

# 钒微合金化汽车用铸造镁合金的组织与性能

高亚男<sup>1</sup>, 郑 镭<sup>2</sup>, 张全逾<sup>1\*</sup>

(1. 河北石油职业技术大学汽车工程系, 河北 承德 067000; 2. 华北理工大学机械工程学院, 河北 唐山 063210)

**摘 要:** 为了研究钒微合金化汽车用铸造镁合金的显微组织、耐磨损性能和耐腐蚀性能, 在铸造 Mg-9Al-1Zn 镁合金中添加了不同含量的合金元素钒, 并进行了试验合金显微组织、力学性能、耐磨损性能和耐腐蚀性能的测试与对比分析。结果表明, 合金元素钒可以有效细化合金内部组织, 提高合金的耐磨损性能和耐腐蚀性能。随钒含量由 0 逐渐增加到 0.4% 时, 试验合金的耐磨损性能和耐腐蚀性能均提高, 进一步将钒含量增加到 0.5%, 则两种性能均开始下降。同不含钒的 Mg-9Al-1Zn 镁合金相比, 当在 Mg-9Al-1Zn 镁合金中添加 0.4% 合金元素钒时, 合金的磨损体积减小了  $12.7 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ , 减小幅度达 29.8%; 腐蚀电位正移了 0.107 V, 正移幅度达到 12.2%; 抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别增大 58、58 MPa、3.3%, 增大幅度分别为 20.9%、36.0%、40.2%。Mg-9Al-1Zn-V 镁合金的合金元素钒含量优选为 0.4%。

**关键词:** 铸造镁合金; 钒微合金化; 显微组织; 耐磨损性能; 耐腐蚀性能

中图分类号: TF822, TG136

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)04-0190-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.04.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Microstructure and properties of vanadium microalloyed cast magnesium alloy for automobile

Gao Yanan<sup>1</sup>, Zheng Lei<sup>2</sup>, Zhang Quanyu<sup>1\*</sup>

(1. Department of Automotive Engineering, Hebei Petroleum University of Technology, Chengde 067000, Hebei, China;

2. College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

**Abstract:** In order to study the microstructure, wear resistance and corrosion resistance of vanadium microalloyed cast magnesium alloy for automobile, different contents of alloy element vanadium were added into the cast Mg-9Al-1Zn magnesium alloy, and the microstructure, wear resistance and corrosion resistance of the test alloy were tested and compared. The results show that the alloy element vanadium can effectively refine the internal structure of the alloy and improve the wear resistance and corrosion resistance of the alloy. With the gradual increase of vanadium content from 0 to 0.4%, both the wear resistance and corrosion resistance of the test alloy have been improved. Further increasing vanadium content to 0.5% will reduce the wear and corrosion resistance. Compared with Mg-9Al-1Zn magnesium alloy without vanadium, when 0.4% alloy element vanadium is added to Mg-9Al-1Zn magnesium alloy, the wear volume of the alloy is reduced by  $12.7 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$  or 29.8%, and the positive shift of corrosion potential reaches by 0.107 V or 12.2%. The tensile strength, yield strength and elongation of the alloy are increased by 58, 58 MPa and 3.3% respectively, with relative increasing amplitude of 20.9%, 36.0% and 40.2%, respectively. The alloy element vanadium content for Mg-9Al-1Zn-V magnesium alloy is preferably at 0.4%.

收稿日期: 2022-03-03

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究重点项目(项目编号: ZD2016113)。

**作者简介:** 高亚男, 1982 年出生, 男, 汉族, 河北承德人, 博士, 副教授, 主要从事金属塑性成形、汽车关键零部件结构设计等方面的研究, E-mail: [llvr@163.com](mailto:llvr@163.com); \*通讯作者: 张全逾, 1980 年出生, 男, 汉族, 河北承德人, 硕士研究生, 副教授, 从事汽车方面的教学与科研工作, E-mail: [llvr@163.com](mailto:llvr@163.com)。

