

# 镁合金成形技术研究进展

张颂阳<sup>1</sup>, 耿茂鹏<sup>1</sup>, 谢水生<sup>2</sup>, 周新民<sup>3</sup>, 张莹<sup>1</sup>, 王艳春<sup>2</sup>

(1.南昌大学 机电学院,江西 南昌 330029; 2.北京有色金属研究总院 有色金属材料制备加工国家重点实验室,北京 100088; 3.北京有色金属技术经济研究总院,北京 100814)

**摘要:** 综述了近年来镁合金成形技术的研究现状,介绍了作者在半固态镁合金铸轧成形技术方面所作的工作,最后预测了镁合金成形技术的发展趋势。

**关键词:** 镁合金; 成形; 综述; 半固态; 铸轧

中图分类号: TG249.7; TG292

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2006)13-0077-04

## Present Development of Formation Technology of Magnesium Alloys

ZHANG Song-yang<sup>1</sup>, GENG Mao-Peng<sup>1</sup>, XIE Shui-sheng<sup>2</sup>, ZHOU Xin-min<sup>3</sup>,  
ZHANG Ying<sup>1</sup>, WANG Yan-chun<sup>1</sup>

(1.Mach. & Elec. School, Nanchang University, Nanchang 330029, China;

2.Beijing General Research Institute for Non-ferrous Metal, Beijing 100088, China;

3. China National Nonferrous Metals Industry Techno-economic Institute, Beijing 100814, China)

**Abstract:** The present situation of the formation technology of magnesium alloys was summarized. The trend of the future development was analyzed and discussed. And our researchment about casting-rolling technology for semisolid magnesium alloys was introduced also.

**Keywords:** magnesium alloys; formation; review; semi-solid; casting-rolling

镁合金是工程应用中最轻的金属结构材料,而且具有较高的比强度、比刚度、减震性、耐磨性、导热性、电磁屏蔽性以及良好的切削性能和回收性能,成为汽车、航天航空及电子通讯等行业的重要新型原材料。在能源、资源日益严峻和环保问题日趋突出的今天,镁合金材料被誉为“绿色工程结构材料”<sup>[1]</sup>。

但是由于镁合金在熔炼中极易燃烧,在热加工过程中极易氧化;耐腐蚀性较差;高温强度、蠕变性能低;常温力学性能,特别是强度和塑韧性差;镁合金的合金系列相对少,特别是变形镁合金的研究开发严重滞后,导致其生产成本过高;与铝合金相比缺乏性价比优势等一系列问题,严重制约了其应用市场的拓展,极大地限制了镁合金的发展。因此,开发适合于变形加工的镁合金及低

成本短流程变形加工技术,是扩大镁合金应用所必须解决的关键技术。本文就近年来国内外在镁合金半固态加工成形技术,铸轧成形技术和半固态铸轧成形技术方面的研究现状进行了综述。

## 1 镁合金半固态加工成形技术

半固态加工技术是目前研究最热门、最有潜力的一项技术。半固态成形具有许多独特的优点:凡具有固液两相区的合金均可实现半固态加工;球状晶组织大大改善了材料的组织性能;半固态成形件表面平整光滑;半固态浆料的部分凝固潜热已经放出,所以一方面对加工设备的热作用小,另一方面半固态浆料本身凝固收缩小,产品尺寸精确;半固态浆料具有流变性和触变性,所以变形抗力小,设备可以小型化;节约能源,以生产单位质量零件为例,半固态加工与普通铸造相比,节约能源 35%左右<sup>[2,3]</sup>。由此可见,半固态加工技术与传统的加工技术相比具有极大的优势,因此 20 世纪 80 年代后期以来,世界各国的科研工作者对此技术进行了广泛研究,取得了较大的进展。

收稿日期: 2005-01-19

基金项目: 科技部技术开发专项基金资助项目(2002-JKZX-071);  
江西省教育厅科技攻关项目(赣教技字[2005]18号)

作者简介: 张颂阳(1975-),男,河南许昌人,博士生;

电话: 0791-7288794; Email: zhangkmust@yahoo.com.cn

镁合金的半固态成形技术是目前各国研究者的研究热点: Ei ji Yano 等<sup>[14]</sup>利用预热的冷却斜槽近液相线铸造获得了半固态 AZ91D 镁合金组织; Kim JM 等<sup>[15]</sup>利用两步加热法得到了半固态 AZ91 镁合金浆料; Czerwinski F<sup>[16]</sup>开发了半固态加工与挤压、喷射成形结合在一起的新的镁合金加工技术; Koren Z 等<sup>[17]</sup>研究了 AZ91 和 AM503 镁合金半固态热压铸和冷压铸成形。

