

铸造 Mg-5Sm-4Gd 合金的反常抗拉强度

李萍¹, 黄蕾¹, 王莹¹, 张清²

(1. 洛阳理工学院土木工程学院, 河南洛阳 471023; 2. 河南科技大学材料科学与工程学院, 河南洛阳 471023)

摘要: 通过电子拉伸试验, 结合显微组织、稀土相和拉伸断口分析, 研究了铸造Mg-5Sm-4Gd合金的室温和高温抗拉强度。结果表明: 随着温度的升高, Mg-5Sm-4Gd合金的抗拉强度先升高后降低, 出现了反常温度效应。该合金主要由 α -Mg基体以及稀土相Mg₄₁Sm₅和Mg₅Gd组成, 平均晶粒尺寸约为200 μm 。拉伸断裂方式主要为脆性断裂。抗拉强度反常温度效应与合金的晶粒尺寸、 α -Mg基体的晶格常数及稀土相的热稳定性有关。

关键词: Mg-5Sm-4Gd合金; 抗拉强度; 反常温度效应; 稀土相

随着人们节能和环保意识的增强, 具有资源优势且节能环保的镁及镁合金材料的开发和应用日益受到重视^[1-4]。可以预期, 随着一些矿产资源的日益枯竭, 镁合金材料将会在多个领域显示出重要的应用价值和广阔的应用前景^[5-6]。相对于铝合金及钢结构材料, 镁合金密度低, 大量采用镁合金可以有效实现航空航天、交通运输行业减重节能的目标, 缓解日益严重的能源问题^[7-10]。相对于工程塑料, 镁合金散热快、抗电磁干扰能力强且容易回收利用, 可用来制作电子产品的外壳, 被称为对环境友好的绿色环保工程材料^[11-12]。所以, 扩大镁合金材料在工程领域的应用有助于实现人类社会的可持续发展。

当温度超过120 $^{\circ}\text{C}$ 时, 随着温度的升高, 普通镁合金的强度通常会迅速降低, 导致镁合金的应用受到限制。近年来, 一些研究者发现, 高Gd耐热镁合金的强度会随温度升高而升高, 出现所谓的“反常温度效应”。付三玲研究了Mg-(6, 9, 12, 15) Gd-1Sm-0.5Zr(质量分数, 下同)合金的组织 and 力学性能, 发现时效态合金组织主要由 α -Mg基体和Mg₅Gd相组成, 晶粒尺寸随Gd含量的增加先减小后增大, 合金在高温拉伸时出现显著的抗拉强度反常温度效应^[13]。陈晓亚研究了Mg-(9, 11, 13, 15) Gd-2Y-0.5Zr合金的组织与性能, 发现时效态合金的抗拉强度随温度升高出现先升高后降低的变化规律, 并在250 $^{\circ}\text{C}$ 达到最大值, 出现了显著的抗拉强度反常温度效应^[14]。朱利敏研究了Mg-10Gd-(0, 1, 3, 5) Sm-0.5Zr合金的显微组织和力学性能, 发现对于同一种合金, 随着拉伸温度的升高抗拉强度先升高后降低, 具有明显的反常温度效应, 而且Sm的加入强化了这种反常温度效应并使抗拉强度峰值出现的温度升高^[15]。陈籽佚研究了时效态Mg-12Gd-3Y-1Sm-(0, 0.4, 0.6, 1.2) Al合金的显微组织和力学性能, 发现当Al含量为0.6%时, 合金的力学性能最好, 而对于同一合金, 抗拉强度随着拉伸温度的上升呈现出增高的趋势, 表现出了反常温度效应^[16]。该效应可显著改善镁合金零部件在高温下特别是在温度剧烈波动条件下工作的安全可靠。对于该反常温度效应的产生, 研究者大多认为是多种因素共同作用的结果, 然而, 除了析出相作用之外的其他影响因素, 目前尚无统一地获得普遍认可的解释。

前期研究发现, 铸造Mg-5Sm-4Gd合金的抗拉强度也具有反常温度效应。因此本文对该合金在室温和高温下进行拉伸试验并对其显微组织、相、拉伸断口进行分

作者简介:

李萍(1978-), 女, 副教授, 硕士, 主要研究方向为材料力学。E-mail: eappol@163.com

通讯作者:

张清, 男, 教授, 博士。E-mail: foxzq@126.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

12-1694-05

基金项目:

河南省科技攻关计划项目(222102230112)。

收稿日期:

2024-03-04 收到初稿,

2024-05-21 收到修订稿。

析,探究可使该合金抗拉强度产生反常温度效应的原因,旨在为开发性能优异的耐热镁合金提供试验依据和参考思路。

1 试验方法

合金设计成分为Mg-5Sm-4Gd(质量分数,下同)。原材料为纯镁锭、Mg-30Gd和Mg-30Sm中间合金。合金熔炼在电磁感应炉中进行,使用高纯刚玉坩埚,保护气体为SF₆和CO₂(体积比为1:99)。原材料熔化后,将合金液升温至750℃,保温5 min,浇注到预热过的钢制模具中,获得合金铸锭,冷却后切割成厚约20 mm的试块,进行热处理,工艺为530℃/6 h固溶+230℃/12 h时效。选取一个试块进行化学成分测定,结果为Mg 90.4%, Sm 5.3%, Gd 4.3%,与设计成分相符合。

采用AG-I 250 kN型精密万能试验机,进行电子拉伸试验,测试合金的力学性能。拉伸试样为圆棒状,标距尺寸为 $\Phi 6$ mm × 30 mm。拉伸速率为1 mm/min,拉伸温度为室温(20℃)和高温(200~300℃)。制备金相试样,采用Axio Vert A1型光学显微镜观察合金的显微组织,采用D8 Advance X射线衍射仪(XRD)进行物相分析,采用带有能谱仪(EDS)的JSM-5610LV扫描电镜(SEM)对合金的稀土相和拉伸断口进行分析。

2 试验结果与分析

2.1 力学性能

表1为铸造Mg-5Sm-4Gd合金在室温(20℃)和200℃至300℃高温条件下的拉伸力学性能测试结果。每个力学性能均为两个试棒的平均值。由表1可知,室温下合金的力学性能并不理想,抗拉强度为182 MPa,伸长率为1.86%。随着温度的升高,抗拉强度和伸长率的变化规律并不完全一致。伸长率随着温度升高一直增大,200℃、250℃和300℃时分别为1.96%、2.80%和5.22%,表明合金的塑性越来越好。抗拉强度随温度升高先升高后降低,200℃、250℃时分别为203 MPa、214 MPa,300℃时降为192 MPa,仍高于室温(182 MPa)。综上可知,在一定温度范围内,随温度

表1 Mg-5Sm-4Gd合金的力学性能
Table 1 Mechanical properties of Mg-5Sm-4Gd alloys

温度/℃	抗拉强度/MPa	伸长率/%
20	182	1.86
200	203	1.96
250	214	2.80
300	192	5.22

升高,合金的抗拉强度并没有降低,反而升高,表现出明显的反常温度效应。

2.2 显微组织

图1和图2分别为铸造Mg-5Sm-4Gd合金的光学显微组织和XRD图谱。由图1可知,铸造合金的显微组织由 α -Mg基体以及散布在晶内和晶界处的黑色颗粒状第二相组成,结合图2可知,这些黑色颗粒状第二相为Mg₄₁Sm₅和Mg₅Gd。它们都是高熔点稀土相,熔点分别为540℃和642℃,在高温下仍保持较高的硬度,具有良好的热稳定性。这两种稀土相(第二相)分布在晶内和晶界上,相当于在 α -Mg基体中嵌入硬质颗粒,在高温拉伸时钉扎位错和晶界,阻碍位错运动和晶界滑动,从而提高合金高温性能。

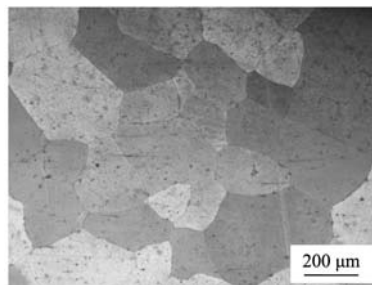


图1 Mg-5Sm-4Gd合金的光学显微组织
Fig. 1 Optical microstructure of Mg-5Sm-4Gd alloy

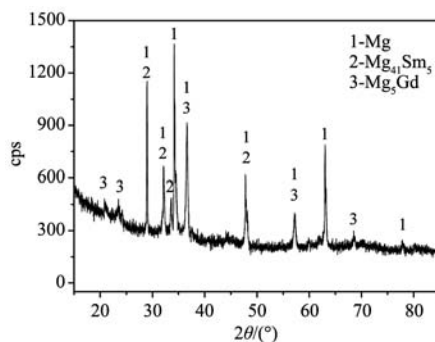


图2 Mg-5Sm-4Gd合金的XRD图谱
Fig. 2 XRD pattern of Mg-5Sm-4Gd alloy

合金的晶粒尺寸、晶格常数和晶轴比的变化均能影响合金的强度性能。根据图1,通过截线法测得合金平均晶粒尺寸为200 μ m。根据图2,可以得到 α -Mg的晶格常数及晶轴比,结果如表2所示。由表2可知,与纯镁相比,Mg-5Sm-4Gd合金的 α -Mg的 a 值减小, c 值增大,晶轴比 c/a 增大为1.628,越来越接近由紧密堆积球体得到的理论比值1.632。这些都会对合金的室温和高温强度产生重要的影响。

