• 今日铸造 Today Foundry •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.07.018

镁合金半固态流变成形技术的发展与应用

徐春杰[1,2],路瑶涵[1],马 东[1],张凯军[1],王银玉[1],杨 怡[1],屠 涛[2,3],田 军[2,3],张忠明[1,2]
(1. 西安理工大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710048;2. 西安谢赫特曼诺奖新材料研究院,陕西 西安 710048;3. 镁高镁诺奖(铜川)新材料有限公司,陕西 铜川 727031)

摘 要:随着镁合金在航空航天、汽车等领域的应用,对高强韧镁合金的需求越来越迫切,普通压铸工艺已经不能满足汽车领域对高性能镁合金的要求。因此,近年来镁合金半固态流变成形技术得到了快速发展,以流变压铸、流变挤压铸造、流变轧制、流变挤压为代表的新型成形技术已经被尝试用于商业化生产。提高制浆与成形工艺生产效率和稳定性,提升产品综合性能,仍然是目前和未来的研究热点。综述了近年来镁合金半固态流变成型技术的主要工艺过程和研究现状,展望了该领域未来的主要研究方向和发展前景。

关键词:镁合金;半固态成形;流变成形
中图分类号:TG146.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)07-0625-07

Development and Application of Semi-solid Rheoforming Technology for Magnesium Alloy

XU Chunjie[1,2], LU Yaohan[1], MA Dong[1], ZHANG Kaijun[1], WANG Yinyu[1], YANG Yi[1], TU Tao[2,3], TIAN Jun[2,3], ZHANG Zhongming[1,2]
(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Shechtman Nobel Prize New Materials Institute, Xi'an 710048, China; 3. Meigaomei Nobel Prize (Tongchuan) New Materials Co., Ltd., Tongchuan 727031, China)

Abstract: With the application of magnesium alloy in aerospace, automotive and other fields, the demand for high strength and toughness magnesium alloy is more and more urgent, and the traditional die casting process has been unable to meet the requirements of high performance magnesium alloy in the automotive field. Therefore, semi-solid rheoforming technology of magnesium alloys has been developed rapidly in recent years, and new forming technologies, such as rheological die casting, rheological squeeze casting, rheological rolling and rheological extrusion, have been tried for commercial production. Improving the production efficiency and stability of pulping and forming process and improving the comprehensive performance of products are still the current and future research hotspots. In this paper, the main process and review of semisolid rheoforming process for magnesium alloys in recent years are reviewed, and the main research direction and development prospect in this field are prospected.

Key words: magnesium alloy; semi-solid forming; rheoforming

镁及镁合金具有密度小质量轻、比强度高、导电导热性好、减震性好、冲击韧度高等特点,被誉为“21世纪最具发展前景的绿色工程材料”[1],在航空航天、汽车等领域已经成为减重首选材料。金属半固态加工技术在20世纪70年代初就被提出,各种半固态成形技术日臻完善,计算机技术已经被用于半固态合金的充型过程模拟,并且已经在黑色金属领域进行半固态加工技术拓展。20世纪90年代末,该技术被用于镁合金商业化生产。与传统加工工艺对比,半固态流变成形工艺充型平稳、组织致密、成型温度低、零件尺寸精度高、模具寿命长的等优点;同时,与半固态触变成形技术对比,其流程短,节约能源,生产成本更低,效率更高。因此,半固态流变成形镁合金工件较普通压铸具有更高的综合性能,其应用前景更广阔。

本文作者综述了镁合金半固态流变成形的主要工艺过程、研究现状及应用领域,展望了镁合金半固态流变成形的研究方向和发展趋势,以期为该技术的应用领域扩大提供参考。

收稿日期:2021-05-27
基金项目:陕西省高等学校学科创新引智基地项目(S2021-ZC-GXYZ-0011);陕西省技术创新引导专项(基金)科技成果转移与推广计划-百项科技成果转化行动项目(2021CGBX-32);西安市高校重大科技创新平台及科技成果就地转化项目(20GXSF0003)
作者简介:徐春杰(1971—),河南淅川人,博士,教授.研究方向:镁合金强韧化设计及增材制造.
电话:13119153059,Email: xuchunjie@gmail.com

