

真空增压铸造对 Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金工艺性能和力学性能的影响

陶健全，李晓松，柴舒心，邓天泉，孙昌建

(西南技术工程研究所，重庆 400039)

摘要：目的 通过真空增压工艺改善 Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金的铸造性能和力学性能。**方法** 采用螺旋法、热裂环法、线收缩率测试方法，分别测试了不同真空度、浇注温度、凝固压力下合金的流动性、热裂倾向和收缩率。采用万能拉伸机测试合金的力学性能，采用金相显微镜观察合金的显微组织，采用截线法测量平均晶粒尺寸。**结果** 重力下 Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金的螺旋长度为 240~270 mm，裂环宽度为 10~15 mm；真空下的螺旋长度为 245~330 mm，裂环宽度为 7.5~12.5 mm；凝固压力从 0.2 MPa 提升至 0.8 MPa，合金的抗拉强度从 320 MPa 提升至 335 MPa，断后伸长率从 4.5% 提升至 6.0%。**结论** 提高真空度、浇注温度，可显著提升合金的充型能力；提高凝固压力、降低浇注温度，可明显降低合金的热裂倾向；凝固压力越高、真空压力转换时间越短，合金的组织越致密，力学性能越高。

关键词：镁合金；真空增压；工艺性能；力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.05.020

中图分类号：TG249.2 文献标识码：A 文章编号：1674-6457(2017)05-0139-05

Effects of Vacuum Casting and Solidification under Pressure on Process Performance and Mechanical Properties of Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr Alloy

TAO Jian-quan, LI Xiao-song, CHAI Shu-xin, DENG Tian-quan, SUN Chang-jian

(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The paper aims to improve the casting process performance and mechanical properties of Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr alloy by vacuum casting and solidification under pressure. The mobility, hot cracking tendency and shrinkage ratio of the alloy under different vacuum degree, pouring temperature and solidification pressure were tested by spiral method, hot cracking method and line shrinkage test method, respectively. The mechanical properties of the alloy were tested by a universal testing machine. The microstructures were observed by a metallographic microscope, and the average grain size was measured by truncation. The spiral length of Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr alloy was 240~270 mm, the width of hot cracking was 10~15 mm by gravity casting; and the spiral length was 245~330 mm, the width of hot cracking was 7.5~12.5 mm by vacuum casting. The solidification pressure increased from 0.2 MPa to 0.8 MPa, the tensile strength increased from 320 MPa to 335 MPa, and the elongation increased from 4.5% to 6.0%. Increasing the vacuum degree and pouring temperature can improve the filling properties. Increasing the pouring pressure and reducing the pouring temperature can significantly reduce the hot cracking tendency. The higher the solidification pressure, the shorter the vacuum pressure conversion time, the denser the microstructures and the higher the mechanical properties.

KEY WORDS: magnesium alloy; vacuum casting and solidification under pressure; process performance; mechanical properties

收稿日期：2017-07-26

作者简介：陶健全（1983—），男，硕士，工程师，主要研究方向轻合金材料与成形工艺。

镁合金是最轻的金属结构材料，在航空航天、交通、电子和家电等行业具有广泛的应用前景^[1~5]。稀土作为重要的合金化元素，在镁合金的合金化方面具有得天独厚的优势。稀土元素的加入可明显提高镁合金的各种性能，尤其是室温及高温力学性能^[6~10]。随着稀土元素含量的增加，镁合金的铸造工艺性能趋于恶化，如流动性差、热裂倾向大，导致工艺难度大，铸件合格率低，生产成本高。在高性能稀土铸造镁合金新材料开发过程中，通过合金成分优化和特种铸造工艺，改善其铸造工艺性能，是扩大高性能稀土镁合金应用的主要途径^[11~15]。文中采用真空增压铸造工艺，研究了不同铸造工艺参数下 Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金的铸造工艺性能和力学性能。

1 实验

Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金在坩埚电阻炉中熔炼，将坩埚预热至暗红色，加入质量分数为 99.96% 的 Mg 锭、99.9% 的纯 Zn 锭、Mg-30Gd, Mg-30Y, Mg-30Nd 中间合金，熔化至 780 °C，氩气搅拌 3~5 min，加入 Mg-30Zr 中间合金，升温至 820 °C，精炼 15~20 min，静置 30~60 min，降温至浇注温度，熔炼全程用 RJ-6 熔剂保护，实验合金含有质量分数为 5.89% 的 Y, 2.12% 的 Nd, 0.96% 的 Gd, 0.48% 的 Zr, 0.62% 的 Zn, 余量为 Mg₉₀。

