

汽车车架用含钛镁合金的显微组织及力学性能研究

桂 林¹, 李强军²

(1. 河南工业职业技术学院, 河南 南阳 473009; 2. 河南大学材料学院, 河南 开封 475001)

摘 要:研究了不同钛含量的汽车车架用含钛镁合金 Mg-8Al-1Zn-xTi(x=0.05, 0.15, 0.3) 的显微组织和力学性能, 并对比了不含钛 Mg-8Al-1Zn 合金的显微组织和力学性能。结果表明: 钛的添加, 细化了合金晶粒, 改善了合金力学性能。随钛含量增加, 合金平均晶粒尺寸先减小后增大、力学性能先提高后下降。与不含钛 Mg-8Al-1Zn 合金相比, 含钛 Mg-8Al-1Zn-0.15Ti 合金的平均晶粒尺寸减小 7.2 μm 、抗拉强度增大 32 MPa、屈服强度增大 33 MPa、断后伸长率增大 3.8%, 拉伸断裂方式从混合断裂变为塑性断裂。

关键词:镁合金; 汽车车架; Ti; 微合金化; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TF823, TG146.22 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)05-0192-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.05.030

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

Microstructure and mechanical properties of titanium magnesium alloy for automobile frame

Gui Lin¹, Li Qiangjun²

(1. Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473009, Henan, China; 2. School of Materials, Henan University, Kaifeng 475001, Henan, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of Mg-8Al-1Zn-xTi(x=0.05,0.15,0.3) magnesium alloy containing titanium with different titanium contents were tested and analyzed, and the microstructure and mechanical properties of Mg-8Al-1Zn alloy without titanium were compared. The results show that the addition of alloy element Ti can refine the alloy grain and improve the mechanical properties of the alloy. The average grain size of the alloy first decreases and then increase, and the mechanical properties first improves and then declines. Compared with Mg-8Al-1Zn alloy without Ti, the average grain size of Mg-8Al-1Zn-0.15Ti alloy containing Ti decreases by 7.2 μm , tensile strength increases by 32 MPa, yield strength increases by 33 MPa, the elongation after fracture increases by 3.8%, and the tensile fracture mode changes from mixed fracture to plastic fracture.

Key words: magnesium alloy, automobile frame, Ti, alloying, microstructure, mechanical property

0 引言

镁合金因为比重小、阻尼减震性好、回收性佳

等特点,在汽车等领域具有广阔的应用前景,如汽车车架、轮毂、座椅、发动机壳体等^[1],因此也吸引了众多科研人员的研究兴趣。根据是否含有稀土元素,

收稿日期:2020-08-10

基金项目:河南省科技攻关项目(142102310549)。

作者简介:桂林(1983—),女,汉族,湖北随州人,讲师,硕士,研究方向:汽车检测及材料研究, E-mail: xingmu104029@163.com。

镁合金可以分为含稀土镁合金和不含稀土镁合金两大类。含稀土镁合金的主要特点:强度高、韧性好、蠕变抗力大、高温性能好、价格较为昂贵等。李海斌和郟彦辉^[2]研究了不同成分 Mg-Ga-Hg-Ce-Y 新型稀土合金汽车电池的铸造工艺。郝亮^[3]等研究了汽车用高强稀土镁合金 Mg-12Gd-3Y-1Zn-0.5Ti 的铸态性能。与含稀土镁合金相比,不含稀土镁合金具有明显的价格优势,但综合性能往往更差。孙宏图等^[4]研究了采用 AZ61 镁合金结构对某轿车车身前端进行轻量化的改进设计。陈锴等^[5]分析了 AZ80 镁合金汽车轮毂的挤压成形工艺,并进行了数值模拟分析。张淬^[6]采用试验方法进行了新能源汽车用 AZ31B 变形镁合金表面改性研究。向峻伯等^[7]研究和分析了汽车用 MB15 镁合金的表面改性与耐腐蚀性能。王耀耀等^[8]分析了挤压温度对汽车用 AZ91 镁合金组织以及力学性能产生的影响。林绍义^[9]研究了半固态流变成形 AZ91D 镁合金汽车零件的裂纹尖端特征。宋飞等^[10]研究了 AM50-1.8%Ca 镁合金汽车轮毂的挤压变形与性能。如何提高不含稀土镁合金的力学性能是一个亟待解决的重要技术课题。我们都知道合金化是改善合金性能的重要措施。金属钛是一种常用的合金元素,在改善金属材料内部组织、提高综合性能方面起着重要作用。郝孟军等^[11]研究了汽车轮毂用 AZ80-0.5V-0.1Ti 改性镁合金的锻造工艺。魏云和赵行^[12]对

