

文章编号:1000-582X(2009)08-0931-06

双向挤压后 AZ31 镁合金的微观组织与性能

张 力, 卢立伟, 刘天模, 李 楠, 孙朝勇

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400030)

摘 要:采用了 100T 挤压机对 AZ31 镁合金在不同温度不同挤压比下双向挤压成型。结果表明, 挤压比为 4.5 时, 显著地细化镁合金晶粒, 晶粒尺寸可由铸态的 400 μm 减小到挤压态的 6 μm ; 挤压比为 10.125 时, 晶粒尺寸可以减小到 3 μm ; 变形材料的硬度、伸长率、压缩率和屈服强度值有了很大程度的提高, 随着挤压温度的升高, 硬度、压缩率、伸长率和屈服强度值呈降低趋势(250 $^{\circ}\text{C}$ 除外)。

关键词: AZ31 镁合金; 双向挤压; 组织与性能; 动态再结晶

中图分类号: TG113

文献标志码: A

Microstructure and mechanical properties of AZ31 Mg alloy after dual-directional extrusion

ZHANG Li, LU Li-wei, LIU Tian-mo, LI Nan, SUN Chao-yong

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: A new dual-directional extrusion (DDE) technique is applied on AZ31 Mg alloy at different extrusion ratios and temperatures by an extruder whose maximum load is 100t. In this experiment, the grain size is significantly reduced from 400 μm as-cast to 6 μm as-extruded when the extrusion ratio is 4.5; while at elevated extrusion ratio of 10.125, the grain size is reduced to 3 μm . The micro-hardness, compressive ratio, elongation and yield strength are all improved a lot and decreased with the increase of extrusion temperatures (except 250 $^{\circ}\text{C}$).

Key words: AZ31 magnesium alloy; dual-direction extrusion; microstructures and properties; dynamic recrystallization

镁合金具有密排六方晶体结构, 其对称性低, 轴比(c/a)值为 1.623, 室温滑移系少, 塑性变形能力差^[1]。金属在挤压变形区中处于强烈的三向压应力状态, 可以充分发挥其塑性, 获得较大变形量, 对于塑性较差的镁合金, 挤压加工是优先选择的塑性加工方法^[2]。目前, 镁合金晶粒细化显著的挤压变形方式为 ECAE(Equal channel angular extrusion)即等径角挤压, 但这种挤压方式往往需经过多道次挤

压才能够将镁合金晶粒细化到较小尺寸^[3]。结合等径角挤压与传统挤压方式设计出双向挤压模具进行双向挤压(DDE)实验, 研究了 AZ31 镁合金热变形后的组织与性能, 开辟了新型的挤压变形方式, 并为此种挤压提供了较优的工艺参数。

1 实验内容

原材料选择 AZ31 合金铸棒($\Phi 30\text{ mm} \times$

收稿日期: 2009-03-25

基金项目: 国家“973”计划资助项目(2007CB613704); 国家大学生科技创新基金资助项目(CQU CX-G-2007-39)

作者简介: 张力(1962-), 男, 重庆大学工程师, 主要从事材料科学研究, (E-mail) ZhangLi@cqu.edu.cn。

刘天模(1953-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail) tmliu@cqu.edu.cn。

60 mm),其化学成分如表 1 所示。将坯料加热到 400 °C,保温 15 h 进行均匀化处理,其组织如图 1 所示,模具如图 2 所示,挤压比为 4.5 时,模具竖直通道的直径为 30 mm,水平的变径通道直径为 10 mm,模具内弯角为 90°,内弯角处圆角半径 R 为 5 mm;挤压比 λ 为 10.125 时,模具的竖直通道的直径为 45 mm,水平变径通道直径为 10 mm,模具内弯角为 90°,内弯角处圆角半径 R 为 3 mm;模具材料均使用 H13 模具钢加工而成。模具加热温度比坯料温度略低 30~50 °C,挤压变形在 100T 液压机上实现。将不同挤压温度不同挤压比下得到的试样在光学 OLYMPUS 金相显微镜观察组织、Microhardness Tester HV-1000 型显微硬度计上测试显微硬度 HV。最后将挤压样加工成标准拉伸和压缩样,在新三思万能电子试验机 CMT-5150 上以 1 mm/min 的速度进行力学性能实验。

