

半固态成形工艺特点及发展现状

孟毅

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045)

摘要: 半固态成形技术充分利用金属材料在半固态温度区间特殊的微观组织和成形性能, 能够在较低的成形载荷下实现复杂构件的高效近净成形, 该技术的应用对于提高金属材料的质量利用率和性能利用率、延长模具寿命、节能减排等方面具有重要的作用。主要介绍了半固态成形技术的历史沿革、半固态成形技术的分类、半固态金属坯料浆料的制备工艺、有色金属材料和钢铁材料的半固态成形技术开发以及应用情况, 最后提出了半固态成形技术所面临的挑战和机遇。

关键词: 金属材料; 半固态成形; 触变成形; 流变成形

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.004

中图分类号: TG249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457 (2016)04-0021-07

Features and Development of Semisolid Metal Forming Technology

MENG Yi

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

ABSTRACT: On the basis of the microstructure and forming properties of metals in semisolid state, semisolid forming could be employed to realize the net shape forming of products with complex geometric shape effectively. The application of semisolid forming can increase the material quality utilization and properties utilization, prolong the lives of dies, realize energy conservation. This manuscript mainly introduces the historical evolution of semisolid forming, classification of semisolid forming, manufacturing methods of semisolid metal slurries, technology development of semisolid forming of non-ferrous metals and ferrous metals, and points out the opportunities and challenges of semisolid forming.

KEY WORDS: metal; semisolid forming; thixo-forming; rheo-forming

自从金属材料的冶炼及加工技术被发明以来, 金属材料一直以其良好的成形性和出色的力学性能影响着人类生产和生活的方方面面。随着科技与文明的持续发展, 人类对金属材料的冶炼及加工技术方面的探索也从未停止过。近年来, 随着我国交通运输业和武器装备向现代化、高速化方向发展, 一方面设计和研发高性能金属结构材料是大型军用飞行器、导弹、航母等国防重大装备的基础, 另一方

面开发并优化先进的金属材料加工成形工艺技术, 是确保高性能金属材料充分发挥其性能的关键。

半固态成形 (semisolid forming) 工艺, 泛指对温度处于固相线温度与液相线温度之间的半固态金属坯料进行的成形工艺。该工艺的基本理念及工艺于 20 世纪 70 年代由美国麻省理工学院 (MIT) 的弗莱明斯 (Flemings) 教授以及他的科研团队所提出和创立^[1-2]。其工艺特征是对正在凝固的金属进行强烈

收稿日期: 2016-06-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助 (No.0903005203307)

作者简介: 孟毅(1983—), 男, 河北唐山人, 博士, 重庆大学教授, 主要研究方向为金属材料的半固态成形技术的开发及其应用、塑性成形技术有限元方法模拟仿真分析。

搅拌或通过控制凝固条件,抑制树枝晶的生成或破碎所生成的树枝晶,制备具有等轴、均匀、细小的初生相均匀分布于液相中的悬浮半固态浆料。此种浆料在外力的作用下,即使固相率达到 60%,仍具有较好的触变流动性,可以利用压铸、挤压、模锻、铸轧等工艺进行加工成形^[3]。

目前,大部分金属构件的制造依赖于传统的铸造和锻造工艺。然而,在全球倡导“节能减排”、“绿色制造”的今天,传统的铸造和锻造工艺在材料质量利用率和材料性能利用率的双重标准的考量下,都显示出了一定的局限性,例如铸造尽管能够以较高的材料质量利用率实现形状复杂构件的制造,然而枝晶组织和元素偏析等缺陷却导致合金工具钢铸件无法充分拥有该材料本身所能够达到的力学性能^[4];另一方面,锻造能够制造出充分展现该材料性能的合金工具钢构件,但形状复杂构件的制造却存在着材料质量利用率低、成形载荷大等缺点,同时,较低的材料质量利用率又造成合金元素资源的浪费^[5]。半固态成形具有许多独到的优点:它与普通铸造成形工艺相比,比较容易充填模具型槽,变形温度较低,可以明显延长模具的使用寿命,同时可提高制件精度与生产效率,并且制件可获得相对较高的综合力学性能。与传统的固态金属塑性加工工艺相比,半固态金属屈服强度相当低,且流动性极好,可在相对较小的成形压力作用下充填模具型槽,从而达到制件的最终形状,且其表面粗糙度较小,并可一次成形具有复杂形状的制件。由此可以看出,半固态模锻成形工艺是一种高效、低耗的新兴金属成形技术^[6]。半固态加工技术是充分利用金属合金材料在其半固态温度区间内呈现等轴球状组织以及良好且可

