

金属材料半固态凝固及成形技术进展

康永林, 宋仁伯, 杨柳青, 张帆

(北京科技大学材料科学与工程学院 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 简要介绍了金属材料半固态凝固及成形技术发展的历史和现状, 重点介绍了近年开发的几种金属材料半固态凝固制备技术的代表性方法与特点、铝合金和镁合金等轻金属材料半固态凝固及流变成形的组织与性能、高熔点合金材料半固态凝固制备及成形技术的进展以及半固态凝固成形技术的应用现状, 最后对金属材料半固态凝固及成形技术的进展状况及发展前景作了简单的总结和展望。

关键词: 金属材料; 半固态; 凝固; 成形

中图分类号: TG244⁺.3; TG249.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2010)07-0027-07

Progress in Technology of Semi-Solid Solidification and Forming for Metal Materials

KANG Yonglin, SONG Renbo, YANG Liuqing, ZHANG Fan

(State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The history and current situation for semi-solid solidification and forming technology were generally introduced, and the contents elaborated next included the following terms: the typical methods and characteristics to the semi-solid preparation technology of several metal materials, the microstructure and properties to the semi-solid solidification and forming process of some light metals such as aluminum and magnesium, the development to the semi-solid forming technology of high melting materials, and the application status of semi-solid forming process. Finally, a general summary and prospect about semi-solid solidification and forming technology is made.

Key words: metal materials; semi-solid; solidification; forming

1 前言

金属材料半固态加工通常是在金属凝固过程中施以剧烈的搅拌作用, 充分破碎树枝状的初生固相进而得到固-液混合浆料, 然后利用这种流变浆料可直接进行成形加工, 称为流变成形(Rheoforming), 也可将半固态坯料重熔加热至半固态区间进行成形加工, 称为触变成形(Thixoforming)。半固态金属加工技术作为一种新型的金属凝固成形工艺, 极大地改变了传统材料加工的概念和手段, 对于固-液两相区间较大的合金材料有很大的吸引力, 可以获得性能优异的各种金属材料及复合材料成形件, 是21世纪最有发展前景的近净成形技术之一。由于该技术打破了传统的枝晶

凝固模式, 在成分与组织均匀性、提高成形件的综合性能及降低工件内部缺陷等方面具有其独特的优势, 受到了越来越广泛的关注, 对半固态凝固成形技术的研究已成为近年国内外金属材料领域竞相开展的一个方向。

从1990年至2008年, 国际上先后召开了10届合金及复合材料半固态加工学术研讨会, 2010年9月将在北京召开第11届国际研讨会。其主题将围绕着金属材料半固态凝固机理及适合半固态加工的金属材料开发与合金设计; 半固态凝固组织及性能评价分析; 半固态浆料的流变行为、描述模型及数值模拟; 半固态浆料及坯料的制备工艺技术; 以及半固态凝固加工技术的工业应用等。

近年来, 半固态加工理论与技术的研究发展很快, 欧美和日本等国已将触变成形技术在汽车等行业进行了较广泛的成功应用。为降低成本、缩短流程, 流变成形技术的研究开发则更加受到重视。我国在该领域也开展了大量工作, 并已开始步入工业应用阶段。半固态凝固加工研究、应用的材料十分广泛, 从Pb, Sn, Zn合金, Al, Mg, Cu, Ti合金, 到高熔点的铸铁和钢铁合金材料及其复合

收稿日期: 2009-12-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2006CB605203); 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2006AA03Z115)

通信作者: 康永林, 男, 1954年生, 教授, 博士生导师

材料^[1-3]。本文重点介绍铝合金、镁合金及高熔点钢铁材料半固态凝固制备及成形技术的进展情况,并对其应用和未来发展进行简单讨论。

2 金属材料半固态凝固制备技术的发展

目前,围绕制备含有近球形非枝晶凝固组织的半固态浆料或坯料这一关键问题,已经出现了 20 多种各有特色的半固态浆料或坯料制备工艺方法^[4]。从技术本质上看,这些方法可以归纳为液态凝固控制法和固态处理法两大类。液态凝固控制法除了人们熟知的机械搅拌、电磁搅拌、冷却斜板(管)法、机械(超声)振动法、CRP(Continuous Rheoconversion Process)法、剪切-冷却-轧制法、NRC(New Rheocasting Control)法、新 MIT(麻省理工学院)法等制备方法外,双螺旋流变法(RDC)^[5]、锥桶流变法(TBR)^[6]、近液相线浇注法等一些新的制备方法也逐渐趋于成熟^[7]。固态处理法主要包括喷射沉积法、粉末冶金法、应变诱发熔体激活法(SIMA)和等通道挤压法(ECAE)等。以上两类方法中,液态凝固控制法既可以制备半固态浆料,直接进行流变成形,又可以为触变成形提供半固态锭坯;固态处理法一般都需要进行二次加热,因此该方法主要是制成半固态坯料,然后进行触变成形。

