

## 铸造 Mg-Zr-Er-Zn 合金的力学性能和阻尼行为

刘楚明<sup>1,2</sup>, 邱从章<sup>1</sup>, 常亚喆<sup>3</sup>, 李慧中<sup>1</sup>, 王孟君<sup>1,4</sup>, 王 荣<sup>2</sup>

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;  
2. 中国兵器科学研究院 宁波分院, 宁波 315103;  
3. 中国空空导弹研究院, 洛阳 471009;  
4. 华中科技大学 模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 通过电子显微镜、阻尼性能和力学性能测试等研究 Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn 合金力学性能和阻尼行为。结果表明: 加入 0.6%Er+1%Zn 后, 在晶界附近存在含 Er 和 Zn 的质点减缓了枝晶生长, 起到细化 Mg-0.6Zr 合金组织的作用, 使得其晶粒尺寸减小至 60 μm 左右, 抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到 198.8 MPa、83.0 MPa 和 24.5%, 较 Mg-0.6Zr 合金均有不同程度的提高, 且比阻尼为 48.1%, 仍具有较高的阻尼性能。

**关键词:** Mg-Zr-Er-Zn 合金; 晶粒细化; 阻尼行为; 力学性能

中图分类号: TG 146.2 文献标识码: A

## Mechanical properties and damping capacity of cast Mg-Zr-Er-Zn alloy

LIU Chu-ming<sup>1,2</sup>, QIU Cong-zhang<sup>1</sup>, CHANG Ya-zhe<sup>3</sup>, LI Hui-zhong<sup>1</sup>, WANG Meng-jun<sup>1,4</sup>, WANG Rong<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;  
2. Ningbo Branch, Ordnance Science Institute of China, Ningbo 315103, China;  
3. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;  
4. State Key Laboratory of Material Processing and Die and Mould Technology,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The mechanical properties and damping capacities of Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn alloys were investigated by SEM, damping capacity test and mechanical property test. The results show that adding 0.6%Er and 1%Zn in the Mg-0.6Zr, the compounds of Mg-Er, Mg-Zn and Mg-Er-Zn restrain the crystal brain growing up, and the grains are observably refined to about 60 μm. σ<sub>b</sub>, σ<sub>0.2</sub> and elongation of Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn alloy increase to 198.8 MPa, 83.0 MPa and 24.5%, respectively. The mechanical properties of Mg-0.6Zr alloys can be significantly improved by Er and Zn microalloying, and the alloy still maintains a rather high damping capacity with specific damping capacity of 48.1%.

**Key words:** Mg-Zr-Er-Zn alloy; grain refinement; damping capacity; mechanical properties

Mg-Zr 系阻尼合金是目前应用最多、最广泛的高阻尼镁合金材料。美、日、俄等国诸多学者在镁合金阻尼特性领域已经做了系统性地研究<sup>[1-4]</sup>,且开发出了高阻尼镁合金材料,如美国的 KI-XA 和 KI-A 以及前苏

联的 等镁合金,以良好的阻尼性能、铸造性能、力学性能和物理性能等优势,成功地用于军事和国防工业等尖端领域以及汽车、仪表等民用行业。我国阻尼镁合金材料的研发远远滞后于欧美等发达国家

家。近年来, 有不少学者开始着手阻尼镁合金的研究, 通过对Mg-0.6Zr及其加入Sr、Ni、Cu、Mn、La、Cd、Ca、Ba和Y等第三、四组元的Mg-Zr系合金进行阻尼和力学性能的研究, 已成功地研制出抗拉强度 $\sigma_b$ 、伸长率 $\delta$ 、相对阻尼特性(SDC)分别达到约180 MPa、20%和40%的阻尼镁合金, 与国际同等镁合金的性能相当, 但其综合性能仍处于较低的水平<sup>[4-6]</sup>。

