

加工工艺对 ZK60 镁合金力学性能和阻尼性能的影响

王敬丰^{1,2}, 高 珊^{1,2}, 潘复生¹, 汤爱涛^{1,2}, 丁培道¹

(1. 重庆大学 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044;

2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 采用显微组织观察、拉伸实验和阻尼测试等方法研究了一次挤压、二次挤压及锻造这 3 种不同塑性加工工艺对 ZK60 镁合金的显微组织、力学性能及阻尼性能的影响。结果表明: ZK60 变形镁合金经 3 种塑性加工工艺处理后, 不同变形态间的抗拉强度、屈服强度及伸长率相差不大, 但其阻尼性能却发生显著变化, 其中锻造态 ZK60 镁合金的阻尼性能相对于挤压态的提高 2 倍多; 采用 G-L 理论分析 3 种不同变形加工工艺对 ZK60 镁合金阻尼性能的影响规律。

关键词: 镁合金; 力学性能; 阻尼性能; 位错

中图分类号: TG 146 **文献标识码:** A

Influence of process technology on mechanical and damping properties of ZK60 magnesium alloys

WANG Jing-feng^{1,2}, GAO Shan^{1,2}, PAN Fu-sheng¹, TANG Ai-tao^{1,2}, DING Pei-dao¹

(1. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The microstructure, mechanical properties and damping properties of ZK60 magnesium alloy in the first extrusion, second extrusion and forging states were investigated by optical microscopy, tensile test and dynamic mechanical analyzer. The results show that the three different processes technologies have little influences on the ultimate strength, yield strength and elongation of ZK60 magnesium alloy, but the damping properties of the ZK60 magnesium alloys change obviously after the three different processes technologies. The damping properties of ZK60 magnesium alloy in forging state are twice more than those in extrusion state. The influences of processes technology on the damping properties can be explained by G-L theory.

Key words: ZK60 magnesium alloys; mechanical properties; damping capacity; dislocation

现代工业对轻量化、高速化和大功率化的要求使得振动和噪声的问题变得尤为突出, 因此, 低密度、高强度、高阻尼的金属结构功能一体化材料成为最紧迫的材料需求之一, 而镁合金作为阻尼性能最好的结构功能材料之一, 具有质量轻和强度高优良性能, 能够满足这些要求, 所以引起了广泛的关注^[1-5]。其中纯镁的阻尼性能最好, 但纯镁的力学性能低, 因而不

能直接应用, 而在提高其力学性能的同时, 阻尼性能会因为位错型阻尼机制^[9]而降低, 此矛盾至今未能得到很好的解决。目前的研究思路主要是从纯镁或高阻尼镁合金出发, 通过添加合金元素^[6]和复合强化等^[1]手段来提高其力学性能, 但效果并不理想。张修庆等^[7]在研究镁基复合材料阻尼性能的现状时发现, 虽然将镁合金制成复合材料对其力学性能有所改善, 但

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10876045); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB613704); 国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(50725413); 国家科技支撑计划资助项目(2007BAG06B04); 重庆市科技攻关计划资助项目(2008AB4114)

收稿日期: 2008-12-17; **修订日期:** 2009-03-10

通讯作者: 王敬丰, 副教授, 博士; 电话: 023-65112153; E-mail: jfwang@cqu.edu.cn

对镁合金室温阻尼性能的改善并不明显,且存在制备工艺复杂、性能不稳定和韧性偏低等问题。刘广等^[8]研究了Mg-Zr合金进行元素添加后的影响,发现大部分元素对其阻尼性能没有贡献,而少量对其阻尼性能有利的元素会引起力学性能的降低。而且较少有人对高强度镁合金阻尼性能的改善进行过研究。因此,本文作者以目前常用的高强变形镁合金ZK60为研究对象,通过不同加工工艺来改善其阻尼性能,使其阻尼性能和力学性能达到平衡优化,从而开辟ZK60镁合金工业应用的新领域。

1 实验

实验材料为 d 258 mm的ZK60镁合金半连续铸锭,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处理,退火工艺为390℃,8 h。接着在2 500 t的日产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℃。再将其中一部分一次挤压合金在500 t的国产卧式挤压机上进行二次挤压,挤压比为25,挤压速度为4~6 m/min,挤压温度为380℃。最后取一部分一次挤压后的试样在气锤上进行快速锻造变形处理。其锻造变形采用同方向锻造,工艺参数如下:380~400℃温度下保温1~2 h后镦粗,镦粗率为30%~40%。

