

MB15-RE 镁合金铸坯在半固态温度下的 应力-应变曲线测试与特征分析

王艳彬^{1,2}, 门海豹³, 陈强^{1,2}, 吴茜², 林军^{1,2}, 朱世凤^{1,2}

(1. 国防科技工业精密塑性成形研究应用中心, 重庆 400039;

2. 中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039;

3. 北方通用动力集团公司, 山西 大同 037036)

摘要: 研究了 MB15-RE 镁合金常规铸坯在半固态温度下应力-应变曲线变化的影响要素。通过热模拟实验,发现 MB15-RE 在 560 °C 的半固态温度下应力-应变曲线均可分为 3 个阶段:应力上升阶段、应力下降阶段和应力稳定阶段;同时在相同应变速率下,合金温度越高,其应力峰值和稳态应力越低,表明曲线与在半固态温度下试样中固液态比例相关;在相同温度下,应变速率越大,峰值应力越大而稳态应力越小,表明了再结晶比例越高,稳态应力越低。

关键词: MB15-RE 镁合金; 铸坯; 半固态; 真应力-真应变曲线

中图分类号: TG146.22 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2012)03-0005-05

Experimental Study and Analysis of Stress-strain Curves for the MB15-RE Magnesium Alloys Casting Billet under the Semisolid Conditions

WANG Yan-bin^{1,2}, MEN Hai-bao³, CHEN Qiang^{1,2}, WU Qian², LIN Jun^{1,2}, ZHU Shi-feng^{1,2}

(1. National Defence Research and Application Center of Precision Plastic Forming Technology, Chongqing 400039, China;

2. No. 59 Research Institute Of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China;

3. North General Dynamic Group Corporation, Datong 037036, China)

Abstract: The influence factors on stress-strain curves of the MB15-RE magnesium alloys casting billet under the semi-solid conditions were studied. The results of thermal simulation experiment show, the all stress-strain curves in the semisolid temperature of 560 °C can be divided into rise, decline and stabilization stages. And under the constant strain rate, the higher temperature can reduce both the peak and steady-state stresses of MB15-RE, which shows the curves are affected by the ratio of phase of samples. In addition, under the same temperature the higher strain-rate can lead to the greater peak and lower steady-state stresses, which shows the greater ratio of recrystallization can lead to lower stabilization stress.

Key words: MB15-RE magnesium alloy; casting billet; semisolid; the true stress-strain curve

镁合金是在工程应用中密度最低的金属结构材料,具有高比强、高比模等优点,在汽车、电子、航空、

航天、国防等领域具有重要的应用价值和广阔的应用前景,被誉为“21 世纪绿色工程材料”。镁合金属

收稿日期: 2012-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51005217);中国博士后基金(201004806777);重庆博士后基金(渝 RC2011013)

作者简介: 王艳彬(1982—),女,湖南怀化人,助理工程师,主要从事热加工及精密成形技术领域的研究工作。

于密排六方结构,传统上被视为一种塑性成形性差的金属结构材料,因此其成形方式局限于铸造。液态镁合金凝固速度快,结晶范围宽,容易产生气孔、缩松、冷凝等缺陷,使得铸件力学性能不够理想,从而导致镁合金的使用性能和范围受到很大限制^[1]。镁合金半固态加工的出现为扩大镁合金的应用范围带来了曙光,它具有加工成本低,零件性能优良的特点,得到了众多研究者和企业界的关注。镁合金半固态加工的前提是制备非枝晶组织的半固态坯料或浆料。目前制备合金半固体坯的方法主要有机械搅拌法、电磁搅拌法、应变诱导熔化激活法和半固态等温热处理法^[2]。文中研究在半固态温度区间压缩铸态镁合金坯料,研究不同压缩温度和应变速率状态下,镁合金的真应力-真应变曲线。

1 试验材料及方法

研究采用铸态 MB15-RE 镁合金,其化学成分采用等离子直读光谱分析,见表 1。

表 1 MB15-RE 镁合金成分(质量分数,%)