Mg-Al-Zn-Ti 含钛镁合金新能源汽车型材的挤压工艺进行了优化研究。庄彦霞和李宁^[13]研究分析了钒钛改性汽车用新型镁合金 Mg-8Al-0.6Zn-xV-0.5Ti(x=0, 0.1, 0.5, 0.8) 的组织与性能。但是,目前在不含稀土元素镁合金中添加合金元素钛的研究还有待进一步深入,以获得更具实用价值的镁合金。

Mg-8Al-1Zn 镁合金具有较好的抗蠕变性能和耐腐蚀性能,是一种极具应用前景的镁合金,但其力学性能不够理想(抗拉强度约 365 MPa)。为此,笔者研究了汽车车架用挤压态含钛镁合金 Mg-8Al-1Zn-xTi(x=0, 0.05, 0.15, 0.3) 的显微组织、组织和力学性能,为汽车车架用不含稀土的含钛镁合金商用开发提供理论支持和试验数据。

1 试验材料和方法

采用中频感应炉熔炼制备的汽车车架用挤压态含钛镁合金 Mg-8Al-1Zn-xTi(x=0, 0.05, 0.15, 0.3) 圆棒形铸锭,尺寸 $\phi 400 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$,合金的化学成分如表 1 所示。Mg-8Al-1Zn-xTi(x=0, 0.05, 0.15, 0.3) 合金试样依次编号为:试样 1[#]、试样 2[#]、试样 3[#]、试样 4[#]。铸锭经过 $380 \text{ }^\circ\text{C} \times 10 \text{ h}$ 均匀化处理后,在 500 t 挤压机上进行挤压,各试样均采用相同的挤压工艺:挤压温度 $350 \text{ }^\circ\text{C}$,挤压比 20、模具预热温度 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 、挤压速度 3 m/min 。挤压试样的厚度为 3 mm、宽度 100 mm。

表 1 试验合金化学成分
Table 1 Chemical compositions of the testing alloys

编号	Al	Zn	Ti	Si	Fe	Mg	%
试样1 [#]	8.021	0.995	0	0.010	0.004	Bal.	
试样2 [#]	8.022	0.994	0.051	0.011	0.004	Bal.	
试样3 [#]	8.024	0.996	0.148	0.011	0.005	Bal.	
试样4 [#]	8.025	0.997	0.301	0.012	0.005	Bal.	

采用线切割方法在试样中部位置切取方形金相试样,尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。经过金相制样后在腐蚀液(腐蚀液由 5 g 苦味酸、5 mL 冰醋酸、5 mL 氢氟酸、10 mL 去离子水和 175 mL 无水乙醇组成)中浸蚀 15 s 并立即在流动水下冲洗、吹干,然后在 PG18 型显微镜下进行显微组织分析。采用线切割方法在试样两端及中部位置分别切取拉伸试样(尺寸如图 1 所示),以 3 个不同切取位置拉伸试样测试值的算术平均值作为试样的力学性能测试值,在 CMT5000 型拉伸试验机上进行室温拉伸,拉伸

速度 1 mm/min ,并用 JSM6510 型扫描显微镜观察试样的拉伸断口形貌。

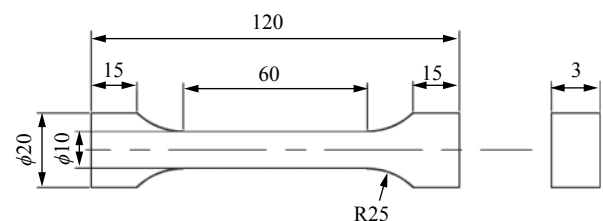


图 1 拉伸试样尺寸(单位: mm)
Fig. 1 Dimensions of tensile specimen

2 试验结果及讨论

2.1 显微组织

不同钛含量的 Mg-8Al-1Zn-xTi($x=0, 0.05, 0.15, 0.3$) 镁合金试样的显微组织如图 2 所示。表 2 是四种合金试样的平均晶粒尺寸。从图 2 和表 2 可以看出, 不含钛 Mg-8Al-1Zn 合金试样(图 2a, 试样 1[#])的内部晶粒最粗大, 组织分布均匀性最差, 合金的平均晶粒尺寸最大($\sim 16.4 \mu\text{m}$)。随钛含量的增加, 合金平均晶粒尺寸先减小后增大, 当钛含量为 0.15% (图 2c, 试样 3[#])时, 合金晶粒细化效果最显著, 平均晶粒尺寸最小($\sim 9.2 \mu\text{m}$), 较不添加钛的 Mg-8Al-

