

# 温度对 Mg-10Gd-2Y-0.5Zr 合金动态拉伸行为及断裂机理的影响

Effect of Temperature on the Dynamic Tensile Behavior and Fracture Mechanism of Mg-10Gd-2Y-0.5Zr Alloy

纪伟, 范亚夫, 陈捷, 王军

(中国兵器工业集团第52研究所烟台分所, 山东烟台264003)

Ji Wei, Fan Ya-fu, Chen Jie, Wang Jun (Yantai Branch of No. 52

Institute of China Ordnance Industry Group, Yantai 264003, Shangdong, China)

**摘要:** 利用带有加热装置的 Hopkinson Bar 拉伸系统在 423~798K、应变率处于  $10^3\text{ s}^{-1}$  范围内研究了两种挤压态的 Mg-10Gd-2Y-0.5Zr 合金的拉伸行为, 并借助光学显微镜和扫描电镜对试样断口附近的显微组织和断口形貌进行了分析。结果表明:  $T \leq 673\text{ K}$  时, 材料的破坏机理主要表现为浅韧窝与准解理的混合型断裂; 随着温度的进一步升高由于受晶界软化的影响材料的断裂机理逐渐转向以晶间断裂为主。  $T < 673\text{ K}$  时材料的主要变形机制是基面滑移, 随着温度的升高非基面滑移系将充分启动, 材料的延伸率也相应地在 735K 时达到最大值。  
**关键词:** Mg-Gd-Y 系合金; 高温; 冲击拉伸; 断口形貌  
**中图分类号:** TG146.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2009)10-0041-04

**Abstract:** The dynamic tensile behaviors of two kinds of Mg-10Gd-2Y-0.5Zr alloys were investigated using a high-temperature split Hopkinson Bar at 423-798K and strain-rate of about  $10^3\text{ s}^{-1}$ . Micro-structures adjacent to the fracture and morphologies were examined by optical microscope and scanning electron microscope. The results indicate that the fracture mechanism varies from the mixed mechanisms of shallow-dimples and quasi-cleavage fracture ( $T \leq 673\text{ K}$ ) to intergranular rupture ( $T \geq 735\text{ K}$ ) with increasing temperature. When  $T < 673\text{ K}$ , the main deformation mechanism of the tensile samples are basal slip. In addition to basal slip, pyramidal slip and prismatic slip will be gradually activated with continually increasing temperature, which account for the maximum elongation of the samples tensioned at 735K.  
**Key words:** Mg-10Gd-2Y-0.5Zr alloy; high temperature; impact tension; fractography

近年来,许多学者在镁合金的加工工艺及变形机理等方面展开了深入的研究并取得了显著的成果,镁合金的强度和抗蚀性能也随之得到了大幅度提高<sup>[1-3]</sup>。这使镁合金作为轻质结构材料在航空、航天,汽车及军工等领域的应用成为可能。由于这些领域的构件时常要承受冲击载荷,因此研究镁合金材料在冲击载荷作用下的变形行为和失效机理对于扩大镁合金在以上领域的应用就显得十分必要。目前已有少数学者涉及这一领域,但重点主要集中在高应变率下镁合金材料的力学响应上<sup>[4-8]</sup>,而很少有涉及材料微观组织变化和断裂机理的研究报道。因此,本研究以具有优异的抗高温蠕变性能的 Mg-Gd-Y 系合金为对象,研究温度对该合金动态拉伸行为的影响并通过扫描电镜(SEM)研究断口特征,试图对该合金在不同温度下的断裂机理做出较为直观的描述。

## 1 实验材料及方法

实验所选材料为经时效处理的两种热挤压态的 Mg-10Gd-2Y-0.5Zr(质量分数/%)合金(板材:厚×宽=30mm×150mm,挤压比为6;棒材:直径 $\phi$ =50mm,挤压比为13),时效温度为523K保温时间为8h,该合金的详细制备过程请参阅文献[9]。试样沿原材料的挤压方向截取,尺寸如图1所示。

拉伸试验在带有加热装置的 Hopkinson 拉杆上进行,将应变率控制在  $10^3\text{ s}^{-1}$  范围内。试样在样品台上被加热至指定温度并保温约 2min 后(入射杆和透射杆与试样的接触端也一起被加热),停止加热并迅速进行拉伸。将拉断的试样其中一半沿轴向剖制成金相试样,用于对断口附近的组织进行观察;将另一半做

