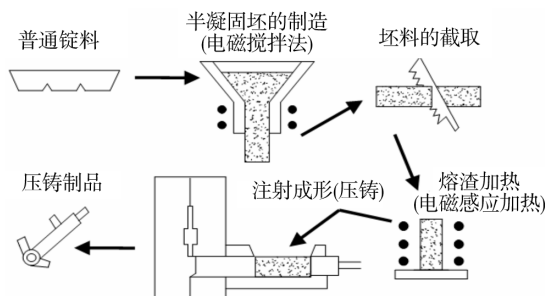


图5 触变铸造法工序

Fig. 5 Steps of thixocasting method

的连铸棒料定量截取,再加热成半熔融状金属,然后插入压铸机的压射套筒并射入成形。

半固态压铸具有的优势如图 6 所示。其中,铸造温度低、凝固潜热小等优点可以延长金属模具寿命,这也预示着高熔点金属压铸存在可能^[7]。同时,减少气孔是半固态压铸的主要目标。

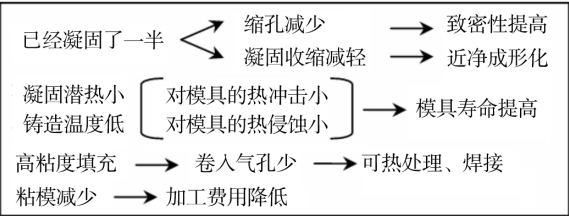


图 6 半固态压铸的优势

Fig. 6 Advantages of semi-solid die casting

半固态内部的流动如图 7 所示,固相粒子在填

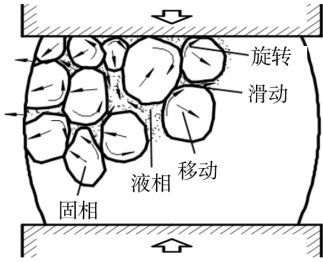


图 7 半固态内部的变形机制

Fig. 7 The deformation mechanic of the internal semi-solid

充过程以独立状态移动旋转,故流动阻力小,通过加压就可以维持流动性^[8]。半凝固压铸、半熔融压铸等制备方法的强度比较如图 8 所示,得到的铸造组

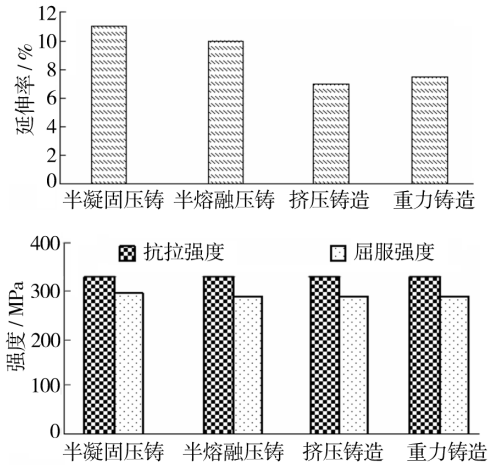


图 8 不同方法所得铸件拉伸性能(A357 合金)