为了提高半固态浆料制备效率和工艺稳定性,许多学者将搅拌、变质、低温浇注等众多的凝固控制技术进行复合,综合现有的制备方法进行创新,形成了许多新的制浆工艺,例如:低温浇注+弱电磁(机械)搅拌^[8]、机械振动+冷却斜板^[9]、电磁搅拌+局部冷却^[10]、熔体分散混合式流变成形工艺技术(Melt Spreading and Mixing Technique Process,简称 MSMT)等^[11]。另外,有研究者采用环缝式电磁搅拌工艺(A-EMS)可有效消除集肤效应,改善浆料组织不均匀,圆整度差等问题^[12]。在真空环境下进行电磁搅拌,然后进行流变锻造成形,从而有效地消除了气孔等缺陷,提高了力学性能^[13-14]。下面简单介绍几种代表性的半固态凝固浆料制备成形方法及其特点。

2.1 CRP 制备法

CRP(Continuous Rheoconversion Process)技术是美国 WPI 的人员开发的,其工艺过程如图 1 所示。该工艺是将两种亚共晶成分的熔融合金混合,待混合的两种熔体均保持在液相线以上,没有晶核或晶核很少。混合在绝热的容器中或在一个通向绝热容器的静止混合槽中进行。混合得到的第三种合金温度在液相线上下,含有大量的晶核,进一步热处理可以形成具有细小、球状组织的半固态浆料。其技术关键是对两种熔体的化学成分、热容量、流动强度等参数进行有效的控制,优点是可以连续生产而且浆料制备速度快^[15-16]。

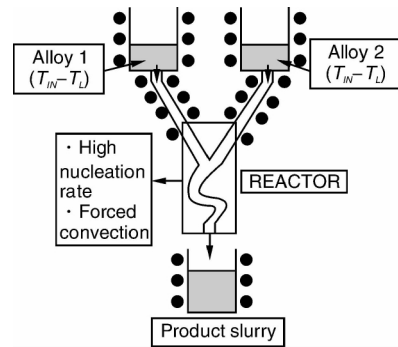


图 1 CRP 工艺示意图

Fig. 1 Schematic of the CRP process

2.2 气体扰动制备法(GISS)

GISS 工艺是泰国 Songkla 大学的 Wannasin 等提出的利用气泡扰动制备半固态合金浆料的方法(Gas Induced Semi-Solid,简称 GISS),其工艺原理如图 2 所示。制备工艺的控制要点:气体流量要大,以引起合金熔体足够的对流,但不能过大,以免引起合金熔体飞溅;合金熔体的冷却速度要适当快,以形成大量的初生晶核;合金液的浇注温度不宜过高,例如 A357 合金的试验浇注温度为 630 °C(其液相线温度为 615 °C)。气泡扰动制备法过程简单,制备成本低,但存在部分气泡滞留铝合金熔体的可能性^[17-18]。