Zn在 $\alpha$ -Mg中的最大固溶度为6.2%, 少量的锌起固溶强化的作用, 还有助于在合金表面形成钝化膜, 并减弱铁和镍等杂质对其的不利影响<sup>[7-8]</sup>。高含Zn量的镁合金如ZK60系列的合金已有较深的理论支持和广泛应用, 但微量Zn对Mg-Zr系合金的组织和性能的影响鲜有报道<sup>[9-10]</sup>。Zr质点作为异质核心, 可有效地细化晶粒, 改善其性能。另外, Zr与合金中的杂质如铁、硅和镍等均能形成高熔点的金属化合物, 并从镁中沉淀出来, 从而使合金纯度得以提高, 减弱了这些杂质对合金耐蚀性的有害作用<sup>[11-12]</sup>。稀土Er具有良好除Fe效果, 适量的稀土Er还具有阻燃和净化镁合金液体的作用, 能够有效地去除夹杂<sup>[13-14]</sup>, 显著地提高合金的力学性能, 为开发新型高强高阻尼的镁合金提供新的思路。

对Mg-0.6Zr合金进行合金化处理, 有望在不降低或略降低其阻尼性能的前提下得到更佳的力学性能。以Mg-0.6Zr为母合金, 通过添加微量Er和Zn, 研究其对合金的组织、力学性能和阻尼行为的影响规律, 为进一步研制出高强度高阻尼的镁合金材料提供了有益参考。

## 1 实验

实验用材料为99.96%Mg、99.92%Zn、镁锆中间合金(30.11%Zr)和镁铒中间合金(22.32%Er), 设计合金:Mg-0.6Zr, Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn(以上均为质量分数, %)。合金熔炼采用电阻坩埚炉进行, 镁锆合金化学性质异常活泼, 熔炼采用CO<sub>2</sub>+SF<sub>6</sub>气体保护, 镁锭在680℃熔化之后, 升温至720℃, 加入Mg-Er和Mg-Zr中间合金及Zn, 在740℃搅拌10 min, 于700

静置20 min后浇入铸模。铸模选用金属铁模, 铸棒尺寸为d18 mm×150 mm, 经400℃, 18 h均匀化和130℃, 24 h时效处理后。将铸棒加工成棒状拉伸试样, 在CSS万能电子实验机上进行力学性能测试, 拉伸速率为2 mm/min。在Sirion 200型扫描电镜进行断口扫描和能谱分析。试样用4%硝酸酒精溶液浸蚀, 在POLYVAR MET型金相显微镜下观察合金铸态显微

组织。采用DPMax 2500型X射线衍射仪器对试样进行物相分析。在室温及2×10<sup>-2</sup>应变振幅条件下用多功能内耗仪测定材料的阻尼性能。

## 2 结果及分析

### 2.1 显微组织与分析

铸造合金实测成分如表1所列。图1所示为加入Zn和Er前后Mg-0.6Zr镁合金的显微组织。由图1可看出, 加入Zn和Er后, Mg-0.6Zr合金的晶粒得到明显细化, 其中Mg-0.6Zr合金原始晶粒尺寸约为300 μm; 加入0.6%Er+1%Zn后, 合金的晶粒尺寸约为60 μm。由此可见, 一定量的Zn和Er(0.6Er+1Zn)

表1 实验合金的实测成分

Table 1 Measured composition of tested alloys

Alloy	Mass fraction/%			
	Zr	Er	Zn	Mg
Mg-0.6Zr	0.56			Bal
Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn	0.57	0.62	1.03	Bal