控的流动性和较小的变形抗力等特点,而建立的一种先进的近净成形技术。哈尔滨工业大学的杜之明、姜巨福等人指出,在触变半固态加工过程中固态晶粒因塑性变形而引发的再结晶等行为,能够提高制件的力学性能^[7-8]。北京科技大学的康永林、宋仁伯等人指出,半固态成形技术能够抑制工具钢制件成形过程中所发生的合金元素偏析^[9]。考虑到绿色制造必须同时满足的材料质量利用率和材料性能利用率,为了充分利用钢铁材料优秀的力学性能带来的优势,使用半固态加工技术有望在确保较高的材料质量利用率和材料性能利用率的基础上,以较小的成形载荷实现形状复杂钢铁构件的高效近净成形^[10-12]。

1 半固态成形技术的分类

根据成形之前坯料不同的加热流程,半固态成形又可以进一步划分为泥态成形(Mushy process)、流变成形(Rheo-process)、触变成形(Thixo-process),如图1所示。其中,泥态成形是通过对液态合金进行电磁搅拌并冷却至室温,获得具有球状晶粒的金属坯料,再将该坯料加热至半固态温度区间完成最终成形;流变成形则省去了冷却至室温这一工序,对已冷却至半固态温度区间的完成球化处理的金属浆料直接进行成形;触变模锻是一种将半固态坯料加热到有 50%左右体积液相的半固态状态,然后置放在具有略高预热温度的模具型槽内进行一次模锻成形,获得与所需成品零件接近尺寸产品的工艺^[3,6]。

流变成形的典型代表是日本宇部株式会社(UBE)开发的新流变成形工艺^[13]和HITACHI工艺^[14],英国BRUNEL大学的Fan Z.等人开发出的双螺旋机

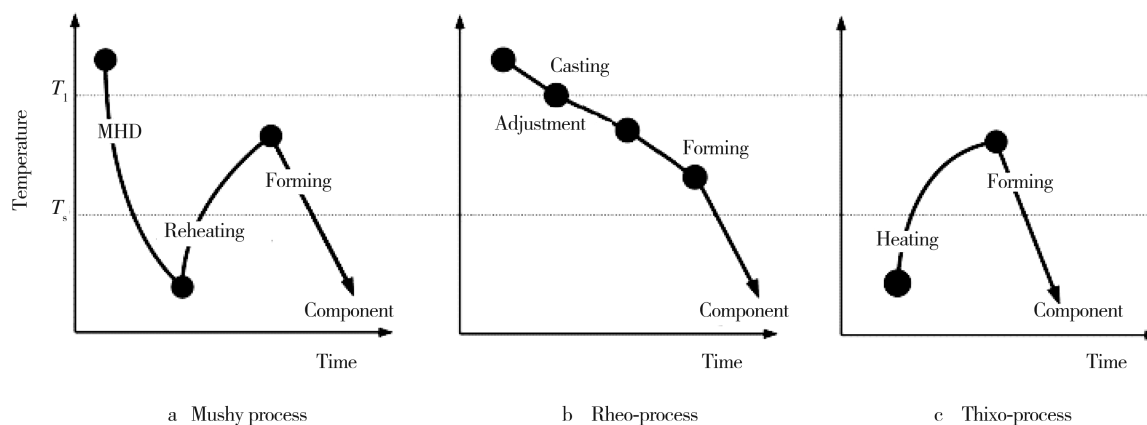


图1 根据成形前坯料加热流程对半固态成形进行的分类

Fig.1 Classification of semi solid forming according to the forming process of billet heating process

机械搅拌式流变工艺^[15]。尽管流变成形具有流程短、成本低等优点,但是由于浆料在保持、状态控制和输送等方面存在很多困难,在很大程度上限制了流变成形工艺应用的步伐。由于半固态金属坯料的加热、运输很方便,容易实现自动化和工业生产,因此触变成形是镁合金加工的主要成形方式。触变成形的典型代表是美国 Dow 化学公司于 1989 年发明的一种触变注射技术^[16]。但是,相对于压铸,镁合金半固态触变注射技术的缺陷是装备昂贵,维护较困难,机械与控制设备故障率较高,维护费用较高,原料价格和成本较高;另一问题是成形零件较小,目前采用触变注射成形的零件最大的只有 7.5 kg;铸件生产周期较长,产量较低;由于此技术尚在专利保护期内(美国 Dow Chemical Co.所有),专利支付费用也较高。