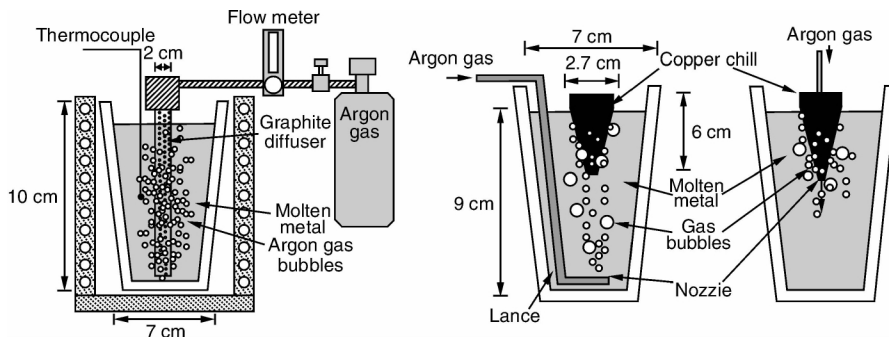


图 2 气泡扰动制备半固态浆料工艺

Fig. 2 Schematic of the gas induced semi-solid process

2.3 倾斜板制备法

倾斜板法半固态浆料制备技术是由日本宇部株式会社开发，其原理为：将略高于液相线温度的熔融金属倒在冷却斜板上，由于斜板的冷却作用，在其表面有细小的晶粒形核长大，金属流体的冲击使晶粒从斜板上脱离进入容器。控制容器温度，即缓慢冷却，冷却到一定的半固态温度后保温，就形成了半固态浆料。倾斜板法具有成本低、效率高等优点，已在日本、欧洲得到了较快的发展，初步实现了铝合金薄带的流变成形。目前对该技术的研究大都采用平直的倾斜板，在制备过程中常常在斜板的表面结壳，或者制备出的合金坯料组织球化效果不理想甚至存在缺陷。因此，东北大学管仁国等开发了带有波浪形表面并施加振动的倾斜板^[9]。南昌大学杨湘杰等开发了剪切低温浇注式（简称 LSPSF）制浆技术，在重力和倾斜转动的输送管内壁剪切/冷却作用下，合金由熔融状态转变为具有一定固相率的金属熔体，通过控制输送管和浇注工艺参数，得到初生相分布均匀、晶粒圆整的半固态浆料^[19]。

2.4 双螺旋流变成形技术(RDC)

英国 Brunel 大学的 Fan 等人开发的 RDC (Rheo-Die-casting) 工艺采用相对旋转的双螺旋杆缝隙产生的剪切作用对凝固过程中的合金进行控制，制备成半固态浆料并直接压铸成形，其制备成形工艺如图 3 所示。该工艺已经先后对 AZ91D, AZ61 镁合金以及 A357 铝合金进行了相关实验研究，取得了良好的效果^[5,20]。

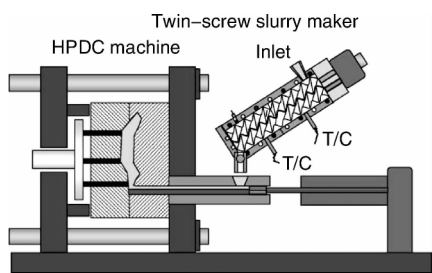


图3 双螺旋流变成形工艺示意图

Fig. 3 Schematic illustration of the RDC process

2.5 锥桶式流变成形技术(TBR)

北京科技大学康永林等自主研发的锥桶式流变成形机 (Taper Barrel Rheomoulding Machine, TBR) 的原理是：使金属液体边凝固边通过旋转的锥形内桶与外桶之间的缝隙产生的剪切作用形成组织均匀的球状晶半固态浆料，通过浆料输送装置与压铸机联接，实现了镁、铝合金的流变压铸成形，其结构如图 4。TBR 技术在镁、铝合金半固态浆料制备以及流变压铸成形方面取得了良好的效果，并与企业合作建立了轻合金半固态流变压铸中试线^[6,21]。

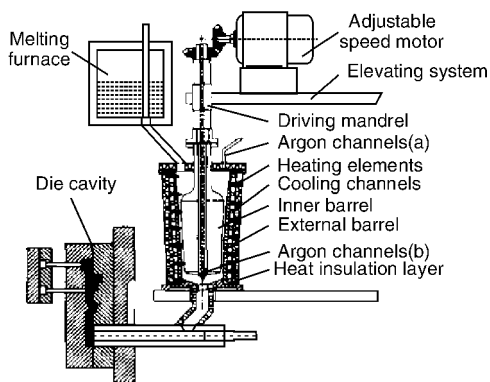


图4 锥桶式流变压铸成形工艺示意图

Fig. 4 Schematic illustration of the TBR machine

3 金属半固态凝固及流变成形的组织与性能

从合金凝固角度看，液态金属在流变成形过程中主要经历两次凝固过程，即一次凝固和二次凝固。图 5 为流变成形过程中半固态金属浆料的凝固示意图^[22]。一次凝固是指半固态浆料制备过程中合金熔体的凝固，该凝固阶段决定着半固态浆料的制备效率、质量和成本。如何快速制备优质的半固态浆料是流变成形面临的巨大挑战，而特定条件下半固态凝固组织的形成机理是国内外学者重点研究的理论问题。二次凝固为半固态浆料在输送、充填以及成形过程中合金熔体的凝固。这里主要涉及到的问题有：浆料制备工艺与浆料成形工艺间的衔接；在此过程中半固态浆料中的剩余液相将完成凝固，因此，剩余液相的凝固行为、共晶组织的形成及金属间化合物的形成均对半固态成形件的各项性能有着重要的影响；以及一次凝固中产生的球形或近球形的初生固相在二次凝固过程中由于凝固环境的变化必然受到影响，因此将出现球形/近球形初生固相生长稳定性问题，如果初生固相的形态发生变化，则必然影响到半固态浆料的触变性^[23-24]。