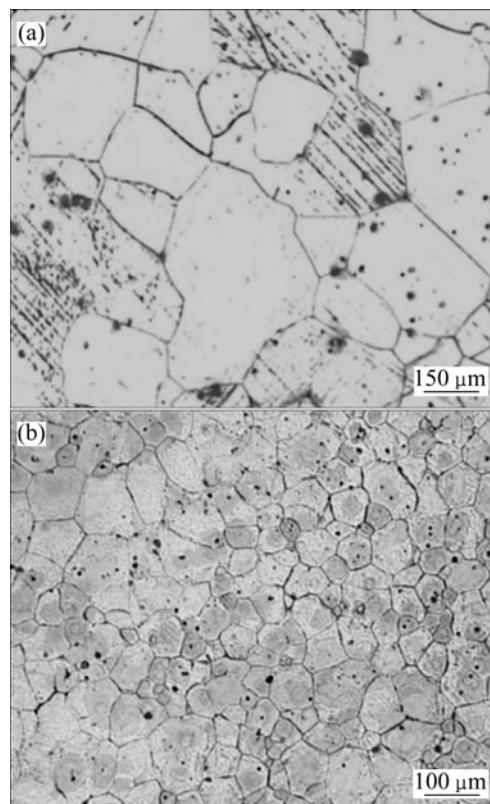


图1 实验合金的显微组织

Fig.1 Microstructures of tested alloys: (a) Mg-0.6Zr; (b) Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn

可以达到良好的晶粒细化效果，起到细晶强化的作用。

图2所示为实验合金的X射线衍射谱。由X射线衍射分析谱可看出，合金铸态组织的相组成主要为单相 $\alpha$ -Mg固溶体，由于合金中Zr、Er和Zn的含量较低，没有观察到其它第二相的衍射峰。

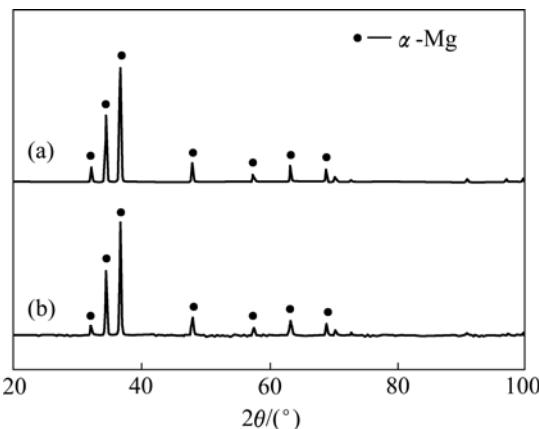


图2 实验合金的X射线衍射谱

Fig.2 XRD patterns of tested alloys: (a) Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn; (b) Mg-0.6Zr

## 2.2 合金的性能与断口扫描

Er和Zn元素对Mg-0.6Zr合金常温力学性能和阻尼性能的测试结果如表2所列。由表2可看出，加入Er和Zn后，Mg-0.6Zr合金的综合力学性能明显提高；当添加0.6%Er+1%Zn时，合金的抗拉强度和屈服强度分别提高至198.8 MPa和83.0 MPa，伸长率达到24.5%。Mg-0.6Zr合金的比阻尼为64.2%，加入Er和Zn后，其阻尼性能下降为48.1%，但仍属于高阻尼范畴。

表2 实验合金的力学性能和比阻尼性能

Table 2 Tensile properties of tested alloys

Alloy	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta$ /%	Specific damping capacity/%
Mg-0.6Zr	143.8	64.44	8.5	64.2
Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn	198.8	83.07	24.5	48.1

图3所示为合金拉伸断口的SEM像。由图3可看出，Mg具有密排六方结构，滑移系少，塞积位错在其端部造成很大的应力集中而使裂纹成核；合金的断口为较大的解理小刻面和由解理台阶形成的大量河流花样，撕裂棱是连接解理刻面和形成解理河流的主要方式，属于明显的解理断裂。图3(b)中具有明显的滑移台阶，同时还可以看到少量的因塑性变形而产生