Fig. 8 The tensile properties of castings in different methods

织如图 9 所示。 α 晶粒中的黑色部分是触变坯料重新加热为半熔融状过程中 α 晶粒长大时包围并吞食的共晶部分,如图 9 所示。

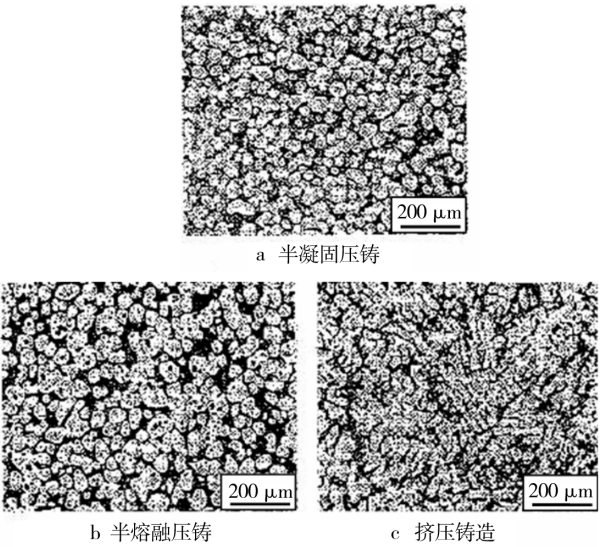


图 9 不同铸造方法所得试样的显微组织

Fig. 9 The microstructure of samples in different casting processes

2 半固态压铸的变迁

半固态压铸的变迁见表 1。从战前到战后,该方法作为成熟的工艺被日本各地的压铸工厂广泛应用,被称作搅拌膏熔体、半膏体、冰冻果子露或浆糊法,采用的是波拉克(Polack)式压铸机(冷室压铸机)。它是向熔液中加入冷金属搅拌成半凝固状,然后用铲勺舀入压铸机的压射套筒射入并填充。在波拉克式压铸机上使用普通的金属熔液,可能会流进柱塞和套筒的间隙从而引起粘模,影响柱塞工作的稳定性。为防止这种现象的发生,人们开始使用半固态。该方法也会产生一些问题——氧化物的混入及金属间化合物的生成引起的硬点问题、温度控制不佳引起的固相率不均匀现象、坩埚炉批量作业生产能力差以及半固态化困难等合金普及问题,导致 1955 年左右卧式压铸机逐渐消失^[9]。

20 世纪 70 年代,美国麻省理工学院的弗莱明斯和东京大学生产技术研究所的木内学等分别掌握了半凝固金属、半熔融金属的特征。随后,研究者也开展了大量关于半凝固、半熔融金属的特性和加工方法的研究,但没有获得过实际应用。20 世纪 80 年

表 1 半固态压铸的变迁

Table 1 The development of semi-solid die casting

年度	国家	事 件	种 类
1929	欧洲	Eckert(GER), J. Polack(CZE)研制了冷室压铸机(Pasty State & Plastic Metal(半固溶状态)铸造}	
1935	—	黄铜的半固态压铸开始	流变铸造
1943	日本	半熔融(半凝固)状态压铸的有用性报告(中谷轻金属工业)	(搅拌铸造)
1953	日本	糊状压铸的实验报告(田中压铸)	
1958	日本	糊状与液体的强度试验实施(东大理工研、田中压铸)	
1965	日本	萩原、高桥,刮土机旋转凝固法的报告(北海道大学)	
1972	美国	D. B. Spencer 半熔融金属的触变性报告	基础技术开发
1976	美国	M. C. Flemings 触变铸造、流变铸造法的发表(MIT)	
1982	日本	木内等人半熔融金属的特性发表(东大生产技术研究所)	
1987	美国	注射成形法的应用(DowChemical, Battel)	
1989	美国	SSF(Semi Solid Forging)开发(Alumax)	
1992	日本	镁合金用实用机的研制(日本制钢所)	
1993	瑞士	SSM(Semi Solid Metal Casting)开发(Buhler)	触变铸造
1994	日本	SSF 的引进(速之星(SPEED STAR))	
1994	日本	ATF(Asahi Thixo Forming)开发(旭 TECH)	
1995	日本	SSM 的引进(东京理化学工业所)	
1997	日本	半凝固压铸的开发(日立金属)	
1998	日本	NRC 法(New Rheo Casting)开发(宇部兴产机械)	
1999	日本	触变铸造的引进(本田)	流变铸造
2002	美国	SSR(Semi-Solid Rheocasting)[IdraPrince]	
2003	韩国和日本	纳米铸造法的开发	
2003	日本	ASCT(Advanced Semisolid Casting Technology)的开发(本田)	

代后期,随着麻省理工学院享有的多项专利权有效期截止,以欧美铝材厂商制造出半熔融加工用的坯料为契机,欧美开始了半熔融压铸的实际应用。

随后,许多钢铁企业开展了半凝固、半熔融金属加工方面的研究并取得了一定成效。工业化方面,1994年速之星(SPEED STAR)(如图10所示)开始

了铝箔的生产,随后旭 TECH 与东京理化工业所分别在铝合金压铸方面开始了工业化生产,如图11、图12所示。另外在镁合金方面,日本制钢所1994年在树脂成型机上开始了生产应用,如图13所示。流变铸造法方面,日立金属、宇部兴产机械分别在1997,1998年开始了生产应用。