2 国内外半固态成形的应用和发展现状

2.1 有色金属的半固态成形

制备具有均匀、细小的非枝晶坯料或浆料,是半固态成形技术的一个关键问题。通常可将半固态坯料或浆料的制备方法分为 3 类。

第 1 类是液相法,如机械搅拌法和电磁搅拌法。典型代表方法有:美国铝业公司下属的 AEMP 公司发明的 MHD 法^[17]、法国 PECHINEY 公司行波电磁搅拌法^[18]、英国 BRUNEL 大学发明的双螺旋搅拌法(RDC)^[19]、美国 MIT 发明的集冷棒机械搅拌法(SSR)^[20]、北京有色金属研究总院发明的复合电磁搅拌法^[21]、北京科技大学发明的转筒搅拌法(MSB)与低过热度弱电磁搅拌法(LSPWES)^[22]、清华大学发明的双向电磁搅拌法^[23]等。这类方法要通过控制搅拌强度、搅拌时间、冷却速度来促进熔体达到均匀凝固,实现强制均匀凝固制备半固态坯料或浆料。此外,采用电磁搅拌法需要特定的搅拌设备,制坯或制浆成本较高;由于交流电磁场存在集肤效应,制备坯料的半径通常不能超过 150 mm。

第 2 类是控制凝固法,即通过控制液态金属生成枝晶的外部条件,或加入某种添加剂,以细化晶粒,从而有利于二次重熔过程中组织的球化。典型的代表方法有:东北大学提出的近液相线半连续铸造法^[24]、挪威 NORSK HYDRO 公司发明的化学晶粒细化法^[25]、日本 URE 公司发明的冷却斜坡法(NRC)^[26]和美国 WPI 发明的液流混合法(CRP)^[27]等。这类方法的优点是工艺简单、生产成本较低,存在的缺陷是低

过热的连续铸造技术不成熟,熔体内部温度场不均匀。

第 3 种方法是固相法,如喷射沉积法^[28]、再结晶重熔法(RAP)^[29]、应变诱导熔化激活法(SIMA)^[30]和粉末冶金法^[31]。其中,目前制备镁合金坯料常用的应变诱导熔化激活法只能生产小规格坯料,且坯料价格比较昂贵。

在国外,半固态模锻技术首先应用于汽车零部件制造方面。以美国为例,美国 Alumax 公司与 Superior 公司 1992 年合作在阿肯色州建成了全球首家半固态模锻铝合金汽车轮毂厂,该厂所生产的半固态模锻铝合金轮毂的力学性能比同一规格铸造轮毂的高 18% 以上,同时前者的重量仅为后者的 85%。随后,Alumax 公司分别于 1994 年和 1996 年,建成了两座汽车铝合金零部件半固态成形的生产工厂。进而用半固态模锻分别为 Bemdix 牌轿车和 Ford 牌轿车生产了约 250 万个铝合金汽缸头和 1500 万个汽车空调器压缩机用铝合金活塞^[32-34]。相较于铝合金半固态模锻成形,镁合金半固态成形技术及应用方面较为滞后,进入工业化应用的仅有 Thixomolding 工艺。如 1995 年,Thixomat 公司的子公司 Lindberg 公司利用 Thixomolding 工艺,为汽车公司生产了 50 余万件的半固态镁合金铸件。随后,日本制钢所从美国购买了 Thixomolding 镁合金注射成形的设备制造和销售权,已经制造和销售了 200 多台,大部分设备销往日本、中国台湾和中国大陆,如日本 TAKATA 公司利用 Thixomolding 技术为索尼和松下等知名公司生产镁合金的照相机壳和 MD 壳;同时, MG Precision 公司也利用 Thixomolding 技术生产镁合金笔记本电脑机壳^[30-31]。

国内对半固态加工技术的研究起步较晚,虽然在半固态坯料制备、二次重熔、半固态成形等方面取得了一些研究成果,但实际应用得很少。半固态模锻技术在国内目前还没有生产应用的报导。虽然在国外半固态加工在汽车等领域得到了广泛应用,但在航空、航天领域却很少受到关注,其原因在于如何提高和保证半固态加工制件性能的可靠性,因此对半固态模锻制件的性能控制显得尤为重要。