的较深的小刻面，台阶短而窄，由于该合金晶粒比较小，塑性有很大改善。

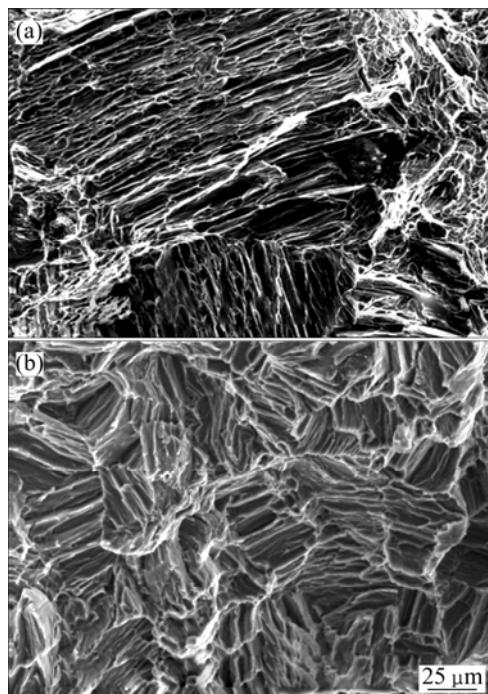


图3 实验合金的拉伸断口形貌

Fig.3 SEM images of fracture surface of tested alloys: (a) Mg-0.6Zr; (b) Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn

## 3 讨论

### 3.1 强化机制的讨论

表3所列为合金元素在镁中的相关参数<sup>[15]</sup>。由表3可以看出，Mg、Zr、Er和Zn均为hcp结构，Er的负电性小，熔炼时易与熔液中的O和Fe等形成化合物，起到净化熔液的作用。Er和Mg的原子半径比为1.4:1.0，Zn和Mg的原子半径比为0.9:1.0。由于其原子半径和弹性模量的差异，Er和Zn原子可固溶于基体Mg中产生点阵畸变，使基体得到强化。

表3 合金元素在镁中的相关参数<sup>[15]</sup>

Table 3 Parameters of Mg, Er, Zn and Zr elements

Element	Atomic radius/nm	Pauling electronegativity	Max-solid-solubility at 400 /%*	Crystal structure
Mg	0.172	1.31		hcp
Er	0.245	1.24	5.30	hcp
Zn	0.153	1.65	2.40	hcp
Zr	0.216	1.33	0.16	hcp

\*—Mole fraction.

Zr作为异质形核晶核, 能有效地细化镁合金的铸造组织, 加入0.6%Er+1%Zn后, 合金的晶界处存在大量的尺寸约为0.1 μm、不连续分布的Mg-Er、Mg-Zn和Mg-Er-Zn化合物(见图4和5以及表4)。分析认为, 当合金凝固时, 这些颗粒中部分含Er和Zn, 且存在细小和不连续分布的质点游离在固液相面附近, 阻碍液相原子向枝晶处移动, 减缓枝晶的生长, 能有效地细化铸态的组织。在外力作用下, 这些颗粒还可与位错交互作用提高强度<sup>[16]</sup>。

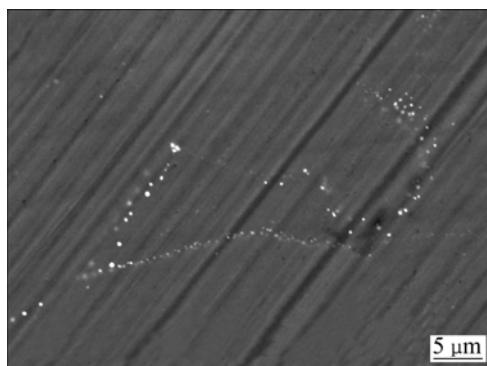


图4 Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn合金中的第二相

Fig.4 Second phase in Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn alloy

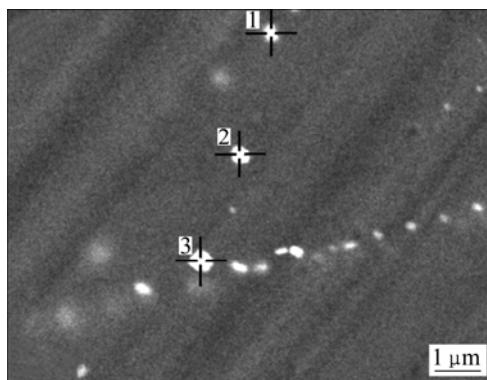


图5 Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn合金EDX分析

Fig.5 EDX analysis of Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn alloy