将经过以上3种不同加工工艺得到的试样在新三思CMT-5105微机控制电子万能实验机上进行拉伸实验,拉伸速率为3 mm/min。另外在TA Q800 DMA动态机械热分析仪上进行阻尼性能的测试,实验所用样品采用线切割制备,尺寸为45 mm×5 mm×1 mm,测量其在室温下应变振幅一阻尼变化的曲线,测试频率 $f=1$ Hz,测试振幅范围为 $1\times 10^{-5}\sim 5\times 10^{-3}$,测试方式为单悬臂梁。且在实验前取样时,为了避免不同织构对材料性能的影响,实验中金相、拉伸和阻尼试样均取自材料的心部,其中拉伸和阻尼试样均沿纵向截取,而金相取自垂直于变形方向的横截面,使用苦味酸对其进行腐蚀。

2 实验结果

2.1 加工工艺对合金微观组织的影响

图1所示为沿垂直于变形方向试样一次挤压态、

二次挤压态和锻造态的横截面金相组织。由图1可以看出,ZK60镁合金经过挤压后,原始晶粒在挤压应力的作用下破碎较严重,同时出现大量的动态再结晶晶粒,动态再结晶晶粒夹杂在变形比较严重的晶粒间。一次挤压后的晶粒较粗大,而二次挤压后动态再结晶晶粒更细小更均匀,但还是存在少量的粗大晶粒,其尺寸为50 μm 左右。在锻造的过程中,由于只沿一个方向进行锻造,且在此方向上的变形量较大,约为40%,因此,锻造态的晶粒将沿垂直于受力方向进行变形而被拉长。对比锻造后与挤压态的金相组织可知,锻造后晶粒有长大趋势,挤压态的动态再结晶晶粒数目明显减少,这可能是在锻造之前进行一定时间的高温保温,从而导致晶粒长大所造成。

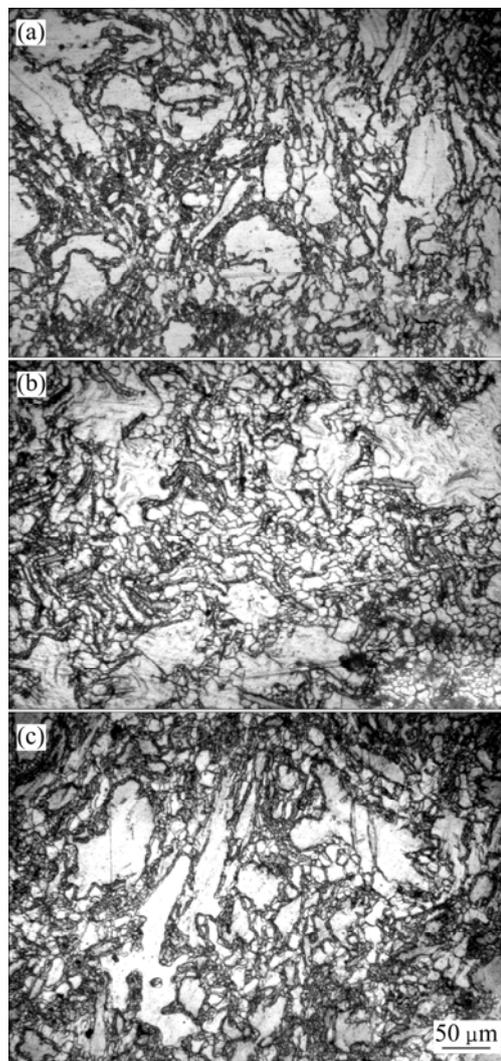


图1 沿垂直于变形方向ZK60镁合金的横截面金相组织
Fig.1 Transversal metallographs vertical to direction of deformation of ZK60 alloys: (a) First extrusion; (b) Second extrusion; (c) Forging

2.2 加工工艺对合金力学性能的影响

经过挤压和锻造的 ZK60 镁合金在变形过程中, 从弹性变形过渡到塑性变形, 且没有明显的屈服点, 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。

挤压和锻造对 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($\sigma_{0.2}$)和伸长率(η)的具体数据。由图 2 可知, 一次挤压态、二次挤压态和一次挤压再锻造态的抗拉强度均在 330 MPa 左右, 屈服强度也在 250 MPa 左右, 其屈强比分别为 0.74、0.77 和 0.78。因此, 可以认为 ZK60 变形镁合金经 3 种塑性加工工艺(一次挤压、二次挤压和锻造)后不同变形态间的力学性能差别并不大。

