

钢铁基合金半固态浆料制备及成形工艺研究

戴长泉, 蒋业华, 周荣, 陶姗

(昆明理工大学机电工程学院, 云南昆明 650093)

摘要: 综述了钢铁基合金—铸铁、不锈钢和其他合金钢半固态浆料的制备技术和成形方法及其工作原理, 其中包括机械搅拌及其成形、电磁搅拌及其成形、液相线铸造法、粉末压实法、剪切冷却辊压法、应变诱发熔化激活法. 并介绍了各种方法的研究现状及其特点, 最后提出了该领域今后的研究发展方向.

关键词: 半固态成形; 浆料; 铁基合金; 非枝晶组织

中图分类号: TG 143. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007- 855X(2003)04- 0040- 05

Research on Producing and Forming Offero- based Alloy Semi- solid Slurry

DAI Chang quan, JIANG Ye hua, ZHOU Rong, TAO Shan

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Ferro- based alloy includes cast iron, stainless steel and other alloy steels Semi- solid slurry. Many processing techniques and producing methods of the ferro- based alloy, such as mechanical stirring, electromagnetic stirring, liquidus casting, powder compacting, shearing- cooling- rolling, and strain induced melt activating, are discussed, which introduces many processing techniques and producing methods. The present situations and characteristics of several basic Semi- solid state forming techniques are discussed and analyzed. The trend of the future development of Semi- solid ferro- based alloy is proposed.

Key words: Semi- solid state forming; slurry; ferro- based alloy; non- dendritic structure

0 引言

20 世纪 70 年代, 美国麻省理工学院学者 M. C. Flemings 等人^[1,2]首次提出了金属半固态成形技术 (Semi- solid metal forming), 简称 SSM. 半固态金属加工技术是指在金属的凝固过程中, 进行剧烈搅拌, 或控制固- 液态温度区间, 或采用某些特殊的工艺使枝晶破碎、球化, 得到一种液态金属, 母液中均匀地悬浮着一定固相组分的固液混合浆料, 这种具有特殊显微组织的金属浆料具有流变特性和触变特性, 并可以用传统的铸造工艺如压铸成形、或在高固相率情况下采用压力加工工艺成形, 采用这种既非完全液态, 又非完全固态的金属浆料加工成形的方法, 就称为半固态金属加工技术. 该技术具有很多优点^[1,3-5], 如成形性能好, 生产效率高, 制品尺寸精度高, 表面质量好, 可成形复杂件和薄壁件, 与传统的液态成形技术相比, 模具热冲击小, 使用寿命长, 铸件缺陷少, 加工余量小, 成品率高, 节能并利于改善环境. 因此, 作为一种新型加工技术—半固态成形技术已成为材料学科研究热点之一, 被誉为 21 世纪最有发展前景的现代加工新技术.

迄今为止, 国内外对半固态合金进行了大量研究. 其中比较典型的包括以下几个方面: 非枝晶浆料的制备方法^[3,6-14]; 半固态成形方法^[3,15-17]; 非枝晶组织的形成机理^[14-19] 半固态合金的流变性能^[14-16,19,20] 半固态合金的触变性能^[14-16]; 半固态合金的形变特性^[21]. 但是, 这些研究多集中于熔点较

收稿日期: 2003- 01- 09; 基金项目: 云南省应用基金项目(项目编号: 2002E0007Q).

第一作者简介: 戴长泉(1973~), 男, 在读硕士研究生; 主要研究方向: 半固态成形技术. E- mail: DCQ0407@163.net

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

低的 Al 合金、Zn 合金、Mg 合金和 Sn 合金等, 如作者所在课题组分别采用电磁搅拌技术及半固态等温处理技术制备了 Zn 合金、Al 合金的半固态非枝晶球状组织. 对于高熔点的铁基合金以往也曾开发研究过, 但因铸型热作用等问题, 非枝晶的获得比较困难, 流变学形为不易测定, 上述研究相对较少, 更谈不上工业化生产了. 本文着重阐述了半固态铁基合金非枝晶组织的制备、成形方法及研究现状, 并提出了该领域今后的研究发展方向.

