

热处理对 ZK60 镁合金力学和阻尼性能的影响

王敬丰, 高 珊, 潘复生, 汤爱涛, 丁培道

(重庆大学 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044)

摘 要: 采用显微组织观察、拉伸试验、阻尼测试等方法研究了时效处理 (T5)、固溶处理 (T4) 及固溶后时效处理 (T6) 3 种不同热处理工艺对挤压态 ZK60 镁合金显微组织、力学性能及阻尼性能的影响。研究发现: 这 3 种不同的热处理工艺对 ZK60 镁合金的抗拉强度、屈服强度及延伸率有一定的影响, 但均可使 ZK60 镁合金的阻尼性能得到不同程度的提高, 3 种不同热处理工艺对 ZK60 镁合金阻尼性能的影响规律可通过 G-L 理论很好解释。

关键词: 镁合金; 力学性能; 阻尼性能; 位错

中图分类号: TG132.2⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)06-1029-04

随着近代工业和交通业的不断发展, 振动和噪声已成为三大公害之一, 阻尼材料的开发及应用就是从材料角度达到减振降噪的措施之一^[1]。早在 20 世纪 50 年代, 人们就根据材料的滞弹性理论, 开始探索金属型的高阻尼材料^[2]。由于现代工业的发展是以构件设计轻量化、高强度化、运行高速化以及尽可能采用整体加工工艺成型为特点, 因此, 所选用的高阻尼材料还必须兼有高强度和其他性能^[3]。金属镁及其合金是目前应用最轻的结构材料, 具有铝和钢不可替代的性能, 如高比强度、高比弹性模量等, 而且镁合金的高阻尼减振性更是其他结构材料所不具有的特点^[4]。其中强度较高的 ZK60 镁合金作为一种比较成熟的变形镁合金, 已经得到广泛应用^[5]。然而, 很少有文献对 ZK60 镁合金阻尼性能研究的报道, 且其阻尼和力学性能之间的联系机理尚不清楚。因此在不改变 ZK60 成分并保证其较好力学性能的基础上, 希望通过不同的热处理工艺对其阻尼性能有所改善, 开辟 ZK60 镁合金工业应用的新领域。本研究对 ZK60 镁合金进行了时效处理、固溶处理以及固溶加时效热处理工艺, 以期找出这 3 种不同热处理工艺对其力学性能和阻尼性能的影响规律。

1 实 验

实验材料为 $\phi 258$ mm 的 ZK60 半连续铸锭, 其化学成分为 Mg-5.6Zn-0.54Zr (质量分数, %)。首先对其进行均匀化退火, 退火工艺为 390 °C, 8 h。接着在

2500 t 的 LXJ-卧式挤压机上将铸态合金进行一次热挤压, 挤压比为 11、挤压速度为 2~8 m/min、挤压温度为 380 °C。然后对挤压后的 ZK60 镁合金分 3 批分别进行时效热处理、固溶热处理和固溶加时效热处理, 3 种热处理的工艺如表 1 所示。

表 1 试样的热处理工艺

Table 1 Heat treatment process of ZK60 alloys

Process No.	Heat treatment process
F	Extrusion state
T5	180 °C, 24 h
T4	400 °C, 3 h
T6	400 °C, 3 h+180 °C, 24 h

将经过以上 3 种不同热处理工艺得到的试样在新三思 CMT-5105 微机控制电子万能试验机上进行拉伸试验, 拉伸速率为 3 mm/min。分别在 TA Q800 DMA 动态机械热分析仪上进行阻尼性能的测试, 实验所用的样品经过线切割得到, 尺寸为 45 mm×5 mm×1 mm, 实验主要测量其在室温下应变振幅-阻尼变化的曲线。测试频率: $f = 1$ Hz; 测试振幅范围: $0 \sim 2 \times 10^{-3}$; 测试方式: 单悬臂梁。

2 实验结果

2.1 微观组织

图 1 是试样不同热处理状态下的横截面金相组织。从金相照片可以看出 ZK60 镁合金经过时效后晶

收稿日期: 2008-08-05

基金项目: 国家“973”项目(2007CB613704); 国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(50725413); 国家科技支撑项目(2007BAG06B04); 重庆市科技攻关计划资助项目(2008AB4114)