**Key words:** cast magnesium alloy, vanadium microalloying, microstructure, wear resistance, corrosion resistance

## 0 引言

铸造镁合金因其比重小、阻尼减震性佳、成型成本相对较低等优点,在汽车等各个领域具有广阔的应用前景,也吸引了较多科研工作者和工程技术人员的研究兴趣。岳海燕等<sup>[1-2]</sup>研究和分析了铸造 Mg-3.0Nd-0.2Zn-Zr 镁合金的高周疲劳累积损伤行为以及双级时效在铸造 Mg-3.0Nd-0.2Zn-Zr 镁合金中的应用。黄芳和徐扬<sup>[3]</sup>分析了浇注温度对新型钒微合金化铸造镁合金组织与性能的影响规律。陈荣石等<sup>[4]</sup>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对比。樊瑞军等<sup>[5]</sup>分析了含钛高强镁合金 Mg-8Gd-1.5Y-0.8Ti 的锻造成形工艺分析。王忠堂等<sup>[6]</sup>研究和探讨了镁合金复合变形过程中的动态再结晶及微观组织演变规律。顾赞涛等<sup>[7]</sup>研究和分析了 Mg-Nd、Mg-Gd 和 Mg-Sb 二元镁合金的组织 and 力学性能。徐淑波等<sup>[8]</sup>探讨了模具几何形状对镁合金 ECAP 变形均匀性的影响。李全和金朝阳<sup>[9]</sup>研究了改进的 Fields-Backofen 本构模型描述 AZ80 镁合金热压缩流动应力。徐景超等<sup>[10]</sup>分析和探索了热挤压铸造新型镁合金微观组织及细胞生物活性。高孝书和吕云<sup>[11]</sup>基于 RSM 和 MPSO 对镁合金薄板冲压工艺参数进行了优化研究。李吉林等<sup>[12]</sup>分析了铸造 WE54 镁合金的枝晶干涉点及其与合金显微组织的关系。肖旅等<sup>[13]</sup>研究了 VW63Z 铸造镁合金线型分离性能及切割机理。王瑛和李广德<sup>[14]</sup>基于云模型 PID 控制方法研究了两种 AZ 镁合金铸造性能。但是,随着汽车市场对铸造镁合金性能要求的不断提高,现有铸态镁合金往往难以满足汽车产业对铸造镁合金性能的高要求,尤其是耐磨损性能和耐腐蚀性能。现有镁合金由于氧化膜疏松、多孔、不够致

密,对镁合金基体保护能力差,所以在大多数的腐蚀性环境中都难以实现较高的耐腐蚀性能;此外,现有镁合金由于耐磨损性能不够理想,限制了它的推广应用,目前镁合金的耐磨损性能研究还较少,难以对工业化生产提供实质性指导。另外,镁合金要大规模的推广应用,力学性能的改善也是一个重要课题,如何获得力学性能、耐磨损性能和耐腐蚀性能均较佳,同时性价比较高的镁合金是业界非常关注的技术难题。

我们都知道,合金化是镁合金材料性能提高的有效途径。体心立方结构的金属元素钒具有优异的抗磨损、耐腐蚀性能。合金元素钒在钢、钛等金属中具有广泛的应用,但是目前关于铸造镁合金中添加合金元素钒的研究还较少,难以对钒微合金化铸造镁合金的商业化应用提供有效技术支持。为此,笔者尝试在铸造 Mg-9Al-1Zn 镁合金中添加不同含量的合金元素钒,研究了钒微合金化汽车用铸造镁合金的显微组织、力学性能、耐磨损性能和耐腐蚀性能。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

以金属镁、铝、锌以及 Mg-5Mn、Al-10V 和中间合金为原料,采用中频感应熔炼方法制备不同钒含量的 Mg-Al-1Zn-xV( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ )钒微合金化汽车用铸造镁合金试样(以下简称试验合金)。试验合金中添加合金元素 Mn 是为了除杂。铸造模具采用 K465 高温合金制备而成,熔炼温度 700 ℃,浇注前将炉温升至 740 ℃,保温 30 min 后浇铸。铸锭为圆棒状,尺寸为 $\varnothing 100\text{ mm}\times 230\text{ mm}$ 。在车床上去除表面氧化皮制得试验所需的试验合金。试验合金化学成分如表 1 所示。