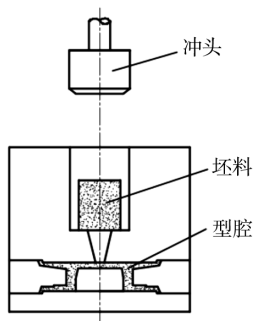


图 10 速之星的模型

Fig. 10 Model of SPEED STAR

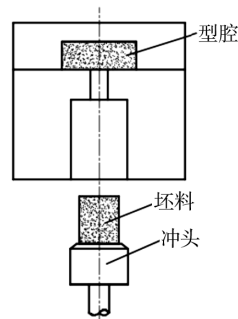


图 11 TECH 的模型

Fig. 11 Model of TECH

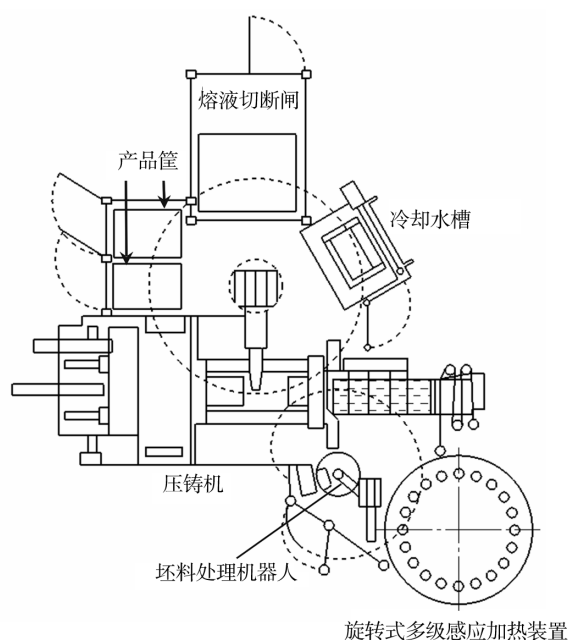


图12 东京理化学工业所的机械布局

Fig. 12 Arrangements of EYELA

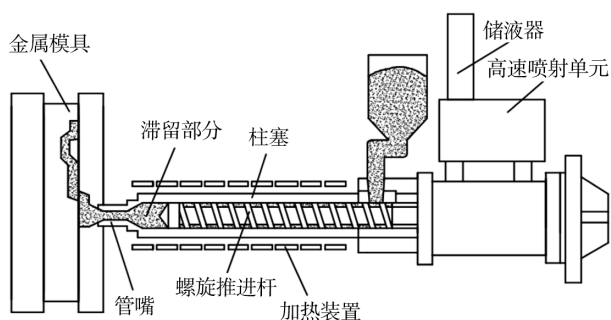


图13 日本制钢所触变模压法的填充机构

Fig. 13 Filling devices of thixomoulding in JSW

3 半固态压铸的动向

从20世纪中叶至今,半固态压铸经历了半凝固(流变法)→半熔融(触变法)→半凝固(流变法)的变迁。初期因流变法存在的诸多问题而消失一时,触变法似乎成为唯一选择,而触变坯料成本高且获取困难使流变法再一次成为研究的方向,即当前的动向^[10-11]。