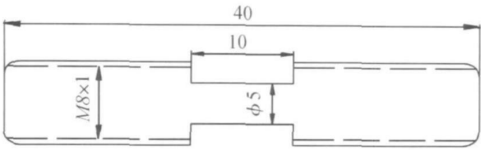


图 1 拉伸试样示意图 (mm)

Fig 1 Schematic of the tensile sample (mm)

断口扫描( KYKY-2008B 扫描电镜), 分析不同温度下材料的断裂方式。

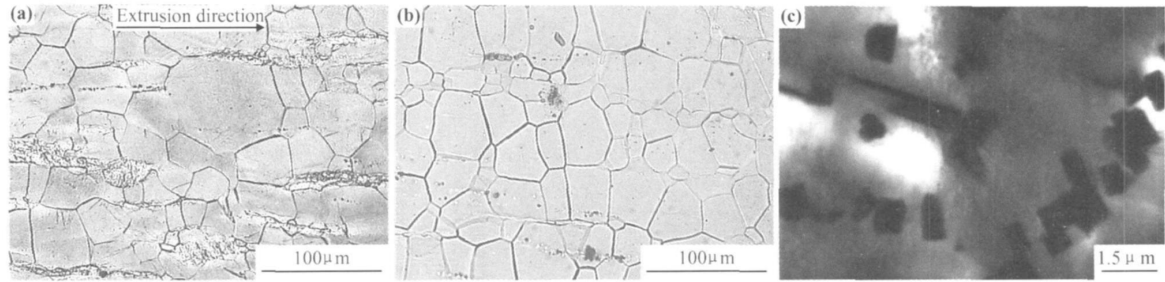


图 2 板材(a)和棒材(b)的原始金相组织以及板材的透射电镜照片(c)

Fig 2 Microstructures of the as-aged Mg-10Gd-2Y-0.5Zr alloys (a) sheet and (b) bar; TEM image of sheet (c)

状的 Mg-Gd 析出相。

表 1 列出了两种试样的实验参数。由于子弹的加速度由压气枪实现, 因此很难精确控制其速度, 但各试样的平均应变率仍可保证在  $10^3 \text{ s}^{-1}$  量级内。

表 1 试样的拉伸参数

Table 1 Parameters of the tension samples

Sample No	Temperature / K	Velocity/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
		Sheet	Bar
1	423	—	22 33
2	548	20 01	22 96
3	673	18 72	20 13
4	735	18 79	18 66
5	798	18 68	18 83

Note: “—” expresses the un-fractured sample

2 2 延伸率-温度曲线

图 3 为两种试样的断裂延伸率随温度的变化曲线。由于试样所受冲击载荷存在差异, 因此不能在整个实验温度范围内对两种试样的拉伸性能进行对比, 而只能选择实验条件接近的 4 号和 5 号试样进行对比。通过对比可以发现, 在  $T \geq 735 \text{ K}$  时板材和棒材的延伸率非常接近。这表明在相近实验条件下板材和棒材的塑性变形行为无明显差别。再结合两种试样的原始组织无明显差别(图 2), 可以推断出此次实验所采用的两种挤压方式的差异对材料的高温冲击拉伸性能影响很小。而两种试样在 548K 和 673K 两个温度点

2 结果与讨论

2 1 材料的原始组织及实验参数

从图 2a, b 所示的时效处理后板材和棒材纵截面的金相照片中可以看出, 挤压方式的不同并未引起材料显微组织的明显差异, 只是由于挤压比的不同造成了两种试样的平均晶粒尺寸间的差异, 板材和棒材的平均晶粒尺寸分别为  $28 \mu\text{m}$  和  $23 \mu\text{m}$ 。由图 2c 可以看出, 经时效处理后镁基体中分布着许多方形和长条

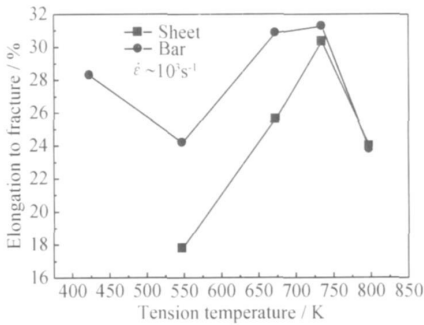


图 3 延伸率随温度的变化曲线

Fig 3 The elongation-to-fracture curves at different temperatures

所表现出来的延伸率的差别主要是由试样所受冲击载荷的不同引起的(见表 1)。

纯镁及大部分镁合金均为密排六方(hcp)晶体, 其塑性变形机制为基面、柱面、锥面滑移和锥面孪生。在室温变形中, 由于柱面和锥面滑移的临界剪切应力远高于基面滑移而不易被启动, 只有基面和基面上 3 个密排方向组成的 2 个独立滑移系, 提供垂直于  $c$  轴方向的应变, 而平行于  $c$  轴方向的应变主要由孪生产生<sup>[10]</sup>。因此低温下镁合金的塑性通常较差。随着温度的升高柱面和锥面等非基面滑移系的临界切应力大幅度降低使镁合金的滑移系增多塑性增加。非基面滑移系的临界切应力的大小与合金元素的种类和含量有密切关系, 大部分商业镁合金的非基面滑移系通常在