表4 图5中不同点EDX分析结果

Table 4 EDX analysis results of points in Fig.5

Point	Zr	Zn	Er	Mg
1			38.45	61.55
2		5.35		94.65
3		4.79	48.69	46.56

由Hall-Petch关系式<sup>[17]</sup>:  $\sigma_s = \sigma_0 + K \cdot d^{-1/2}$ 可知, 在一定条件下, 晶粒尺寸减小, 合金的屈服强度提高, 其相应的抗拉强度也明显提高。晶粒细化在提高合金强度的同时也提高了合金的塑性, 由于晶粒越细, 一

定体积内的晶粒数目越多, 在同样变形量下, 变形分散在更多的晶粒内进行, 晶粒内部和晶界附近的应变度相差较小, 变形较均匀, 相对来说引起应力集中减小, 使材料在断裂之前能承受较大的变形量, 因此可以得到较大的延伸率。

### 3.2 阻尼行为探讨

由表2可看出, Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn合金的阻尼性能明显低于Mg-0.6Zr合金的。根据G-L位错阻尼理论<sup>[18]</sup>(见图6), Mg-0.6Zr合金中位错线上的弱钉扎点较少, 可动位错密度和钉扎长度 $L_C$ 都较大, 因此位错可以在滑移面上扫过较大的面积, 消耗掉大量的振动能量, 从而呈现较大的位错运动阻尼性能。而在Mg-Zr-Er-Zn合金中, 由于加入Er和Zn, 部分原子固溶于基体中, 使单位长度位错线上的钉扎点数量增加, 即 $L_C$ 变小, 位错只能在相对更大的应变振幅下才能产生脱钉运动, 在滑移面上运动的面积也较小, 消耗的能量相应也较少, 阻尼值减小。此外, 由于加入合金元素使合金晶粒进一步细化, 增加了晶界的数量, 减小了 $L_N$ , 因此其阻尼性能相应减弱。在金属中, 晶界是位错运动的有效障碍, 晶界附近细小、不连续分布的质点钉扎位错以及晶界处的位错密度远大于晶内的。在大应变振幅下, 位错弓出开动, 位错可以挣脱弱钉扎点并限制在强钉扎点上。同时, 在滑移面上扫过一个更大的面积, 被钉扎的位错发生雪崩好像脱钉一样, 消耗掉大量的振动能量, 可以使Mg-Zr-Er-Zn合金仍保持高阻尼的状态。

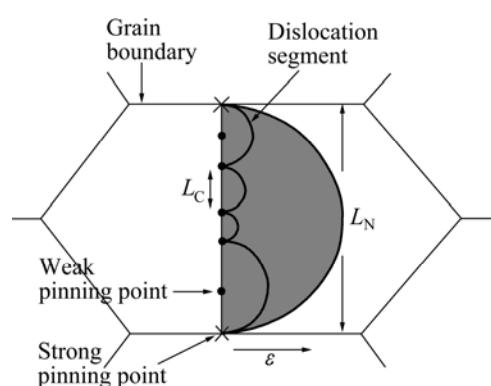


图6 有关阻尼的G-L位错模型示意图

Fig.6 Schematic diagram of G-L vibrating string dislocation model

## 4 结论

1) 微量的Er和Zn可固溶于Mg基体中形成固溶

体，引起晶格畸变，起到固溶强化的作用。

2) Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn 合金晶界处存在较多的 Mg-Er 和 Mg-Er-Zn 高熔点质点，粒径约为  $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ，成不连续分布状，减缓枝晶生长，起到细化铸态组织的作用，合金晶粒尺寸减至约  $60\text{ }\mu\text{m}$ 。

3) 加入 0.6%Er+1%Zn 后，Mg-0.6Zr-0.6Er-1Zn 合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到 198.8 MPa、83.0 MPa 和 24.5%，较 Mg-0.6Zr 均有不同程度的提高，而阻尼性能达到 48.1%，仍属于高阻尼范畴。