用较低成本得到品质稳定的半固态对于半固态压铸的发展相当重要,下面从该观点出发介绍一下最近的一些研制方法^[12-15]。

日立金属在1997年开发出在略高于液相线温

度下低温浇铸的流变铸造法,它通过安装在挤压铸造机压射套筒外围的电磁线圈将注入筒内的熔液搅拌成半固态状射入填充。设备概要和压射套筒如图14和图15所示。

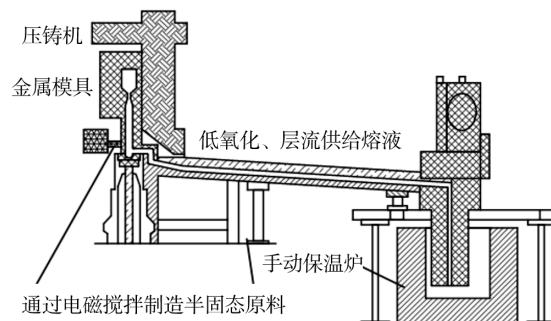


图14 半凝固压铸批量生产设备

Fig. 14 Mass production equipment of semi-solid die casting

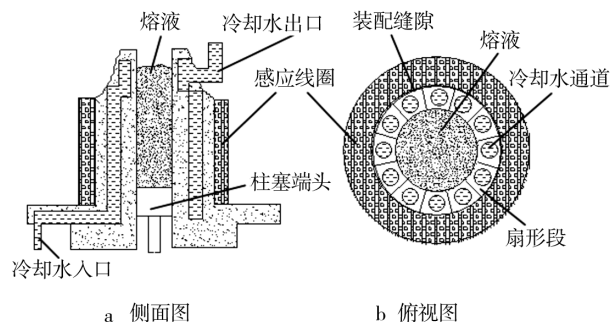


图15 带电磁线圈的压射套筒

Fig. 15 Ejection sleeve with field coil

宇部兴产机械在1998年开发出新流变铸造法(NRC法:New Rheo-Casting法),将温度略高于液相线的低温熔液注入制浆容器得到半固态后倒入挤压铸造机的压射套筒内射入填充。NRC法的工艺概要如图16所示。

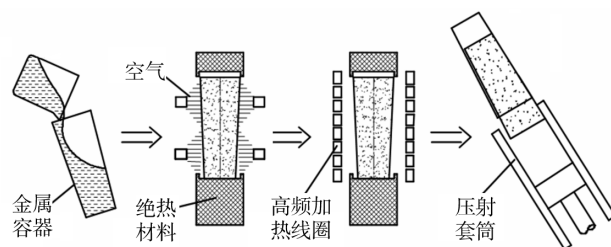


图16 NRC法工序

Fig. 16 Steps of NRC method

在美国,IdraPrince在2002年开发了SSR法

(Semi-Solid-Rheocasting)。SSR法是向熔液中插入铜制的冷却棒并旋转,制备细小的半固态浆料的方法,原理如图17所示。

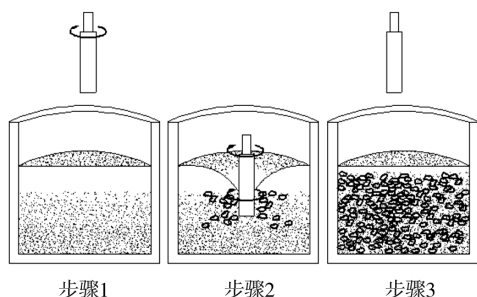


图17 SSR的原理

Fig. 17 The principle of SSR

韩国的延世大学和纳米铸造(NANO-CAST)在2003年开发出纳米铸造法。纳米铸造法是向电磁搅拌装置内的不锈钢杯中注入熔液,以急冷手段来增加形核数量,在极短的时间内将熔液变成半固态的方法。与以往的半固态压铸法($100\ \mu\text{m}$ 以上)相比具有初晶 α 晶粒的直径小($50\ \mu\text{m}$ 左右),可适应多种合金,注入熔液的温度范围广,设备简单廉价等优点。纳米铸造法的工序如图18所示。