在国内,李元东等<sup>[18]</sup>研究了不同铸造工艺对 AZ91D 镁合金半固态组织制备的影响。结果表明: 增加冷却速率有利于初始凝固组织中存在的非平衡组织的分散细化。熊爱华等<sup>[19]</sup>研究了 SIMA 法墩粗形变半固态 AZ91D 镁合金的挤压充型性能。结果表明, 随着半固态加热温度的升高或保温时间的延长, 合金浆料的充型性能提高; 但不同的形变率对浆料的充型性能也有影响。王武孝等<sup>[10]</sup>将经过压缩形变的 AZ91 镁合金坯料加热到半固态温度, 等温挤压。结果发现 AZ91 镁合金在二次加热过程中出现晶内“小液池”特征, 其组织与晶界处相同, 均为( + ) 共晶体。姜巨福等<sup>[11]</sup>通过半固态重熔试验对等径道角挤压处理后的 AZ91D 镁合金坯的组织进行了研究, 并进行了触变成形试验, 认为在成形过程中, 坯料的流动方式是以液相包裹球状固相颗粒的方式进行的。

甄子胜等<sup>[12]</sup>在 Couette 型同轴双桶流变仪上对半固态 AZ91D 合金浆料的流变性能以及组织进行了研究, 发现连续冷却条件下, 半固态 AZ91D 合金浆料的表观粘度与冷却速率、剪切速率有很大关系, 低冷速、高剪切速率浆料的表观粘度会变低, 但有利于固相颗粒球化。徐跃等<sup>[13]</sup>自行研制了新型半固态浆料制备与直接流变成形装置, 研究表明: 制备浆料的温度越低, 剪切速率越大, 固相率越高, 固相颗粒越细小、均匀、圆整。肖泽辉等<sup>[14]</sup>用双螺杆机械搅拌方式制备半固态浆料; 研究了 AZ91D 镁合金半固态浆料的流变压铸成形工艺。结果表明, 半固态流变压铸成形比液态压铸成形的强度、伸长率分别提高 37%、44%, 并可施以热处理, 进一步提高性能。

姚亮宇等<sup>[15]</sup>研究了 AZ91D 镁合金在应变诱发熔化激活法处理过程中形变率和形变温度对组织的影响。结果表明, 随着形变率增加, 球状晶粒尺寸减小, 圆整度提高; 随形变温度的提高, 固相颗

粒的偏聚现象减轻。李元东等<sup>[16-18]</sup>在研究半固态 AZ91D 镁合金的重熔过程时发现, 增加冷却速率、预变形处理和晶粒细化有利于初始凝固组织中存在的非平衡组织的分散细化。并且提出半固态熔化过程可分为成分均匀化、共晶熔化及部分初生相的熔化和球化三个阶段。孙建林等<sup>[19]</sup>由一对带有螺纹的内外桶的旋转, 在其间的缝隙形成剧烈的剪切应力场的作用原理自行研制了镁合金浆料制备装置。

崔晓鹏等<sup>[20]</sup>研究了半固态触变注射成型镁合金的组织性能特点; 乐启焱等<sup>[21]</sup>研究了 AZ91D 镁合金在不同浇铸温度下组织的对比, 以及近液相线铸造时静置时间和不同冷却能力的铸模对组织形貌的影响; 毛卫民等<sup>[22]</sup>研究了电磁搅拌对半固态 AZ91D 镁合金组织的影响; 吴树森等<sup>[23]</sup>研究了半固态流变压铸 AZ91D 镁合金的组织与性能。这些研究表明, 半固态压铸试样的抗拉强度和伸长率比液态压铸试样有显著提高。

可见镁合金半固态的研究虽然很多, 但是主要集中在浆料制备、二次加热重熔、触变成形几个方面, 仅有的几个流变成形研究还在试验室阶段, 工艺还不很成熟, 与应用有一定的距离。虽然目前半固态流变成形技术应用很少, 但与触变成形相比, 流变成形更节省能源、流程更短、设备更紧凑, 因此流变成形技术是未来金属半固态加工技术的一个重要发展方向。研究开发镁合金的流变成形工艺具有重大的现实意义。