2.2 钢铁材料的半固态成形

为了制备适用于半固态加工的具有均匀、细小的球状晶坯/浆料,国内外研究者们先后尝试使用了机械搅拌法、电磁搅拌法、超声波处理法、冷却槽法、喷射沉积法,粉末冶金法、应变诱导熔化激

活法等方法来制备钢铁合金坯/浆料^[35-41],然而由于钢铁合金较高的固/液相线温度(1300℃以上),上述适用于有色金属的方法及技术往往受制于设备的耐高温能力。英国莱切斯特大学的 Atkinson 教授等学者指出,使用再结晶重熔法(RAP)更适合制备半固态钢铁合金坯/浆料^[42]。首先,此方法无需特殊设备,仅将塑性变形后的坯料加热到半固态温度,即可获得适于半固态成形的坯/浆料进而进行成形。其次,加热过程中在钢铁合金表面生成的氧化膜能够有效地保证坯/浆料形状的稳定,便于加热和运输。在此基础上,各国研究者从理论和实验两方面研究了多种钢铁合金的再结晶重熔球化机制,进而深入地探究了钢铁合金的半固态触变成形机制,其中欧洲以德国亚琛工大和法国国立高等工程技术学校为代表,亚洲以我国北京科技大学和日本东京大学为代表^[43-50]。

由于钢铁材料较高的半固态温度区间,以及较苛刻的工作环境要求,直至今日,国内外尚未实现钢铁材料半固态成形技术的产业化应用。德国亚琛工业大学的 Püttgen 等人指出,若要实现钢铁材料的半固态成形产业化应用,必须解决以下3个问题:第一,适于半固态成形的钢铁材料的选择与设计;第二,适用于钢铁材料半固态成形的模具、工具材料的选择与设计;第三,半固态成形前后钢铁材料的热处理工艺开发与设计^[51-53]。

3 挑战和机遇

从已经举办过的多届半固态国际会议(S2P)的学术文章看,各国学者的研究工作多是集中在半固态坯料的制备方法、二次重熔、流变压铸和触变压铸。其研究目的旨在寻找更简单、更有效的半固态制坯方法和降低半固态加工成本,从而促进半固态加工在工业上推广和应用,但对如何提高半固态加工制件的性能研究,尤其是半固态制件在成形过程中,由于凝固不均匀和成形应力分布不均匀性导致制件各部性能的不均匀性,甚至产生内部缺陷的研究少有报导。

实际上,目前半固态成形工艺主要应用在汽车、电子产品、仪表等行业,零件尺寸较小,选用的成形工艺多为半固态流变压铸或触变压铸,制件性能相对较低,没有充分发挥半固态成形的优势。而对于汽车、重型机械、武器装备上许多形状复杂的关键件,采用轻质合金替代原钢质零件遇到的难题是

采用压铸不能满足性能要求,采用固态锻造难以成形。

半固态模锻是解决这类零件最有前途的方法之一,但采用简单的固态锻造的成形方法可能造成制件各部施压不均匀,导致相应的性能不均匀问题,因为在半固态锻造成形过程中依然存在合金凝固过程,由于制件形状、合金成分、应力状态的影响,总是存在着不均匀的应变场。在金属凝固的末期(脆性温度区),晶间的延性或塑性变形能力不足以承受当时应力产生的应变量,从而发生沿晶断裂,即热裂纹,这是凝固成形形成裂纹缺陷的一般规律。在半固态模锻过程中,由于始锻时就有一定的固相存在,使得凝固过程不均匀性加剧,尤其是施加了成形载荷(同固态模锻)使得成形制件各部应变更加不均匀,产生微裂纹的可能性进一步提高。但是半固态模锻依然是凝固为主的成形技术,其性能指标可以接近锻件性能指标,但是同一些武器装备和汽车的承力构件要求的性能指标尚有差距,这也是为什么半固态加工在武器装备和汽车承力件制造中应用较少的原因之一。如何提高半固态制件的性能指标,成为了推广和应用的关键技术问题,受到了国家和企业部门的高度重视。