采用螺旋法测试不同真空度、浇注温度下合金的流动性；采用热裂环法测试不同浇注温度和凝固压力条件下合金的热裂倾向，制备 2 个厚度为 5 mm、直径为 108 mm 圆盘型腔，并在各自的中心分别安置钢芯，在内浇道的对面安置冷铁，使环形试样在内浇道处形成热裂。以首次出现热裂纹的环形试样的宽度作为合金的热裂倾向的指标，其值愈大，对热裂愈敏感；采用非铁合金线收缩率测试方法测试不同浇注温度下合金的线收缩率；采用树脂砂型模具浇注标准拉伸试样，试样经 T6 处理后，采用 CSS-44100 型电子万能拉伸机测试合金的力学性能，拉伸力为 2 kN，拉伸速度为 2 mm/min，在同一状态下测试 3 根试样，取平均值；重力铸造和真空增压铸造合金的显微组织观察在 OLYMPUS-GX71 金相显微镜上进行，显微组织腐蚀液为体积分数为 5% 的硝酸酒精，平均晶粒尺寸采用截线法测量。

2 结果与分析

2.1 真空增压参数对 Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金铸造工艺性能的影响

真空度、浇注温度对 Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金流动性的影响见图 1。可以看出，合金充型能力受到浇

注温度、真空度等因素的影响较大，提高浇注温度，螺旋长度值增加。在重力下浇注，浇注温度从 740 °C 提高至 780 °C，Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金的螺旋长度从 240 mm 提高至 270 mm。在同一浇注温度下，提高真空度，合金流动性越好。浇注温度为 760 °C 时，重力条件下螺旋长度为 251 mm，真空度为 -0.04 MPa 时，螺旋长度增加至 285 mm，真空度为 -0.08 MPa 时，螺旋长度增加至 310 mm。

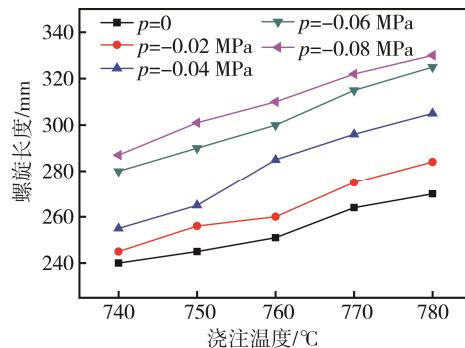


图 1 真空度、浇注温度对流动性的影响
Fig.1 Effect of vacuum degree and pouring temperature on filling properties

镁合金结晶间隔宽、结晶潜热小，合金液充型过程中形成骨架的能力强，凝固速度较快，故镁合金充型能力差。在真空条件下，可大幅降低铸型型腔的气体含量，减少氧化夹杂的同时，降低充型过程中气体的反压力和充型前端固相分数，降低凝固速度，延长合金液的保持时间，因此，提高浇注温度和真空度，可显著提高合金的充型能力。

不同浇注温度及凝固压力下 Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金热裂倾向见图 2。可以看出，Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金浇注温度越高，热裂倾向愈大，在重力条件下，浇注温度 740, 760, 780 °C 时，裂环宽度分别为 10, 12.5, 15 mm。在压力条件下，合金热裂倾向较小。在 760 °C 浇注温度条件下，提高凝固压力，裂环宽度从 12.5 mm 降低至 7.5 mm。镁合金的热裂是在凝固过程中产生的，即在大部分合金已经凝固，在枝晶间还

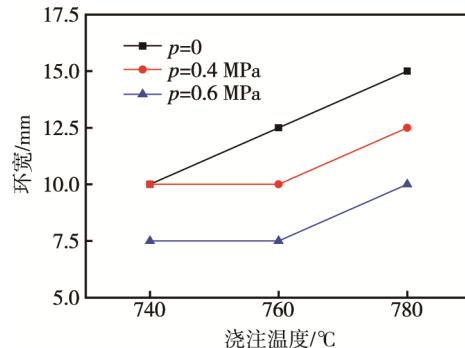


图 2 浇注温度、凝固压力对热裂倾向的影响
Fig.2 Effect of pouring temperature and solidifying pressure on hot crack tendency

