

挤锻复合成形汽车高强镁合金的组织与性能

武卫民¹, 孙晨宇²

(1. 山西工程科技职业大学 汽车工程学院, 山西 晋中 030600; 2. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为了研究挤锻复合成形汽车高强镁合金的显微组织和力学性能, 采用挤锻复合成形方法制备了 Mg-6Al-4Sn 汽车用高强镁合金试样, 并采用金相和扫描电镜方法进行了试样的显微组织分析, 以及室温条件下试样的力学性能测试和拉伸断口扫描电镜分析。结果表明: 挤锻复合成形可以获得组织细小、力学性能优良的 Mg-6Al-4Sn 汽车用高强镁合金, 合金内部晶粒细小、组织分布均匀性较好、平均晶粒尺寸约为 6.2 μm , 基体上分布有类似球形的大颗粒状 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相和呈弥散分布的细小颗粒状 Mg_2Sn 相。挤锻复合成形 Mg-6Al-4Sn 汽车用高强镁合金的抗拉强度为 312 MPa、屈服强度为 268 MPa、断后伸长率为 15.6%, 拉伸断口呈现韧窝状花样, 同时伴随着均匀分布的撕裂棱, 表现为较为明显的韧性断裂特点。

关键词: 汽车材料; Mg-6Al-4Sn 镁合金; 挤锻复合成形; 显微组织; 力学性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.005

中图分类号: TG379; TG319

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 12-0027-04

Microstructure and properties of automotive high-strength magnesium alloy by extrusion-forging compound forming

Wu Weimin¹, Sun Chenyu²

(1. School of Automotive Engineering, Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Jinzhong 030600, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to study the microstructure and mechanical properties of automotive high-strength magnesium alloy by extrusion-forging compound forming, Mg-6Al-4Sn high-strength magnesium alloy specimens for automotive were prepared by extrusion-forging compound forming method, and the microstructure of specimen was analyzed by metallography and SEM. Then, the mechanical properties of specimen were tested at room temperature, and the tensile fracture of specimen was analyzed by SEM. The results show that Mg-6Al-4Sn automotive high-strength magnesium alloy with fine microstructure and good mechanical properties can be obtained by extrusion-forging compound forming, the internal grains of alloy are fine, the structure distribution is relatively uniform, the average grain size is about 6.2 μm , and there are spherical large granular $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ phase and dispersed fine granular Mg_2Sn phase on the matrix. The tensile strength of Mg-6Al-4Sn automotive high-strength magnesium alloy by extrusion-forging compound forming is 312 MPa, the yield strength is 268 MPa, the elongation after fracture is 15.6%, and the tensile fracture presents a dimple-like pattern, accompanied by evenly distributed tear edges, which shows obvious ductile fracture characteristics.

Key words: automotive materials; Mg-6Al-4Sn magnesium alloy; extrusion-forging compound forming; microstructure; mechanical property

具有比重轻、比强度高、减震降噪性能佳、可回收性好的镁合金, 在汽车、航空航天等领域具有广阔的应用前景, 尤其是高强镁合金的研究备受业界关注, 也取得了较多的科研成果, 如高强度低合金化镁合金开发^[1]、高强韧稀土镁合金大型复杂铸件制造^[2]等。王敬丰等^[3]对高强韧镁合金大规格型

材挤压成形进行了数值模拟及试验研究。王柏宁等^[4]采用挤压剪切工艺制备了细晶高强韧镁合金。韩二锋和黄瑞^[5]研究和分析了差压铸造工艺参数对汽车高强镁合金性能的影响规律。万迪庆等^[6]详细介绍了高强镁合金组织的细化方法。张浩等^[7]研究了高强耐热镁合金大型锻件的显微组织及性能。陈荣石等^[8]进行了铸造高强耐热 Mg-Y-Nd(-Gd)-Zr 和 Mg-Gd-Y-Zr 系镁合金组织性能和铸造缺陷的对比。陈炯等^[9]优化了低溶质总量的高强镁合金复杂铸件的本体性能。李玉亮等^[10]研究了高强 GWZ1042 镁合金的三维热加工图及可加工性。然而, 在商业化