国家发改委于2004年颁布的《汽车产业发展政策》第十条明确提出:“汽车产业及相关产业要注重发展和应用新技术,提高汽车的燃油经济性。2010年前,乘用车新车平均油耗比2003年降低15%以上”。要达到这个指标,汽车整备质量要减轻10%,因此为了环保和节能的需要,汽车轻量化势在必行。2007年11月由汽车工程学会牵头,第一汽车集团、东风汽车公司、浙江吉利控股集团、奇瑞汽车公司、长安汽车公司、宝山钢铁股份有限公司和一些高等院校和科研院所成立的汽车轻量化技术创新战略联盟,提出了我国汽车轻量化技术发展战略,并列出了铝镁合金及其复合材料、塑料和高强钢等一些重点开发的新材料和5项汽车先进制造技术,其中将有色合金半固态成形技术被列为先进制造技术之一。半固态成形技术重点解决发动机支架等强度件和商用车车轮的成形难点,在这一领域实现原始创新突破。为了提高液态或半固态成形制件的性能,近些年来一些学者提出了铸锻复合、连铸连锻、半固态双控成形等方法(称谓尚未统一),其技术原理或是采用液态或半固态充型,然后进行闭式模锻,在模锻过程中金属成形还是以凝固为主,塑性变形量很少,仅略微起到密实作用而已,制件性能没有质的提高;

或是采用先铸造制坯,然后进行普通热模锻,这种方法只适用于简单形状零件,主要目的是同时提高金属材料的质量利用率和性能利用率,进而实现节能减排和绿色制造^[54—60]。

4 结语

随着现在制造业和兵器工业的迅猛发展,在全球倡导“节能减排”、“绿色制造”的今天,传统的铸造和锻造工艺在材料质量利用率和材料性能利用率的双重考量标准下,都显示出了一定的局限性,而半固态成形技术由于能够实现从质量和性能两方面充分地提高材料利用率,而受到金属材料加工成形从业人员和专家学者的广泛关注。但是,由于半固态金属材料所表现出异于传统固态和液态金属材料的相关特性,使得机遇与挑战并存,具体可归纳为以下几点。

1) 金属半固态浆料或坯料的制备。近30年来,国内外专家学者已经开发出了20余种制备金属半固态浆料或坯料的制备技术及工艺,但是这些工艺的成本、稳定性、效率等诸多方面仍有待进一步与工业生产实际进行衔接。

2) 由于金属材料的半固态成形工作温度区间相对于传统的铸造和锻造而言较窄,而且同种材料在不同半固态温度下其微观组织迥异,因此,欲实现金属材料半固态成形的稳定性,必须提高现有的温度控制系统以及加工成形系统的控制精度。

3) 对于钢铁材料以及其他具有高熔点的金属材料,由于其对半固态成形环境的要求较为苛刻,相关的基础研究以及应用技术开发相对滞后,浆料及坯料制备,工具模具材料选择,成形以及热处理工艺的开发等方面,都需要广大科研工作者和从业人员再接再厉。

参考文献:

- [1] SPENCER D B, MEHRABIAN R, FLEMINGS M C. Rheological Behavior of Sn-15 Pct Pb in the Crystallization Range[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 1972, 3(3): 1925—1932.
- [2] FLEMINGS M C. Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State[J]. Met Trans, 1991, 22A: 957—981.
- [3] ATKINSON H, RASSILI A, ATKINSON H, Rassili A (Eds.), Thixoforming Steel Shaker Verlag, Aachen, Germany, pp. 13—18.
- [4] 李激光, 康永林, 赵爱民, 等. 高碳工具钢半固态流变轧制[J]. 材料导报, 2003, 17(6): 21—24.
- LI Ji-guang, KANG Yong-lin, ZHAO Ai-min, et al. Semi-solid Rheorolling of High Carbon Tool Steels[J]. Materials Review, 2003, 17(6): 21—24.
- [5] 刘静安, 谢水生. 半固态金属加工技术研究现状与应用[J]. 塑性工程学报, 2002, 9(2): 1—11.
- LIU Jing-an, XIE Shui-sheng. The Overview of Study and Application of Semi-solid Metals Processing Technology[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2002, 9(2): 1—11.
- [6] KIUCHI M, KOPP R. Mushy/semi-solid Metal Forming Technology – Present and Future[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2002, 51(2): 653—670.
- [7] 姜巨福, 王迎, 杜之明, 等. 新SIMA制备坯料触变挤压AZ61镁合金零件的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(3): 576—585.
- JIANG Ju-fu, WANG Ying, DU Zhi-ming, et al. Microstructure and Mechanical Properties of AZ61 Magnesium Alloy Parts Achieved by Thixo-extruding Semisolid Billets Prepare by New SIMA[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(3): 576—585.
- [8] 姜巨福, 王迎, 曲建俊. 工艺参数对AM50A镁合金双控成形件组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(2): 321—333.
- JIANG Ju-fu, WANG Ying, QU Jian-jun. Effect of Process Parameters on Microstructure and Properties of AM50A Magnesium Alloy Parts Formed by Double Control Forming [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(2): 321—333.
- [9] 康永林, 宋仁伯, 杨柳青, 等. 金属材料半固态凝固及成形技术进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(7): 27—33.
- KANG Yong-lin, SONG Ren-bo, YANG Liu-qing, et al. Progress in Technology of Semi-solid and Forming of Metal [J]. Materials China, 2010, 29(7): 27—33.
- [10] 胡勇, 闫洪, 陈国香. 原位Mg₂Si/AM60镁基复合材料半固态组织演变[J]. 材料工程, 2009(6): 56—59.
- HU Yong, YAN Hong, CHEN Guo-xiang. Semi-solid Microstructure Evolution of In situ Synthesized Mg₂Si/AM60 Magnesium Matrix Composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2009(6): 56—59.
- [11] FLEMINGS M C. Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State[J]. Met Trans, 1991, 22A: 957—981.
- [12] SONG R, KANG Y, ZHAO A. Semi-solid Rolling Process of Steel Strips[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 198(1—3): 291—299.
- [13] FINDON M. Semi-solid Slurry Formation Via Liquid Metal Mixing[J]. Materials and Science Thesis, Worcester Polytechnic Institute, 2003.
- [14] 潘复生, 张津, 张喜燕, 等. 轻合金材料新技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 170.
- PAN Fu-sheng, ZHANG Jin, ZHANG Xi-yan, et al. New Technology of Light Alloy Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 170.
- [15] YURKO J A, MARTINEZ R A, FLEMINGS M C. Development of Semi-solid Rheocasting (SSR) Process[C]. Proceedings of the 7th Int Conf on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Tsukuba, Japan, September, 2002: 495—500.
- [16] FREDERICK P S, BRADLEY N L, ERICKSON S C. In-