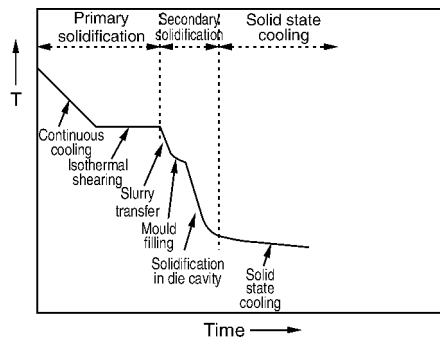


图5 流变成形过程中金属凝固示意图

Fig. 5 Schematic illustration of the solidification process in the RDC process

目前采用的各种半固态凝固浆料制备方法均可获得较均匀的近球状晶组织,但主要差别在于制备的效率、成本、以及工艺过程的可控性和稳定性。图 6 为 Pan 等采用 CRP 工艺制备的颗粒圆整均匀的半固态 A356 铝合金浆料组织^[22]。图 7 为杨湘杰等采用 LSPSF 技术与压铸相结合进行 YL112 合金流变压铸成形支架的内部金相组织^[25]。

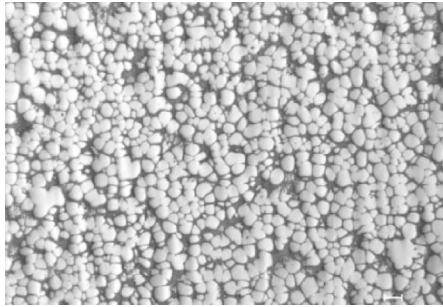


图 6 半固态 A356 铝合金浆料组织

Fig. 6 Microstructure of the semi-solid A356 alloy

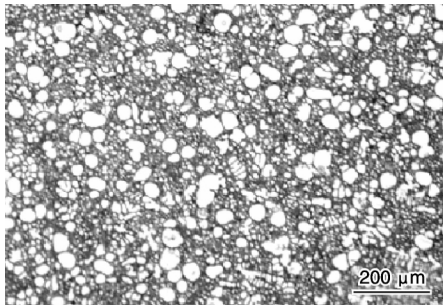


图 7 流变压铸 YL112 合金支架的显微组织

Fig. 7 Microstructure of rheo-diecasting bracket

Fan 等采用 RDC 技术流变压铸成形 AZ91D 镁合金的结果表明:与传统压铸相比,流变压铸生产的压铸件在浇道、料柄以及铸件部位中初生固相呈球形,尺寸非常细小且分布均匀,具有较低的气孔率(见图 8),并且成形件的力学性能均优于 Thixocasting, NRC, Thixomoulding 等技术(见表 1)^[26]。

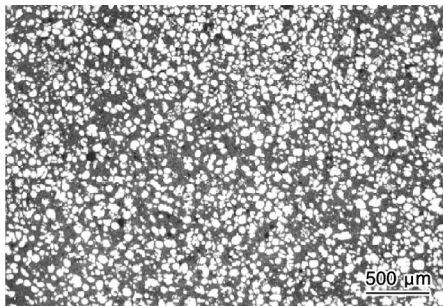


图 8 流变压铸 AZ91D 的显微组织(桶体温度 585 °C)

Fig. 8 Microstructure of the rheo-diecasting AZ91D alloy (barrel temperature 585 °C)

表 1 不同条件下 AZ91D 镁合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of AZ91D magnesium alloy under different processes

Process	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%
Traditional Die-Casting	146	212	3.3
Thixocasting	134	223	3.6
Thixomoulding	-	150~241	3~5
NRC	-	230	5.5
Rheo-Diecasting	145	248	7.4

该设备结构的优点是剪切速率高,产生的半固态颗粒细小均匀,可产生薄壁、断面复杂的零件,不足之处是双螺旋结构存在螺杆工况差、消耗高、寿命短的问题,不适合大型零件生产。Haghighy 等人将双螺旋设备与传统连铸技术相结合,用于生产触变成形或固态挤压成形使用的镁合金或铝合金坯料^[27]。采用这种技术的 7075 和 5754 铝合金坯料的晶粒明显比传统连铸坯料的晶粒细小,如传统连铸 7075 坯料的晶粒通常为 130~245 μm,双螺旋技术制备的坯料晶粒大小仅为 60 μm 左右。因此,该设备更适合于半固态镁合金浆料的制备与成形。目前,双螺旋半固态流变压铸工艺仍然处于完善和商业试生产阶段。