收稿日期: 2021-12-19; 修订日期: 2022-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51308396); 山西省高等学校教学改革创新项目 (J2020440)

作者简介: 武卫民 (1972-), 男, 本科, 高级实习指导教师

E-mail: youangzhan7199@163.com

应用过程中, 高强镁合金往往都含有昂贵的稀土元素, 成本高昂, 严重影响了高强镁合金的商业化应用。合金化和变形是提高合金综合性能的有效途径。挤锻复合成形是一种改善金属综合性能的有效途径, 刘兴刚等^[11]研究和分析了挤压锻温度对固态再生 H11 钢组织和性能的影响。杜勇等^[12]分析和探索了挤锻复合成形工艺对 AZ81 镁合金组织和性能的影响规律。徐绍勇等^[13]研究了热处理对挤锻复合成形 AZ61 镁合金组织与性能的影响。不含稀土元素的 Mg-Al-Sn 系高强镁合金极具应用前景。但是, 目前关于 Mg-Al-Sn 系高强镁合金的挤压复合成形的研究还鲜有报道。本文尝试对汽车用 Mg-6Al-4Sn 高强镁合金进行了挤锻复合成形, 并研究了挤锻复合成形 Mg-6Al-4Sn 汽车用高强镁合金的显微组织、力学性能和耐腐蚀性能。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验材料为 Mg-6Al-4Sn 汽车用高强镁合金 (以下简称“合金试样”), 其化学成分如表 1 所示, 合金中添加 Mn 主要是为了去除铁和其他重金属元素。合金试样的试验工艺流程如图 1 所示。合金试样的挤压成形在 3000 t 挤压机上进行, 挤压温度为 380 ℃、挤压比为 30、挤压速度为 20 mm·s⁻¹, 对挤压成形板坯进行喷水冷却。模锻成形在 2000 kN 液压机上进行, 模锻温度为 400 ℃、变形量为 50%、模压速度为 12 mm·s⁻¹, 模锻方向与挤压方向平行。挤锻复合成形的合金试样未进行热处理。

表 1 合金试样的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of alloy specimens (% , mass fraction)

Al	Sn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	其他杂质元素	Mg
6.043	3.974	0.285	0.011	0.004	0.0013	0.0004	<0.010	余量