作者简介: 王敬丰, 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044, 电话: 023-65112153; E-mail: jfwang@cqu.edu.cn

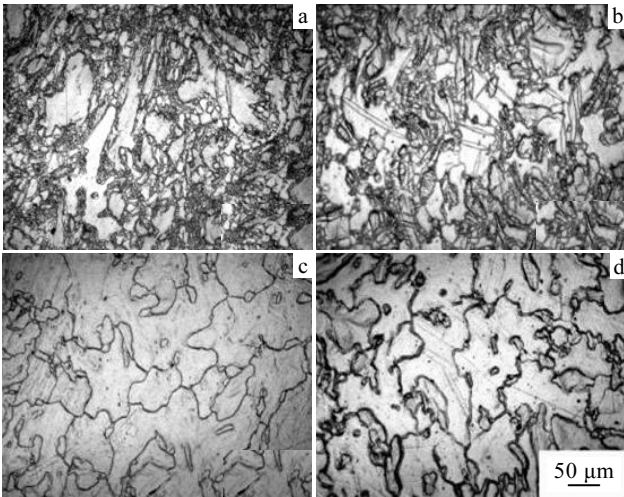


图 1 ZK60 镁合金 F 态、T5 态、T4 态和 T6 态的金相照片

Fig.1 OM microstructures of ZK60 magnesium alloys by different heat treatments: (a) F, (b) T5, (c) T4, and (d) T6

粒大小基本没有变化，同样是动态再结晶晶粒长大后形成的等轴晶与锻造后形成的柱状晶相互夹杂。但是在某些部位能够清晰的看到点状和团状的析出物，同时也存在少量的孪晶。析出物和孪晶将对材料的力学性能产生积极影响，有利于材料力学性能的提高。经过 400 °C，3 h 固溶处理后，晶粒明显长大，其尺寸达到了 100 μm 左右。虽然锻造后的柱状晶在高温下有所长大，但是长大后的晶粒还是在一定程度上保存着原始的柱状晶形貌。除此之外，晶界也变得细小，说明富 Zn 共晶体溶解程度较高，固溶效果较好。富 Zn 共晶体的存在使得 ZK60 在变形过程中容易在晶界处产生应力集中，从而产生裂纹，降低其塑性。固溶后再进行时效处理，晶粒大小基本没有改变，但晶界更粗大清晰，这是时效后的析出物和共晶体相互叠加的结果。同时在晶粒内部分布有团状和细小的点状析出物，可能会在一定程度上改变 ZK60 的力学和阻尼性能。

2.2 力学性能

经过挤压的 ZK60 镁合金在变形过程中，从弹性变形过渡到塑性变形并没有明显的屈服点，弹性变形过程对应的应变也较小。且材料屈服后，进入均匀塑性变形阶段，随应变的增加，应力基本保持稳定。

热处理对 ZK60 镁合金力学性能的影响规律如图 2 所示。图中标出了其抗拉强度 σ_b 、屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 和延伸率 $\delta/\%$ 的具体数据。从图 2 可以看出，挤压试样经过热处理后，抗拉强度略有降低。但除了固溶处理态，屈服强度在一定程度上得到提高，其延伸率也均有所

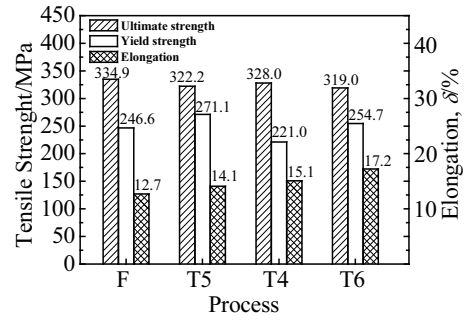


图 2 ZK60 镁合金不同热处理状态的力学性能

Fig.2 Mechanical properties of ZK60 magnesium alloys by different heat treatments