1 机械搅拌及其成形

实验装置如图 1^[7] 所示, 铁基合金在通有保护气的坩埚内熔化, 坩埚内设有搅拌器, 坩埚外设有温度控制系统, 以保证处于固-液两相区的合金有预定的固相率. 经过搅拌制成的半固态浆料可以直接进行成形加工, 通常称作流变成形, 也可以将半固态浆料制成坯料后, 根据产品尺寸需要下料, 再重新加热到合金半固态温度, 然后进行成形加工, 通常称作触变成形.

1.1 机械搅拌法关于钢铁基合金的研究

日本人^[22]利用图 1 的装置, 将成分为 C: 4.26%; Si: 1.78%; Mn: 0.11%; P: 0.062%; S: 0.021% 的过共晶铸铁作为研究对象, 加热到 1723 K, 然后冷却到固-液两相区, 进行机械搅拌, 获得了细小的石墨均匀的分布于基体中的灰铸铁半固态坯料, 如图 2(a) 所示, 其组织形貌明显比同成分无搅拌常规铸造所获得的组织(如图 2(b) 所示) 细小得多. 其机械性能也比同成分无搅拌的灰铸铁有明显的提高, 如表 1 所示^[22].

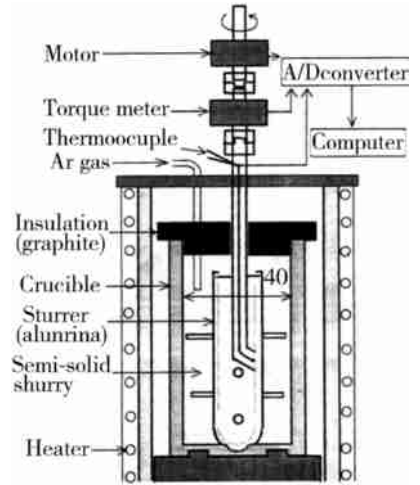
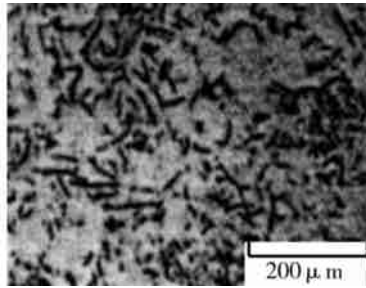


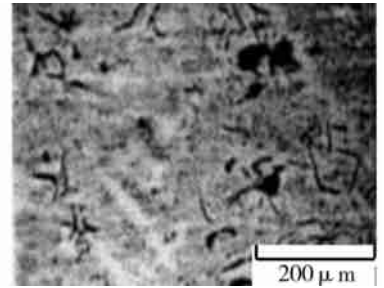
图 1 机械搅拌装置

表 1 铸件机械性能

搅拌强度 /r·min ⁻¹	抗拉强度 /MPa	延伸率/%
0	144	0.19
300	233	0.32
600	300	0.60



(a) 有搅拌微观组织



(b) 无搅拌微观组织

图 2 搅拌微观组织

1.2 机械搅拌的作用及不利因素

研究表明, 采用机械搅拌法可以获得很高的剪切速率, 使铸铁的初生相球化, 与普通凝固铸锭相比, 组织明显细化、均匀. 同时, 改变初晶凝固过程的冷却速度, 可使初晶更加细化. 但是, 机械搅拌法中也存在一些不足, 如: 搅拌腔体内部往往存在搅拌不到的死区, 影响浆料的均匀性; 搅拌叶片的腐蚀问题及对半固态金属浆料的污染问题都会对半固态铸坯带来不利影响; 半固态浆料转移过程中易氧化; 而且从熔体到半固态浆料的制备直到最终成形的全过程不易控制. 这些问题使机械搅拌法在应用中受到一定的限制, 于是, 非接触式的电磁搅拌法便得到了很好的推广和应用^[11, 12, 14, 18].