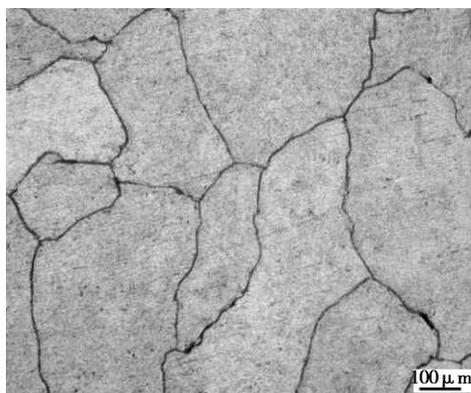


图 1 均匀化组织

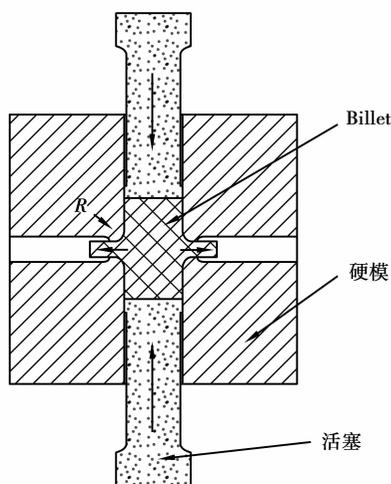


图 2 双向挤压模具装配图

表 1 AZ31 镁合金的主要元素质量分数 %

元素	Al	Zn	Mn	Mg
质量分数	2.5~3	0.7~1.3	>0.20	bal

2 实验结果及讨论

2.1 DDE 变形对组织的影响

挤压前的纵截面组织比较均匀,但晶粒粗大,大约为 300~400 μm (如图 1)。挤压后纵向出现条带状组织清晰可见,在平行于流线方向上分布着大量相对较为细小的等轴晶。这说明 AZ31 镁合金在变形过程中发生了动态再结晶^[4]。在 250 °C 时,镁合金铸棒中粗大的晶粒在挤压力和凹模内壁的共同作用下发生破碎,晶粒细小,但变形不均匀。随着坯料加热温度的升高,在 350 °C 时为明显的混晶组织,金相显微镜下能观察到未发生再结晶而被拉长的长条组织。在 400 °C 时动态再结晶比较充分,同时棒材晶粒开始有逐渐长大的趋势。250 °C 时挤压得到的棒材的晶粒尺寸约为 6 μm ,400 °C 时挤压得到的棒材的晶粒尺寸约为 20 μm ,说明坯料温度较低时能够抑制晶粒的进一步长大^[4]。挤压加工在组织方面有其固有的缺点,由于挤压时金属流动不均匀,致使挤压材表层与中心组织性能不均匀。在温度不均匀时,要发生完全再结晶的应变变量 ϵ_s 也变大。对于棒材中心部分变形不剧烈,其应变变量小;当应变变量小于 ϵ_s 时,就会形成未完全再结晶组织^[5]。

当挤压比增加到 10.125 时,由于大量的塑性变形造成金属晶体结构的严重畸变,为再结晶的发生提供了有利的条件,加上挤压热的作用,较易发生动态再结晶,再结晶时从晶格严重畸变的高能位区域产生大量的晶核,新的晶粒又在正在长大的再结晶晶粒边界形核长大,从而使晶粒细化^[6];图 4 分别为 300 °C、350 °C 和 400 °C 下挤压得到的纵截面组织,平均晶粒尺寸为 3 μm 、7 μm 和 15 μm ,其中图 4(a) 和图 4(b) 流线型组织不明显,表面和中心部分均为细小动态再结晶组织,说明发生了充分的动态再结晶;而图 4(c) 中存在大量的原始变形拉长的长条晶粒,细小的再结晶晶粒沿着长条晶粒晶界成定向排布,长条晶粒晶界呈锯齿状,正在逐步被动态再结晶晶粒吞噬分割,动态再结晶不充分^[7];这说明在相同变形量下,温度越低,应变能越大,为动态再结晶提供驱动力也越大。