Table 1 Composition of MB15-RE magnesium alloy

元素	Zn	Zr	Al	Nd	La	Pr	Mg
质量分数	5.294	0.772	0.491	1.139	0.511	0.282	余量

为了较为准确反应 MB15-RE 镁合金不同温度下的固相率,研究采用 MATLAB 编程,进行图像处理。MATLAB 语言编程分析半固态合金金相图片具有程序简单、易修改、适应性强、识别效果好、运行速度快和操作简易等优点。半固态金相照片中,固相与液相有明显的颜色差别,固相为白色部分,液相为黑色背景部分。固相率为白色图像像素个数/总像素个数。图像二值化后,白色图像部分像素值为 1,黑色背景部分像素值为 0,那么容易编程计算固相率。为了减小误差,在研究中对同一试样不同区域取像,然后取其平均值。根据图 1 可知,550、560 和 570 °C 下,MB15-RE 的固相率分别是 86%,83% 和 80%。

采用的半固态温度下的应力-应变曲线测试试样为 MB15-RE 镁合金常规铸坯,直接由所制备的坯料车加工成 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱体。

测试设备为 Gleeble-1500D 热模拟试验机,电阻加热。该热模拟试验机水平夹持试样,为了降低

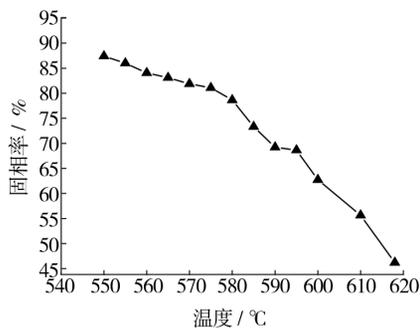


图 1 MB15-RE 温度与固相率的关系

Fig. 1 The relationship between temperature and solid phase volume fraction

试样与夹头之间的摩擦力,减小摩擦力对真实应力计算值的影响,将石墨片垫在夹头与试样端面之间。影响半固态温度下坯料流变性能的参数主要有加热温度、应变速率和保温时间。试样试验时的加热温度为 5 °C/s,总应变为 0.7。试验旨在研究加热温度(固相率)和应变速率(剪切速率)对合金流变性能的影响。首先将常规铸坯试样进行预处理,即将铸坯试样流变试验前在预定温度下保温 7 min 制得坯料,流变试验的加热温度分别为 550、560 和 570 °C,应变速率分别为 1×10^{-2} , 1×10^{-1} 和 1 s^{-1} ,保温时间为 30 s。

2 试验结果与讨论

2.1 铸态 MB15-RE 镁合金微观组织

铸态 MB15-RE 镁合金等温热处理前的微观组织形貌如图 2 所示。MB15-RE 镁合金的晶粒为等轴晶,平均晶粒尺寸 120 μm 。微观组织是由 $\alpha\text{-Mg}$,

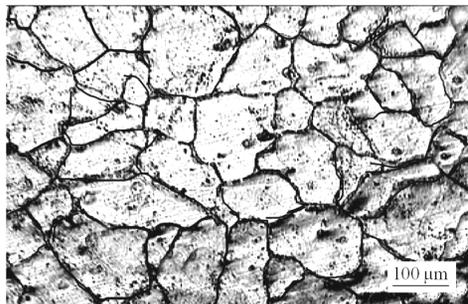


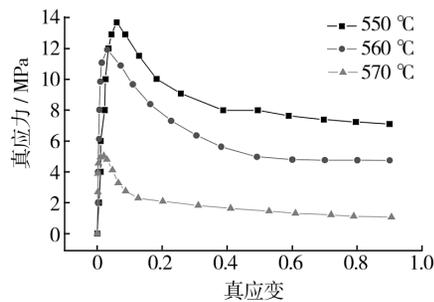
图 2 铸态 MB15-RE 镁合金原始组织

Fig. 2 Microstructure of as-cast MB15-RE magnesium alloy

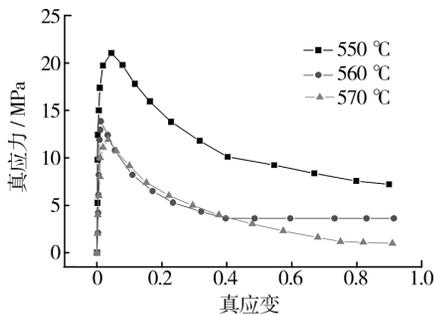
晶界处 Mg 和 Zn 的共晶化合物,以及 Mg 与稀土元素形成的中间相物质构成。Zr 元素一部分溶于 α -Mg 形成置换固溶体,而一部分 Zr 成为 α -Mg 的初生晶核,呈弥散分布于 α -Mg 中^[2]。