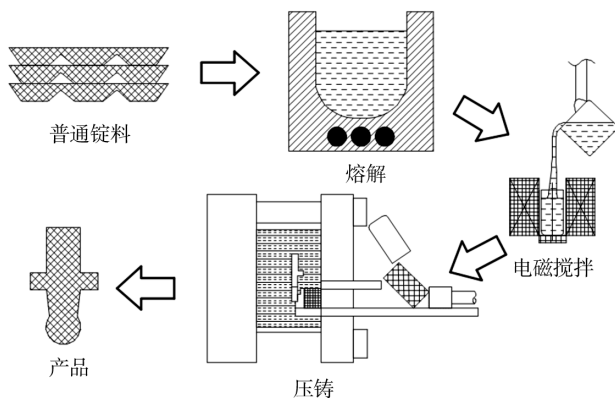


图18 纳米铸造法工序

Fig. 18 Steps of nano-casting

最近,日本东北大学正在改进纳米铸造法,研究不通过外力搅拌而是依靠熔液自身搅拌生成半固态的方法。如果这种方法得以推广应用,将产生成本更低的半固态压铸产品。2003年本田技研工业和本田工程开发了ASCT法(Advanced-Semisolid-Casting-Technology),开始生产采油发动机闭式缸体。ASCT法是把自转同时又公转的冷却棒插进熔

液中,使熔液结晶出初晶,测定粘度,把达到指定固相率的浆料倒入压铸机的压射套筒,然后进行压铸的方法。ASCT法的浆料制备装置如图19所示。

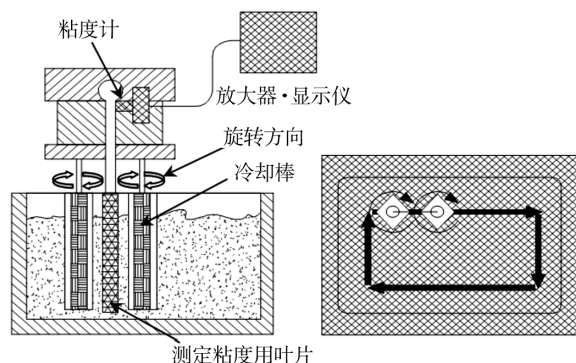


图19 ASCT法

Fig. 19 ASCT method

在半固态压铸流变铸造法实际应用快速发展期间,触变铸造坯料制备方法的研究也取得了较大进展^[16-17]。下面介绍其中一些具有代表性的方法^[18-20]。

1) 电磁搅拌法是目前工业化生产触变坯料的唯一方法。以铝合金为对象,在连续铸造铸型内进行电磁搅拌,制备出直径为 $7.62\sim 15.24\ \text{cm}$ 的坯料。电磁搅拌法如图20所示,连续铸造有立式和水平方向抽拔的卧式等2种。

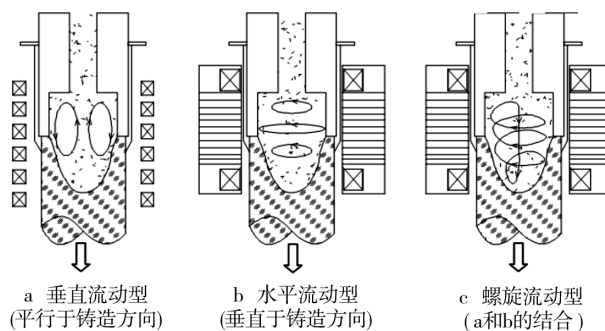


图20 电磁搅拌法

Fig. 20 EMS method

2) 倾斜冷却板法。由千葉工业大学、AHRES-TY开发,它将略高于液相线温度的低温熔液导流在流槽状的倾斜冷却板上,制备出具有基于结晶游离学说生成的细小粒状初晶的浆料。浆料在冷却板下游的中间包中缓慢冷却长大成粒状。然后将其连续铸造制备出触变坯料。倾斜冷却板法如图21所

示。

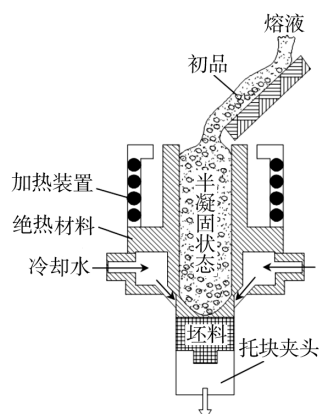


图 21 倾斜冷却板法

Fig. 21 Slope cooling plate method

3) PID 法 (Pressure Ingot Die-Casting)。由 O. Hervieu 等人开发,使用稍多量镁合金流变压铸的浆液压铸,结束后将多余料当作触变坯料重新加热压铸的方法。这种方法使原材料的成品率(成品对原材料的比率)提高,应用范围更广,且能降低成本。工序如图 22 所示。