1 半固态流变成形

流变成形(Rheoforming)是一种在冷却过程中，对金属熔体进行强烈的电磁、机械搅拌或其他处理，以获得具有一定比例固相或晶胚的半固态浆料，并迫使浆料中的初生固相呈近球形；然后直接将该半固态金属浆液通过压铸、挤压或轧制成形[2-3]。由于该技术具有诸多优点，近年来已成为研究热点，备受关注，目前，已经被应用于各种材料，在航空航天、汽车制造、生物医疗、模具工业等领域得到了广泛的应用，如制造汽车外壳、人体骨架、3C零件等。

半固态流变成形技术可以细分为流变压铸、流变锻造、流变轧制、流变挤压等。流变压铸是流变成形的主要成形方式，如图1。

1.1 流变压铸

与传统铸造相比，流变压铸生产过程充型稳定，不易发生湍流和飞溅，可以有效地减少零件的气孔，提高铸件的致密性。流变压铸设备通常是通过不同的浆料制备设备和高压压铸（High Pressure Die Casting, HPDC）设备结合使用，生产所需要的零件。

流变压铸设备最早是由英国的Fan和同事开发的，该设备由两个基本功能单元组成，即双螺杆制浆机和HPDC设备，如图2。其原理是基于冷室压铸工艺，通过具有双螺杆剪切机制的设备制备金属浆料，然后通过HPDC设备成形最终零件，该设备可以直接用于液态镁合金生产近净形零件成形[4-5]，成形过程采用0.4vol%SF_6+N_2保护。

康永林等[6]利用金属浆料通过旋转的斜锥形内外筒之间的缝隙形成剧烈剪切应力场作用原理，开发了锥筒式半固态流变成形装置（Taper Barrel Rheomoulding, TBR）[7-8]，如图3[10]。其工作原理是通过内外筒相对运动的剧烈剪切作用，结合温度控制，使金属液体迅速成为具有理想固液体积比的半固态浆料，再通过HPDC设备快速成形。表1为TBR装置的主要工艺参数[9]。

表1 锥筒式半固态流变成形装置的主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters of BR device

剪切速率 /s^{-1}	温度范围 /℃	控温精度 /℃	浆料容积 /cm^3	熔化炉功率 /kW	压力机压力 /kN
0～9 000	50～900	±1	4 500	4.4	2 000

此外，祁明凡等[11]发明了强制对流搅拌(Forced Convection Stirring, FCS)装置，由搅拌系统，温度控制系统和排放系统组成，如图4所示[10-11]。搅拌系统