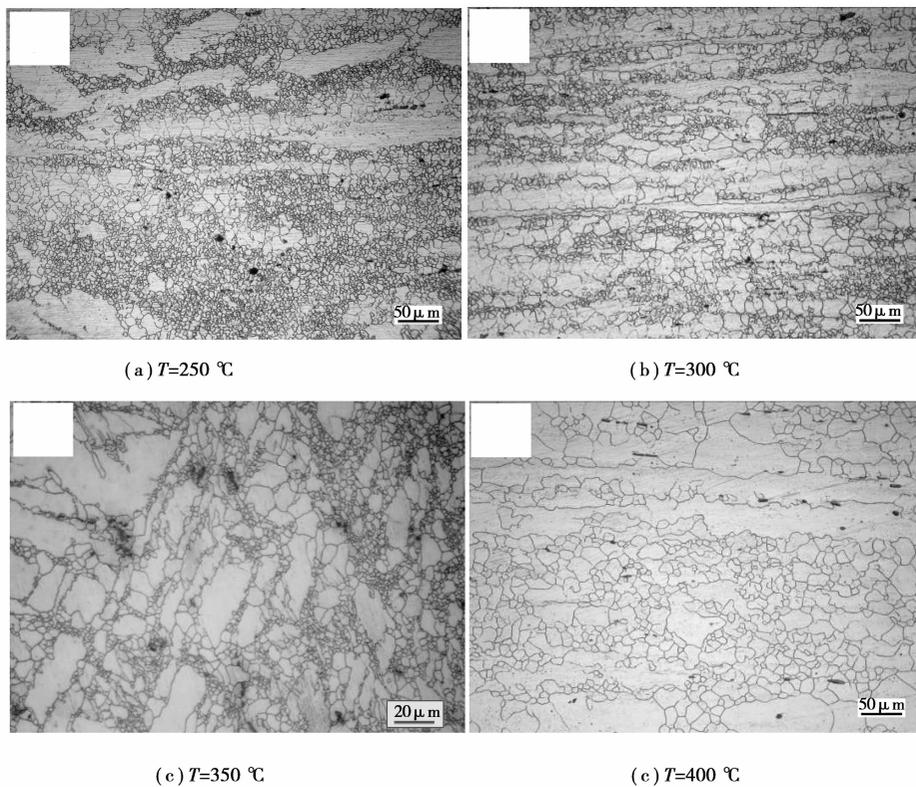


图 3 $\lambda=4.5$ 时不同温度下的纵截面组织

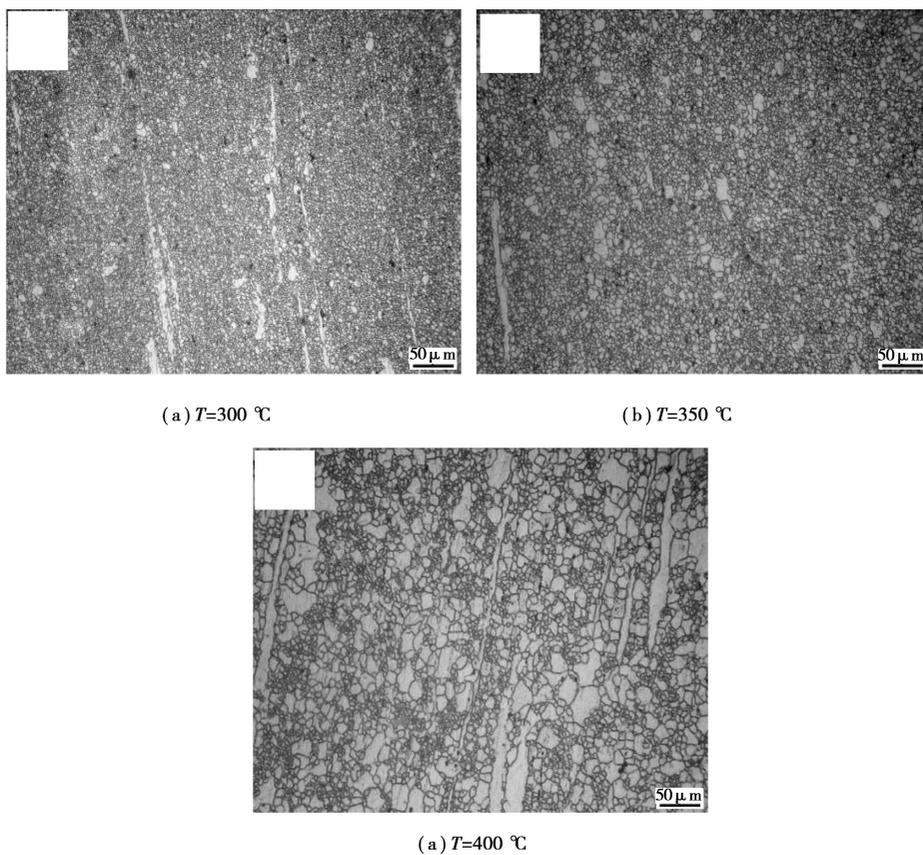


图 4 $\lambda=10.125$ 时不同温度下的纵截面组织

实验在经过模具转角剪切变形和挤压比变形形成的平行纤维组织,受到挤压应力和挤压热的作用,首先沿晶界形成亚晶结构,进而通过亚晶合并机制形成较大尺寸的大角度亚晶;随后通过晶界迁移,亚晶进一步合并和转动,发生动态再结晶,最终形成细小的大角度晶粒^[8]。

2.2 DDE 变形对力学性能的影响

2.2.1 显微硬度测试

DDE 变形前后伴随着强烈的剪切变形和挤压比变形引起的加工硬化和动态再结晶软化的发生,变形材料的显微硬度相应地发生了很大的改变,挤压比为 4.5 和 10.125 的 DDE 变形成型样的纵截面硬度值对比如图 5 所示,硬度值随着温度的升高而不断下降,因为随着温度的升高,位错运动能力增强,位错缠结减弱,进而应变硬化效应减弱和再结晶软化效应增强;随着挤压比的增大 AZ31 镁合金棒材的硬度值也增大,这是由于随着变形程度的增大,晶粒更加细密,晶界数量增多,使其变形抗力增大。