图 9 为康永林等采用锥桶式流变成形工艺(TBR)制备的半固态 A356 铝合金初生固相平均晶粒尺寸 D 和形状因子 F 与浇注温度的关系以及内桶转速对半固态组织初生固相形貌的影响(图 10)^[28]。由图可见,浇注温度和内桶转速对铝合金凝固过程中初生固相晶粒尺寸和形状因子影响显著。

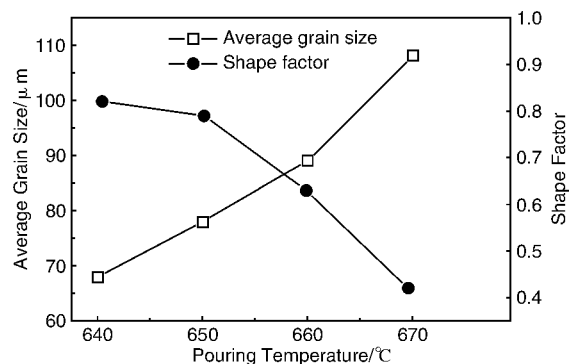


图 9 浇注温度对半固态浆料初生固相形貌的影响

Fig. 9 Effect of pouring temperature on primary solid phase of the semi-solid slurry

4 高熔点合金材料半固态凝固制备及成形技术

高熔点合金材料通常因碳含量或合金成分较高,因

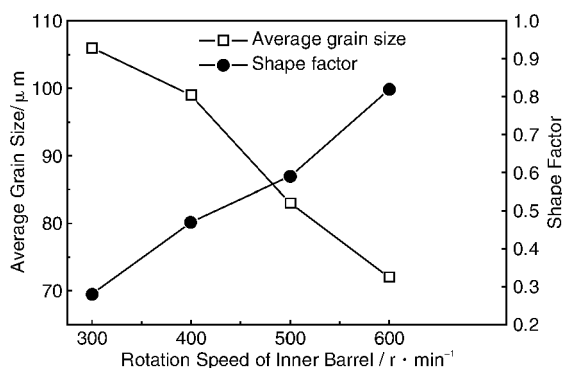


图10 内桶转速对半固态浆料初生固相形貌的影响

Fig. 10 Effect of rotation speed on primary solid phase of the semi-solid slurry

而在凝固时更易产生成分和组织偏析，采用半固态凝固控制的方法可以显著改善组织性能均匀性并提高综合性能。近年来，对高熔点钢铁材料的半固态凝固成形的研究逐渐受到重视。目前，德国、比利时、法国等国的研究处于该方向的前列。但是，钢铁材料半固态加工存在以下困难及“技术瓶颈”^[2]：①可选择的材料液固线温度区间较小；②高温半固态浆料难以连续稳定地制备；③熔体的温度、固相的比率和分布难以准确控制；④浆料在高温下输送和保温困难；⑤成形温度高，工具材料的高温性能难以保证。所以钢铁材料半固态成形加工研究的进展缓慢，目前研究重点主要集中在某些钢种的压铸、锻造、轧制等半固态制备和成形加工方面。

国外学者利用机械搅拌方法、应变激活方法或粉末方法成功地制备了 AISI4340 碳钢、440C 和 304 不锈钢、M2 高速钢、铸铁等及 X40, Ti-20Co 等合金的半固态浆料或制造出优质的半固态零件坯料^[29]。图 11 为 Ahmadabadi 等采用倾斜冷却板法制备亚共晶灰口铸铁的半固态组织^[30]。

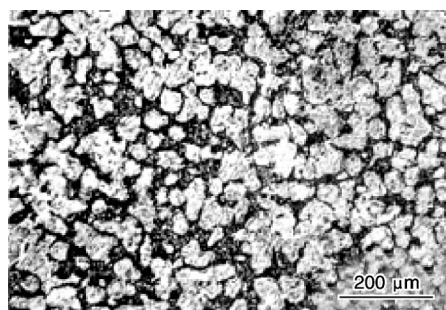


图11 倾斜板冷却法制备的亚共晶灰口铸铁半固态组织(固相率为0.2)

Fig. 11 Semi-solid microstructure of hypoeutectic grey cast iron prepared by slope plate cooling process (solid fraction is 0.20)