2 电磁搅拌及其成形

2.1 电磁搅拌的工作原理

电磁搅拌是借助电磁力强化铸坯内未凝固金属熔体的运动, 从而改变凝固过程的流动、传热和传质, 达到细化晶粒、改善铸坯质量的目的. 电磁搅拌法是低熔点合金半固态坯料工业化生产的主要方法, 由于该方法不会污染金属, 金属浆料纯净, 控制方便, 应用条件成熟, 因此, 电磁搅拌法也是钢铁基半固态浆料制备的主要方法. 电磁搅拌法制备半固态合金的基本原理和过程与机械搅拌法相似, 不同的是利用导电的

熔融金属与变化磁场间的感应力驱动金属液搅拌,使枝晶破断形成等轴晶^[11,14~27].

2. 电磁搅拌法关于钢铁基合金的研究

邢书明^[28]等人采用立式半固态加工用的连续铸造装置,成功制备了白口铁半固态坯料. 试验所用白口铁成分为: C: 2.

表2 机械性能对比

钢号	试样	σ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	HRB
1Cr18Ni9Ti	半固态1道次轧制试样	480	1022	40	85.0
	常规多道次轧制试样	500	790	40	56.6

30%; Si: 0.5%~0.7%; Mn: 0.4%; Cr: 40%. 熔炼合格的合金液以高于液相线的温度浇入制浆室后,在熔体自上而下的运动过程中连续冷却并不断搅拌,逐步形成具有良好流变性的半固态浆料. 所得的半固态浆料非枝晶相为颗粒状,其平均粒径为 $5\mu\text{m}$,宏观组织中无明显的柱状晶和宏观偏析,组织和性能满足半固态加工要求. 由于该方法的搅拌可由改变电磁力及感应电流来控制,不受搅拌器具材料耐热性的限制,还适用于除铸铁以外的更高熔点的钢铁基合金. 杨卯生、赵爱民等人^[25]通过对60Si2Mn的等温电磁搅拌和连续降温搅拌,使该合金半固态初生相的界面经历了抑制、熔断、粗化与聚集等过程而演变为近球形半固态组织. 宋仁伯等人^[28]通过对1Cr18Ni9Ti合金实施半固态电磁搅拌,成功获得了球形或近球形的半固态组织. 半固态1Cr18Ni9Ti轧制件的拉伸屈服强度与抗拉强度相当高,仅经过一次轧制,其所获得的力学性能要普遍高于普通轧制状态下的1Cr18Ni9Ti的力学性能,表现出良好的塑性,如表2所示^[27].

2.3 电磁搅拌法中影响组织性能的相关因素及其缺陷

从上述搅拌过程及其组织演变和性能变化可以看到,颗粒的大小、圆整程度与温度、搅拌力或搅拌速度(激磁电流或搅拌功率)等有关. 只有众多要素恰当的配合才能形成球状的颗粒组织. 搅拌器激磁电流的变化,熔体粘度的变化,都会使熔体的流动状态发生变化从而影响组织形貌. 较大搅拌速度可以促使温度场、浓度场的均匀,从而降低负温度梯度和熔质富集,直接抑制枝晶前端的进一步失稳生长并促使晶核增殖;搅拌使得粗化过程由长程扩散转变为界面短程控制,进而缩短粗化时间;一定的搅拌时间可使晶粒充分粗化而演变为近球形;在搅拌中,采取适当的冷却速度可以保证获得较小的晶粒尺寸. 然而,电磁搅拌法也存在缺陷,主要是:设备投资大,工艺复杂;固相率低很难达到0.3~0.4以上;坩埚中液体的中心与边缘搅拌速度不同,易造成组织不均;漏磁严重,效率低,感应器激发的磁场只有极小部分对金属液起搅拌作用^[19~28].

3 近液相线铸造法

中国科学院和日本的Arest研究所及东北大学研究发现,通过控制合金的浇注温度,在近液相线温度进行浇注,不需任何搅拌,初生枝晶组织便可以球化. 潘险峰^[29]等人通过对Fe-B-Si-Mo和Fe-B-Zr-Nb合金研究,在浇铸前将此两种合金熔体的温度调整到液相线附近,并控制随后的凝固条件,快速冷却,分别获得了该成分的非枝晶球状半固态组织,如图3,图4所示^[29]. 该技术完全不同于目前国内外普遍采用的半固态熔体搅拌法,是能自熔融金属直接成形的半固态浆料制备技术. 克服了剧烈搅拌所带来的熔体纯净度不易保证;合金锭再次加热所导致的能源消耗;附加工序造成的制造技术复杂;以及对制品生产的局限性. 既可获得高质量的半固态合金,大大节约能源,提高制造效率,又可望进一步发展成为实用化技术,从粒状化机理看也是全新的,打破了树枝晶破碎或结晶游离机理的概念,使人们从根本的物理机理,去认识半固态组织的形成,是半固态合金领