表2 Mg-5Sm-4Gd合金中 α -Mg的晶格常数及晶轴比
Table 2 Lattice constant and crystal axis ratio of α -Mg in Mg-5Sm-4Gd alloy

合金	a/nm	c/nm	c/a
纯镁	0.320 94	0.521 12	1.624
Mg-5Sm-4Gd	0.320 40	0.521 66	1.628

2.3 稀土相

为了深入研究合金中的第二相，使用扫描电镜（SEM）观察合金组织，发现合金中的第二相绝大多数以块状或颗粒状的形态存在，如图3所示。对图3中的标记第二相进行EDS分析，结果如表3所示。第二相A、B、C均含有Mg和大量稀土元素Sm和Gd，且Sm含量均比Gd含量高，根据元素含量比例，推测第二相A、B、C均为Mg与Sm和Gd构成的 $\text{Mg}_{41}\text{Sm}_5$ 和 Mg_5Gd 的混合相。第二相D、E也含有Mg和稀土元素Sm和Gd，但与A、B、C相比，Gd含量大大降低，因此推测第二相D、E仍为 $\text{Mg}_{41}\text{Sm}_5$ 和 Mg_5Gd 的混合相，其中稀土相 $\text{Mg}_{41}\text{Sm}_5$ 占有较大比例， Mg_5Gd 所占的比例较少。

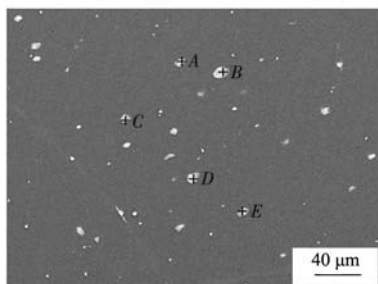


图3 Mg-5Sm-4Gd合金SEM组织形貌
Fig. 3 SEM microstructure morphology of Mg-5Sm-4Gd alloy

表3 图3中各标记相的EDS分析结果
Table 3 EDS analysis results of phases marked in Fig.3
 $w_B/\%$

位置	Mg	Sm	Gd
A	61.9	21.7	16.4
B	59.5	31.9	8.6
C	57.0	34.6	8.4
D	75.3	21.9	2.8
E	79.2	16.5	4.3

稀土相 $\text{Mg}_{41}\text{Sm}_5$ 和 Mg_5Gd 的形成，并在镁合金中弥散分布，因此能对镁合金产生显著的弥散强化，其强化温度可大大提高，从而对镁合金的高温强度起到有利作用。Mg和稀土元素形成的稀土相的硬度高于 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相，且在200~300℃时仍维持较高的硬度（表4^[6]），具有较高的热稳定性，因此在高温下仍能阻碍

表4 镁合金中一些相的显微硬度
Table 4 Microhardnesses of some phases in magnesium alloy

相	显微硬度 HV			
	20℃	200℃	250℃	300℃
$\text{Mg}_{41}\text{Sm}_5$	232	188	164	132
$\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$	183	158	125	84

晶界滑移，从而提高镁合金的高温强度，甚至使镁合金的高温强度有可能高于室温，出现反常温度效应。

2.4 拉伸断口

图4为Mg-5Sm-4Gd合金在室温以及高温条件下的拉伸断口形貌。可以看出，铸造Mg-5Sm-4Gd合金在室温条件下拉伸断口主要呈脆性断裂特征，其中一大部分为解理面，其表面平整且布满了河流状花纹，为典型的穿晶断裂，沿河流状花纹延伸方向，产生了大量的解理台阶（图4a）；温度升高到200℃，断口的解理面面积减小（图4b），但仍表现为脆性断裂；250℃条件下，断口中的撕裂棱数量增多（图4c），合金的塑性有所提高；300℃时，拉伸断口的解理面最小，撕裂棱继续增多（图4d），有向韧性断裂转变的趋势。拉伸断口形貌的变化与合金伸长率的测试结果（表1）具有一致性。