## 2 镁合金铸轧成形技术

铸轧技术是冶金材料领域的一项前沿技术, 它将连续铸造、轧制、甚至热处理等串联为一体, 铸出毫米级的薄带坯, 经在线轧制后一次性形成工业产品。铸轧技术具有以下优点: 在同一台设备上同时完成铸造和轧制两道工序, 相比热轧省去了铸锭加热、开坯及热轧等多道工序, 减少了废料, 节约了能源; 设备简单集中, 投资少, 建造速度快, 生产成本低; 可连续稳定地进行生产, 简化了生产工艺, 缩短了生产周期, 且便于实现自动化; 铸轧薄带品质不亚于传统工艺, 还可以生产出传统工艺难以轧制的材料以及具有特殊性能的新材料。

但是目前国内外主要把铸轧技术应用于钢铁

材料和铝合金, 而镁合金的连续铸轧技术研究更少。变形镁合金连续铸轧技术是目前世界范围内变形镁合金研究领域的前沿热门课题。目前, 国际上只有德国、澳大利亚掌握该技术, 且只能加工 6 mm × 400 mm 的变形镁带坯。我国的洛铜集团现已掌握这一短流程、低成本、具有高度技术原创性和世界先进性的成型技术<sup>[24]</sup>。另外, 东北大学的李铮<sup>[25]</sup>、李永林等<sup>[26]</sup>研究了 AZ31 镁合金薄带铸轧工艺过程, 对铸轧 AZ31 镁合金显微组织进行了分析。结果表明, 利用铸轧新工艺可消除偏析, 细化晶粒。将镁合金薄带在 240~300 进行热轧, 最大压下率达到了 50%。

### 3 镁合金半固态铸轧成形技术

将高效、节能、短流程的连续铸轧技术与半固态加工技术相结合, 得到半固态板带连续铸轧成形技术, 如图 1 所示。这是一种全方位、高效、节能、短流程、近终形的加工方法。将被轧制材料处理为半固态后, 送入轧辊间轧制时, 具有球状晶的半固态合金材料, 变形抗力很低, 对轧制成形有利。但是目前半固态铸轧技术的研究主要集中在铝合金以及钢铁材料, 而且较多的是研究半固态垂直双辊铸轧。

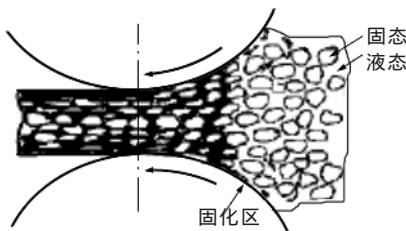


图 1 半固态轧制示意图

Watari H 等<sup>[27-29]</sup>在世界上第一次提出了一种镁合金薄板半固态双辊铸轧工艺, 其试验装置及制备过程如图 2 所示。采用带有冷却斜面的双辊带坯铸轧机, 冷却斜面主要是为了获得含球状晶体的半固态组织。漏斗中合金的温度 595~640、铸轧速度 10~30 m/min, 生产的带坯厚度 2.5~4.0 mm, 晶粒尺寸 10~15 μm。他们用镁合金 AZ31B、AZ91D、AM50A 和 AM60B 在铸轧速度为 25 m/min 时生产出 2.1~3.1 mm 厚的镁合金板。通过半固态过程热辊铸造的镁合金板可以用来塑性变形, 板件拉深比达到 2.1。

但是 Watari H 等的研究对设备的要求很高,

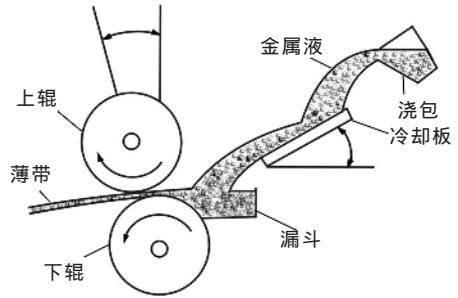


图 2 镁合金薄板半固态双辊铸轧工艺

为了增加冷却时间, 铸轧机上下辊存在倾角, 可以认为下辊起铸的作用, 上辊起轧的作用, 人为的把铸轧隔开了, 并不是常说的水平双辊铸轧, 只能说是带倾角水平双辊铸轧, 因此不能应用于普通水平双辊铸轧机。