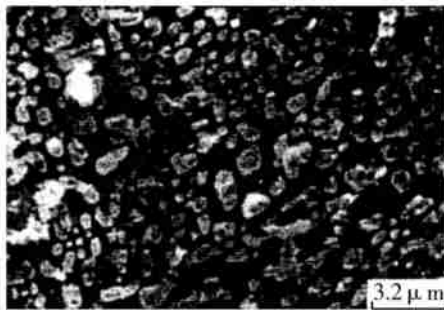


图3 近液相线铸造条件下Fe-B-Si-Mo合金显微组织

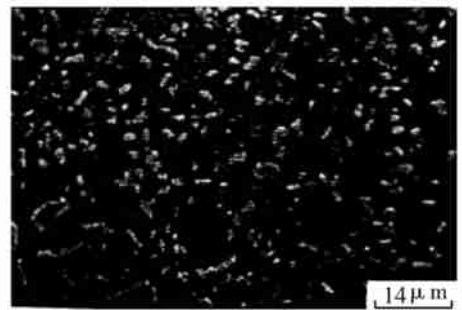


图4 近液相线铸造条件下Fe-B-Zr-Nb合金显微组织

域. 该技术完全不同于目前国内外普遍采用的半固态熔体搅拌法,是能自熔融金属直接成形的半固态浆料制备技术. 克服了剧烈搅拌所带来的熔体纯净度不易保证;合金锭再次加热所导致的能源消耗;附加工序造成的制造技术复杂;以及对制品生产的局限性. 既可获得高质量的半固态合金,大大节约能源,提高制造效率,又可望进一步发展成为实用化技术,从粒状化机理看也是全新的,打破了树枝晶破碎或结晶游离机理的概念,使人们从根本的物理机理,去认识半固态组织的形成,是半固态合金领

域的发展方向之一^[6,21,29].

4 粉末压实法

该法是指根据合金成分的需要, 将两种或两种以上的不同熔点的固态粉末按一定比例均匀混合, 并压成一定的形状, 制成试样, 然后快速加热到低熔点合金的熔点以上, 低熔点的合金的粉末熔化而高熔点的合金仍以颗粒状保持在液相基体中, 并在后续的工艺中配以快速升温, 适当保温的一种材料制备新工艺. 日本人将成分为: C < 0.01%; P: 0.04%; S: 0.05% 的纯铁粉和成分为 C: 4.24%; Si: 0.64%; Mn: 0.21%; P: 0.10%; S: 0.011%; Cr: 0.46% 的共晶铁粉按 3:7 的比例均匀混合后, 压实成试样, 快速加热至共晶温度以上, 进行适当保温, 可获得含球状组织的半固态浆料, 如图 5 所示. 此时, 液相是由共晶铁粉的熔化或两种粉间扩散导致的合金熔化来提供的. 与搅拌法相比, 所得的固相粒子更加细小. 研究表明, 用该法制得的半固态铸铁, 其初晶形态与搅拌法相同, 但尺寸仅为 40 μm , 在某适当温度下保温 1200 s 后, 平均粒径仍在 100 μm 以下. 该半固态浆料除了组织细微外, 还具有良好的流动性, 但其工艺较复杂, 可以用来制备具有特殊用途的产品^[14,19,31,32].