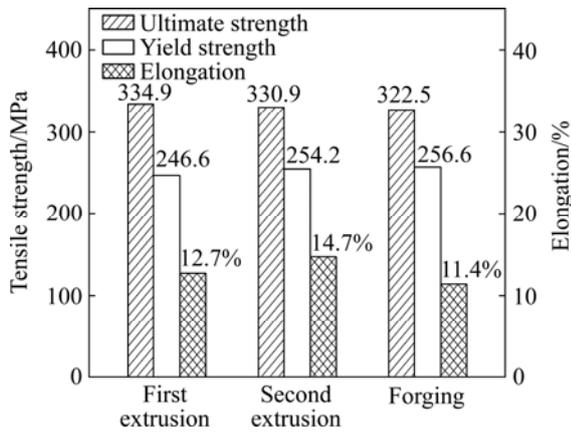


图 2 不同挤压和锻造状态 ZK60 镁合金的力学性能
Fig.2 Mechanical properties of ZK60 alloys after different process

2.3 加工工艺对阻尼性能的影响

ZK60 镁合金经过挤压和锻造后的阻尼—应变曲线如图 3 所示。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两个区域: 在第一个区域里, 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后, 即应变大于临界值时, 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} 可以表示为应变无关部分和应变相关部分之和, 分别以 Q_0^{-1} 和 Q_h^{-1} 表示, 即

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

图 3 分别标出 3 种不同状态下试样的临界值, 其中 ϵ_{0-fir} 表示一次挤压态的临界点, ϵ_{0-sec} 表示二次挤压态的临界点, ϵ_{0-for} 表示锻造态的临界点。由图 3 可以

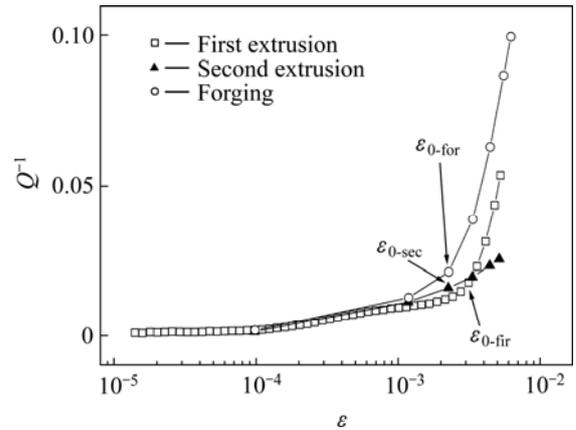


图 3 ZK60 镁合金挤压和锻造后的阻尼—应变曲线
Fig.3 Curves of damping capacity (Q^{-1}) vs strain for ZK60 alloys

看出, 在小应变时, 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。合金各种状态的 Q_0^{-1} 都基本一致, 而高应变区时, 锻造态的 Q_0^{-1} 远远大于其它两种状态的, 几乎高出挤压态的两倍多, 其次是一次挤压态的, 最差的是二次挤压态的阻尼性能。

3 分析与讨论

镁合金在加工过程中力学性能变化的主要原因是由于晶粒尺寸的变化, 即晶粒的细晶强化作用。但晶粒越细小, 晶界面积将越大, 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, 这些都将对材料的阻尼性能产生一定的负面影响^[9-10]。结合图 1 可知, 二次挤压态的晶粒比其它两种状态的晶粒小很多, 因此, 晶界的总量越多, 对位错运动的阻碍作用也越大, 位错即使在很大的应力下也无法脱钉, 故阻尼性能最小。

另外, 材料阻尼性能的显著差别与晶体中位错组态的变化有着直接联系^[11], 具有高阻尼性能的镁合金, 采用透射电镜观察发现, 其位错密度低, 位错线具有长、直且沿某一方向平行排列的特点, 它们具有较大的可动性。经过加工变形后, 位错密度急剧增加, 形成位错网络和位错缠结等, 使位错线间相互拘束, 可动性大大降低, 上述因素使内耗值大大降低^[12]。尤其是挤压态合金, 晶粒的细化与可动位错数量的减少, 使位错运动困难, 只有在较大应力下才能开动^[13]。本实验中锻造采用的是同方向锻压, 应力分布的方向较

单一, 因此, 其试样相比挤压态的位错可能排列得较为整齐, 具有较大的可动性而挤压时, 受力方向分布复杂, 会引起位错线之间相互缠结, 可动性可能会大大降低。因此, 本实验中, 一次挤压和锻造态的晶粒大小虽然相差不大, 但是可能由于位错组态的原因, 所以阻尼性能相差较多。

以上两点都可以用 G-L 理论得到很好的解释^[14]。根据 G-L 理论^[15], 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, 可用如下公式表示为^[16]

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

式中 ρ 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, 因而产生了很大的阻尼, 用如下公式表示^[17]:

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

式中 $C_1 = \Omega \rho L_N^3 K \eta \alpha / (\pi^2 L_c^2)$; $C_2 = K \eta \alpha / L_c$; ε 是应变振幅; Ω 为取向因子; K 为与弹性系数的各向异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。该公式还可改写为

$$\ln(\varepsilon Q_h^{-1}) = \ln C_1 - C_2 \varepsilon^{-1} \quad (4)$$

可见 $\ln(\varepsilon Q_h^{-1})$ 与 $1/\varepsilon$ 应成线形关系, 截距为 $\ln C_1$, 斜率 $-C_2$ 。图 4 所示为根据实验数据作出的 $\ln(\varepsilon Q_h^{-1})$ 与 $1/\varepsilon$ 的曲线, 图中的直线关系说明本实验中 3 种加工工艺下试样的阻尼行为符合 G-L 理论。

由式(4)可知, 合金阻尼性能的大小主要由材料本身的参数 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。在本实验中, 影响合金阻尼性能的主要因素有晶粒大小和可动位错密度两个因素, 而实验中的晶界为主要的强钉扎点, 所以这两个因素在公式中的具体表现分别为 L_N 和 ρ , 并且都与 C_1 有关。从图 4 可以看出, 虽然 3 种加工态的斜率(与 C_2 有关)稍有区别, 但是相差并不大。本实验中由于截距(与 C_1 有关)对其阻尼性能的影响因素较大, 锻造态的截距比其他两种大出很多, 所以锻造态的阻尼性能最好。同理, 一次挤压态的截距次于锻造态的, 所以其阻尼性能也

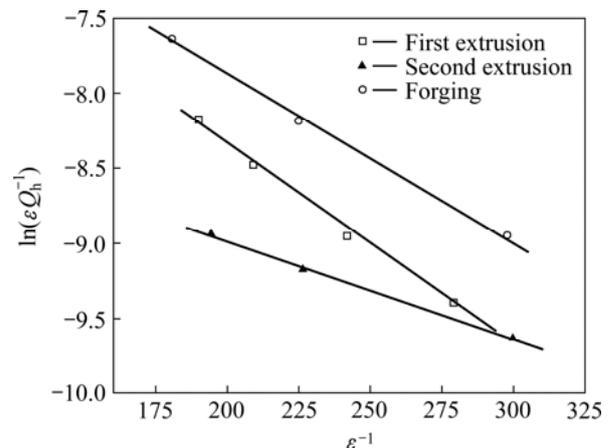


图 4 挤压和锻造后 ZK60 镁合金的 $\ln(\varepsilon Q_h^{-1}) - \varepsilon^{-1}$ 曲线

Fig.4 Curves of $\ln(\varepsilon Q_h^{-1}) - \varepsilon^{-1}$ for ZK60 alloys

次于锻造态的, 二次挤压态的截距最小, 故其阻尼性能最差。

4 结论

1) ZK60 变形镁合金经 3 种塑形加工工艺后, 不同变形态之间的力学性能差别并不大, 但阻尼性能呈现出明显的变化。其中经过锻造工艺后合金的阻尼性能是经过挤压工艺后合金阻尼性能的 2 倍多。

2) 本实验中锻造态合金阻尼性能较高, 其原因主要是锻造态与挤压态相比, 晶粒较大且可动位错较多, 这可以用 G-L 理论得到很好的解释。

REFERENCES

- [1] 王海桥, 姜志国, 黄丽, 袁海宾, 李效玉. 阻尼材料研究进展[J]. 高分子通报, 2006, 3: 24-30.
WANG Hai-qiao, JIANG Zhi-guo, HUANG Li, YUAN Hai-bin, LI Xiao-yu. Development of damping materials[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2006, 3: 24-30.
- [2] 张平, 丁毅, 马立群, 刘广, 张振忠, 沈晓东. 镁合金的阻尼性能研究[J]. 物理学进展, 2006, 26(3): 419-422.
ZHANG Ping, DING Yi, MA Li-qun, LIU Guang, ZHANG Zhen-zhong, SHEN Xiao-dong. Research on damping capacities of Mg-based alloys[J]. Progress in Physics, 2006, 26(3): 419-422.
- [3] 任志远, 范永革. 镁合金的阻尼性能研究进展[J]. 材料热处理, 2006, 35(18): 64-67.
REN Zhi-yuan, FAN Yong-ge. Progress in damping capacity research of magnesium alloy[J]. Hot Working Technology, 2006, 35(18): 64-67.