2.2 MB15-RE 镁合金固-液两相温度区间的流变应力分析

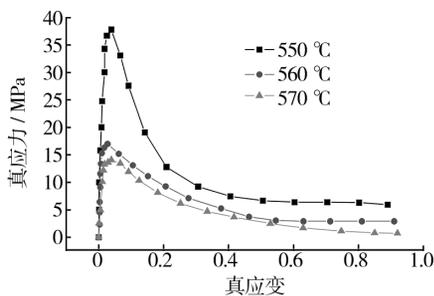
MB15-RE 镁合金试样加热到固-液两相温度区间的应力-应变曲线如图 3、图 4 和图 5 所示。可以将半固态温度下 MB15-RE 镁合金的触变过程分为 3 个阶段。



a 应变速率 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$



b 应变速率 $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$

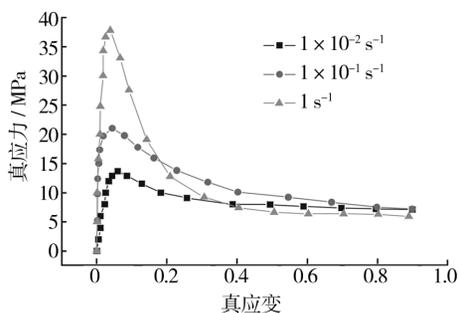


c 应变速率 1 s^{-1}

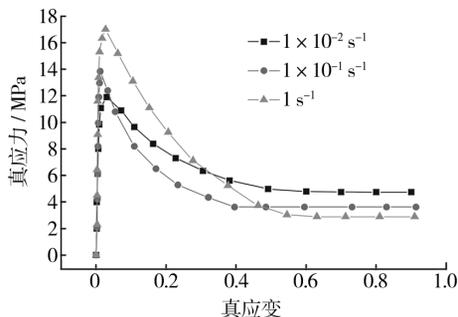
图 3 经过预处理的 MB15-RE 镁合金常规铸坯不同半固态温度下的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of as-cast MB15-RE magnesium alloy prepared by pretreatment at different semi-solid temperature ranges

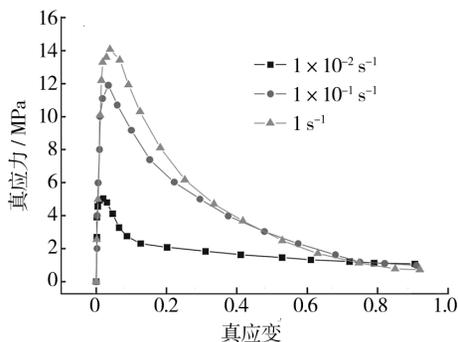
1) 应变值从 0 增加到 0.06 附近,称为应力上升阶段。重熔后的 MB15-RE 镁合金由球形的初生



a 加热温度 550 °C



b 加热温度 560 °C



c 加热温度 570 °C

图 4 经过预处理 MB15-RE 镁合金常规铸坯不同应变速率下的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of as-cast MB15-RE magnesium alloy prepared by pretreatment at different strain rates

α -Mg 固相和共晶液相组成。在变形初期试样受到压应力时,液相沿固相周围流动和组织致密化使材料变形,出现了应力剧增阶段,很快达到应力峰值。当固相率较高液相相对较少时,试样的变形主要靠固相粒子的滑动,因而随着应变的增加,应力上升速度很快。当液相体积分数增加到一定程度时,由于固相颗粒间有大量液相存在,使得固相颗粒间相对滑动、转动变得容易,试样的变形主要靠固相粒子的滑动以及液相流动共同完成,因而随着压缩应变的增加,应力上升相对较慢。值得注意的是,在等温压缩过程中,液相体积分数过高(大于 40%),试样在

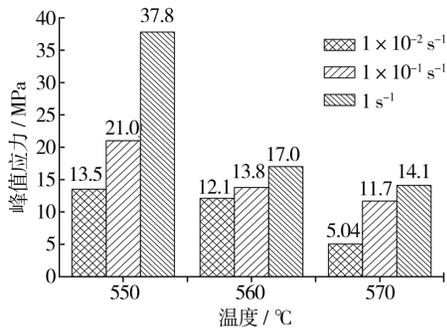


图5 经过预处理的MB15-RE镁合金常规铸坯在不同加热温度和应变速率下的峰值应力

Fig. 5 Peak stresses of as-cast MB15-RE magnesium alloy prepared by pretreatment at different temperatures and strain rates