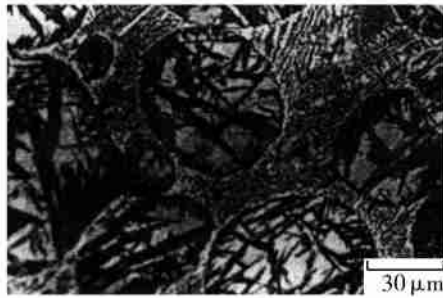


图 5 粉末压实法获得的半固态灰铁微观组织图



图 6 SCR 法的工作原理图

5 剪切-冷却-滚压法 (Shearing-cooling-rolling, 简称 SCR)

剪切-冷却-滚压 (SRC) 法的工作装置如图 6 所示, 其原理是熔融金属浇入辊轮和冷却靴间的间隙, 用预热辊轮和冷却靴来控制金属液的温度, 使其处于固液相区, 以得到固定的固相率, 从而得到非枝晶半固态合金. 可通过调整辊轮旋转速度及与冷却靴间隙的大小来实现不同程度的剪切, 比较容易达到所需要的工艺条件, 适合大批量生产. 该方法适用于低熔点到高熔点的各种合金, 所得粒径比流变铸造法小, 可达到 20~30 μm . 该方法的特点主要有: (a) 辊轮和冷却靴等主要工具结构简单, (b) 辊轮的温度易于控制, 使用寿命长, (c) 半固态合金沿辊轮旋转方向排出, 排出性好, 生产率高. 所以, 最终制品可以是带材, 也可以由后续的压铸或其他方法成形所需零件. 对于高固相率和高熔点材料, 是一种有效的制备手段. 目前用此法已经制备出铝合金、铸铁和不锈钢半固态坯料, 如: 铸铁 (FC30) 和不锈钢 (SUS304) 经处理后, 可获得均匀微细的颗粒状初晶, 是理想的半固态组织^[6,19,21].

6 应变诱发熔化激活法 (Strain Induced Melt Activated, 简称 SIMA)

应变诱发熔化激活 (SIMA) 法是将常规铸锭经过预变形, 如进行挤压、滚压等热加工制成半成品棒料, 使组织具有强烈的拉长形变机构, 然后加热到半固态下保温一定的时间, 熔化的部分液相渗入小角度晶界中, 使得固相粒子分开, 从而使枝晶破碎, 获得半固态非枝晶组织的方法. SIMA 工艺效果主要取决于低温热加工和重熔两个阶段, 若在两者间设置冷加工工序可以增加工艺的可控性. SIMA 技术适合各种高、低熔点的合金系列, 尤其对制备较高熔点的非枝晶合金具有独特的优越性. 已经成功应用于不锈钢、工具钢和铜合金、铝合金系列. CAU 和 Robert 等人用 SIMA 技术对 Al-Cu, Al-Si, M-Z 工具钢等材料进行试验, 成功的获得了非枝晶球状组织. 但是, 它的最大缺点是要对传统铸坯施加很大的固态变形量, 只能生产小型零件毛坯^[5,6,19,21,33].