变形温度超过 573K 时才能够被充分激活<sup>[11]</sup>。Mg-Gd-Y 系合金中由于添加了较多的稀土元素 Gd, 在时效处理过程中会析出大量的 Mg-Gd 析出相(图 2c)。根据文献[12], 这些析出相主要为  $\beta'$  相和  $\beta$  相, 它们大多分布在镁基体的  $(\bar{2}110)$  面上。析出相的这种分布对镁基体的基面滑移具有阻碍作用, 提高了基面滑移的临界切应力, 使得该合金在低温下的塑性变形更加困难。当  $T \geq 673\text{K}$  时, 高温软化作用使得析出相对基面滑移的阻碍作用减弱, 同时非基面滑移系也随着临界切应力的降低而充分启动, 这些因素都促使该合金的高温塑性大幅度增加。当  $T = 798\text{K}$  时, 由于该温度已接近镁的熔点(923K), 所以在拉伸过程中将发生晶粒长大和晶界软化。晶粒长大和晶界软化都将加快裂纹的扩展速度而引起材料的过早断裂。因此当  $T > 735\text{K}$  时, 该合金的延伸率将会随着温度的升高而降低。

除了温度外影响镁合金塑性的另一重要因素就是织构。由于滑移系少变形镁合金在成型过程中会形成不同程度的基面织构, 即大部分晶粒的  $(0001)$  面在变形过程中会转向平行或近似平行于挤压面的方向。具有这种织构的材料在沿挤压方向拉伸时由于大部分晶粒的基面滑移系处于不利位置无法启动而往往表现出较低的延伸率。此外,  $\{10\bar{1}1\} - \{10\bar{1}2\}$  二次孪晶虽处于有利位置, 能够产生平行于  $c$  轴的应变, 但由于一方面该类孪晶在镁合金中不易形成, 另一方面孪晶直接产生的应变很小, 所以该类孪晶对试样延伸率的贡献很小。根据 Jiang 等<sup>[13]</sup> 的研究结果, 在 AZ31 和 AM30 两种镁合金中  $\{10\bar{1}1\}$  孪晶的体积含量在拉伸温度高于 473K 时即趋于零。从图 5 不同温度下断口附近的金相组织中也可以看出, 除了 1 号试样断口附近有少量孪晶外, 在其它断口附近几乎观察不到孪晶。据此可以将棒材的 1 号试样的延伸率高于 2 号试样的主要原因归结为以下两方面: 一方面可以认为 1 号试样中基面织构相对较弱, 即有更多晶粒的  $(0001)$  面处于有利方向, 在拉伸过程中能充分启动; 另一方面, 1 号试样在变形过程中  $\{10\bar{1}1\} - \{10\bar{1}2\}$  二次孪晶的形成使更多晶粒的基面转向有利于滑移的位置, 进一步促进了基面滑移, 提高了材料的塑性。

### 2.3 断口分析

各试样在不同温度点动态拉伸后宏观断口形貌见图 4。各断口均呈杯状, 各断口附近均有明显地颈缩。

由于板材和棒材在相同温度下的断口形貌非常接近, 故此处只选棒材为对象研究温度对该合金动态拉伸断裂机理的影响。棒材试样断口附近的纵截面低倍金相组织及相应的断口微观形貌如图 5 所示。