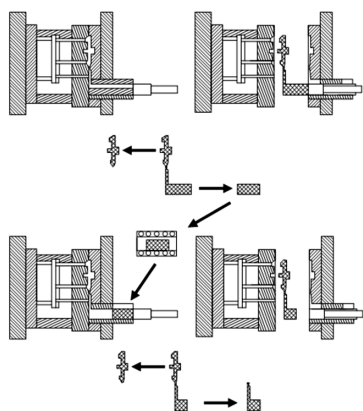


图 22 PID 法工序

Fig. 22 Steps of PID method

4) SIMA 法 (Strain Induced Melt Activated)。对材料进行压轧或挤压处理引入变形,借助二次加热时的再结晶使固相粒子分裂并球化,转化为适合触变铸造的状态再投入使用。SIMA 法主要以获得球状晶困难的铁系、不锈钢系高熔点金属为研究对象,对铝合金中的锻造用 A2024 和 A6061 等合金,铸造用 A356 合金,镁合金中的 AZ91D 等也在加速研究应用过程中,国内近年来主要集中在北京科技大学、中科院金属所和北京有色金属研究总院等单

位。

5) SEED 法 (Swirled-Enthalpy-Equilibration Device)。由 ALCAN 开发,它是把熔液注入底部带孔(为排出未凝固液相)的容器中,急冷的同时摇动容器,制成固相率为 35%~40% 的半固态浆液,5~10 s 后排出凝固最迟的中心部位液相,得到更均质浆料的方法。工序如图 23 所示。

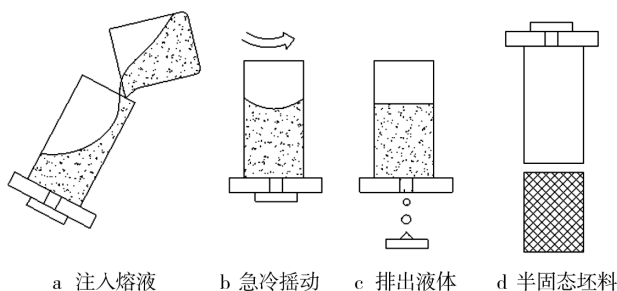


图 23 SEED 法工序

Fig. 23 Steps of SEED method

4 结语

金属半固态压铸技术,与传统材料压铸技术相比,在提高产品质量、性能,降低能耗和成本,缩短生产流程,利于环境保护,以及提高产品市场竞争力等方面具有其独特的优势。此技术在汽车、通信电器、机械以及航空航天等工业领域存在着巨大的现实及潜在应用市场,十分需要从理论基础、成形加工控制技术以及工艺装备等方面开展系统的研究开发工作,以促进这一新技术的理论完善、工艺成熟、实际应用水平的提高和应用领域的扩大,其理论和实际意义将十分重大,应用前景不可估量。

参考文献:

- [1] 谢水生,黄声宏. 半固态金属加工技术及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1999.
- [2] KIM E S, LEE K H, MOON Y H. A Feasibility Study of the Partial Squeeze and Vacuum Die Casting Process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000 (105): 42-48.
- [3] 余冬梅. 中国铝合金压铸业的发展及现状[J]. 世界有色金属, 2007(3): 63-65.
- [4] 管仁国,石路,邢振环,等. 新型倾斜板技术制备半固态 Al-Si₃Mg₂ 合金及触变成形[J]. 铸造, 2007, 56(7): 694-697.