- [4] 刘楚明, 纪仁峰, 周海涛, 陈明安. 镁及镁合金阻尼特性的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(9): 1319-1325.
LIU Chu-ming, JI Ren-feng, ZHOU Hai-tao, CHEN Ming-an. Research and development progress of damping capacity of magnesium and magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(9): 1319-1325.
- [5] 张晓芳, 李兆智, 李保成. 热挤压工艺对 ZK60 合金组织及性能的影响[J]. 材料热处理技术, 2008, 37(4): 29-35.
ZHANG Xiao-fang, LI Zhao-zhi, LI Bao-cheng. Influences of extrusion process on microstructure and mechanical properties of ZK60 alloy[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(4): 29-35.
- [6] 王敬丰, 赵亮, 胡耀波, 彭建, 张丁非, 潘复生, 丁培道. 阻尼镁合金的研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2008, 22(7): 103-106.
WANG Jing-feng, ZHAO Liang, HU Yao-bo, PENG Jian, ZHANG Ding-fei, PAN Fu-sheng, DING Pei-dao. Research status and prospect of damping magnesium alloys[J]. Materials Review, 2008, 22(7): 103-106.
- [7] 张修庆, 滕新营, 王浩伟. 镁基复合材料的阻尼性能研究[J]. 铸造, 2004, 53(3): 176-178.
ZHANG Xiu-qing, TENG Xin-ying, WANG Hao-wei. Study on damping characterization of magnesium-based composites[J]. Foundry, 2004, 53(3): 176-178.
- [8] 刘广, 张振忠, 张少明, 沈晓冬, 马立群. 高阻尼镁锆合金的研究进展及展望[J]. 材料导报, 2006, 11(20): 425-428.
LIU Guang, ZHANG Zhen-zhong, ZHANG Shao-ming, SHEN Xiao-dong, MA Li-qun. Research progress and prospect of high damping Mg₂Zr alloys[J]. Materials Review, 2006, 11(20): 425-428.
- [9] 王晓林, 于洋, 梁书锦, 王尔德. 热挤压工艺对 AZ31 镁合金晶粒大小及性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(6): 567-569.
WANG Xiao-lin, YU Yang, LIANG Shu-jin, WANG Er-de. The effects of extrusion deformation on grain size and properties of AZ31 magnesium alloy[J]. Materials Science and Technology, 2005, 13(6): 567-569.
- [10] XU Guang-ming, BAO Wei-ping, CUI Jian-zhong, ZUO Yu-bo. Effect of magnetostatic field on microstructure of magnesium alloy ZK60[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(6): 1270-1273.
- [11] TSUI R T C. Internal friction and transmission electron microscopy studies of magnesium (II): Electron microscopy[J]. Acta Metallurgica, 1967, 15(11): 1723-1730.
- [12] 李明, 贺章, 胡赓祥. 应用 TEM 研究镁合金中位错组态与阻尼性能间的关系[J]. 电子显微学报, 1988(3): 199.
LI Ming, HE Zhang, HU Geng-xiang. The research on relationship of dislocation situation and damping capacities of Mg alloy by TEM[J]. Electron Microscopy Society, 1988(3): 199.
- [13] 江国金, 张振栋, 刘楚明, 周海涛. 挤压及退火对 Mg-0.6Zr 系合金力学性能及阻尼性能的影响[J]. 热加工工艺, 2007, 36(13): 20-22.
JIANG Guo-jin, ZHANG Zhen-dong, LIU Chu-ming, ZHOU Hai-tao. Effect of extrusion and annealing on mechanical properties and damping capacity of Mg-0.6Zr alloy[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(13): 20-22.
- [14] ZHANG Zhen-yan, PENG Li-ming, ZENG Xiao-qin, DU Lin, MA Lan, DING Wen-jiang. Effects of extrusion on the mechanical properties and damping capacity of Mg-1.8Cu-0.5Mn alloy[J]. Material Science Forum, 2007, 546: 257-260.
- [15] ZHANG Y K, HU X S, WU K, ZHENG M Y. Application of G-L dislocation model in low frequency damping capacities of AZ91D and SiC_w/AZ91D composites[J]. Material Science Forum, 2007, 549: 495-498.
- [16] 张佳, 刘楚明, 王荣, 周海涛, 纪仁峰. 退火时间对 Mg-0.6Zr 热轧板材阻尼性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(6): 916-919.
ZHANG Jia, LIU Chu-ming, WANG Rong, ZHOU Hai-tao, JI Ren-feng. Effect of annealing time on damping capacity of hot-rolled Mg-0.6Zr plate[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2006, 24(6): 916-919.
- [17] GRANATO A, LÜCKE K. Application of dislocation theory to internal friction phenomena at high frequencies[J]. Journal of Applied Physics, 1956, 27: 789-809.

(编辑 龙怀中)