最近几年，有学者尝试利用电磁搅拌方法制备 Al-Si4340, 440C, 304, M7, M2 等钢种的半固态铸锭，利用压铸机对 Fe-2.5% C-3.1% Si 铸铁和 AISI440A 不锈钢的半固态浆料直接进行流变成形，可以获得初生固相分布均匀的优质成形件。北京科技大学采用电磁搅拌方式和流变轧制工艺制备出弹簧钢、高碳钢及不锈钢带材^[31-32]。但由于钢铁材料半固态浆料的保存和阶段式输送较为困难，因此其流变成形工艺的研究进展缓慢。

目前，半固态钢铁材料的成形主要以触变成形为主，对于触变成形所要解决的关键问题为：制备出适合触变成形的半固态坯料；成形过程中半固态物理状态的保证；半固态触变成形件的尺寸控制；成形件组织性能目标值的获得。国内外学者分别以中、高碳钢及液固两相区较宽的钢种为研究对象，如工具钢 C38, C70, C80, HS6-5-2, X210CrW12 等，通过触变挤压或锻造的方式获得了断面复杂的零件^[33]。

综上所述，将钢铁材料的非枝晶半固态浆料或坯料直接与成形技术相结合，是以非枝晶凝固为基础的崭新的成形技术，其技术构成非常合理，由此可以取得以下优势：①半固态钢铁浆料的初晶晶粒细小，凝固收缩小，成分均匀，成形件性能更优异、更均匀；②钢铁浆料在半固态下成形，变形抗力低，成形能耗低；③钢铁半固态浆料比液态温度低，部分凝固潜热已经释放，对成形设备的热作用减小。因此，半固态成形与传统成形技术相比，产品质量、性能可明显提高，有望达到低能耗、低成本、流程短，产品具有更强的市场竞争力。

5 半固态凝固成形技术的应用现状

半固态凝固成形技术经历了 30 多年的研究与发展，在国外已进入工业化应用阶段，应用水平处于领先地位的有美国、意大利、日本、德国、瑞士、英国、法国等。半固态金属触变成形最成功的应用是汽车行业，该工艺技术顺应了汽车的高性能、轻量化和节能环保的发展趋势。

美国是半固态成形的发源地，在美国，这一技术基本成熟并处于领先地位。美国 Alumax 公司在 20 世纪 90 年代中期就已先后建成两家铝合金汽车零件半固态加工生产厂，年生产能力超过 5 000 万件。目前，用半固态加工技术生产的汽车零件包括：汽车制动筒、转向系统零件、摇臂、发动机活塞、轮毂、传动系统零件、燃油系统零件和汽车空调零件等。这些零件已应用于 Ford, Chrysler, Volvo, BMW, Fiat 和 Audi 等欧美名牌汽车上，并出现集成一体化的生产方式。此外，Thixomat 公

司利用 Thixomolding 工艺, 为汽车公司生产了上百万件的半固态镁合金成形件。

欧洲对半固态铝合金和镁合金触变成形技术作了大量的研究和开发。如意大利的 Stampal 公司采用触变成形技术为 Alfa Romeo Spider Sports Car 生产的半固态铝合金后悬挂架的左右支撑件重达 6.8 kg, 形状非常复杂; 意大利的 Magneti Marelli 公司为汽车公司生产半固态铝合金触变成形的油道零件; 法国 Pechiney 铝业公司主要生产半固态铝合金坯料; 瑞士的 Bubler 公司已经生产出铝合金半固态触变成形的专用 SC 型压铸机和铝合金半固态坯料的专用加热设备。

日本的 Rheo-Tech 公司, 采用半固态触变成形技术生产的铝合金汽车轮毂比低压铸造的轮毂减重 30%, 力学性能提高近 30%, 生产效率提高 9 倍。Hitachi Metals 公司利用流变压铸成形技术, 为汽车发动机生产 A356 铝合金支撑件。日本制钢所从美国购买了 Thixomolding 镁合金射铸成形的设备制造和销售权, 已经制造和销售了 260 多台套, 大部分设备都销往日本、中国大陆和台湾。如 Takata 公司利用 Thixomolding 技术生产镁合金的照相机壳和 MD 壳; MG Precision 利用 Thixomolding 技术生产镁合金笔记本电脑机壳。

钢铁材料半固态成形在国外已有部分企业生产, 如 C70S6 钢触变成形的连杆、高碳钢 C80 的触变锻造成形件、HS6-5-2 和 X5CrNi18-10 钢之间的半固态连接、球状铸铁的半固态触变压铸成形连杆件等^[34-36]。

我国在半固态加工技术应用方面起步较晚, 但已作了大量的技术准备工作。近几年, 铝合金、镁合金的流变和触变成形技术已在汽车和相关工业领域进行了初步应用并逐渐形成规模。