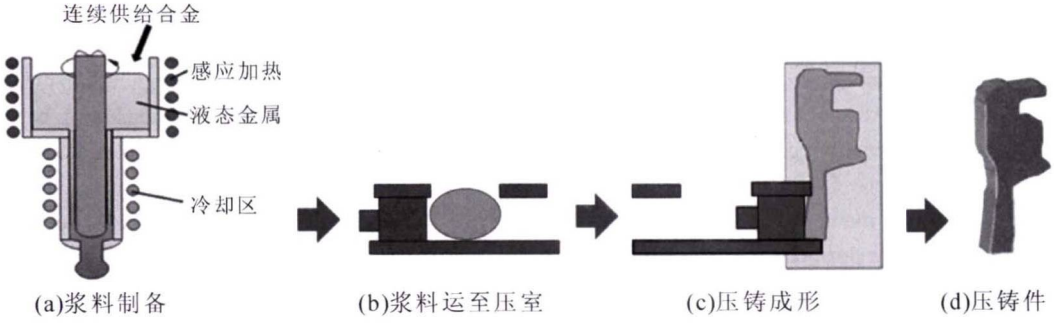


图1 典型的流变成形工艺流程
Fig.1 Typical rheoforming process flow

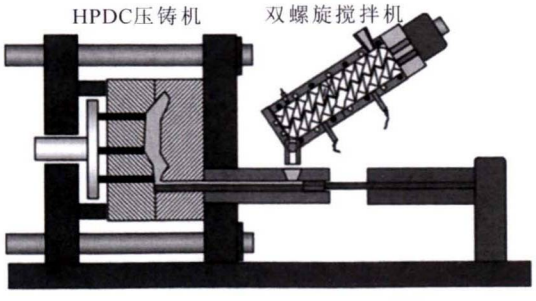
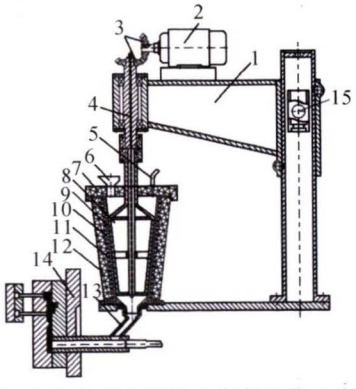
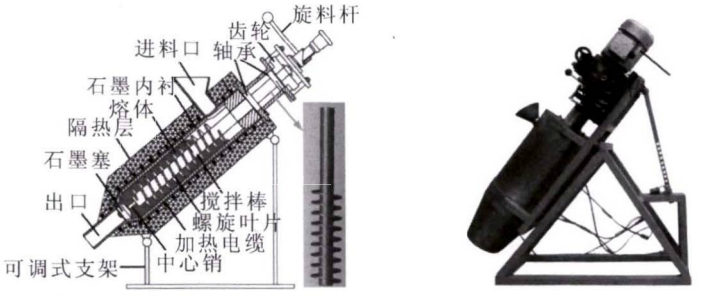


图2 流变压铸过程示意图
Fig.2 Schematic Rheo-die casting process



1- 升降系统；2- 电机；3- 驱动齿轮；4- 氩气通道；5- 氩通道；6- 漏斗 7- 保温罩；8- 内锥度桶；9- 外锥度桶；10- 加热元件；11- 冷却通道 12- 保温套；13- 浆料输送器具；14- 压铸模具；15- 支柱

图3 TBR一体化工艺示意图
Fig.3 Schematic diagram of TBR integrated process



(a)原理示意图　　(b)实物图

图 4 强制对流搅拌(FCS)装置

Fig.4 Forced convection stirring (FCS) device

是利用有螺旋叶片的搅拌棒，在强制对流搅拌作用下将熔体转变为高质量的半固态浆料。在浆料制备过程中，凝固熔体，螺旋叶片和机筒之间存在大量变化的界面区域，这使得浆料的制备过程非常有效，可实现快速散热。同时，由于在搅拌室中嵌入了石墨内衬，可以解决浆料粘附问题。

表 2 和表 3 列出了强制对流搅拌设备关于 AZ91D 的浆料制备熔体质量、FCS 工艺参数和所使用高压压射设备和参数[9-10]。

表 2 浆料制备的熔体质量和FCS工艺参数

Tab.2 Melt quality and FCS process parameters of slurry preparation

熔体质量 /kg	浇铸温度 /℃	转速 /rad·s^{-1}	机筒温度 /℃	搅拌时间 /s
3.0	310	18.84	560	20

表 3 用于零件成型的 HPDC 机器模型和 HPDC 参数

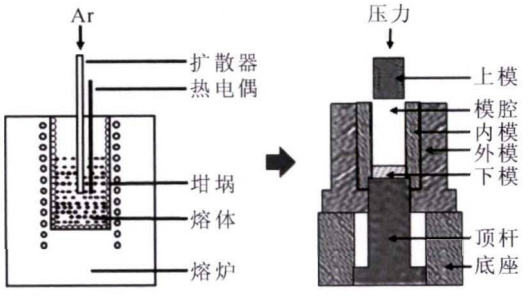
Tab. 3 HPDC machine model and HPDC parameters for part forming

型号	注射速度 /m·s^{-1}	注射压力 /MPa	注射温度 /℃
东芝 DC1250J-MC	1.5	70	210

1.2 流变挤压铸造

流变挤压铸造（Rheo-Squeeze Casting，RSC）发挥了传统挤压铸造和半固态流变成形的优势，可以有效改善晶粒尺寸和共晶偏析[12]。Wannasin 发明了基于气体诱导半固态（Gas Induced Semi-Solid GISS）过程的流变挤压铸造工艺[13]。图 5 为气体诱导半固态工艺和流变挤压铸造过程[14-15]。

为了改善稀土元素在基体中的偏析，可以采用新的流变挤压铸造工艺，浆料采用超声振动（Direct Ultrasonic Vibration, DUV）工艺制备[16-17]，DUV 设备如图 6 所示。在浆料制备中，首先将一定质量的镁合金熔体转移到加热炉中的预热金属杯中。在所需温度下开始 DUV 处理之前，将超声波振子浸入合金熔体表面以下约 20 mm 处，经过一定时间的 DUV 处理后，可以得到具有所需温度和固相分数的