表 1 Mg-9Al-1Zn-xV ( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) 试验合金化学成分  
Table 1 Chemical compositions of Mg-9Al-1Zn-xV ( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) test alloys

| 试样编号           | V含量     | Al    | Zn    | Mn    | V     | Fe    | Si    | 其他杂质元素 | Mg |
|----------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|----|
| 1 <sup>#</sup> | $x=0$   | 9.034 | 0.998 | 0.231 | 0     | 0.012 | 0.008 | <0.100 | 余量 |
| 2 <sup>#</sup> | $x=0.1$ | 9.028 | 0.996 | 0.228 | 0.104 | 0.011 | 0.009 | <0.100 | 余量 |
| 3 <sup>#</sup> | $x=0.2$ | 9.029 | 0.997 | 0.229 | 0.202 | 0.009 | 0.007 | <0.100 | 余量 |
| 4 <sup>#</sup> | $x=0.3$ | 9.031 | 1.002 | 0.232 | 0.298 | 0.011 | 0.008 | <0.100 | 余量 |
| 5 <sup>#</sup> | $x=0.4$ | 9.027 | 0.999 | 0.234 | 0.403 | 0.012 | 0.009 | <0.100 | 余量 |
| 6 <sup>#</sup> | $x=0.5$ | 9.032 | 0.998 | 0.228 | 0.501 | 0.013 | 0.008 | <0.100 | 余量 |

## 1.2 试验方法

**组织分析:** 在不同钒含量试验合金中部切取圆片状金相试样(尺寸 $\Phi 30\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ), 经过由粗到细的砂纸磨至镜面时, 在金相腐蚀液中浸蚀 15 s 后冲洗、吹干, 然后将其置于 DMM-5 000 型金相显微镜和 JSM6510 型扫描电子显微镜下进行显微组织的观察和拍照。

**磨损试验:** 在不同钒含量试验合金两端和中部分别切取圆柱状磨损试样(尺寸 $\Phi 40\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ ), 在 MMW-1A 立式万能摩擦磨损试验机上进行磨损试验, 试验温度为室温、磨轮转速 300 r/min、相对滑动速度 90 mm/min、磨损时间 10 min、对磨材料为 Mg-9Al-1Zn 镁合金。以磨损体积表征试样的耐磨性能。每种成分的试验合金磨损体积测试值为 3 个磨损试样测试值的算术平均值。

**腐蚀试验:** 在不同钒含量试验合金两端和中部分别切取圆片状腐蚀试样(尺寸 $\Phi 30\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ), 在 PGSTAT302 型电化学工作站上进行电化学腐蚀试验, 扫描速度为 0.001 V/s。试验前先在 -1.0 V 恒电位下极化 3 min。以腐蚀电位表征试样的耐腐蚀性能。每种成分的试验合金腐蚀电位测试值为 3 个腐蚀试样测试值的算术平均值。

**力学性能测试:** 在不同钒含量试验合金两端和中部分别切取圆棒状拉伸试样(平行段尺寸 $\Phi 10\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ ), 在 MTS858 型万能试验机上进行室温拉伸, 拉伸速度设置为 1 mm/min。每种成分的试验合金力学性能测试值为 3 个拉伸试样测试值的算术平均值。

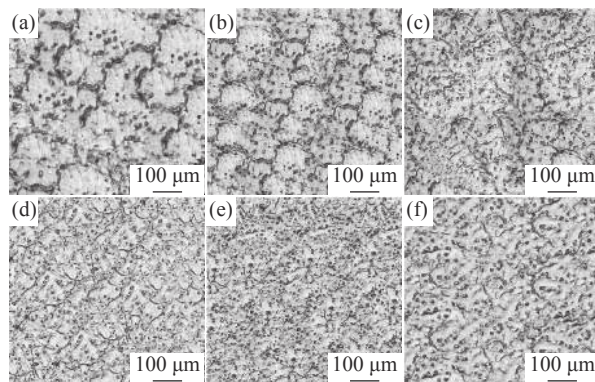
## 2 试验结果及讨论

### 2.1 显微组织

不同钒含量 Mg-9Al-1Zn-xV( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) 试验合金的显微组织金相照片如图 1 所示。从图 1 可以看出, 与不添加合金元素钒( $x=0$ )相比, 添加合金元素钒后试验合金的内部晶粒明显细化, 组织分布更加均匀。合金元素钒有效改善了 Mg-9Al-1Zn 镁合金的内部组织。此外从图 1 还可以看出, Mg-9Al-1Zn-xV 试验合金中随钒含量逐渐增加, 试验合金的内部晶粒先细化后粗化。当合金元素钒含量为 0.4%( $x=0.4$ )时, 试验合金的内部晶粒最细小、组织分布最均匀。