1Zn 合金减小 $7.2 \mu\text{m}$ 。添加适量的合金元素钛后, 合金的内部晶粒明显细化, 组织分布更加均匀。当钛含量为 0.05% (图 2b, 试样 2[#])时, 合金平均晶粒尺寸 $\sim 14.6 \mu\text{m}$, 晶粒尺寸较不添加钛的 Mg-8Al-1Zn 合金有所减小, 但减幅较小。当钛含量进一步增大到 0.3% (图 2d, 试样 4[#])时, 合金内部晶粒非但没有进一步变细, 反而有所增大, 组织分布均匀性也变差, 合金的平均晶粒尺寸有所增大($\sim 11.4 \mu\text{m}$)。由此可以看出, 合金元素钛的添加显著细化了合金试样的内部晶粒, 改善了合金试样的组织分布均匀性。但钛含量过高或过低, 都难以获得优异的晶粒细化效果。

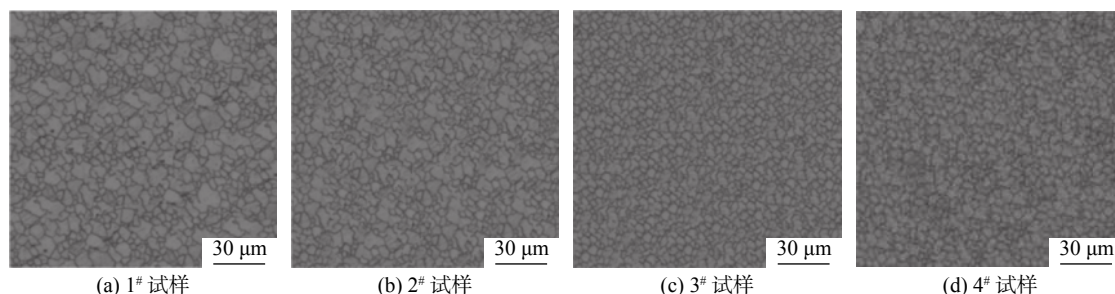


图 2 合金试样的显微组织

Fig. 2 Microstructures of the alloy samples

表 2 试验合金的平均晶粒尺寸
Table 2 Average grain size of the samples

编号	钛含量/%	平均晶粒尺寸/ μm
试样 1 [#]	0	16.4
试样 2 [#]	0.05	14.6
试样 3 [#]	0.15	9.2
试样 4 [#]	0.3	11.4

2.2 力学性能

不同钛含量的 Mg-8Al-1Zn-xTi($x=0, 0.05, 0.15, 0.3$) 镁合金试样的室温力学性能测试结果如表 3 所示。从表 3 可以看出, 与不含钛 Mg-8Al-1Zn 合金(试样 1[#])相比, 添加钛后合金试样的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率均有增加, 合金的力学性能得到改善。随钛含量的增加, 合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率均表现出先增大后减小的变化趋势, 当钛含量为 0.15% (试样 3[#])时, 合金抗拉强度、屈服强度和断后伸长率均最大, 分别为 398 MPa、290 MPa、11.2%。与不含钛 Mg-8Al-1Zn 合金(试样 1[#])相比, 钛含量 0.15% 的 Mg-8Al-1Zn-0.15Ti 合金的抗拉强度由 366 MPa 增大到 398 MPa, 增加

32 MPa; 屈服强度从 257 MPa 增大到 290 MPa, 增加 33 MPa; 断后伸长率从 7.4% 增大到 11.2%, 增加 3.8 个百分点。当钛含量进一步增大到 0.3% (图 2d, 试样 4[#])时, 合金力学性能非但没有进一步提高, 反而有所下降。由此可以看出, 合金元素钛的添加显著提高了合金试样的力学性能。钛含量对 Mg-8Al-1Zn-xTi($x=0, 0.05, 0.15, 0.3$) 镁合金力学性能影响明显, 钛含量不宜过低也不宜过高。

不同钛含量的 Mg-8Al-1Zn-xTi($x=0, 0.05, 0.15, 0.3$) 镁合金试样的拉伸断口在扫描电子显微镜下的 SEM 照片如图 3 所示。从图 3 可以看出, 不含钛 Mg-8Al-1Zn 合金试样(试样 1[#], 图 3a)的拉伸断口中除了韧窝和撕裂棱外, 还存在一部分解理台阶, 表现为塑性断裂和脆性断裂共存的混合断裂特征; 而含钛 Mg-8Al-1Zn-xTi($x=0.05, 0.15, 0.3$) 试样(试样 2[#]、3[#]和 4[#], 图 3b~d)的拉伸断口中未发现明显的解理台阶, 仅有韧窝和撕裂棱, 表现为较为明显的塑性断裂特征。此外, 从图 3 还可以看出, 钛含量 0.15% 的 Mg-8Al-1Zn-0.15Ti 合金(试样 3[#], 图 3c)的拉伸断口中韧窝明显更细, 表现出更好的拉伸性能。