有少量液体产生时, 合金的线收缩量大, 此时强度较低, 铸件产生较大的收缩应力作用于热节处, 当热节处的应变量大于合金在该温度条件下的允许应变量时, 易产生热裂。在压力下凝固驱使处于液固两相区中的金属液, 进入固相骨架间隙内进行补缩, 可降低热裂倾向。

Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金不同浇注温度下的线收缩率见图 3。随浇注温度的增加, 合金线收缩率逐渐增大, 浇注温度为 700~720 °C 时, 收缩率为 1.2%, 当浇注温度增加到 780~800 °C 时, 线收缩率增加到 1.5%。

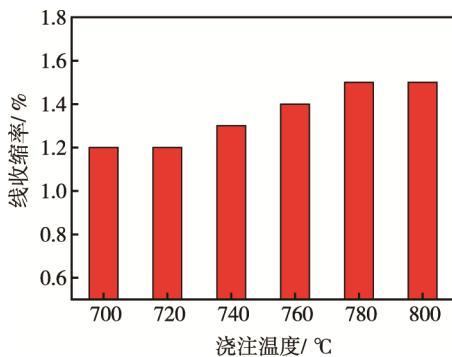


图 3 Mg-Y-RE 合金不同浇注温度下的线收缩率
Fig.3 The shrinkage of Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr alloy for different pouring temperatures

Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金铸造工艺性能见表 1。合金的线收缩率为 1.2%~1.5%。重力条件下合金流动性为 240~270 mm, 裂环宽度为 10~15 mm; 真空增压条件下流动性为 245~300 mm, 裂环宽度为 7.5~12.5 mm, 因此, 真空增压铸造工艺可提高合金的充型能力、降低热裂倾向。

表 1 Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金的铸造工艺性能
Tab.1 The casting process performance of Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr alloy

铸造工艺	流动性		抗热裂性
	浇注温度 / °C	螺旋长度 / mm	
重力铸造	740~780	240~270	10~15
真空增压铸造	740~780	245~300	7.5~12.5

2.2 真空增压参数对 Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金力学性能的影响

采用卧式真空增压铸造机, 在浇注温度为 760 °C 时, 不同凝固压力、真空压力转换时间条件下浇注成形的 Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金砂型铸造力学性能测试试样见图 4。拉伸试样经 T6 (525 °C×12 h+225 °C×12 h) 处理后, 测试其力学性能。

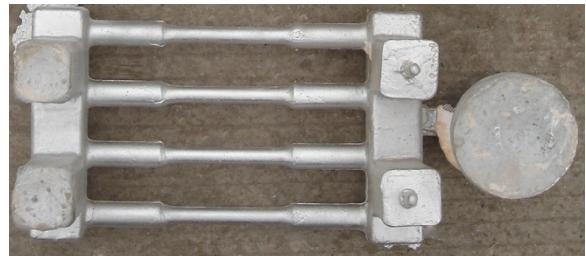


图 4 真空增压成形的拉伸试样
Fig.4 The mechanical properties test samples by vacuum casting and solidification under pressure

凝固压力、操作时间与 Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金抗拉强度和断后伸长率的关系曲线见图 5。可以看出, 合金在压力下凝固, 可显著提升抗拉强度和断后伸长率。当真空压力转换时间为 10 s 时, 凝固压力从 0.2 MPa 提升至 0.8 MPa, 合金的抗拉强度从 320 MPa 提升至 335 MPa, 断后伸长率从 4.5% 提升至 6.0%。另外, 真空压力转换时间对性能也有较大影响, 同一凝固压力条件下, 转换时间越短, 合金的力学性能越高。当凝固压力为 0.6 MPa 时, 真空压力转换时间从 10 s 增加至 40 s, 合金的抗拉强度从 330 MPa 降低至 310 MPa, 断后伸长率从 5.5% 降低至 4.0%。