不同钒含量 Mg-9Al-1Zn-xV( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) 试验合金的显微组织 SEM(扫描电子显微

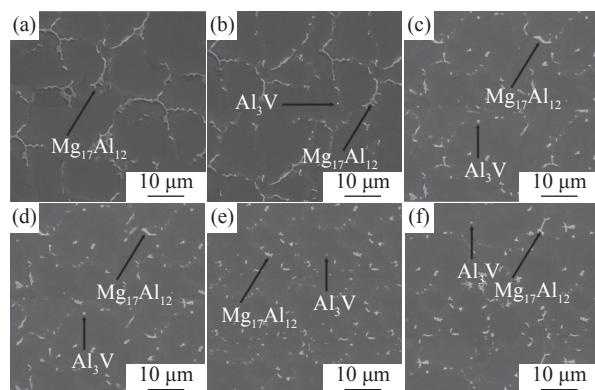
镜)照片如图 2 所示。从图 2 可以看出, 不添加合金元素钒( $x=0$ )时, Mg-9Al-1Zn 镁合金晶界处分布着呈网状的鱼骨状  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相。当试验合金中添加合金元素钒后, 合金内部的化合物相除了条状或鱼骨状  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相外, 还存在细小颗粒状的  $\text{Al}_3\text{V}$  相。随着合金元素钒含量的增加, 试验合金内部网状分布的  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相被破碎成短条状。当合金元素钒含量为 0.4%( $x=0.4$ )时, 试验合金的  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相最为细小, 合金中  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相和  $\text{Al}_3\text{V}$  相呈弥散状分布在镁基体中。当合金元素含量进一步提高到 0.5% 时, 试验合金内部的  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相尺寸有所增大,  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相和  $\text{Al}_3\text{V}$  相呈不均匀分布。



(a) 1<sup>#</sup>试样 ( $x=0$ ); (b) 2<sup>#</sup>试样 ( $x=0.1$ ); (c) 3<sup>#</sup>试样 ( $x=0.2$ ); (d) 4<sup>#</sup>试样 ( $x=0.3$ ); (e) 5<sup>#</sup>试样 ( $x=0.4$ ); (f) 6<sup>#</sup>试样 ( $x=0.5$ )

图 1 Mg-9Al-1Zn-xV( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) 试验合金显微组织金相照片

Fig. 1 Microstructure of Mg-9Al-1Zn-xV ( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) test alloys



(a) 1<sup>#</sup>试样 ( $x=0$ ); (b) 2<sup>#</sup>试样 ( $x=0.1$ ); (c) 3<sup>#</sup>试样 ( $x=0.2$ ); (d) 4<sup>#</sup>试样 ( $x=0.3$ ); (e) 5<sup>#</sup>试样 ( $x=0.4$ ); (f) 6<sup>#</sup>试样 ( $x=0.5$ )

图 2 Mg-9Al-1Zn-xV( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) 试验合金显微组织 SEM 照片

Fig. 2 SEM photos of Mg-9Al-1Zn-xV ( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) test alloys

### 2.2 耐磨损性能

不同钒含量 Mg-9Al-1Zn-xV( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3,$

0.4, 0.5)试验合金的耐磨损性能测试结果如表2所示。从表2可以看出,与不添加合金元素钒( $x=0$ )相比,添加合金元素钒后试验合金的磨损体积减小,试验合金的耐磨损性能提高。合金元素钒有效改善了Mg-9Al-1Zn镁合金的耐磨损性能。此外,从表2还可以看出,随合金元素钒含量的逐渐增加,试验合金的磨损体积先减小后增大,耐磨损性能先提高后下降。当合金元素钒含量为0.4%( $x=0.4$ )时,试验合金的磨损体积最小,较不添加合金元素钒时减小了 $12.7 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ,磨损体积减小幅度达到29.8%,试验合金耐磨损性能最佳。这主要归功于合金元素钒的添加,合金元素钒与铝结合生成了弥散分布的细小颗粒状 $\text{Al}_3\text{V}$ 相,并使原本呈网状分布的鱼骨状 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相得以破碎成弥散分布的短条状,从而显著提高了试验合金的耐磨损性能。但是合金元素钒含量并不是越高越好,当合金元素钒含量过大,试验合金中 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相和 $\text{Al}_3\text{V}$ 相呈不均匀分布,存在成分和组织偏析,从而降低了试验合金的耐磨损性能。