表 3 试验合金力学性能测试结果
Table 3 Test results of the mechanical properties of used alloys

编号	钛含量/%	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%
试样1 [#]	0	366	257	7.4
试样2 [#]	0.05	371	261	7.7
试样3 [#]	0.15	398	290	11.2
试样4 [#]	0.3	382	273	11.8

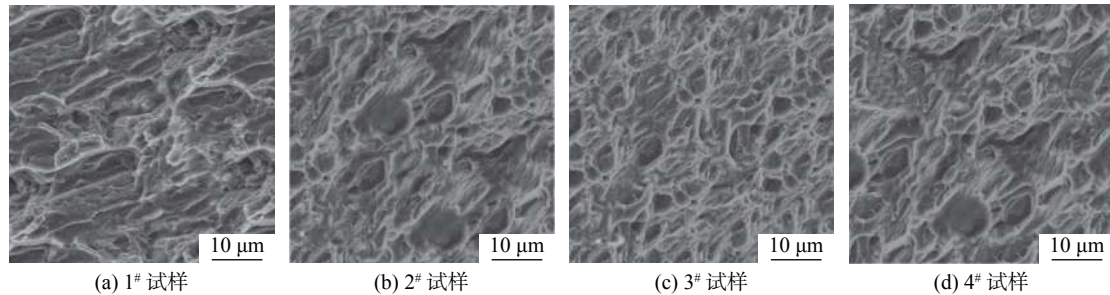


图 3 合金试样拉伸断口 SEM 照片
Fig. 3 SEM images of the tensile fracture for used alloys

2.3 讨论与分析

金属钛作为一种常用的合金化元素,适量的合金元素钛添加到 Mg-8Al-1Zn 镁合金中时,一方面,在合金凝固过程中钛可以在固液界面前富集,抑制合金中铝的扩散,减少离异共晶数量,改善合金内部组织,提高合金力学性能^[11];另一方面,合金元素钛与合金中铝可以形成钛铝化合物 $TiAl_3$,由于 $TiAl_3$ 晶格常数(0.384 8 nm)与金属铝很接近,可以起到促进铝形核的作用,促使镁合金中的含铝 β 相 ($Mg_{17}Al_{12}$ 相)更加密集和连续,起到显著细化基体 α -Mg 晶粒的效果^[13],从而提高了镁合金的力学性能。所以,与不含钛 Mg-8Al-1Zn 合金相比,含钛 Mg-8Al-1Zn-xTi(x=0.05,0.15,0.3) 合金的晶粒明显细化、组织分布更均匀、力学性能得到提高。适量合金元素钛的添加,有助于改善镁合金的力学性能。

由试验可知,随钛含量的增加, Mg-8Al-1Zn-xTi(x=0.05,0.15,0.3) 合金的平均晶粒尺寸先减小后增大,抗拉强度、屈服强度和断后伸长率均先增大后减小,合金力学性能先提高后下降。钛含量 0.15% 的 Mg-8Al-1Zn-0.15Ti 合金具有较好的力学性能,拥有较好的工程应用价值和汽车车架冲压效

果。与稀土镁合金相比,没有稀土元素的含钛镁合金成本下降约五分之一,极具成本优势。含钛镁合金有望在汽车车架上得到应用。但是对于工业化生产而言,汽车车架冲压工艺优化是一个较为复杂的重要工程技术问题,这也是课题后续研究的主要内容。

3 结论

1) 适量合金元素钛的添加,有助于细化 Mg-8Al-1Zn 镁合金的晶粒,改善合金力学性能。与不含钛 Mg-8Al-1Zn 合金相比,含钛 Mg-8Al-1Zn-0.15Ti 合金的平均晶粒尺寸减小 7.2 μm 、抗拉强度增加 32 MPa、屈服强度增加 33 MPa、断后伸长率增大 3.8 个百分点,拉伸断裂方式从混合断裂变为塑性断裂。

2) 随钛含量增加, Mg-8Al-1Zn-xTi(x=0.05, 0.15, 0.3) 合金的平均晶粒尺寸先减小后增大,抗拉强度、屈服强度和断后伸长率均先增大后减小,合金力学性能先提高后下降。

3) 350 $^{\circ}\text{C}$ 挤压时含钛 Mg-8Al-1Zn-0.15Ti 合金具有较好的内部显微组织和力学性能,平均晶粒尺寸 9.2 μm 、抗拉强度 398 MPa、屈服强度 290 MPa、断后伸长率 11.2%,具有较好的工程应用价值。

参考文献

- [1] Ji Hongchao, Li Yiming, Long Haiyang, *et al.* Application and development of magnesium alloy in automobile parts[J]. Foundry Technology, 2019, 40(1): 122-128.