- [5] 李远发, 苏平线. 液态压铸锻造双控成形技术研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(9): 568—571.
- [6] 黄卫东, 李涛, 林鑫, 等. 半固态加工技术分析与发展[C]. 特种铸造及有色合金, 中国压铸、挤压铸造、半固态加工学术年会论文集, 2001: 186—191.
- [7] 姜巨福, 彭秋才, 单巍巍, 等. 新 SIMA 法制备 AZ91D 半固态坯[J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(12): 740—743.
- [8] 翟秋亚, 袁森, 蒋百灵. AZ91 镁合金的 SIMA 法半固态组织特征[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(1): 123—128.
- [9] 冯鹏发, 唐靖林, 李双寿, 等. 制浆-成形分离式铝合金流变成形技术[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(2): 239—247.
- [10] YANG M B, PAN F S, TANG L W, et al. Compression Deformation Behavior of AZ91D Magnesium Alloy in Semi-solid State[J]. Material Science Forum, 2007: 546—549; 151—154.
- [11] LE Q C, CUI J Z, XIA K. Thixotropic Mg alloys through Liquidus and Sub-liquidus Casting[J]. Material Science Forum, 2005, 488: 303—306.
- [12] Anacleto de Figueredo. Science and Technology of Semi-solid Metal Processing[C]. Worcester Polytechnic Institute Worcester, MA, 2004.
- [13] LEE S G, GOKHALE A M, PATEL G R, et al. Effect of Process Parameters on Porosity Distributions in High-pressure Die-casting AM50 Mg-Alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 427: 99—111.
- [14] MATSUKI R, PEREPEZKO J H. ISI[J]. International, 1997, 37(7): 668.
- [15] WEILER J P, WOOD J T, KLASSEN R J, et al. Relationship between Internal Porosity and Fracture Strength of Die-casting Magnesium AM60B Alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 395: 315—322.
- [16] 李维明, 李四娣, 罗金祺. 滤波器腔体压铸技术的研究和应用[J]. 精密成形工程, 2011, 3(4): 76—78.
- [17] 陈洪涛. 电磁搅拌对半固态镁合金组织的影响[D]. 北京: 北京科技大学, 2003.
- [18] 路贵民, 董杰, 崔建忠, 等. 液相线半连续铸造 7075 铝合金二次加热与触变成形[J]. 金属学报, 2001, 37(11): 1184—1188.
- [19] HU Henry, ZHOU Ming, SUN Zhi-zhong, et al. Tensile Behavior and Fracture Characteristics of Die-casting Magnesium Alloy AM50[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201: 364—368.
- [20] FU Peng-huai, ALAN A L, JIANG Hai-yan, et al. Low-pressure Die-casting of Magnesium Alloy AN50 Response to Process Parameters[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(3): 224—234.

我国锻压设备业的发展

锻压设备发展至今在今天的装备制造业已具有举足轻重的作用,在重型化、精密化、智能化、复合发展等方面取得了巨大的技术突破,对国民生产力的提升提供了必要的支撑。我国龙头锻压设备企业发展短短十多年时间就成长为行业的龙头企业,企业产业升级功不可没,并且紧跟产业升级的步伐抢抓机遇取得发展。

尚普咨询机械分析师认为,锻压设备是航空工业的助推器,其中 85% 以上的零部件都使用大(重)型锻压装备进行生产。我国锻压企业依托技术创新,不断研发新产品。锻压设备也是发展高铁的催化剂。伴随着国内铁路建设规模和投资规模的高速扩张,铁路装备需求不断增加,特别是与机床需求密切相关的机车车辆和轨道装备需求将大幅增加,这就需要机床的大量供需作保障。我国锻压行业的领军企业,通过多年努力已经实现了液压机产品产高销量,有效保障了对高铁行业所需机车车辆和轨道装备的供应。该企业生产的设备具有极高的质量保障,保障了中国高铁的安全顺利建设和积极扩张。

据尚普咨询发布的《2010 年中国锻压设备市场分析及投资价值研究报告》显示,在十二五国家机械工业科技发展规划蓝图中,明确的规定了机械工业科技发展的目标是形成以机床为代表的基础制造装备、大型自控及精密测量仪器的自主开发能力,实现关键装备的国产化。我国将相关付出政策纳入到企业的发展之中,促进企业发展更快,也将紧紧抓住我国汽车、船舶、航空航天、军工、轻工家电、石油化工等行业对大型、精密成形机床装备的迫切需求,引导我国锻压企业逐步发展壮大。

(中华机械网)