(a)气致半固态工艺　　(b)流变挤压铸造工艺

图 5 气致半固态(GISS)工艺和流变挤压铸造(RSC)工艺的示意图

Fig.5 Schematic diagram of gas-induced semi-solid (GISS) process and rheological squeeze casting (RSC) process

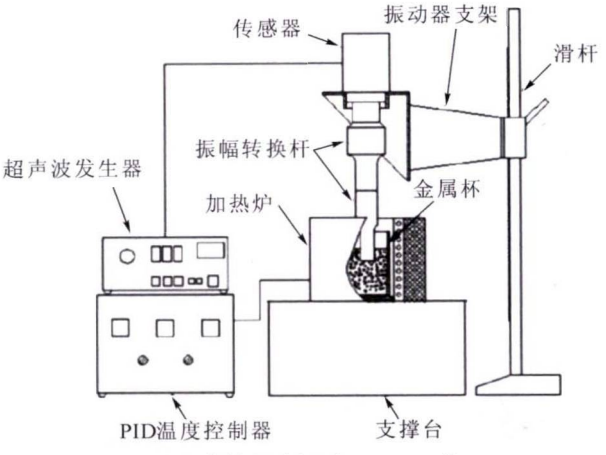
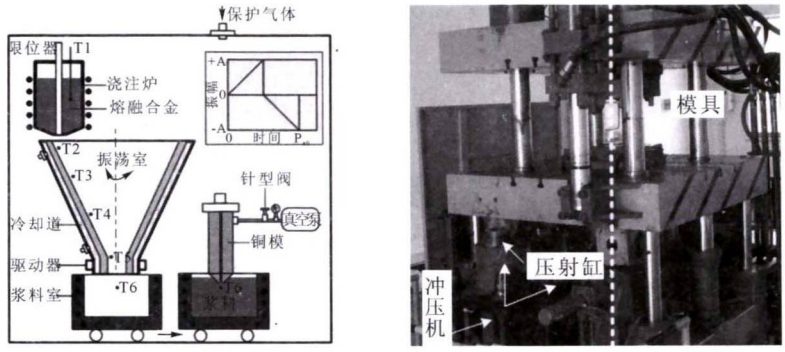


图 6 直接超声振动(DUV)工艺

Fig.6 Direct ultrasonic vibration (DUV) process

浆料。随后，将合金浆料倒入预热的模具中，然后从顶部和底部同时施加预定压力进行挤压铸造。在制浆过程中，一般使用 Ar 保护合金熔体。

另外，也可以采用有限的角度振荡（Limited Angular Oscillation，LAO）方式，利用振动腔以相对较低的频率绕其轴顺时针和逆时针交替旋转原理，实现了在初始凝固过程中对熔体进行充分搅拌和冷却[18]，并在立式设备上对 AZ91 合金进行挤压铸造，如图 7(b)所示[18]。在这个过程中，振荡幅度和振荡频率可以根据需要进行调整，并通过六个热电偶（T1~T6）记录和反馈各位置的温度，如图 7(a)所



(a)制浆机和振荡周期　　(b)挤压铸造机

图 7 镁合金立式浆料制备及挤压实验装置

Fig.7 Schematic illustration of experimental setup

示[19],挤压过程采用含有 2vol%SF_6+CO_2 气氛保护。

新流变成形(New Rheocasting, NRC)工艺是由日本开发的一种新的流变成形工艺[20-23],其工艺流程如图 8。其原理是将在液相线温度 10 ℃以上的熔体倒入隔热容器中,利用容器的冷却作用,使熔融金属内部产生大量的初生晶核;同时,使用陶瓷片覆盖容器,避免过多的局部散热。利用空冷将熔体冷却到合适的温度,随后在通过容器外部的高频感应加热器微调容器内部温度,使金属浆料达到成形需要的固相体积分数。翻转隔热容器,将半固态浆料倒入套筒,这样浆料上表面的氧化层沉到套筒底部,可防止氧化层进入铸件;最后将浆料直接推到模腔中,并迅速成形。

奥地利的 LKR(奥地利理工学院下属的轻金属技术研究部门),经过机械和技术改进,利用 NRC 工艺实现了高质量镁合金零件的工业化生产[24],浇铸系统可回收,并可以重新投入生产[25-26]。因此,NRC 工艺被认为是半固态镁合金零件最经济和最有前途的生产方法。采用常规镁合金,无需特殊的前体材料及额外成本就可生产出具有高延展性、高质量、几乎无孔洞且可热处理的铸件[24]。