表2 Mg-9Al-1Zn- $x\text{V}$ ( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) 试验合金耐磨损与耐腐蚀性能测试结果

Table 2 Wear resistance and corrosion resistance test results of Mg-9Al-1Zn- $x\text{V}$ ( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) tested alloys

| 钒含量/% | 磨损体积/ $10^3/\text{mm}^3$ | 腐蚀电位/V |
|-------|--------------------------|--------|
| 0     | 42.6                     | -0.876 |
| 0.1   | 38.1                     | -0.828 |
| 0.2   | 34.7                     | -0.803 |
| 0.3   | 32.6                     | -0.791 |
| 0.4   | 29.9                     | -0.769 |
| 0.5   | 31.4                     | -0.814 |

### 2.3 耐腐蚀性能

不同钒含量Mg-9Al-1Zn- $x\text{V}$ ( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ )试验合金的耐腐蚀性能测试结果如表2所示。从表2可以看出,与不添加合金元素钒( $x=0$ )相比,添加合金元素钒后试验合金的腐蚀电位正移,试验合金的耐腐蚀性能提高。合金元素钒有效改善了Mg-9Al-1Zn镁合金的耐腐蚀性能。此外,从表2还可以看出,随合金元素钒含量的逐渐增加,试验合金的腐蚀电位先正移后负移,试验合金耐腐蚀性能先提高后下降。当合金元素钒含量为0.4%( $x=0.4$ )时,试验合金的腐蚀电位最正,较不添加合金元素钒时正移了0.107 V(107 mV),腐蚀电位正移幅度达到12.2%,试验合金耐腐蚀性能最佳。合金元素钒改善试验合金的耐腐蚀性能,主要是因为Mg-9Al-

1Zn镁合金中添加的合金元素钒,与合金元素铝结合生成了细小颗粒状 $\text{Al}_3\text{V}$ 相,并使原本呈网状分布的鱼骨状 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相得以破碎成弥散分布的短条状,组织均匀性得到改善。当钒含量过大,试验合金中 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相和 $\text{Al}_3\text{V}$ 相呈不均匀分布,存在成分和组织偏析,试验合金耐腐蚀性能非但不能随合金元素钒含量的增加而提高,反而有所下降。

### 2.4 力学性能

不同钒含量Mg-9Al-1Zn- $x\text{V}$ ( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ )试验合金的力学性能测试结果如图3所示。从图3可以看出,与不添加合金元素钒( $x=0$ )相比,添加合金元素钒后试验合金的抗拉强度和屈服强度明显提高,断后延伸率也有增大。合金元素钒有效改善了Mg-9Al-1Zn镁合金的力学性能。此外,从图3还可以看出,随合金元素钒含量的逐渐增加,试验合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率均先增大后减小,试验合金力学性能先提高后下降。当合金元素钒含量为0.4%( $x=0.4$ )时,试验合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率均最大,分别较不添加合金元素钒时增大58、58 MPa、3.3%,增大幅度分别为20.9%、36.0%、40.2%,试验合金力学性能最佳。由此可以看出,合金元素钒提高了试验合金的力学性能,这主要是因为添加的合金元素钒与试验合金中的铝结合生成了颗粒状的细小 $\text{Al}_3\text{V}$ 相,同时试验合金中呈网状分布的鱼骨状 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相被破碎为弥散分布的短条状,使得试验合金内部组织更加均匀,从而明显改善了试验合金的力学性能。但是,当试验合金中的合金元素含量过大,试验合金内部的 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相和 $\text{Al}_3\text{V}$ 相出现不均匀地分布,成分和组织的偏析导致试验合金力学性能非但没能随合金元素钒含量的增加而提高,反而有所下降。

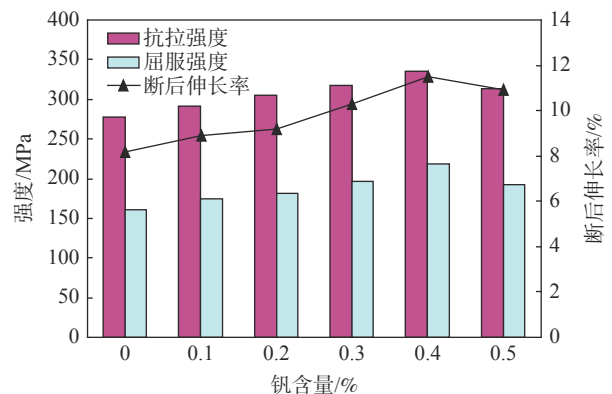


图3 Mg-9Al-1Zn- $x\text{V}$ ( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) 试验合金力学性能测试结果