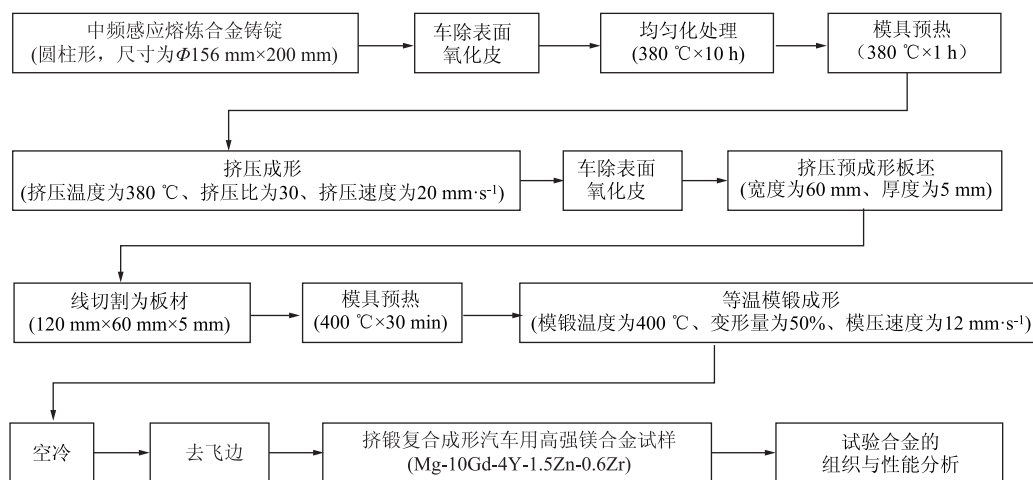


图 1 合金试样的试验工艺流程

Fig. 1 Test process flow of alloy specimens

1.2 试验方法

采用线切割方法在挤锻复合成形 Mg-6Al-4Sn 合金试样中部位置切取若干圆片金相试样 (尺寸为 Φ30 mm×5 mm), 经过粗砂纸到细砂纸的磨抛后, 在金相腐蚀剂 (5 g 苦味酸+5 mL 氢氟酸+5 mL 冰醋酸+10 mL 无水乙醇+75 mL 去离子水) 中浸蚀 15 s 后冲洗并吹干, 在 PG18 型电子金相显微镜和 JSM6510 型扫描电子显微镜下观察挤锻复合成形合金试样的显微组织, 并结合 Image Pro Plus 软件统计平均晶粒尺寸。

分别在挤锻复合成形 Mg-6Al-4Sn 合金试样两端

及中部采用线切割方法切取拉伸试样 (板状), 平行段的宽度为 10 mm、厚度为 5 mm、长度为 70 mm。在室温条件下进行拉伸试验 (试验机为 CMT5105 型电子万能试验机), 拉伸速度确定为 1 mm·s⁻¹, 最终在 JSM6510 型扫描电子显微镜下观察试样的拉伸断口形貌。

2 试验结果及讨论

2.1 显微组织

挤锻复合成形 Mg-6Al-4Sn 汽车用高强镁合金试

样的显微组织金相照片如图 2 所示。从图 2 可以看出，挤锻复合成形合金试样内部的晶粒呈细小颗粒状，未发现常规挤压变形中常见的长条形变形组织，晶粒细小，组织分布均匀性较好。经 Image Pro Plus 软件统计，合金试样的平均晶粒尺寸约为 6.2 μm。

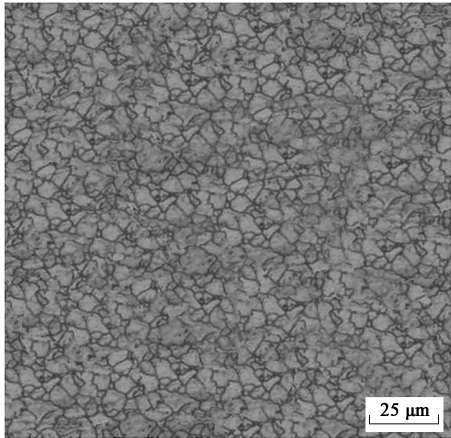


图 2 合金试样显微组织金相照片
Fig. 2 Metallographic photograph of microstructure for alloy specimens

图 3 为挤锻复合成形 Mg-6Al-4Sn 合金试样显微组织的 SEM 照片。从图 3 可以看出，合金试样的基体上分布着两种不同形状的化合物相，一种为类似球形的大颗粒状 $Mg_{17}Al_{12}$ 相，另一种为呈弥散分布的细小颗粒状 Mg_2Sn 相。

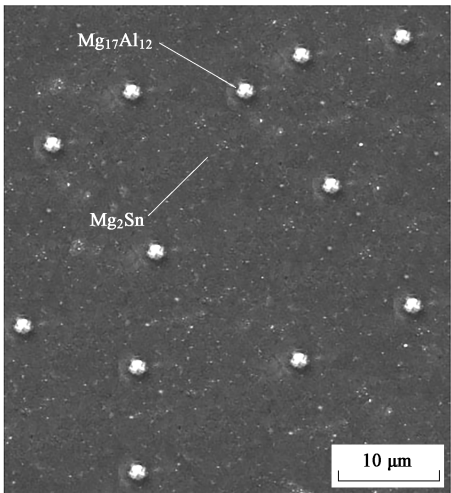


图 3 合金试样显微组织 SEM 照片
Fig. 3 SEM photograph of microstructure for alloy specimens

在铸态下，镁合金组织中不可避免地存在气孔、缩松等缺陷，在热挤压成形以及随后的等温模锻成形后，合金试样内部原有的气孔、缩松等缺陷被焊合，此外，在挤锻复合成形过程中合金试样内部发