1.3 流变轧制

流变轧制是一种低熔点半固态金属材料直接轧制工艺[27],即将半固态金属浆料直接进行轧制变形,连续制备金属薄带。在此基础上,将振动倾斜板与型材轧机结合在一起,适用于镁合金的流变轧制[28-29],如图 9[29]。在流变轧制过程中,镁合金熔体被浇注在振动斜板上并形核,由于强烈的冷却,形核迅速发生,最后可以获得高质量的半固态合金浆料。随后,浆料直接流入凹面和凸面之间的间隙滚轴,随着两个辊子的运动和摩擦,在封闭间隙中的浆料沿轧制方向流动,从而被轧制成形。

连续半固态轧制技术的特征在于,将型材轧机和振动倾斜板装置有机地结合在一起。由于金属浆料的温度较低和凝固时间较短,工艺优势明显,预期该新型轧制方法将迅速发展。此外,新工艺克服了浆液对板的粘附,在一定程度上消除了液体的偏析,从而产生了比传统轧制更优的组织与性能。早先,使用冷却斜率进行浆料制备,采用双辊铸造半固态工艺制备了 AZ31B,AM50A 和 AM60B 合金薄带[30-31],在二辊铸轧机上将机械搅拌 AZ91D 和 AZ31 镁合金浆料制成了带材[32]。

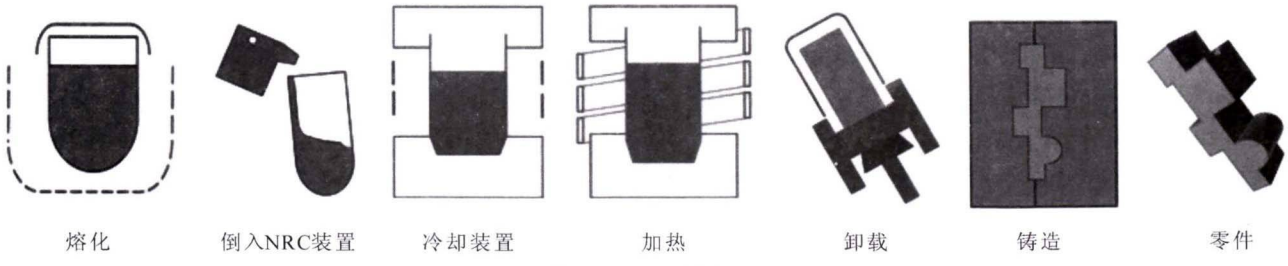


图 8 NRC 工艺流程

Fig.8 NRC process flow

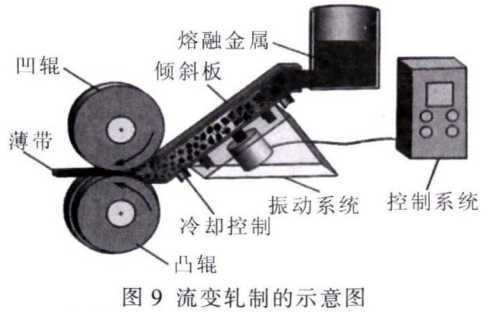


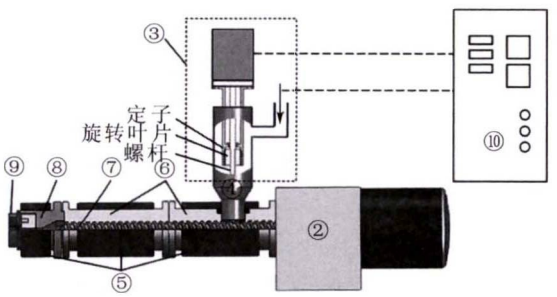
图 9 流变轧制的示意图

Fig.9 Schematic diagram of the rheo-rolling

1.4 流变挤压

流变挤压工艺压力较小,大约为传统热挤压的

1/10-1/5，但是可以生产线材，棒材、型材和复杂断面型材，其原理和结构主要由液态金属处理系统、双螺旋剪切挤压系统、齿轮泵送系统和挤压模具系统构成[33-34]，如图 10[35]。该工艺中，镁合金熔体首先在冷却速率受控的双螺杆制浆机中转化为半固体浆料，然后将浆料通过引导漏斗进料至挤出机，并通过旋转螺杆实现有效剪切。最终，将具有所需固体含量的浆料推入模具单元挤出。作为传统挤压对比，流变挤压潜在优势显著，可以通过轻型设备成形，生产成本降低，生产过程简化，余料几乎可以实现 100%回收。