Fig. 3 Mechanical properties of Mg-9Al-1Zn- $x\text{V}$  ( $x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) test alloys

### 3 结论

1)合金元素钒可以有效细化 Mg-9Al-1Zn 镁合金的内部组织,提高合金的力学性能、耐磨损性能和耐腐蚀性能。

2)当合金元素钒含量为 0.4%( $x=0.4$ )时, Mg-9Al-1Zn- $x$ V 试验合金的  $Mg_{17}Al_{12}$  相最为细小,合金中  $Mg_{17}Al_{12}$  相和  $Al_3V$  相呈弥散状分布在镁基体中,合金的力学性能、耐磨损性能和耐腐蚀性能均最佳。Mg-9Al-1Zn-V 镁合金的合金元素钒含量优选为 0.4%。

3)同不含钒的 Mg-9Al-1Zn 镁合金相比,当在 Mg-9Al-1Zn 镁合金中添加 0.4% 合金元素钒时,合金的磨损体积减小了  $12.7 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ,磨损体积减小幅度达到 29.8%;腐蚀电位正移了 0.107 V(107 mV),腐蚀电位正移幅度达到 12.2%;抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别增大 58、58 MPa、3.3%,增大幅度分别为 20.9%、36.0%、40.2%。

4) Mg-9Al-1Zn-0.4V 合金具有较佳的力学性能、耐磨损性能和耐腐蚀性能,合金产业化应用潜力较大。后续将进一步研究 Mg-9Al-1Zn-0.4V 的制备及成型工艺优化。

### 参考文献

- [1] Yue Haiyan, Fu Penghuai, Xu Xuwen, *et al.* Cumulative damage behavior study of high cycle fatigue of as-cast Mg-3.0Nd-0.2Zn-Zr alloy[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2020, 38(5): 693-700.  
(岳海燕, 付彭怀, 徐旭文, 等. 铸造 Mg-3.0Nd-0.2Zn-Zr 镁合金高周疲劳累积损伤行为[J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(5): 693-700.)
- [2] Yue Haiyan, Fu Penghuai, Hu Bin, *et al.* Application of two-step aging treatment in cast Mg-3Nd-0.2Zn-Zr alloy[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2020, 38(4): 517-524.  
(岳海燕, 付彭怀, 胡斌, 等. 双级时效在铸造 Mg-3Nd-0.2Zn-Zr 镁合金中的应用[J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(4): 517-524.)
- [3] Huang Fang, Xu Yang. Effect of pouring temperature on microstructure and properties of new vanadium microalloyed casting magnesium alloy[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(1): 65-69.  
(黄芳, 徐扬. 浇注温度对新型钒微合金化铸造镁合金组织与性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(1): 65-69.)
- [4] Chen Rongshi, Zhou Bo, Li Jilin, *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.  
(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.)
- [5] Fan Ruijun, Guan Zhiwei, Sun Cuixiang. Analysis of forging forming process for high strength magnesium alloys Mg-8Gd-1.5Y-1M containing Ti[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(5): 171-174.  
(樊瑞军, 关志伟, 孙翠香. 含钛高强镁合金 Mg-8Gd-1.5Y-0.8Ti 的锻造成形工艺分析[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(5): 171-174.)
- [6] Wang Zhongtang, Wu Kaiqi, Wang Minghao, *et al.* Study on dynamic recrystallization and microstructure evolution of magnesium alloy in process of composite deformation[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(19): 94-98.  
(王忠堂, 吴凯琦, 王明浩, 等. 镁合金复合变形过程中的动态再结晶及微观组织演变规律研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(19): 94-98.)
- [7] Gu Yuntao, Gao Xiaopeng, Dong Xiwang, *et al.* Microstructure and mechanical properties of Mg-Nd, Mg-Gd and Mg-Sb binary magnesium alloys[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(6): 35-38.  
(顾贇涛, 高霄鹏, 董喜旺, 等. Mg-Nd、Mg-Gd 和 Mg-Sb 二元镁合金的组织 and 力学性能[J]. 热加工工艺, 2021, 50(6): 35-38.)
- [8] Xu Shubo, Sun Haibo, Liu Ting, *et al.* Influence of die geometry on ECAP deformation uniformity of magnesium alloy[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2021, 56(2): 100-105.  
(徐淑波, 孙海波, 刘婷, 等. 模具几何形状对镁合金 ECAP 变形均匀性的影响[J]. 锻压装备与制造技术, 2021, 56(2): 100-105.)
- [9] Li Quan, Jin Chaoyang. A comparative study on thermal compression flow stress of AZ80 magnesium alloy described by

improved Fields-Backofen constitutive model[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(3): 221–228.