7 结束语

目前, 国内外对于低温合金的半固态技术研究较多, 而对于钢铁基合金半固态成形研究非常有限, 尤

其是我国,仍处于实验室研究阶段.在今后一段时间内,电磁搅拌法将是工业化制备钢铁基半固态坯料的主要方法.同时,近液相线铸造法,由于其特有的优点(如:能耗低;浆料不易受污染,纯度高;工艺简化、效率高等),可望进一步发展成为实用化技术,尤其是对于高熔点的钢铁基合金系而言,由于其熔体温度高,对搅拌装置、工艺控制和熔体保护要求很高,成形复杂,能耗高等原因,控制熔体温度法将成为半固态铁基合金领域的重要研究发展方向之一.随着半固态技术及其工艺在其他合金(如:铝合金、锌合金、镁合金等)系中的成功应用及现有的制备技术及工艺的不断更新和完善,将会给钢铁基合金的半固态成形技术研究及应用带来理论和实践价值,从而,半固态铁基合金将会有广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] Spencer D B, Flemings M C. Rheocasting. Mater. Sci. Eng[J]. 1976, 25: 103~ 107.
- [2] Fleming M C. Behavior of Alloy in the Semi- solid State[J]. Metallurgical Transactions B, 1991, 22B(5): 269~ 293.
- [3] 谢水生, 黄生宏. 半固态金属加工技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [4] 蒋 鹏. 半固态金属成形技术的研究概况[J]. 塑性工程学报, 1998, 5: 1~ 7.
- [5] 唐靖林, 曾大本. 半固态加工技术的发展和现状[J]. 兵器材料与科学, 1998, 21(23): 56~ 60.
- [6] 罗守靖, 丑文彤, 谢水生, 等. 半固态加工技术及应用[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(6): 765~ 762.
- [7] 杨为佑, 陈振华, 吴艳军, 孙 亦. 半固态非枝晶组织合金的制备技术[J]. 金属与热处理, 2001, 24(1): 32~ 35.
- [8] 杨卯生, 毛为民, 钟雪友. 半固态合金成形的技术现状与展望[J]. 包头钢铁学院学报, 2001, 20(2): 187~ 194.
- [9] Spencer D B, Mehrabian R, Flemings M C. Met. Trans, 1972; (3): 1925.
- [10] Flemings M C. Met. Trans., 1991; 22B: 269.
- [11] Turkdi A, et al. Proc. 4th Int. conf. on Semi- Solid Alloys and Composites, Sheffield, U. K. 1996; 71.
- [12] Gabathuler J P et al. Proc. 2nd Int. Conf. on Semi- Solid Alloys and Composites, M. I. T. USA, 1992; 33.
- [13] Kirrwood D K, kapranos P. Metal and Materials, 1989; 5(1): 16.
- [14] 崔建忠, 路贵民, 刘 丹, 董 杰. 半固态浆制备技术的新进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32, (4): 110~ 113.
- [15] Flemings M C. Metall Trans A, 1991; 22: 957.
- [16] Brown S B, Flemings M C. Adv Mater Proc, 1993; 143: 36.
- [17] 朱鸣芳, 等. 半固态铸造技术的研究现状[J]. 特种铸造及有色合金, 1996, (2): 29~ 32.
- [18] 罗守靖, 杜之明. 半固态金属加工(SSP)分类及新进展[J]. 热加工工艺, 1999(5): 46~ 49.
- [19] 张 奎, 刘过均, 等. 半固态金属制备原理及应用[J]. 稀有金属, 1998, 22(6): 447~ 449.
- [20] 吉田千里, 等. 半固态压铸铸铁组织与性能[J]. 国外金属加工, 1997, (2): 39~ 44.
- [21] 潘 冶, 孙国雄. 半固态铁基合金的研究进展[J]. 现代铸造, 1998, 71(3): 18~ 21.
- [22] Masaru Imaizumi, Second International Conference on Processing Materials for Propertise; 1033~ 1036.
- [23] Hiroyuki Nomura, Peiqi Qiu, Materials Transactions[J]. 2001, 42(2): 303~ 308.
- [24] 邱克强, 张海峰, 等. 流变铸造亚共晶白口铁组织结构的演变[J]. 材料研究学报, 2000, 14, (2): 167~ 172.
- [25] 杨卯生, 赵爱民, 等. 60Si2Mn 钢半固态初生相形成与演变机制[J]. 金属学报, 2002, 38, (7): 689~ 693.
- [26] Hellawell A. the 4th International Conference on Semi- solid Processing of Alloys and Compositions. Sheffield; 1996: 60.
- [27] 宋仁伯, 等. 半固态钢铁材料流变轧制的试验[J]. 北京科技大学学报, 2001, 23(5): 439~ 441.
- [28] XING Shuming, ZENG Daben. PROCEEDINGS of ICTES 2000- ISAM; 1462~ 1466.
- [29] 潘险峰. 中国科学院博士学位论文[D]. 2001.
- [30] Kuichi M, et al. Characterization of Semi- Solid Alloys Made by SCR- Process. PICSPAC Sheffield, June, 19~ 21, 1996: 197~ 201.
- [31] Tsujikaqa M, Tanaka K. Advanced Materials Research Vols. 4- 5(1997) oo. 321- 326.
- [32] Young R M K, Clyne T W. Powder Metall, 1986, 29(3), 195.
- [33] Cau E R and Robert M h. Obtention of Rheocast Structures of M- 2 and 308L Stainless Steel by SIMA, 2nd IC SSPAC Trans- action, June 10~ 12, 1992: 119~ 129.