提高。各种状态的屈强比为 0.74 (F)、0.84 (T5)、0.67 (T4)和 0.80 (T6)，可以看出经过时效处理和固溶加时效处理的屈强比最高，但是固溶处理后的屈强比却有所降低，固溶加时效后延伸率得到了近 5% 的提高。

2.3 阻尼性能

ZK60 镁合金经过挤压和锻造后的阻尼-应变曲线如图 3 所示。横坐标为应变振幅，纵坐标表示材料阻尼性能，用 Q^{-1} 表示。从图 3 可以看出，ZK60 镁合金经过挤压和锻造后的阻尼-应变曲线清楚地展示了 2 个区域：在第 1 个区域里，应变振幅较小，阻尼参数 Q^{-1} 与应变振幅几乎无关，呈水平直线，待达到一定的应变振幅之后，即应变大于临界值 10^{-3} 时^[6]， Q^{-1} 随应变振幅的增大而快速增大。因此合金的阻尼性能 Q^{-1} 可以表示成为与应变无关部分和应变相关部分之和，分别用 Q_0^{-1} 和 Q_h^{-1} 表示，即

$$Q^{-1}(\epsilon) = Q_0^{-1} + Q_h^{-1}(\epsilon) \tag{1}$$

在小应变下，试样 Q^{-1} 主要由 Q_0^{-1} 组成，当应变超过某个临界值后， Q^{-1} 主要由 $Q_h^{-1}(\epsilon)$ 构成。图中合金各种状态的 Q_0^{-1} 都基本一致，而高应变区时，未热处理态阻尼性能最差，其次是直接时效处理，阻尼性能最好的是固溶处理，而固溶加时效处理介于时效处理和固溶处理之间。

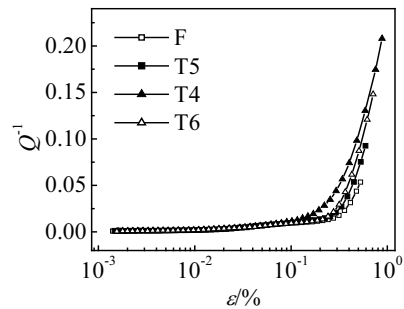


图 3 ZK60 镁合金热处理后的阻尼-应变曲线

Fig.3 Relationship between damping capacity Q^{-1} of ZK60 magnesium alloys and strain amplitude

3 结果分析

镁合金在热处理过程中力学性能变化的主要原因是由于晶粒大小及析出物的变化。粗大的晶粒将会对材料的力学性能产生负面影响^[7]。晶粒的细化在一定程度上可以有效改善材料的力学性能,但是晶粒越细小,晶界面积将越大,晶界对位错运动的阻碍作用将越强烈,除此之外,晶界自身的移动也变得困难,对材料的阻尼性能将产生一定的负面影响,而析出物对位错的移动有钉扎作用,使位错移动比较困难,影响阻尼性能的进一步提高^[8]。另外,材料阻尼性能的显著差别与晶体中位错组态的变化也有着直接联系^[9]。基本上有着力学性能越好阻尼性能越差的规律。

挤压后直接时效的 T5 态合金强度最高,结合图 1 可知,经过 T5 处理后,合金仍然保留部分变形组织,其中的位错孪晶等会使变形困难,故屈服强度较高,而且由于在时效过程中有大量第二相会析出,因此合金中黑色第二相明显增多。比较细小的一类第二相是析出的 $\beta(\text{MgZn})$ 相,这些细小的析出相对合金强度的提高也是有益的。固溶处理时,使挤压过程中产生的有利于第二相析出的亚结构消失,合金内部几乎见不到位错等变形组织,只有明显的经高温处理后的完全再结晶晶粒。因此其屈服强度有所降低。经过 T6 处理后,合金中析出了第二相,这些第二相的尺寸在此时效制度下明显大于 T5 状态,因此强度会有一定程度的降低^[10]。

挤压后未热处理态合金高应变振幅下阻尼性能最差,可能有以下原因:第一,从图 1 看,柱状晶和细小的动态再结晶晶粒最多,这 2 种形貌的晶粒都对材料的阻尼性能不利;第二,经过挤压后,使得大量的位错相互缠结,降低了可动位错的密度。