加热过程中,难以夹持,不能进行应力-应变曲线测试试验。

2) 应变值超过 0.06,随着应变的增加,应力逐渐下降,这一阶段为应力下降阶段。在这一阶段,初生 α -Mg 骨架或初生 α -Mg 颗粒团聚体被破坏,这时变形所需的载荷主要克服固-液之间的作用力和固相颗粒之间的摩擦力,呈现应变软化现象。

3) 应力随着应变的增加而趋向相对稳定阶段。在该阶段,初生 α -Mg 骨架或初生 α -Mg 颗粒团聚体被破坏,达到一定程度后应力值维持相对稳定。

2.3 加热温度的影响

在应变速率一定的情况下,经过预处理(坯料在二次加热前等温热处理 7 min,然后激冷)的常规铸坯在半固态区间内的不同温度下,保温 30 s 后的应力-应变曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出,在相同的应变速率下,加热温度越高,压缩变形时的应力越低;加热温度越低,压缩变形时的应力越高。加热温度的高低影响 MB15-RE 镁合金的固相率和固相颗粒作用力的大小。当变形温度较低时,即合金的固相率较高,合金熔化不充分,固相颗粒间的“约束”未被完全破坏,晶界未被润湿,合金的变形主要靠固相粒子的相互滑移实现。合金的变形力要克服固相粒子滑移所产生的摩擦力和周围固相粒子对它的阻力^[3]。当加热温度较高,即合金的固相率较低,液相比例加大,固相颗粒完全被润湿,此时变形主要通过液相的流动或固相粒子与液相共同移动来实现,因而变形应力相对较低。总之,加热温度升高,液相增

多,固相颗粒连接部分减少,更多的液相起到了“润滑”作用,宏观表现为应力降低。

2.4 应变速率的影响

在一定加热温度下,应变速率对经过预处理的常规铸坯 MB15-RE 镁合金试样压缩变形影响的应力-应变曲线如图 4 所示。从图 4 可看出,在相同的加热温度下,应变速率越大,峰值应力越大,稳态应力越小。产生这种现象的原因是:在高应变速率下,试样中的液相来不及排挤出来并对变形产生阻力,因此应力的最大值很高。随后由于剪切速率较高,固相颗粒易被打碎,固相包裹的液相被排挤出来,使固相颗粒间的液相量相对集中,此时滑移和流动容易,应力下降很快;相反,当应变速率较低时,应力作用时间相对较长,试样中的液相慢慢被排挤出来,降低了变形抗力。后期由于剪切速率降低,剪切力对半固态温度下组织中固相形态和液相分布的改变作用较弱,流动应力反而高于应变速率高时的应力值,即应变速率越大,稳态应力值越小^[4]。另外,应变速率很低时,随时间延长,固相颗粒粗化并包裹液相,也是导致应力稳态值增高的又一个原因^[5]。

MB15-RE 镁合金在不同加热温度和不同应变速率下的峰值应力如图 5 所示。半固态其峰值应力是加工和设计成形设备的基础。在 MB15-RE 镁合金坯料进入模腔之前,先经历一个触变流动的初始化过程,即对 MB15-RE 镁合金施加超过该条件下的峰值应力,这样就可使坯料在模腔内流动,有利于充填^[6]。

2.5 晶粒大小的影响

MB15-RE 镁合金常规铸坯的半固态温度下的等温压缩应力-应变曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出,合金的峰值应力随应变速率的增加而增加;稳态应力随应变速率的增加而降低。

MB15-RE 镁合金在 560 °C 保温 0.5 s 的微观组织如图 7 所示。可以看出,常规铸坯固相粒子周围液相缺乏,比较“干涸”,但在局部区域液相相对集中,液相不能很好地润湿固相粒子。可见,固相粒子的大小影响了液相的分布,如果粒子越小,液相的分布越均匀,液相充当“润滑剂”的效果越明显,宏观表现为峰值应力和稳态应力降低。