6 结束语

(1) 金属材料半固态凝固浆料或坯料制备技术基于不同的凝固控制原理, 已开发出 20 余种方法, 其特色各异, 但能否工业应用的关键在于制备效率、成本、稳定性以及与成形设备的有效衔接。

(2) 半固态凝固组织的形成过程主要表现在初生固相晶粒的球化、细化及均匀化方面。目前对于建立在流变学基础上的半固态凝固过程中非枝晶组织形成机制的解释还很不一致, 仍是一个重大的理论问题。

(3) 半固态金属成形技术由于其制备成形过程特有的流变性, 因此具有巨大的应用开发和工业生产潜力, 需要充分挖掘。流变成形技术已处于工业应用的研究开发阶段, 尚有许多关键性技术问题亟待解决, 重点应是半固态凝固浆料制备过程的高效、稳定可控、低成本以

及专业配套设备技术的集成化。

(4) 高熔点钢铁材料半固态加工的有关基础研究和应用技术开发任重道远, 但一旦取得突破, 其前景将十分光明。

参考文献 References

- [1] Patel J B, Liu Y Q, Shao G, *et al.* Rheo-Processing of an Alloy Specifically Designed for Semi-Solid Metal Processing Based on the Al-Mg-Si System[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 476(1-2): 341-349.
- [2] Kang Yonglin(康永林), Mao Weimin(毛卫民), Hu Zhuangqi(胡壮麒). *Theory and Technology of Semi-Solid Metal Forming Processing*(金属材料半固态加工理论与技术)[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [3] Zhao Z D(赵祖德), Luo S J(罗守靖). *Semi-Solid Metal Forming Technology of Light Alloys*(轻合金半固态成形技术)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [4] Xing S M(邢书明), Bao P W(鲍培玮). *Special Casting and Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金 2009 年年会专刊)[C]. Wuhan: Special Casting and Nonferrous Alloys, 2009: 337-340.
- [5] Fan Z, Fang X, Ji S. Microstructure and Mechanical Properties of Rheo-Diecast (RDC) Aluminium Alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 412(1-2): 298-306.
- [6] Kang Y L, Yang L Q, Song R B, *et al.* Study on Microstructure-Processing Relationship of a Semisolid Rheocasting A357 Aluminum Alloy[J]. *Solid State Phenomena*, 2008, 141-143: 157-162.
- [7] Mao Weimin, Zhu Daping, Zhang Jianbin, *et al.* *Special Casting and Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金 2009 年年会专刊)[C]. Wuhan: Special Casting and Nonferrous Alloys, 2009: 310-313.
- [8] Zhao Z D, Mao W M. Preparation of Semi-Solid AlSi7Mg Alloy Slurry[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, 21(2): 139-145.
- [9] Xie Fengguang(谢丰广), Guan Renguo(管仁国), Li Jiangping(李江平), *et al.* 波浪型倾斜板振动过程中晶粒直接球状长大行为[J]. *Journal of Northeast University*(东北大学学报自然科学版), 2009, 30(3): 377-380.
- [10] Birol Y. Internal Cooling to Produce Aluminium Alloy Slurries for Rheocasting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 480(2): 365-368.
- [11] Zeng Yidan(曾怡丹), Shi Likai(石力开), Zhang Zhifeng(张志峰). 熔体分散混合法制备半固态浆料[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*(中国有色金属学报), 2008, 18(4): 630-636.
- [12] Zhu G L(朱光磊), Xu J(徐骏), Bai Y L(白月龙), *et al.* *Special Casting and Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金 2009 年年会专刊)[C]. Wuhan: Special Casting and Nonferrous Alloys, 2009: 402-405.