(李全, 金朝阳. 改进的Fields-Backofen本构模型描述AZ80镁合金热压缩流动应力的比较研究[J]. 锻压技术, 2021, 46(3): 221–228.)

- [10] Xu Jingchao, Zhang Yanru, Yang Yue, *et al.* Analysis on microstructure and cell biological activity of new magnesium alloy by hot squeeze casting[J]. Journal of Ningbo University(Natural Science & Engineering Edition), 2022, 35(1): 26–32.

(徐景超, 张雁儒, 杨越, 等. 热挤压铸造新型镁合金微观组织及细胞生物活性分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2022, 35(1): 26–32.)

- [11] Gao Xiaoshu, Lv Yun. Optimization of stamping process parameters of magnesium alloy sheet based on RSM and MPSO[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(15): 79–83, 87.

(高孝书, 吕云. 基于RSM和MPSO的镁合金薄板冲压工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2021, 50(15): 79–83, 87.)

- [12] Li Jilin, Feng Junning, Qin Chun, *et al.* Dendrite coherency point of WE54 magnesium alloy and its relation with solidification microstructure[J]. Foundry, 2021, 70(11): 1270–1276.

(李吉林, 冯俊宁, 秦春, 等. 铸造WE54镁合金的枝晶干涉点及其与合金显微组织的关系[J]. 铸造, 2021, 70(11): 1270–1276.)

- [13] Xiao Lv, Zhou Haitao, Wang Yanbo, *et al.* Linear shaped charge separation behavior and cutting mechanism of VW63Z cast magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(1): 11–15.

(肖旅, 周海涛, 汪彦博, 等. VW63Z铸造镁合金线型分离性能及切割机理研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(1): 11–15.)

- [14] Wang Ying, Li Guangde. Study on casting properties of two AZ magnesium alloys based on cloud model PID control[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(3): 71–73.

(王瑛, 李广德. 基于云模型PID控制的两种AZ镁合金铸造性能研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(3): 71–73.)

编辑 杨冬梅

## 超塑性钛合金研究取得重要进展

(2023年7月5日消息)超塑性成型技术有望解决复杂构件的成型问题,在航空航天等重要领域中有着广阔的应用前景。然而,目前多数金属超塑性成型的温度较高且应变速率极为缓慢,这不仅增大了超塑性成型的能耗与时间,还使成型后的材料表面发生了严重的氧化,制约了该技术的广泛应用。

为解决上述问题,中国科学院金属研究所杨柯、任玲研究团队与澳大利亚皇家墨尔本理工大学邱冬教授研究团队合作,在前期开发的高性能双相核壳纳米结构 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}_5\text{Cu}$ 合金基础之上设计并制备了具有多相纳米网状结构的新型钛合金,它利用基体中的纳米 $\beta$ 网促进微纳米晶 $\alpha$ 晶粒间的滑移与倾转,并利用沿 $\alpha/\beta$ 相界钉扎的纳米 $\text{Ti}_2\text{Cu}$ 相提高该纳米网状结构的稳定性,全面提升材料的超塑性变形能力。这一组织设计使材料的超塑性变形温度较 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ 合金下降了约250℃,在750℃和应变速率高达 $1\text{ s}^{-1}$ 的条件下,它可以获得超过900%的延伸率,意味着该材料超塑性变形的应变速率较现有材料提高了2~4个数量级。在超塑性变形后,多相纳米网状结构钛合金的组织不会粗化长大,解决了材料超塑性变形能力与组织热稳定性之间的固有矛盾,这对于推动超塑性成型技术的发展具有重要的意义。

摘自 [http://www.imr.cas.cn/xwzx/kydt/202307/t20230705\\_6806124.html](http://www.imr.cas.cn/xwzx/kydt/202307/t20230705_6806124.html)