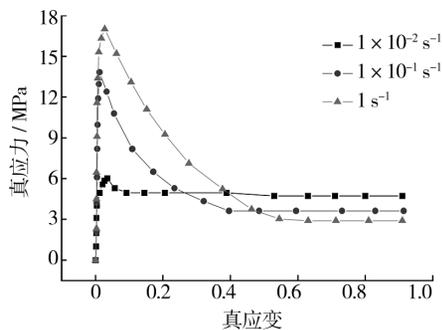


图6 MB15-RE 镁合金常规铸坯 560 °C 的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of as-cast MB15-RE magnesium alloy prepared by pretreatment at 560 °C

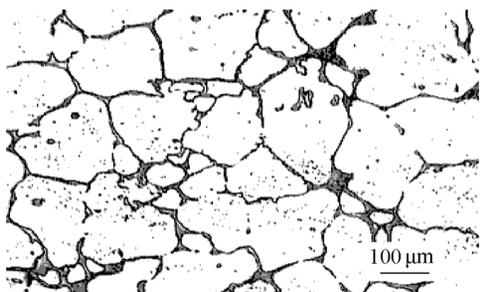


图7 MB15-RE 镁合金常规铸坯 560 °C 的微观组织

Fig. 7 Microstructure of as-cast MB15-RE magnesium alloy at 560 °C

3 结语

1) MB15-RE 镁合金常规铸坯在 560 °C 半固态

(上接第4页)

生物原型结构,并在模具表面“复制”,可提高模具寿命 1~1.5 倍。

2) 有别于传统模具表面整体激光强化技术,从植物叶片抗开裂角度,提出模具表面裂纹局部激光仿生阻断其发展,为提高模具寿命提供了一种新的方法。

参考文献:

- [1] 黄升金,谢长生,许德胜. 脉冲激光熔凝和相变硬化的研究现状[J]. 激光技术, 2004, 27(2): 130-133.
- [2] 王福德,胡乾午,曾晓雁. ZL108 镍基粉末激光表面合金化气孔与裂纹的研究[J]. 应用激光, 2004, 24(5): 264-268.
- [3] 周宏,张志辉,任露泉,等. 仿生非光滑表面 45 # 钢模具的热疲劳性能[J]. 材料科学与工艺, 2004, 12(6): 561-564.

温度的真应力-真应变曲线都可分为 3 个阶段:应力上升阶段、应力下降阶段和应力稳定阶段。

2) MB15-RE 镁合金常规铸坯在相同应变速率下,合金温度越高,其应力峰值和稳态应力越低;在相同温度下,应变速率越大,峰值应力越大,稳态应力越小。

参考文献:

- [1] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京:化学工业出版社, 2005:1-6.
- [2] 康永林,毛卫民. 金属材料半固态加工理论与技术[M]. 北京:科学出版社, 2004:153-193.
- [3] 罗守靖,杜之明. 液相线模锻制备半固态坯料方法:中国,01116406[P]. 2002-11-20.
- [4] JOLY P A, MEHRABIAN R. The Rheology of a Partially Solid Alloy[J]. Materials Science, 1976 (11): 1393-1418.
- [5] BRABAZON D, BROWNE D J, CARR A J. Experimental Investigation of the Transient and Steady State Rheological Behavior of Al-Si Alloys in the Mushy State[J]. Materials Science And Engineering, 2003: 69-80.
- [6] 陈强. MB15-RE 镁合金半固态温度等温组织演变及流变性实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.
- [4] JERONIMIDS G, ATKINS A G. Mechanics of Biological Materials and Structures: Nature's Lessons for the Engineer[C]. Proc Instn Mech Engrs, 1995, 209: 221-235.
- [5] REN L Q, HAN Zhi-wu, LI Jian-jiao, et al. Effects of Non-smooth Characteristics on Bionic Bulldozer Blades in Resistance Reduction Against Soi[J]. Journal of Terramechanics, 2002, 39(4): 21-230.
- [6] 任露泉,周宏,沈中虎,等. 一种增强金属工件表面的仿生非光滑工艺方法和制备装置:中国, 200610016699 [P]. 2006-11-15.
- [7] ZHANG Zhi-hui, ZHOU Hong, REN Lu-quan, et al. Effect of Units in Different Sizes on Thermal Fatigue Behavior of 3Cr2W8V Die Steel with Biomimetic Non-smooth Surface[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(3): 468-475.