我们课题组<sup>[30-32]</sup>把半固态加工技术和双辊水平连续铸轧技术结合起来, 即把半固态加工技术和普通水平铸轧机直接结合, 避免了设备的大改造, 再应用于镁合金的加工成形, 可以说是不同于以往的研究, 具有一定的创新性。

实验设备如图 3, 是水平双辊铸轧机。图 4 是得到半固态铸轧镁合金板带之后取样观察显微组织得到的结果, 可以看到铸轧之后组织非常圆整, 是典型的半固态组织。而且研究发现, 铸轧对半固态组织具有圆整化作用<sup>[33]</sup>。

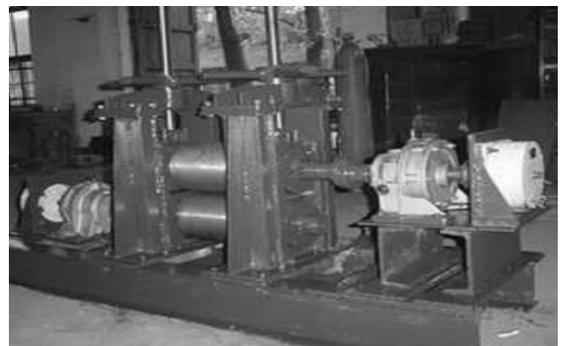


图 3 水平双辊铸轧机

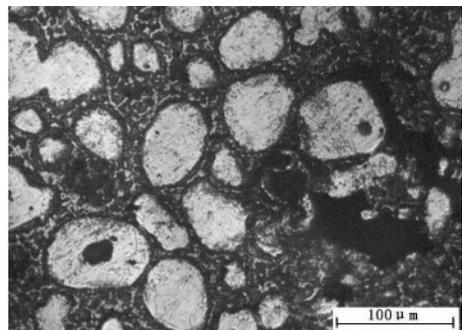


图 4 半固态铸轧镁合金板带显微组织

将半固态铸轧镁合金板带进行再加工实验,结果表明:AZ91D和AZ31B半固态镁合金铸轧板带都具有较大的变形能力(压下量)。反复弯曲板带仍不断裂,显示出良好的可塑性。AZ91D冷变形率达28%,热变形率达47%,AZ31B热变形率达57%,板带表面没有出现大的裂纹和破裂。

## 4 结语

由于镁资源丰富,镁合金具有良好的综合性能,因此镁合金具有广阔的应用前景。镁合金应用的关键是解决成形方面存在的问题。与发达国家相比,我国是产镁大国,但镁合金的加工成形技术有很大差距,随着镁合金应用需求的增加,开发具有高效、节能、低成本、短流程的成形技术,具有重要意义。面向21世纪,半固态铸轧成形技术是最有潜力、最有应用前景的镁合金成形技术。