固溶处理后,拥有最好的高应变振幅阻尼性能,其中有以下有利于阻尼提高的因素:第一,固溶处理后,晶粒得到了长大,且晶粒呈现出等轴晶形貌,有利于位错的运动;第二,高温下的长时间保温,可以消除位错的相互缠结,增加了可动位错的密度;第三,析出物溶入基体有利于位错移动。因此固溶处理后阻尼性能得到优化。固溶后再时效处理与固溶处理相比,高应变振幅阻尼有所下降。这与时效后第二相的析出有很大关系。固溶处理后再进行时效,杂质原子以第二相的形式析出。第二相的增加,增加了位错的强钉扎点,从而使得在高应变振幅下,位错脱钉更不容易,阻尼性能有所下降,而直接时效态的阻尼性能最差也是这个原因,直接时效态的析出物比固溶后时效态的还要多些,所以对位错移动的钉扎作用更强,阻尼性

能也就更差。

最后,材料的阻尼与其微观组织缺陷也是密切相关的,这种缺陷包括位错、晶界、微裂纹等^[11]。金属及合金在室温时的点缺陷阻尼极其微小,晶界粘性滑移造成的阻尼只在较高温度下发生,此外在本实验的合金材料中未发现显微孔洞或微裂纹,因此,可以认为本实验中的阻尼是由位错引起的,用 G-L 模型可很好的解释位错阻尼^[12]。

根据 G-L 位错钉扎模型^[13],在低温下镁合金阻尼是由可动位错与点缺陷的交互作用产生的。晶体中位错除了被一些不可动的点缺陷(一般位错网节点或沉淀粒子,称为“强钉”)钉扎外,还被一些可以开脱的点缺陷(如杂质原子、空位等,称为“弱钉”)钉扎着。在小应变振幅下,位错在强钉扎点处被钉扎住,只是在弱钉点之间“弓出”作往复运动,在运动过程中,需克服阻尼力,从而引起较小的内耗,可用如下公式表示^[14]:

$$Q_0^{-1} = ABL_c^4 \omega / (36Gb^2) \quad (2)$$

式中: A 为可动位错密度, L_c 为弱钉扎点之间的长度, ω 为角频率, G 为剪切模量, b 为柏氏矢量, B 为常数。

在高应变振幅下,当外加应力增加到脱钉应力时,位错在弱钉扎点处开脱而发生所谓“雪崩式”的脱钉过程,但当应力撤去时,位错段做弹性收缩,最后被重新钉扎住。在脱钉与缩回的过程中,位错的运动情况不同,对应的应力-应变曲线包含有一条滞后回线,因而产生了很大的阻尼,用如下公式表示^[15]:

$$Q_h^{-1} = \frac{C_1}{\varepsilon} \exp\left(-\frac{C_2}{\varepsilon}\right) \quad (3)$$

$$C_1 = \Omega L_N^3 K \eta \alpha / \pi^2 L_c^2 \quad (4)$$

$$C_2 = K \eta \alpha / L_c \quad (5)$$

式中: ε 是应变振幅, Ω 为取向因子, K 为与弹性系数的各向异性性和样品取向有关的因子, η 为溶质和溶剂原子的错配系数, α 为点阵常数, L_N 是强钉扎点之间的长度, L_c 是弱钉扎点之间的长度。此公式还可改写为:

$$\ln(\varepsilon \cdot Q_h^{-1}) = \ln C_1 - C_2 \varepsilon^{-1} \quad (6)$$

可见 $\ln(\varepsilon \cdot Q_h^{-1})$ 与 ε^{-1} 应成线形关系,截距为 $\ln C_1$,斜率为 $-C_2$ 。图 4 是根据实验数据作出的 $\ln(\varepsilon \cdot Q_h^{-1})$ 与 ε^{-1} 的关系图。图中的直线关系说明本实验中 3 种热处理工艺下试样的阻尼行为符合 G-L 位错钉扎理论。