1- 电动机；2- 变速箱；3- 双螺杆制浆机；4- 漏斗；5- 加热单元
6- 气缸；7- 螺杆；8- 模具系统；9- 喷水冷却；10- 系统中央控制柜

图 10 双螺杆流变挤压(TSRE)过程的示意图
Fig.10 Schematic diagram showing the twin-screw rheo-extrusion (TSRE) process

2 镁合金半固态流变成形

全球节能减排趋势日益明显，各领域对轻质高强金属零件的需求越来越大，半固态流变成型镁合金前景广阔，尤其能满足汽车和航空航天对轻量化、舒适性要求。高质量半固态浆料制备、产品质量、生产成本等问题是目前研究的热点。

由于镁合金易氧化、易燃烧，其半固态浆料制备仍比较困难。目前，镁合金浆料制备方法有单螺杆机械搅拌[36]、双螺杆机械搅拌[37]、气至半固态过程[13]、电磁搅拌[38]、超声振动[39]、自接种法[26]和一些其他方法[40]。上述方法均有一些工业尝试，但大多数仍处于实验室阶段。单螺杆或双螺杆的机械搅拌方法，除了效率和成本外，复杂的设备和清洗困难仍是限制其工业应用的主要原因。同时，其他镁合金浆料制备方法，也没有得到工业实际应用。由于气致半固态过程(GISS)和新流变成形(NRC)工艺设备简单，成本较低，因此发展空间巨大。流变压铸(RDC)和流变挤压铸造(RSC)相对其他流变成形工艺的独特优势和适用性，表现出更好的应用前景。

流变成形是浆料制备技术与传统成形工艺的结合，在某种程度上，创造性组合为镁合金的流变成形技术的发展带来了无限的可能性。无论如何，这些实验研究和尝试为流变镁合金浆料的制备积累了丰富而宝贵的经验。针对工业应用，其核心问题是成本、效率、产品质量和工艺稳定性。浆料制备的成本和稳定性仍是该技术在镁合金商业化应用的主要障碍。

3 结语与展望

半固态流变成形具有流程短、成本低、生产效率高等特点，必然会成为高强镁合金的新兴加工工艺。虽然近年来许多学者对半固态流变成形进行了各方面的研究和有益尝试，但对于镁合金半固态流变成形的研究仍较少，大多处于试验阶段，研究不够充分，存在的许多工艺问题仍需要深入，距离真正应用于实际生产，仍需要一定时间和经费投入。但是，随着研究的不断深入、技术的不断进步，规律的不断总结和探索，专用装备的不断开发，镁合金半固态流变成形技术必将逐渐成熟。基于此，在今后的研究中仍需在以下几方面进行深入探索：

(1)探寻合适半固态浆料制备工艺，保证固液比的稳定性，并降低成本。

(2)将计算机模拟技术与半固态流变成形相结合，优化模型，探究注射速度、注射温度、保温时间等工艺参数与组织性能的内在联系，达到节约成本，优化工艺的目的。

(3)根据加工镁合金的物化特性，探寻并优化专有工艺，减少缺陷，从而获得优良性能的工件。

参考文献：

[1] 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.

[2] 谢水生，李兴刚，王浩，等. 金属半固态加工技术[M]. 北京：冶金工业出版社，2012.

[3] LUO S J, KEUNG W C, KANG Y L. Theory and application research development of semi-solid forming in China [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20 (9): 1805-1814.

[4] JI S, QIAN M, FAN Z. Semi-solid processing characteristics of AM series mg alloys by rheo-diecasting[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(3):779-787.

[5] FAN Z. Development of the rheo-diecasting process for magnesium alloys [J]. Materials Science & Engineering A, 2005(413): 72-78.

[6] YANG L, KANG Y, ZHANG F, et al. Rheo-diecasting of AZ91D magnesium alloy by taper barrel rheomoulding process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20 (6): 966-972.

[7] KANG Y L, AN Lin, WANG K K, et al. Experimental study on rheo-forming on semi-solid magnesium alloys [C]. Proceeding of

the 7th International Conference on Semi Solid Processing of Alloys and Composites, Tsukuba, Japan, 2002:287-292.