### 参考文献:

- [1] 张丁非,彭建,丁培道,等. 镁及镁合金的资源、应用及其发展现状[J]. 材料导报, 2004, 18(4): 72-76.
- [2] Flemings M C. Behavior of Metal Alloys in the Semi-solid State [J]. Metall Trans., 1991, 22B(6): 269-293.
- [3] 蒋鹏,贺小毛,张秀峰.半固态金属成形技术的研究概况[J].塑性工程学报,1998, 5(3):1-7.
- [4] Eiji Yano, Noriya Wada, Naoki Nishikawa. Semi-solid Casting of Magnesium Alloy AZ91D using Inclined Cooling Plate [J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 2002,66(11): 1131-1134.
- [5] Kim JM, Kim K T. Effects of Isothermal Heating Procedure and Strontium Addition on Semi-solid Forming of AZ91 Magnesium Alloy [J]. Materials Science and Technology, 2002, 18 (6): 698-701.
- [6] Czerwinski F. Semisolid Extrusion Molding of Mg-9%Al-1%Zn Alloys [J]. Journal of Materials Science, 2004,39(2): 463-468.
- [7] Koren Z, Rosenson H, Gutman, E M. Development of Semi-solid Casting for AZ91 and AM50 Magnesium Alloys [J]. Journal of Light Metals, 2002,2(2): 81-87.
- [8] 李元东,郝远,陈体军,等. 冷却速率对AZ91D镁合金半固态组织制备的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(6): 19-22.
- [9] 熊爱华,袁森,王武孝.半固态镁合金充型性能研究[J].热加工工艺, 2005, (1): 26-28.
- [10] 王武孝,蒋百灵,介万奇. AZ91 镁合金半固态凝固组织特征的研究[J]. 铸造技术, 2004, 25(12): 927-929.
- [11] 姜巨福,罗守靖,王迎.等径角挤压AZ91D镁合金的半固态组织演变[J].中国有色金属学报, 2004, 14(5): 752-758.
- [12] 甄子胜,毛卫民,闫时建.连续冷却条件下半固态AZ91D合金的组织及流变特性[J].金属学报,2003,39(1): 71-74.
- [13] 徐跃,康永林,王朝晖.机械搅拌法制备半固态镁合金的组织及性能研究[J].铸造技术, 2004,25(9): 670-672.
- [14] 肖泽辉,罗吉荣,吴树森. AZ91D 半固态流变压铸成形的研究[J].热加工工艺, 2004, (2): 41-42.
- [15] 姚亮宇,袁森,王武孝. SIMA 法处理 AZ91D 镁合金压缩形变及半固态等温组织的特征[J].中国有色金属学报, 2004, 14 (4): 660-664.
- [16] 李元东,郝远,陈体军,等.原始组织对半固态AZ91D镁合金重熔行为的影响 [J].中国有色金属学报, 2004, 14(3): 366-371.
- [17] 李元东,郝远,陈体军. AZ91D 镁合金半固态挤压铸造的研究[J].热加工工艺, 2004, (1): 7-8.
- [18] 李元东,郝远,陈体军.等温热处理工艺对AZ91D镁合金半固态组织演变和成形性的影响 [J].中国有色金属学报, 2002, 12(6): 1143-1148.
- [19] 孙建林,康永林,肖邦国,等.镁合金半固态材料成形与浆料制备工艺研究[J].稀有金属, 2004, 28(1): 104-107.
- [20] 崔晓鹏,刘勇兵,刘喜明,等.半固态触变注射成型镁合金的组织与性能分析[J].汽车工艺与材料, 2004, (2): 22-25.
- [21] 乐启焱, 欧鹏. 镁合金半固态制浆新工艺 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(4): 371-374.
- [22] 毛卫民,甄子胜,陈洪涛.电磁搅拌对半固态AZ91D镁合金组织的影响[J].材料研究学报, 2005,19(3): 303-309.
- [23] 吴树森,李东南,毛有武.半固态流变压铸AZ91D镁合金的组织与性能[J].铸造, 2002, 51(10): 583-586.
- [24] 汪恒玉.变形镁合金连铸轧成型技术在洛铜取得突破性进展 [J].有色金属工业, 2005, (7): 93-93.
- [25] 李铮, 赵凯.双辊铸轧法生产变形镁合金薄带新工艺研究 [J].轻金属, 2003, (12): 35.
- [26] 李永林,李铮,邱洪双. AZ31 镁合金薄带直接铸轧新工艺[J].轻合金加工技术, 2004, 32(7): 15-17.
- [27] Watari H, Davey K, Rasgud M T, et al. Semi-solid Manufacture Process of Magnesium Alloys by Twin-roll Casting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, (155-156): 1662-1667.
- [28] Watari H. Mechanical Properties of Magnesium Alloy Sheets Produced by Semi-solid Roll Strip Casting [J]. Mater Sci Forum, 2003, 426(1): 617.
- [29] Watari H, Koga N. Formability of Magnesium Alloy Sheets Manufactured by Semi-solid Roll Strip Casting [J]. Mater Sci Forum, 2004, 427(1): 181.
- [30] XIE Shuisheng, GENG Maopeng, ZHOU Xinmin, et al. A New Technique of Casting-rolling Strips for Semi-solid Magnesium Alloys [J]. J. Mater. Sci. Technol, 2005, 21 (6): 785-787.
- [31] 耿茂鹏,张莹,张颂阳,等. AZ91D 半固态镁合金板带铸轧技术的研究 [A]. 第十一届中国有色金属学会材料科学与工程及合金加工学术交流会论文集[C]. 2005.7-11.
- [32] 张莹,耿茂鹏,饶磊,等.镁合金半固态双辊板带流变成形试验研究[J].热加工工艺, 2005, (10): 10-12.
- [33] 张颂阳,耿茂鹏,谢水生,等.铸轧对半固态镁合金组织的影响[J].塑性工程学报, 2006, 13(1): 82-85. [1]