根据(6)式可知,合金阻尼性能的大小主要由材料本身参数 C_1 和 C_2 所决定,即 C_1 越大、 C_2 越小,合金的阻尼性能越好。从图 4 可以看出, T4 态和 T6 态的斜率(与 C_2 有关)一样,但是 T4 态的截距(与 C_1 有关)大于 T6 态,所以 T4 态阻尼性能高于 T6 态,而 T5 态的斜率大于另外 2 种热处理态,所以阻尼性

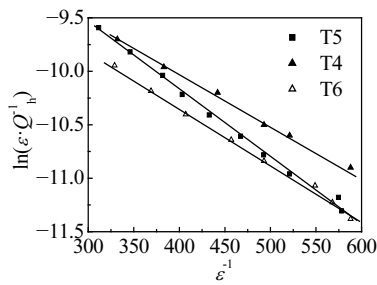


图 4 ZK60 镁合金不同热处理后的 G-L 曲线

Fig.4 G-L plots of ZK60 magnesium alloys

能低于其他 2 种状态。在 T4 处理时, 第二相的溶入和晶粒的长大使强钉数量减少, 增大了 L_N , 因而造成 Q_h^{-1} 增大, 其他 2 种热处理的长时间时效会使基体析出第二相形成强钉, 故阻尼性能有所下降。

4 结 论

1) 3 种不同热处理工艺 (时效处理、固溶处理和固溶加时效处理) 对 ZK60 镁合金的力学性能影响中, 直接时效态的好于固溶后时效态, 最差的是固溶态。

2) 热处理后, ZK60 镁合金的阻尼性能得到不同程度的改善。其中固溶处理对 ZK60 合金阻尼性能的影响最大, 其次是固溶加时效处理, 最后是直接时效处理。

3) 满足力学性能越好阻尼性能越差的规律, 用 G-L 位错理论可以很好的解释热处理工艺对 ZK60 镁合金力学性能和阻尼性能的影响。

参考文献 References

- [1] Huang Zhenghua(黄正华) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(3): 375
- [2] Gu Jinhai(顾金海) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34: 1423
- [3] Gao Zhiyong(高智勇) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(9): 1534
- [4] Liu Chuming(刘楚明) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2005, 15: 1319
- [5] Zhang Xiaofang(张晓芳) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2008, 39: 29
- [6] Liu Zijuan (刘子娟) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2006, 35: 35
- [7] Wang Xiaolin(王晓林) *et al.* *Materials Science and Technology*(材料科学与工程)[J], 2005, 16: 567
- [8] Dong Shoujun(董守军) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2006, 35: 16
- [9] Tsui R T C. *Acta Metallurgica*[J], 1967(15): 1723
- [10] Yu Kun(余 琨) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2007, 17: 188
- [11] Hiroyuki Watanabe *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2004, 51: 291
- [12] Zhenyan Zhang *et al.* *Material Science Forum*[J], 2007, 546: 257
- [13] Zhang Y K *et al.* *Material Science Forum*[J], 2007, 549: 495
- [14] Zhang Jia(张 佳) *et al.* *Journal of Materials Science and Engineering*(材料科学与工程)[J], 2006, 24: 916
- [15] Granato A, Lücke K. *Journal of Applied Physics*[J], 1956, 27: 789

Influence of Heat Treatment on Mechanical and Damping Properties of As-Extruded ZK60 Magnesium Alloy

Wang Jingfeng, Gao Shan, Pan Fusheng, Tang Aitao, Ding Peidao

(National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The microstructure, mechanical and damping properties of ZK60 magnesium alloy in the solution treatment, ageing treatment and solution-ageing treatment states were investigated by using the optical microscope, tensile test and dynamic mechanical analyzer. The results show that the three heat treatments have some influences on the ultimate strength, the yield strength and the elongation of ZK60 magnesium alloys, and improve their damping properties to some extent. The influences of heat treatment technology on damping properties can be explained by the G-L theory.

Key words: magnesium alloy; mechanical property; damping capacity; dislocation

Biography: Wang Jingfeng, Ph. D., Associate Professor, College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China, Tel: 0086-23-65112153, E-mail: jfwang@cqu.edu.cn