由图 5 a' - e' 可以看出, 材料的断口形貌随测试

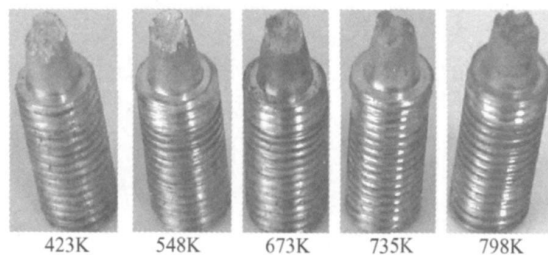


图 4 拉伸断口的宏观照片

Fig. 4 Macro photographs of specimens after dynamic tension

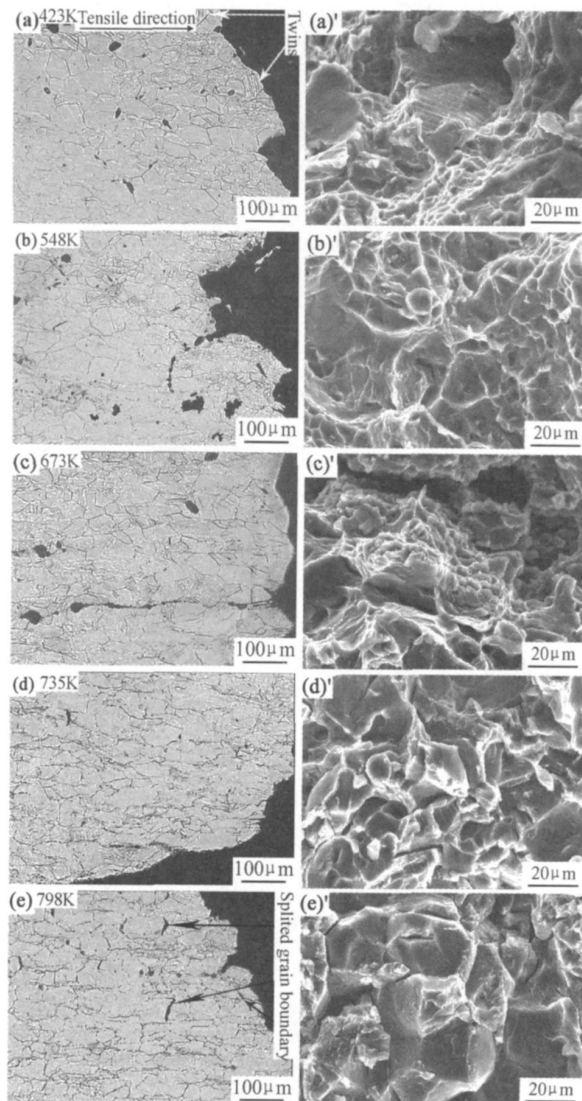


图 5 棒材试样在不同温度下拉伸断口附近纵截面低倍金相组织(a)-(e)和相应的微观断口形貌(a')-(e')

Fig. 5 Microstructures adjacent to tensile fracture (a)-(e) and their SEM morphologies of fractural surfaces (a')-(e') of the bar tested at different temperatures and at strain-rate of about  $10^3\text{s}^{-1}$

温度的变化具有较明显的变化趋势。

1 号和 2 号试样的断口形貌类似, 主要表现为浅韧窝与准解理的混合型破坏特征, 不同之处主要表现

在二者所占的比例上。相比之下, 1 号试样中韧窝的数量较少且有明显的解理台阶。对比图 5a 和图 5b 可以发现, 两个试样断口附近的金相组织中均有明显的孔洞的存在, 但 1 号试样中的孔洞体积相对较小且分布较分散, 而 2 号试样中的孔洞体积较大且有相互连接的现象。微孔洞是拉应力诱发断裂的主要表现形式。材料中的夹杂物或第二相等硬质点在应力波的作用下首先破碎或与基体脱离形成微孔。这些微孔在应力波的作用下长大并相互连接, 最终将形成裂纹。根据前面的分析, 由于 1 号试样中的晶粒取向更有利于基面滑移, 微孔附近的应力集中能通过基面滑移得到有效缓解。此外, 孪晶对塑性变形的协调作用也将缓解应力集中。因此, 1 号试样中的微孔就不易长大和连接。1 号和 2 号试样断口形貌及断口附近显微组织间的差异与图 3 中反映出的两个试样间延伸率的差异现象相吻合。

如图 5c 所示, 3 号试样断口附近的组织中仍然有孔洞存在, 有的孔洞已连接形成平行于拉伸方向的二次裂纹。从图 5c' 中也可以看到由于孔洞的长大连接而形成的二次裂纹。3 号试样的断口主要表现为准解理特征, 在断面上几乎观察不到韧窝。

如图 5d 和图 5d' 所示, 4 号试样的断口形貌主要由小的解理面组成, 解理面上没有韧窝分布, 一些小的解理面间通过撕裂棱连接。在断口附近的组织中几乎观察不到孔洞和二次裂纹。这也与 4 号试样表现出最大的延伸率相吻合。