- jection Molding Magnesium Alloys[J]. *Advanced Mater Process*, 1998, 134(4): 53—58.
- [17] ZIFLGEN M, HIRT G. Microstructural Effects of Electromagnetic Stirring in Continuous Casting of Various Aluminum Alloys, 2003: 180—186.
- [18] GARAT M, BLAIS S, PLUCHON C, et al. Aluminum Semi-solid Processing: From the Billet to the Finished Part[C]. *Processing of the 5th Int Conf on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Colorado, America, 1998: 189—206.
- [19] FAN Z, FANG X, JI S. Microstructure and Mechanical Properties of Rheo-diecast (RDC) Aluminum Alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 412: 298-306.
- [20] ZHANG Z F, XU J, SHI J K. Study on Multiple Electromagnetic Continuous Casting of Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2006, 22: 437-440.
- [21] 毛卫民, 赵爱民. 球状初晶半固态金属或合金浆料直接成型方法及装置: 中国, 02104349.3[P]. 2003-04-23.
MAO Wei-min, ZHAO Ai-min, CUI Cheng-lin. Direct Forming Method and Device for Spherical Primary Crystal Semi Solid Metal or Alloy Slurry: China, 02104349.3[P]. 2003-04-23.
- [22] 康永林, 安林, 孙建林. 转筒式半固态金属浆料制备与成形设备: 中国, ZL 01109074.X [P].
KANG Yong-lin, AN Lin, SUN Jian-lin. Rotary Drum Type Semi-solid Metal Slurry Preparation and Forming Equipment: China, ZL 01109074.X [P]. 2003.
- [23] 唐靖林, 冯鹏飞, 曾大本. 一种制备半固态铝合金浆料的方法: 中国, ZL 200510086377.4 [P]. 2005.
TANG Jing-lin, FENG Peng-fa, ZENG Da-ben. Method for Preparing Semi-solid Aluminum Alloy Slurry: China, ZL 200510086377.4 [P]. 2005.
- [24] 刘丹. 铝合金液相线铸造制浆及半固态加工工艺及理论研究[D]. 沈阳: 东北大学, 1999.
LIU Dan. Slurry Making by Liquidus Aluminum Alloy and the Research of Tecchnology and Theory in Semi-Solid Metal Processing[D]. Shenyang: Northeastern University, 1999.
- [25] MITSURU A, HIROTO S, YASUNORI H, et al. Method and Apparatus for Shaping Semisolid Metals: European Patent, EP0745694[P]. 1996.
- [26] Ospray Metals Ltd. UK Patent. 147239[P].
- [27] KIRKWOOD D H, SELLARS C M, ELIAS-BOYED L G. Thixotropic Materials: European Patent, No. 0305375 B1[P]. 1992-10-28.
- [28] YOUNG K P, KYONKA C P, COURTOIS J A. Fine Grained Metal Composition: US Patent, No. 4,415,374[P]. 1982-04-30.
- [29] YOUNG K P, CLYNE T W. A Powder Mixing and Preheating Route to Slurry Production for Semisolid Die-casting[J]. *Powder Metall*, 1986, 29: 195—199.
- [30] MIDSON S T. The Commerical Status of Semi-solid Casting in the USA[C]. *Proceedings of the 4th Int Conf on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Sheffield, England, 1996: 2251—2257.
- [31] GRIFFITHS W D, MCCARTNEY D G. The Effect of Electromagnetic Stirring during Solidification on the Structure of Al-Si Alloys[J]. *Mater Sci Eng A*, 1996, 216: 47—60.
- [32] 康永林, 毛卫民, 胡状麟. 金属材料半固态加工理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004:1—10.
KANG Yong-lin, MAO Wei-min, HU Zhuang-qi. Theory and Technology of Semi Solid Processing of Metallic Materials [M]. Beijing: Science Press, 2004:1—10.
- [33] 洪慎章, 曾振鹏. 铝合金零件半固态模锻的应用及发展[J]. *锻压技术*, 2004, 29(4): 5—7.
HONG Shen-zhang, ZENG Zhen-peng. Application and Development of Semi Solid Die Forging for Aluminum Alloy Parts[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2004, 29(4): 5—7.
- [34] 刘劲松, 王惠敏. 半固态模锻及其工业应用前景展望[J]. *模具制造*, 2004(3): 47—49.
LIU Jin-song, WANG Hui-min. Semi Solid Die Forging and Its Industrial Application Prospect[J]. *Die Manufacturing*, 2004(3): 47—49.
- [35] BOYED L E, KIRKWOOD D H, SELLARS C M. Application of Thixotropic Metallic Slurries in Forging Operations[C]. *Proc 2nd World Basque Congress on New Structural Materials*. Spain: Vitoria Gasteiz, 1988: 285—295.
- [36] BARANI A A, LI F, ROMANO, et al. Design of High-strength Steels by Microalloying and Thermo Mechanical Treatment[J]. *Mater Sci Eng*, 2006, 463: 138-146.
- [37] KIM K B, LEE H I, MOON H K. Microstructures and Formability of Electromagnetically Stirred Billet of High Melting Point Alloys[C]. *Proc 5th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*. Colorado School of Mines, Colorado, 1998: 415—422.
- [38] ADACHI M, SASAKI H, HARADA Y, et al. Method and Apparatus for Shaping Semisolid Metals: European Patent, 0745694A1[P]. 1996.
- [39] KIRKWOOD D H, SELLARS C M, ELIASBOYED L G. Fine Grained Metal Composition: US Patent, 5, 037, 498 [P]. 1991.
- [40] OMAR M Z, ATKINSON H V, PALMIERE, et al. Microstructural Development of HP9/4/30 Steel during Partial Remelting[J]. *Steel Res Int*, 2004, 75: 552—560.
- [41] PÜTTGEN W, HALLSTEDT B, BLECK W, et al. On the Microstructure Formation in Chromium Steels Rapidly Cooled from the Semi-solid State[J]. *Acta Mater*, 2007, 55: 1033—1042.
- [42] HIRT, G, SHIMAHARA, H, SEIDL, et al. Semi-solid Forging of 100Cr6 and X210CrW12 Steel[J]. *CIRP Ann – Manuf Technol*, 2005, 54: 257—260.
- [43] GU G, PESCI R, BECKER E, et al. Quantification and Localization of the Liquid Zone of Partially Remelted M2 Tool Steel Using X-ray Microtomography and Scanning Electron Microscopy[J]. *Acta Mater*, 2012, 60: 948—957.
- [44] GU G, PESCI R, LANGLOIS L, et al. Microstructure Observation and Quantification of the Liquid Fraction of M2 Steel Grade in the Semi-solid state, Combining Confocal Laser Scanning Microscopy and X-ray Microtomography[J]. *Acta Mater*, 2014, 66: 118—131.
- [45] BECKER E, FAVIER V, BIGOT R, et al. Impact of Experimental Conditions on Material Response during Forming of Steel in Semi-solid State[J]. *J Mater Process Technol*,