- [13] Kim H H, Kang C G. Vacuum-Assisted Rheo-Forging Process of A356 Aluminum Alloys [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(15): 1 626 - 1 636.
- [14] Kim H H, Kang C G. Study of the Microstructure and Mechanical Properties of Al6061 Aluminum Alloys Rheo-Forged by Vacuum Pump [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 497(1-2): 309 - 321.
- [15] Pan Q Y, Findon M, Apelian D. The Continuous Rheoconversion Process (CRP): A Novel SSM Approach [C]//*Proceedings of the 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*. Limassol; Cyprus, 2004: 106 - 118.
- [16] Zeng Yidan(曾怡丹), Zhang Zhifeng(张志峰), Liang Bo(梁博), et al. CRP 法制备半固态浆料过程中熔体流动速度对浆料组织的影响 [J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys(特种铸造及有色合金)*, 2007(S1): 408 - 409.
- [17] Wannasin J, Canyook R, Burapa R, et al. Evaluation of Solid Fraction in a Rheocast Aluminum Die Casting Alloy by a Rapid Quenching Method [J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59(10): 1 091 - 1 094.
- [18] Wannasin J, Martinez R A, Flemings M C. Grain Refinement of an Aluminum Alloy by Introducing Gas Bubbles during Solidification [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55(2): 115 - 118.
- [19] Guo H M, Yang X J. Low Superheat Pouring with a Shear Field in Rheocasting of Aluminum Alloys [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition)*, 2008, 23(1): 54 - 59.
- [20] Hitchcock M, Wang Y, Fan Z. Secondary Solidification Behaviour of the Al - Si - Mg Alloy Prepared by the Rheo-Diecasting Process [J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(5): 1 589 - 1 598.
- [21] Yang Liuqing(杨柳青), Kang Yonglin(康永林), Zhang Fan(张帆), et al. A357 铝合金半固态流变压铸成形组织工艺研究 [J]. *Journal of Materials Engineering(材料工程)*, 2009(6): 64 - 66.
- [22] Pan Q Y, Findon M, Apelian D. *Processing of the 8th International Conference on the Semi-Solid Processing of Alloys and Composites* [C]. Limassol; Solid State Phenomena, 2004: 2 - 4.
- [23] Fan Z, Liu G. Solidification Behavior of AZ91D Alloy under Intensive Forced Convection in the RDC Process [J]. *Acta Materialia*, 2005, 53: 4 345 - 4 357.
- [24] Guo Hongmin(郭洪民). *Investigation on Technique and Theory of Rheofforming for Semi-Solid Aluminum Alloys(半固态铝合金流变成形工艺与理论研究)* [D]. Nanchang: Nanchang University, 2007.
- [25] Guo Hongmin(郭洪民), Yang Xiangjie(杨湘杰). 流变压铸 YL112 铝合金的微观组织特征 [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China(中国有色金属学报)*, 2008, 18(3): 400 - 408.
- [26] Fan Z. Development of the Rheo-Diecasting Process for Magnesium Alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 413/414: 72 - 78.
- [27] Haghayeghi R, Liu Y, Fan Z. Melt Conditioned Direct Chill Casting(MC - DC) of Wrought Al-Alloys [J]. *Solid State Phenomena*, 2008, 141 - 143: 403 - 408.
- [28] Zhang Fan(张帆), Kang Yonglin(康永林), Yang Liuqing(杨柳青), et al. *Special Casting and Nonferrous Alloys(特种铸造及有色合金 2009 年年会专刊)* [C]. Wuhan: Special Casting and Nonferrous Alloys, 2009: 383 - 386.
- [29] Wiengmoon A, Chainuangsi T, Poolthong N, et al. Electron Microscopy and Hardness Study of a Semi-Solid Processed 27 wt% Cr Cast Iron [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 480: 333 - 341.
- [30] Nili Ahmadabadi M, Pahlevani F, Babaghorban P. Effect of Slope Plate Variable and Reheating on the Semi-Solid Structure of Ductile Cast Iron [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2008, 13(2): 147 - 151.
- [31] Song R B, Kang Y L, Zhao A M. Fabrication of Semi-Solid Slurry for Steels and Their Rheo-Rolling Process [J]. *Solid State Phenomena*, 2008, 141 - 143: 457 - 461.
- [32] Song R B, Kang Y L, Zhao A M. Semi-Solid Rolling Process of Steel Strips [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 198: 291 - 299.
- [33] Muenstermanna S, Uibelb K, Tonnesena T, et al. Semi-Solid Extrusion of Steel Grade X210CrW12 under Isothermal Conditions Using Ceramic Dies [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209: 3 640 - 3 649.
- [34] Baadjou R, Knauf F, Hirt G. Investigations on Thermal Influences for Thixoforging and Thixojoining of Steel Components [J]. *Solid State Phenomena*, 2008, 141 - 143: 37 - 42.
- [35] Puttgen W, Hallstedt B, Bleck W, et al. On the Microstructure and Properties of 100Cr6 Steel Processed in the Semi-Solid State [J]. *Acta Materialia*, 2007, 55: 6 553 - 6 560.
- [36] Cezard P, Sourmail T. Thixoforming of Steel: A Steel of Art Form an Industrial Point of View [J]. *Solid State Phenomena*, 2008, 141 - 143: 25 - 35.