如图 5e' 所示, 5 号试样的断口形貌表现为明显的颗粒状, 其断裂机理以晶间断裂为主, 穿晶解理断裂为辅。从图 5e 中可以看出, 5 号试样断口附近的金相组织中虽然没有圆形的孔洞和明显的二次裂纹, 但存在由于晶界开裂而形成的条状微裂纹。这主要是由于高温下晶粒间的结合力减弱所致。

综上所述, 随着变形温度的升高, Mg-Gd-Y 系合金的断裂机理发生了明显变化。当  $T \leq 673\text{K}$  时, 试样的破坏表现为浅韧窝与准解理的混合型; 随着温度的进一步升高, 由于受晶界软化的影响, 断裂机理逐渐向晶间断裂演变。

### 3 结论

(1) Mg-Gd-Y 系合金的动态拉伸断裂机理随着测试温度的变化而发生明显的转变。当  $T \leq 673\text{K}$  时主要表现为浅韧窝与准解理的混合型断裂; 随着温度的进一步升高, 非基面滑移系充分启动, 二相粒子和夹杂物处的应力集中得到有效释放, 从而使韧窝的形核几率降低。同时由于高温下的晶界软化效应使得晶间断裂

比例增加, 当  $T = 798\text{K}$  时, 晶间断裂已占主导地位。

(2) 沿挤压方向拉伸时, 材料的主要变形机制是基面滑移; 而  $\{10\bar{1}1\} - \{10\bar{1}2\}$  二次孪晶只存在于 1 号试样断口附近的金相组织中, 由于数量很少它们对提高材料塑性的贡献有限。

(3) 两种挤压态的 Mg-Gd-Y 系合金的冲击延伸率均在 735K 时达到最大值, 随着温度的进一步升高, 由于受晶界软化的影响材料的塑性将降低。

(4) 从两种不同挤压态的 Mg-Gd-Y 系合金试样在相近实验条件下的表现及相似的断口形貌可以判断这两种挤压方式对材料的动态拉伸性能及断裂机理无明显影响。

### 参考文献

- [1] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium properties-applications-potential[J]. Mater Sci Eng A, 2001, 302: 37-45.
- [2] 颜永年, 李茂盛, 林峰, 等. 变形镁合金的研究热点概述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(5): 613-617.
- [3] 李姝, 王伯健. 变形镁合金的研究与开发应用[J]. 材料热处理, 2007, 36(6): 65-68.
- [4] 沙桂英, 徐永波, 于涛, 等. AZ91 镁合金的动态应力-应变行为及其应变率效应[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(4): 77-81.
- [5] 张星, 张治民, 李保成. AZ31 镁合金动力学行为实验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(4): 226-227.
- [6] YOKOYAMA T. Impact tensile stress-strain characteristics of wrought magnesium alloys[J]. Strain, 2003, 39: 167-175.
- [7] ISHIKAWA K, WATANABE H, MUKAI T. High strain rate deformation behavior of an AZ91 magnesium alloy at elevated temperature[J]. Mater Lett, 2005, 59: 1511-1515.
- [8] 范亚夫, 陈捷, 宁俊生, 等. 变形镁合金材料抗弹性能实验研究[A]. 第八届全国爆炸力学学术会议论文集[C]. 江西: 中国力学学会爆炸力学委员会, 2007. 150-157.
- [9] HE S M, ZENG X Q, PENG L M, et al. Microstructure and strengthening mechanism of high strength Mg-10Gd-2Y-0.5Zr alloy[J]. J Alloys Compd, 2007, 427: 316-323.
- [10] 陈振华, 杨春花, 黄长清, 等. 镁合金塑性变形中孪生的研究[J]. 材料导报, 2006, 20(8): 107-113.
- [11] 肖阳, 张新明, 陈健美, 等. Mg-9Gd-4Y-0.6Zr 合金挤压 T5 态的高温组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(4): 709-714.
- [12] HE S M, ZENG X Q, PENG L M, et al. Precipitation in a Mg-10Gd-3Y-0.4Zr (%) alloy during isothermal ageing at 250°C[J]. J Alloys Compd, 2006, 421: 309-313.
- [13] JIANG L, JONAS J J, MISHRA R K, et al. Twinning and texture development in two Mg alloys subjected to loading along three different strain paths[J]. Acta Mater, 2007, 55: 3899-3910.

收稿日期: 2008-06-19; 修订日期: 2008-11-01

作者简介: 纪伟(1983—), 男, 硕士研究生, 从事镁合金材料动态力学性能研究, 联系地址: 中国兵器工业集团第五二研究所烟台分所(264003), E-mail: jw5807@163.com