[8] An Lin, Kang Y L, Wang K K, et al. Low melting point metal semi-solid slurry preparation and microstructural evolution of rheo-moulding forming [J]. Journal of Iron & Steel Research, 2002, 6: 407-409.

[9] 康永林, 毛卫民, 胡壮麒. 金属材料半固态加工理论与技术[M]. 北京:科学出版社, 2004.

[10] QI M, KANG Y, ZHOU B, et al. A forced convection stirring process for Rheo-HPDC aluminum and magnesium alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 234:353-367.

[11] ZHOU B, KANG Y, QI M, et al. Microstructure and property of Rheo-Diecasting magnesium-alloy with forced convection mixing process[J]. Solid State Phenomena, 2015, 217-218:455-460.

[12] GUAN R G, ZHAO Z Y, LI Y D, et al. Microstructure and properties of squeeze cast A356 alloy processed with a vibrating slope[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229:514-519.

[13] WANNASIN J, MARTINEZ R A, FLEMINGS M C, et al. Grain re?nement of an aluminum alloy by introducing gas bubbles during solidi?cation[J]. Scripta Materialia, 2006, 55:115-118.

[14] ZHANG Y, WU G, LIU W, et al. Microstructure and mechanical properties of rheo-squeeze casting AZ91-Ca magnesium alloy prepared by gas bubbling process [J]. Materials & Design, 2015, 67: 1-8.

[15] MAO J , LIU W, WU G, et al. Semi-solid slurry preparation, rheo-die casting and rheo-squeeze casting of an AZ91-2Ca-1.5Ce ignition-proof magnesium alloy by gas-bubbling process [J]. Journal of Materials Research, 2017, 32:677-686.

[16] FANG X G, LU S L, ZHAO L, et al. Microstructure and mechanical properties of a novel Mg-RE-Zn-Y alloy fabricated by rheo-squeeze casting[J]. Materials & Design, 2016, 94(3):353-359.

[17] LIN C, WU S, LU S, et al. Microstructure and mechanical properties of rheo-diecast hypereutectic Al-Si alloy with 2%Fe assisted with ultrasonic vibration process [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2013, 568:42-48.

[18] GUO H M, ZHANG S G, YANG X J, et al. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Rheo-Squeeze Cast Mg-9Al-1Zn Alloy by Experiments and Thermodynamic Calculation [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2015, 46(5): 2134-2142.

[19] GUO H M, ZHANG S G, HU B, et al. Refining microstructure of AZ91 magnesium alloy by introducing limited angular oscillation during initial stage of solidi?cation [J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 532(1):221-229.

[20] ADACHI M, SATO S, SASAKI H, et al. The Effect of Casting Condition for Mechanical Properties of Cast Alloys Made with New Rheocasting Process [C]. Proceeding of the 7th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Tsukuba, Japan, 2002:629-634.

[21] KAUFMANN H, WABUSSEG H, UGGOWITZER P J. Casting of Light Metal Wrought Alloys by New Rheocasting [C]. Proceeding of the 6th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Turin, Italy, 2000:457-462.

[22] FRAGNER W, KAUFMANN H. Difference in Al and Mg New Rheocasting[C]. Proceeding of the 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Limassol, Cyprus, 2004.

[23] 谢水生, 半固态金属加工技术的工业应用及发展[C]. 第二届半固态金属加工技术研讨会, 北京, 2002.

[24] FRAGNER W, KAUFMANN H, HELMBERGER H, et al. Magnesium New Rheocasting as an Industrial Process: An Update of Recent Developments [M]. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.

[25] KAUFMANN H, WABUSSEG H, UGGOWITZER P J. Metallurgical and processing aspects of the NRC semi-solid casting technology[J]. Aluminium, 2000, 76(1/2):70-75.

[26] KAUFMANN H, UGGOWITZER P J. Fundamentals of the New Rheocasting Process for Magnesium Alloys [J]. Advanced Engineering Materials, 2001, 3(12):963-967.

[27] HAGA T, SUZUKI S. Roll casting of aluminum alloy strip by melt drag twin roll caster [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2001, 118(1):165-168.

[28] GUAN R G, ZHAO Z Y, DAI C G, et al. A novel semisolid Rheo-rolling process of AZ31 alloy with vibrating sloping plate[J]. Advanced Manufacturing Processes, 2013, 28(3):299-305.