2.5 抗拉强度反常温度效应

合金的晶粒尺寸是影响镁合金强度的重要因素之一。晶粒尺寸越小，细晶强化作用越显著，对合金室温强度有利；但是同时晶界增多，高温下晶界滑动变得容易，反而对合金高温强度不利。本试验合金的平均晶粒尺寸为200μm，既不算太大也不算太小，由此导致的结果是，合金的室温强度不高，高温强度不低，抗拉强度出现反常的温度效应。

基体的晶格常数也对镁合金强度有重要影响。镁为密排六方结构，通过对合金 α -Mg基体的晶格常数分析得知， a 值减小， c 值增大，晶轴比 c/a 越来越接近由紧密堆积球体得到的理论比值1.632，可以理解为Mg的晶胞被沿着 a 轴压缩的同时沿着 c 轴拉伸，晶胞变得更加致密， α -Mg基体的强度因此增大。这可能使合金在高温条件下的强度性能得到提升，甚至出现反常的温度效应。

稀土相的热稳定性也能有效提高镁合金强度。稀土镁合金铸造过程中形成的稀土相 $\text{Mg}_{41}\text{Sm}_5$ 和 Mg_5Gd 多为硬脆相，在室温下能提高合金的硬度，同时也能成为裂纹源，导致合金的强度和塑性较差。但在较高温度条件下进行拉伸时，这些稀土相的硬度略微降低

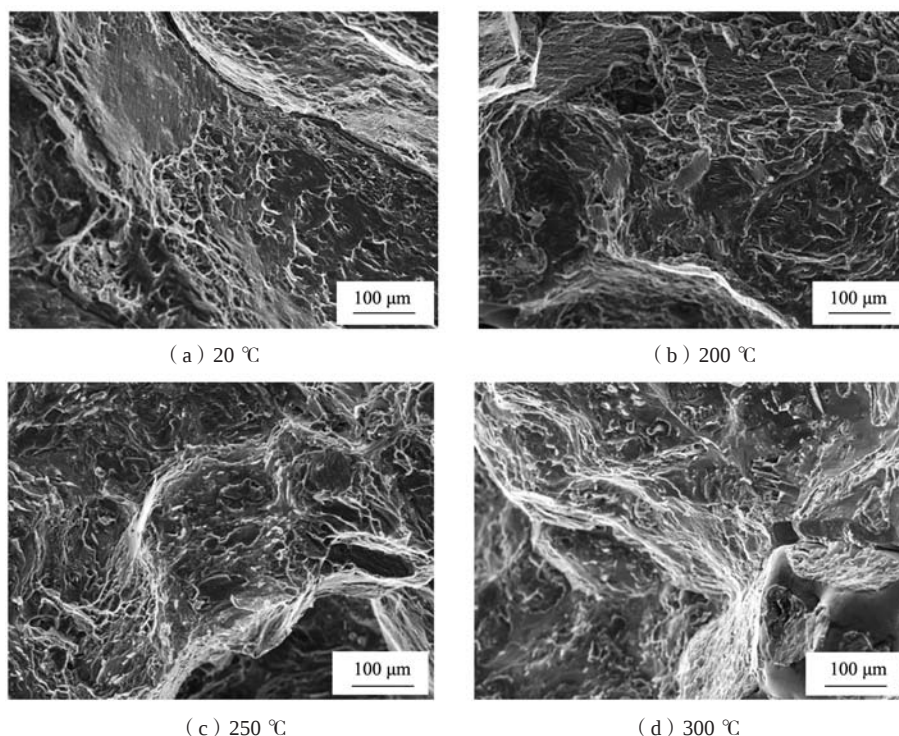


图4 Mg-5Sm-4Gd合金在不同温度下的断口形貌

Fig. 4 Fracture surface morphologies of Mg-5Sm-4Gd alloys at different temperatures

而塑性升高，在阻碍晶界滑动起到弥散强化作用的同时，应力集中得以缓解，裂纹不再首先在这些相上萌生，对变形的协调作用增强，合金不易发生脆性断裂，并有向韧性断裂转变的趋势，最终使合金在发生断裂前能承受比室温更大的变形和载荷，从而使合金表现出比室温更高的抗拉强度。这可能是合金产生抗拉强度反常温度效应的又一个原因。

关于镁合金的抗拉强度随温度增高而增高的反常温度效应，目前还没有获得一个普遍认可的解释。本文基于试验数据，对于使Mg-5Sm-4Gd合金产生抗拉强度反常温度效应的原因进行了初步的推测和分析，认为应与合金的晶粒尺寸和 α -Mg基体的晶格常数以及稀土相的热稳定性有关。此外，固溶的稀土元素、时效