生了明显的动态再结晶，晶粒得到细化， $Mg_{17}Al_{12}$ 相和 Mg_2Sn 相也被破碎为颗粒状。挤锻复合成形兼具了挤压变形和模锻变形的成形特点，充分发挥了热变形在镁合金成形中的积极作用，使得室温条件下不易变形的镁合金得以成为内部晶粒细小、组织分布均匀的挤锻复合成形合金试样。

2.2 力学性能

挤锻复合成形 Mg-6Al-4Sn 合金试样的室温力学性能测试结果如表 2 所示。从表 2 可以看出，挤锻复合成形合金试样在不同位置的力学性能的差异性很小，力学性能一致性较好，Mg-6Al-4Sn 合金试样的抗拉强度达到 312 MPa、屈服强度为 268 MPa、断后伸长率为 15.6%，具有较佳的室温力学性能。图 4 为挤锻复合成形 Mg-6Al-4Sn 合金试样的室温拉伸断口的扫描电镜照片。从图 4 可以看出，Mg-6Al-4Sn 合金试样的拉伸断口中布满细小而深邃的韧窝，拉伸断口呈现韧窝状花样，同时伴随着均匀分布的撕裂棱，表现为较为明显的韧性断裂特点。由此可以看出，挤锻复合成形 Mg-6Al-4Sn 合金试样具有韧性断裂的特点，具有较佳的室温力学性能。

表 2 合金试样的室温力学性能
Table 2 Mechanical properties of alloy specimens at room temperature

取样位置	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%
前端	311	268	15.6
中部	312	268	15.7
后端	312	268	15.5
平均值	312	268	15.6

3 结论

(1) 挤锻复合成形 Mg-6Al-4Sn 汽车用高强镁合金的晶粒细小、组织分布均匀性较好，平均晶粒尺寸约为 6.2 μm，合金试样基体上分布着类似球形的大颗粒状 $Mg_{17}Al_{12}$ 相和呈弥散分布的细小颗粒状 Mg_2Sn 相。

(2) 挤锻复合成形 Mg-6Al-4Sn 汽车用高强镁合金试样的抗拉强度为 312 MPa、屈服强度为 268 MPa、断后伸长率为 15.6%，具有较佳的室温力学性能；拉伸断口呈现韧窝状花样，同时伴随着均匀分布的撕裂棱，具有较为明显的韧性断裂特点。

(3) 挤锻复合成形可以获得组织细小、力学性能较佳的 Mg-6Al-4Sn 汽车用镁合金。

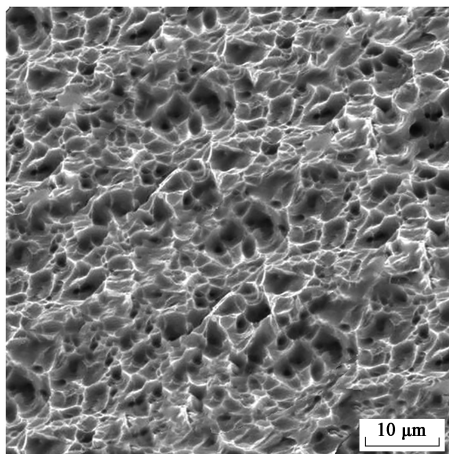


图 4 合金试样拉伸断口 SEM 照片

Fig. 4 SEM photograph of tensile fracture for alloy specimens

参考文献:

- [1] 程仁山, 潘虎成, 谢东升, 等. 新型高强度低合金化镁合金研究进展 [J]. 中国材料进展, 2020, 39 (1): 31-38.
Cheng R S, Pan H C, Xie D S, et al. Research progress of newly developed high-strength and low-alloyed magnesium alloy [J]. Materials China, 2020, 39 (1): 31-38.
- [2] 肖旅, 侯正全, 吴国华, 等. 高强韧稀土镁合金大型复杂铸件制造技术研究现状及展望 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (7): 793-801.
Xiao L, Hou Z Q, Wu G H, et al. Progress and prospect in manufacture of large complex castings in rare earth magnesium alloy with high strength and toughness [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41 (7): 793-801.
- [3] 王敬丰, 彭星, 王奎, 等. 高强韧镁合金大规格型材挤压成形的数值模拟及实验研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49 (5): 1665-1673.
Wang J F, Peng X, Wang K, et al. Numerical simulation and experimental study on extrusion forming of high strength tough magnesium alloy large size profiles [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49 (5): 1665-1673.
- [4] 王柏宁, 王峰, 王志, 等. 采用挤压剪切工艺制备细晶高强韧镁合金 [J]. 中国有色金属学报: 英文版, 2021, 31 (3): 666-678.
Wang B N, Wang F, Wang Z, et al. Fabrication of fine-grained, high strength and toughness Mg alloy by extrusion shearing process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (3): 666-678.
- [5] 韩二锋, 黄瑞. 差压铸造工艺参数对汽车高强镁合金性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (1): 70-73.
Han E F, Huang R. Effect of technological parameters of differential pressure casting on properties of automobile high strength magnesium alloy [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (1): 70-73.
- [6] 万迪庆, 袁艳平, 周新建. 高强镁合金组织细化方法研究现状 [J]. 材料导报, 2015, 29 (9): 76-80.
Wan D Q, Yuan Y P, Zhou X J. A review of microstructure refinement methods for high strength magnesium alloys [J]. Materials Review, 2015, 29 (9): 76-80.
- [7] 张浩, 张绪虎, 杜志惠, 等. 高强耐热镁合金大型锻件组织性能研究 [J]. 材料科学与工艺, 2013, 21 (5): 65-68.
Zhang H, Zhang X H, Du Z H, et al. Microstructure and mechanical property of large-scale high-strength and heat-resistant magnesium alloy [J]. Materials Science and Technology, 2013, 21 (5): 65-68.
- [8] 陈荣石, 周波, 李吉林, 等. 铸造高强耐热 Mg-Y-Nd (-Gd)-Zr 和 Mg-Gd-Y-Zr 系镁合金组织性能和铸造缺陷对比 [J]. 铸造, 2021, 70 (1): 15-20.
Chen R S, Zhou B, Li J L, et al. Contrast of microstructure, mechanical properties and casting defects between high strength and heat resistant Mg-Y-Nd (-Gd)-Zr and Mg-Gd-Y-Zr magnesium alloys [J]. Foundry, 2021, 70 (1): 15-20.
- [9] 陈舸, 肖旅, 董喜旺. 低溶质总量高强镁合金复杂铸件本体性能优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (8): 813-819.
Chen K, Xiao L, Dong X W. Performance optimization of magnesium alloy complex castings with low solute content and high strength [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40 (8): 813-819.
- [10] 李玉亮, 曾健, 欧阳金栋, 等. 高强 GWZ1042 镁合金三维热加工图及可加工性研究 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (17): 42-46.
Li Y L, Zeng J, Ouyang J D, et al. Study on 3D hot processing maps and processability of high strength GWZ1042 magnesium alloy [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (17): 42-46.
- [11] 刘兴刚, 王亚琴, 马召俊, 等. 挤压锻温度对固态再生 H11 钢组织和性能的影响 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2020, 41 (10): 1394-1401.
Liu X G, Wang Y Q, Ma Z J, et al. Effect of extrusion-forging temperature on microstructure and mechanical properties of solid state regenerated H11 steel [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2020, 41 (10): 1394-1401.
- [12] 杜勇, 龙思远, 曹凤红, 等. 挤锻复合成形工艺对 AZ81 镁合金组织和性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29 (1): 39-41.
Du Y, Long S Y, Cao F H, et al. Effects of extruding-forging process on microstructure and properties of AZ81 magnesium alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2009, 29 (1): 39-41.
- [13] 徐绍勇, 龙思远, 曹凤红. 热处理对挤锻复合成形 AZ61 镁合金组织与性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (24): 199-203.
Xu S Y, Long S Y, Cao F H, et al. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical property of extrusion-forging AZ61 alloy [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (24): 199-203.