[29] ZHAO Z Y, GUAN R G, SHEN Y F, et al. Temperature distribution and its in?uence on microstructure of mg-3Sn-1Mn alloy during rheo-rolling process [J]. Philosophical Magazine, 2018, 98: 2367-2379.

[30] WATARI H, DAVEY K, RASGADO M T, et al. Semi-solid manufacturing process of magnesium alloys by twin-roll casting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156: 1662-1667.

[31] WATARI H, KOGA N, PAISARN R, et al. Formability of magnesium alloy sheets manufactured by semi-solid roll strip casting[J]. Materials Science Forum. Trans Tech Publications, 2004, 449-452: 181-184.

[32] XIE S, HE Y, MI X. Study on Semi-Solid Magnesium Alloys Slurry Preparation and Continuous Roll-Casting Process[M]. Frank Czerwinski, In Tech Open, 2011.

[33] FAN Z. Twin-screw rheoforming technologies for semisolid processing of Mg-alloys[C]. Proceedings of the 7th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Tsukuba, 2002:671-676.

[34] ROBERTS K A, FANG X, JI S, et al. Development of twin-screw rheoextrusion process [C]. Proceedings of the 7th International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites. Tsukuba, 2002:677-682.

[35] XIA M, HUANG Y, CASSINATH Z, et al. Continuous Twin Screw Rheo-Extrusion of an AZ91D Magnesium Alloy [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2012, 43(11):4331-4344.

[36] YURKO J A, MARTINEZ R A, FLEMINGS M C, et al. Development of the semi-solid rheocasting (SSR) process[C]. Proceedings of the 7th International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, Tsukuba, 2002:25-27.

[37] FAN Z, LIU G, HITCHCOCK M, et al. Solidification behaviour under intensive forced convection [J], Materials Science & Engi-

(下转第 646 页)

图 1 学生利用太空砂、火漆蜡等材料物理模拟砂型铸造过程
Fig.1 Students use space sand, fire lacquer wax and other materials to physically simulate sand casting

图 2 学生作品展示
Fig.2 Student works display

3 结论

(1)线上教学相比线下教学,对于教学人员的分工、硬件设施的支撑、教学备选方案的制定都有较为严格和系统性的要求;清华大学基础工业训练中心铸造实验室为了能够使线上教学同质等效开展,通过前期教学准备以及教学环节优化,特别是砂型铸造教学环节充分利用铸造资源优势,创新教学方案,考虑学生的体验度和完成度,前期将材料邮寄给学生,通过线上理论讲解和线下实操演示,学生在家利用物理模拟方式体验砂型铸造,教学效果显著,获得学生的高度认可。

(2)及时了解学生对于课程的意见或建议对于教学质量的提升至关重要,因此每次铸造线上课程将会预留 15 分钟时间使学生参与铸造线上教学效果测评;根据学生反馈的测评结果,每周开 1 次铸造教学研讨会议,教学人员通过学生反馈结果和教学指导人员经验相互分享,并反思教学过程中存在的不足之处,从而将比较好的反馈结果或者共性问题落实到实践教学中,使教学方案不断迭代和优化[4]。

参考文献:

[1] 邢小颖,姚启明,汤彬,等. 工程训练中铸造教学模式及内容的创新与改革[J]. 铸造技术, 2020, 41(10):1001-1004.

[2] 马运,汤彬,邢小颖,等. 砂型铸造实践教学的改革与创新[J]. 铸造技术, 2020, 41(5):498-500.

[3] 马运,邢小颖,汤彬,等. 基于铸造技术在文化核心素质课程中的应用研究[J]. 铸造技术, 2021, 42(2):159-161.

[4] 杨宇翔,黄继业,吴占雄. 线上线下混合教学模式实施方案设计[J]. 课程教育研究, 2015(5):3-4.

(上接第 630 页)

neering A, 2005, 413-414:229-235.

[38] VIVES C. Elaboration of semisolid alloys by means of new electromagnetic rheocasting processes [J]. Metallurgical Transactions B, 1992, 23(2):189-206.

[39] WU S S, ZHAO J W, ZHANG L P, et al. Development of Non-Dendritic Microstructure of Aluminum Alloy in Semi-Solid State under Ultrasonic Vibration[J]. Solid State Phenomena, 2008, 141-143:451-456.

[40] QIN R S, WALLACH E R. Phase-field simulation of semisolid metal processing under conditions of laminar and turbulent flow [J]. Materials Science & Engineering A, 2003, 357(1-2):45-54.