- 2010, 210: 1482—1492.
- [46] 杨雄飞, 康永林, 宋仁伯, 等. 60Si2Mn 半固态压缩变形组织演变[J]. 中国有色金属学报, 2000(S1):120—125.
YANG Xiong-fei, KANG Yong-lin, SONG Ren-bo, et al. Microstructure Evolution of 60Si2Mn Semi Solid Compressive Deformation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2000(S1):120—125.
- [47] LI J, SUGIYAMA S, YANAGIMOTO J, et al. Effect of Inverse Peritectic Reaction on Microstructural Spheroidization in Semi-solid State[J]. J Mater Process Technol, 2008, 208:165—170.
- [48] MENG Y, SUGIYAMA S, TAN J, et al. Microstructural Evolution during Partial Melting and Semisolid Forming Behaviors of Two Kinds of Hot Rolled Cr-V-Mo Tool Steel[J]. J Mater Process Technol, 2015, 225: 203—212.
- [49] KANG C G, SEO P K, KANG S S. The Effect of Injection Velocity on Liquid Segregation and Mechanical Properties in Arm Part Fabricated by Semi-solid Die Casting Process[J]. J Mater Process Technol, 2006, 176: 32—40.
- [50] CHEN Q, CHEN G, HAN L, et al. Microstructure Evolution of SiCp/ZM6 (Mg-Nd-Zn) Magnesium Matrix Composite in the Semi-solid State[J]. J Alloy Compd, 2016, 656: 67—76.
- [51] UHLENHAUT D I, KRADOLFER J, PÜTTGEN W, et al. Structure and Properties of a Hypoeutectic Chromium Steel Processed in the Semi-solid State[J]. Acta Mater, 2006, 54: 2727—2734.
- [52] PÜTTGEN W, HALLSTEDT B, BLECK W, et al. On the Microstructure and Properties of 100Cr6 Steel Processed in the Semi-solid State[J]. Acta Mater, 2007, 55: 6553—6560.
- [53] PÜTTGEN W, HALLSTEDT B, BLECK W, et al. On the Microstructure Formation in Chromium Steels Rapidly Cooled from the Semisolid State[J]. Acta Mater, 2007, 55: 1033—1042.
- [54] 高霖, 童国权, 罗守靖. 低碳钢法兰铸锻复合工艺研究[J]. 热加工工艺, 1999(4):24—26.
- GAO Lin, TONG Guo-quan, LUO Shou-jing, et al. Study of the Compound Technique of Casting-and-Forging for Steel Flange[J]. Hot Working Technology, 1999(4):24—26.
- [55] 张雪冬, 李志广, 赵臣俊, 等. 联接环铸锻复合塑性成形工艺[J]. 机械管理开发, 2004, 80(5):9—10.
ZHANG Dong-xue, LI Zhi-guang, ZHAO Chen-jun, et al. Link Ring Casting and Forging Compound Plasticity Forming Technology[J]. Mechanical Management and Development, 2004, 80(5):9—10.
- [56] 王以华. 连杆的铸锻联合工艺: 中国, CN 85106018[P]. 1987.
WANG Yi-hua. Combined Process of Casting and Forging of Connecting Rod: China, CN 85106018[P]. 1987.
- [57] 李远发. 金属液态压铸锻造双控一次成型的方法: 中国, CN1647871[P]. 2004-12-24.
LI Yuan-fa. Method for Double Controlling Forming of Metal Liquid Die Casting and Forging: China, CN1647871 [P]. 2004-12-24.
- [58] 陈炳光, 陈昆. 连铸连锻技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
CHEN Bing-guang, CHEN Kun. Continuous Casting Technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004.
- [59] 齐怀襄, 齐霖. 双重挤压铸造研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2007(压铸专刊): 243—247.
QI Huai-xiang, QI Lin. Investigation on Dual Squeeze Casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007: 243—247.
- [60] 胡茂良, 赵密, 吉泽升, 等. 挤压铸造工艺对汽车空调器摇盘组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(3):400—405.
HU Mao-mi, ZHAO Mi, JI Ze-sheng, et al. Effect of Squeezing Casting Technology on Structures and Properties of Air-conditioner Swaying Tray of Automobile[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(3): 400—405.