## REFERENCES

- [1] RITCHIE I G, PAN Z L. High-damping metals and alloys[J]. Metallurgical Transaction, 1991, 22A(3): 607–611.
- [2] LAMBRI O A, RIEHEMANN W. Damping due to incoherent precipitates in commercial QE22 magnesium alloy[J]. Scripta Materialia, 2005, 52(2): 93–97.
- [3] ZHANG X N. Effect of reinforcements on damping capacity of pure magnesium[J]. Journal of Materials Science Letters, 2003, 22(7): 503–505.
- [4] JUN J H, LEE G H, KIM J M, KIM K T, JUNG W J. Effect of heat treatment on microstructure, tensile properties and damping capacity of Mg-Zr wrought alloy[J]. Materials Science Forum, 2006, 510(11): 210–213.
- [5] 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.
- [6] 李 明. 镁及镁锆合金阻尼特性的研究[D]. 上海: 上海交通大学材料学院, 1988.  
LI Ming. The study of damping behaviour in Mg and Mg-Zr alloys[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 1988.
- [7] GOKEN J, SWIOSTEK J, LETZIG D, KAINER K U. Damping measurements of the magnesium wrought alloys AZ31, AZ61 and AZ80 after indirect and hydrostatic extrusion[J]. Materials Structure & Micromechanics of Fracture, 2005, 482(21): 387–390.
- [8] POPOV I, STAROSVETSHY D. Initial stages of corrosion within Mg-Zn-Y-Zr alloy in 1 g/L solution[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(9): 1–8.
- [9] 刘志义, 叶呈武, 张 坤, 郑青春. ZK31+0.3Yb 镁合金的热力模拟[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(6): 933–937.  
LIU Zhi-yi, YE Cheng-wu, ZHANG Kun, ZHEN Qing-chun. Thermal mechanical simulation of ZK31+0.3Yb magnesium alloy[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(6): 933–937.
- [10] CLACK J B. Transmission electron microscopy study of age hardening in Mg-5%Zn alloy[J]. Acta Metallurgica, 1965, 13(2): 1281–1289.
- [11] 陈 增, 张密林, 吕 艳, 韩 伟, 唐定骧. 锆在镁及镁合金中的作用[J]. 铸造技术, 2007, 28(6): 820–823.  
CHEN Zeng, ZHANG Mi-lin, LÜ Yan, HAN Wei, TANG Ding-xiang. Role of zirconium in magnesium and magnesium alloys[J]. Foundry Technology, 2007, 28(6): 820–823.
- [12] QIAN M, STJOHN D H, FROST M T. Heterogeneous nuclei size in magnesium-zirconium alloys[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(8): 1115–1119.
- [13] 王忠军, 张彩培, 邵晓宏, 崔建忠, 乐启炽. 添加稀土Er于熔剂中对铸态AZ91 镁合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(2): 181–187.  
WANG Zhong-jun, ZHANG Cai-bei, SHAO Xiao-hong, CHUI Jian-zhong, LE Qi-zhi. Effects of Er addition in flux on microstructure and properties of casting AZ91 magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(2): 181–187.
- [14] ZENG Xiao-qin, WANG Qu-dong, LU Zen-yi. Influence of beryllium and rare earth additions on ignition-proof magnesium alloys[J]. J Mater Process Technol, 2001, 112(1): 17–23.
- [15] 刘楚明, 朱秀荣, 周海涛. 镁合金相图集[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006.  
LIU Chu-ming, ZHU Xiu-rong, ZHOU Hai-tao. Phase diagrams of magnesium alloy[M]. Changsha: Central South University Press, 2006.
- [16] KOIZUMI Y, UYEYAMA M, TSUJI N, MINAMINO Y, OTA K. High damping capacity of ultra-fine grained aluminum produced by accumulative roll bonding[J]. Journal of Alloys and Compound, 2003, 355(1): 47–51.
- [17] OKAMOTO H. Desk handbook: phase diagrams for binary alloys[M]. OH: ASM International, 2000.
- [18] LIU C M, ZHANG J, ZHOU H T, JI R F, CHEN M A. A study of damping capacities of Mg-Zr alloys after hot rolling and annealing[J]. Magnesium Technology, 2006, 5(11): 165–170.

(编辑 李艳红)