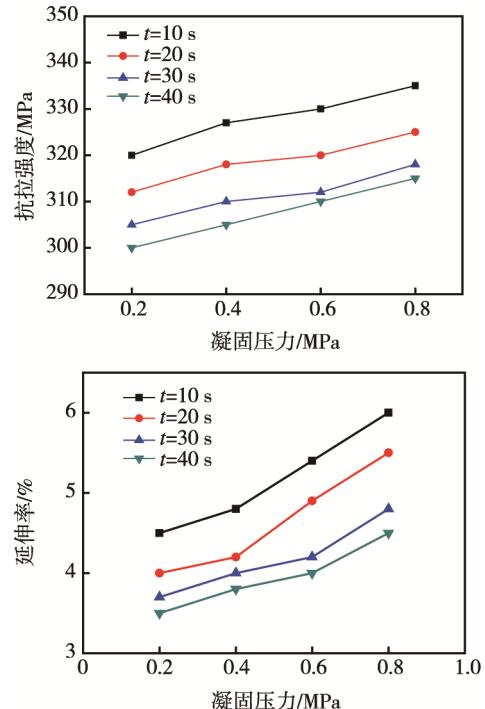


图 5 凝固压力、真空压力转换时间对力学性能的影响
Fig.5 Effect of the solidifying pressure and the time for manipulation on mechanical properties

压力下凝固可明显改善合金的凝固组织, 重力和真空增压浇注 Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金的铸态金相显微组织见图 6。可以看出, 重力浇注条件下, 合金晶粒粗大, 平均晶粒尺寸约 180 μm; 压力条件下浇注凝固的试样, 组织致密细小, 平均晶粒尺寸约 100 μm。

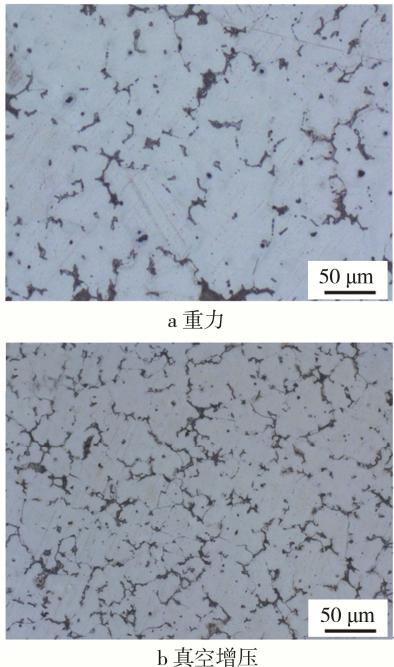


图 6 Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金的铸态金相显微组织
Fig.6 The metallographic microstructure for casting of Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr alloy

疏松形成判据见式(1)。

$$\frac{G_{sc}\sqrt{P_{sc}}}{R_{sc}} \leq K_c \quad (1)$$

式中: G_{sc} 为临界固相率的温度梯度; R_{sc} 为临界固相率的冷却速度; P_{sc} 为临界固相率的压力; K_c 为判据数。由式(1)可知, 在压力下凝固, 可驱使液固两相区中的合金液进入固相骨架间隙内进行补缩, 从而阻止缩松的形成; 凝固压力越高, 获得的组织越致密, 其力学性能就越好。

3 结论

1) 提高真空度、浇注温度, 可显著提升合金的充型能力; 提高凝固压力、降低浇注温度, 可明显降低合金的热裂倾向。

2) 重力下 Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金的螺旋长度为 240~270 mm, 裂环宽度为 10~15 mm; 真空下螺旋长度为 245~330 mm, 裂环宽度为 7.5~12.5 mm。

3) 凝固压力越高、真空压力转换时间越短, Mg-Y-Nd-Gd-Zn-Zr 合金的组织越致密, 抗拉强度和断后伸长率越高。

参考文献:

- [1] 赵怿, 董刚, 赵博, 等. 镁合金在航空领域应用的研究进展[J]. 有色金属工程, 2015, 5(2): 23—27.
ZHAO Yi, DONG Gang, ZHAO Bo, et al. Research Progress of Magnesium Alloy Application in Aviation Manufacturing[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2015, 5(2): 23—27.
- [2] 姚灿, 郭芳琼. 铸造镁合金在先进航空发动机上的应用[J]. 装备制造技术, 2015(1): 122—124.
YAO Can, GUO Fang-qiong. Application of Cast Magnesium Alloy in Advanced Aero Engines[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(1): 122—124.
- [3] 于建民, 张治民, 李旭斌, 等. 热处理工艺对 Mg-Gd-Y-Nd-Zr 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(12): 1240—1243.
YU Jian-min, ZHANG Zhi-min, LI Xu-bin, et al. Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Gd-Y-Nd-Zr Magnesium Alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(12): 1240—1243.
- [4] 张艳平, 陶健全, 李晓松, 等. Mg-Y-Nd-Zr-Zn 铸造镁合金组织与性能研究[J]. 精密成形工程, 2016, 7(4): 83—86.
ZHANG Yan-ping, TAO Jian-quan, LI Xiao-song, et al. Microstructure and Properties of Mg-Y-Nd-Zr-Zn Casting Magnesium Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 7(4): 83—86.
- [5] YONG Hu, LI Rao, NI Xu-wu. Effect of Isothermal Heat Treatment on Semi-solid Microstructure of AZ91D Magnesium Alloy Containing Rare Earth Gd[J]. China Foundry, 2015(4): 20—25.
- [6] 唐昌平, 刘文辉, 陈宇强, 等. Y 含量对铸造 Mg-Gd-Y-Nd-Zr 合金组织与性能的影响[J]. 材料导报, 2016, 30(16): 86—90.
TANG Chang-ping, LIU Wen-hui, CHEN Yu-qiang, et al. Effects of Y Content on Microstructures and Mechanical Properties of Mg-Gd-Y-Nd-Zr Casting Alloy[J]. Materials Review, 2016, 30(16): 86—90.
- [7] AZZEDDINE H, BRADAI D. On Some Aspects of Compressive Properties and Serrated Flow in Mg-Y-Nd-Zr Alloy[J]. Journal of Rare Earths, 2013(8): 804—810.
- [8] 陈巧旺, 汤爱涛, 许婷熠, 等. 高性能铸造稀土镁合金的发展[J]. 材料导报, 2016, 30(17): 1—9.
CHEN Qiao-wang, TANG Ai-tao, XU Ting-yi, et al. High Performance Cast Magnesium Rare-earth Alloys: Retrospect and Prospect[J]. Materials Review, 2016, 30(17): 1—9.
- [9] WANG Zhao-hui, DU Wen-bo, WANG Xu-dong, et al. Microstructure Evolution of Mg-9Gd-2Er-0.4Zr Alloy during Solid Solution Treatment[J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2013, 23(3): 593—598.
- [10] 段红玲, 张丁非, 戴庆伟, 等. 镁合金强化研究的发展现状[J]. 材料导报, 2007, 21(Z2): 310—312.
DUAN Hong-ling, ZHANG Ding-fei, DAI Qing-wei, et al. Research and Development Status of Strengthening for Magnesium Alloys[J]. Materials Review, 2007, 21(Z2): 310—312.
- [11] WANG Jing, SHI Bao-liang, YANG Yuan-sheng. Hot Compression Behavior and Processing Map of Cast

- Mg-4Al-2Sn-Y-Nd Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014(3): 626—631.
- [12] 陈旭, 蒋文明, 王本京, 等. 机械振动对消失模型壳铸造镁合金充型能力的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(1): 70—73.
CHEN Xu, JIANG Wen-ming, WANG Ben-jing, et al. Influence of Mechanical Vibration on Filling Ability of AZ91D Magnesium Alloy Produced by Expendable Pattern Shell Casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35(1): 70—73.
- [13] 王东军, 李庆奎, 关绍康, 等. 锡和混合稀土对 AZ31 镁合金铸造性能的影响[J]. 铸造技术, 2005, 26(10): 977—979.
WANG Dong-jun, LI Qing-kui, GUAN Shao-kang, et al.
- Effect of Antimony and Mischmetal on the Casting Properties of AZ31 Alloy[J]. Foundry Technology, 2005, 26(10): 977—979.
- [14] 孙昌建, 舒大禹, 王元庆, 等. 大型复杂薄壁铝合金铸件真空增压铸造特性研究[J]. 铸造, 2008, 57(5): 442—445.
SUN Chang-jian, SHU Da-yu, WANG Yuan-qing, et al. Vacuum Pressurizing Casting Technique for Large-Scale Complicated and Thin-Wall Al-Alloy Components[J]. Foundry, 2008, 57(5): 442—445.
- [15] JANK V, HNILICA F, ZUNA P, et al. Cavitation and Grain Boundary Sliding during Creep of Mg-Y-Nd-Zn-Mn Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(Z1): 64—68.