- (纪宏超, 李轶明, 龙海洋, 等. 镁合金在汽车零部件中的应用与发展[J]. 铸造技术, 2019, 40(1): 122-128.)
- [2] Li Haibin, Qi Yanhui. Casting process and properties of new rare earth alloys for automotive batteries[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2019, 39(5): 487-489.
(李海斌, 郗彦辉. 新型稀土镁合金汽车电池的铸造工艺及性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(5): 487-489.)
- [3] Hao Liang, Sun Lili, Meng Xiangli. Experimental study on as-cast properties of high-strength magnesium alloys used for automobile[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2019, 47(9): 66-69.
(郝亮, 孙丽丽, 孟祥丽. 汽车用高强镁合金铸态性能试验研究[J]. 轻合金加工技术, 2019, 47(9): 66-69.)
- [4] Sun Hongtu, Shen Guozhe, Hu Ping, *et al.* Design on the magnesium alloy car body[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009, (7): 4-6.
(孙宏图, 申国哲, 胡平, 等. 汽车镁合金车身设计[J]. 机械设计与制造, 2009, (7): 4-6.)
- [5] Chen Kai, Yan Yinbiao, Xu Yue. Proces analysis and numerical simulation of hot extrusion of magnesium alloy wheels[J]. *Machine Building & Automation*, 2018, 47(3): 103-105.
(陈锴, 颜银标, 徐跃. 镁合金汽车轮毂挤压成形工艺分析及其数值模拟[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(3): 103-105.)
- [6] Zhang Cui. Experimental research on surface modification of wrought magnesium alloy for new energy automobile[J]. *Electroplating & Pollution Control*, 2018, 38(6): 23-25.
(张淬. 新能源汽车用变形镁合金表面改性实验研究[J]. 电镀与环保, 2018, 38(6): 23-25.)
- [7] Xiang Junbo, Wang Congming, Chen Kaibing, *et al.* Surface modification and corrosion resistance of MB15 magnesium alloy for automobile[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(12): 186-192.
(向峻伯, 王从明, 陈凯兵, 等. 汽车用MB15镁合金的表面改性与耐腐蚀性能[J]. 金属热处理, 2019, 44(12): 186-192.)
- [8] Wang Yaoyao, Chen Zhijuan, Liu Gang. Effect of extrusion temperature on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy for automobile[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(1): 80-82.
(王耀耀, 陈智娟, 刘刚. 挤压温度对汽车用AZ91镁合金组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(1): 80-82.)
- [9] Lin Shaoyi. Characteristics of crack tip of fatigue crack in the semi-solid rheomolding AZ91D auto parts[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2019, 39(11): 1209-1212.
(林绍义. 半固态流变成形AZ91D镁合金汽车零部件裂纹尖端特征[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(11): 1209-1212.)
- [10] Song Fei, Wu Huibo, Luo Zhilin. Study on extrusion deformation and properties for magnesium alloy automotive hubs[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2019, 44(12): 174-181, 197.
(宋飞, 吴会波, 罗志林. 镁合金汽车轮毂的挤压变形与性能研究[J]. 锻压技术, 2019, 44(12): 174-181, 197.)
- [11] Hao Mengjun, Gong Tao, Dai Yanxia. Modified magnesium alloy forging process for automobile hub[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2019, 44(4): 22-27.
(郝孟军, 宫涛, 代艳霞. 汽车轮毂用改性镁合金锻造工艺[J]. 锻压技术, 2019, 44(4): 22-27.)
- [12] Wei Yun, Zhao Xing. Optimization of extrusion process for new energy automotive profiles made from titanium-magnesium alloy[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(6): 155-159.
(魏云, 赵行. 含钛镁合金新能源汽车型材挤压工艺优化[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(6): 155-159.)
- [13] Zhuang Yanxia, Li Ning. Microstructure and properties of new automobile magnesium alloy modified by vanadium and titanium[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(5): 61-65.
(庄彦霞, 李宁. 钒钛改性汽车用新型镁合金的组织与性能[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(5): 61-65.)

编辑 杨冬梅