过程中的析出相等也可能会有着一定的影响。该反常温度效应产生的具体原因仍需进一步深入研究。

3 结论

(1) 铸造Mg-5Sm-4Gd合金的抗拉强度随温度升高先升高后降低，200~300 °C时的抗拉强度均高于室温，出现了反常温度效应。

(2) Mg-5Sm-4Gd合金主要由 α -Mg基体和稀土相 $\text{Mg}_{41}\text{Sm}_5$ 、 Mg_5Gd 组成，平均晶粒尺寸约为200 μm 。

(3) Mg-5Sm-4Gd合金抗拉强度的反常温度效应可能与合金的晶粒尺寸和 α -Mg基体的晶格常数及稀土相的热稳定性有关。

参考文献:

- [1] 李华成, 程法嵩, 于雷, 等. 变质细化在Mg-Al系合金中的应用及研究进展 [J]. 铸造, 2023, 72 (12): 1535-1541.
- [2] WU Hongfei, HU Wenxin, MA Shaobo, et al. Effect of Ce on microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Ce magnesium alloys. [J]. China Foundry, 2023, 20 (4): 271-279.
- [3] PAN Fusheng, ZHANG Jing, WANG Jingfeng, et al. Key R&D activities for development of new types of wrought magnesium alloys in China [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20 (7): 1249-1258.
- [4] LUO Yulun, ZHANG Dingfei, HUA Jianrong, et al. Effect of high Y addition on microstructure and mechanical properties of Mg-2Zn-1Mn alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52 (1): 54-62.
- [5] 丁文江. 镁合金科学与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

- [6] 陈振华. 耐热镁合金 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [7] WANG G G, WEILER J P. Recent developments in high-pressure die-cast magnesium alloys for automotive and future applications [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11 (1): 78–87.
- [8] LIU Bo, YANG Jian, ZHANG Xiaoyu, et al. Development and application of magnesium alloy parts for automotive OEMs: a review [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11 (1): 15–47.
- [9] 来昊民, 白庆伟, 田迎春, 等. 脉冲磁场对稀土AZ91D镁合金凝固组织及性能的影响 [J]. 铸造, 2024, 73 (1): 68–75.
- [10] HE Feiyu, HU Wenxin, LIU Lijuan, et al. Effect of Zn addition on microstructure and mechanical properties of Mg-3Y-2Nd-0.5Zr alloy [J]. *China Foundry*, 2023, 20 (4): 299–306.
- [11] 王渠东, 吕宜振, 曾小勤, 等. 镁合金在电子器材壳体中的应用 [J]. 材料导报, 2000, 14 (6): 22–24.
- [12] 李晓敏. 压铸镁合金在电子产业中的应用及其发展前景 [J]. 轻金属, 2003 (7): 37–38.
- [13] 付三玲, 李全安, 井晓天, 等. Gd含量对Mg-Gd-Sm-Zr合金组织和性能影响 [J]. 材料热处理学报, 2016, 37 (8): 41–46.
- [14] 陈晓亚, 李全安, 陈君, 等. Gd含量对Mg-Gd-Y-Zr合金组织和性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2017, 38 (11): 21–27.
- [15] 朱利敏, 李全安, 周耀, 等. Sm对Mg-10Gd-0.5Zr合金组织及力学性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48 (1): 171–176.
- [16] 陈籽佚, 李全安, 陈晓亚, 等. 铝对时效态Mg-12Gd-3Y-1Sm合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 中国稀土学报, 2022, 40 (1): 128–134.

Abnormal Tensile Strength of Cast Mg-5Sm-4Gd Alloy

LI Ping¹, HUANG Lei¹, WANG Ying¹, ZHANG Qing²

(1. School of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract:

The room and high temperature tensile strengths of cast Mg-5Sm-4Gd alloy were studied by electronic tensile tests, and microstructure, rare earth phase and tensile fracture analysis. The results showed that the tensile strength of Mg-5Sm-4Gd alloy increased first and then decreased with increasing temperature, and had an abnormal temperature effect. The microstructure was mainly composed of α -Mg matrix and rare earth phases $\text{Mg}_{41}\text{Sm}_5$ and Mg_5Gd , and the average grain size was about 200 μm . The tensile fracture mode was mainly brittle fracture at room and high temperature. The abnormal temperature effect of tensile strength should be related to grain size of the alloy, the lattice constant of α -Mg matrix and the thermal stability of rare earth phases.

Key words:

Mg-5Sm-4Gd alloy; tensile strength; abnormal temperature effect; rare earth phase