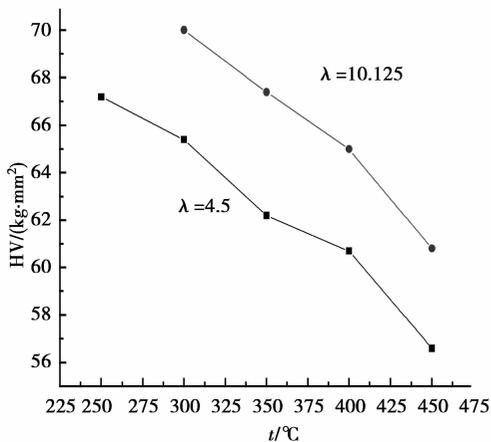


图 5 不同挤压比成型样纵截面硬度

为检测实验所得的硬度值是否符合 Hall-Petch 关系式,把实验硬度值与测得晶粒直径后得到的 Hall-Petch 函数直线(如图 6)对比, Hall-Petch 式用以下关系来表达:

$$H_V = H_0 + K_H d^{-1/2}, \quad (1)$$

对于 DDE 变形 AZ31 镁合金来说, $K_H = 50.0$; $H_0 = 47.4$ ^[9]; K_H, H_0 为材料本身固有的常数; d 为 DDE 变形 AZ31 镁合金的平均直径;由图 6 可以看出,实验测得的硬度值与晶粒直径关系基本符合 Hall-Petch 关系式。

2.2.2 拉伸压缩性能测试

图 7 是挤压比为 4.5 时不同挤压温度成型样在室温拉伸破坏实验中得到的真实应力应变曲线,从

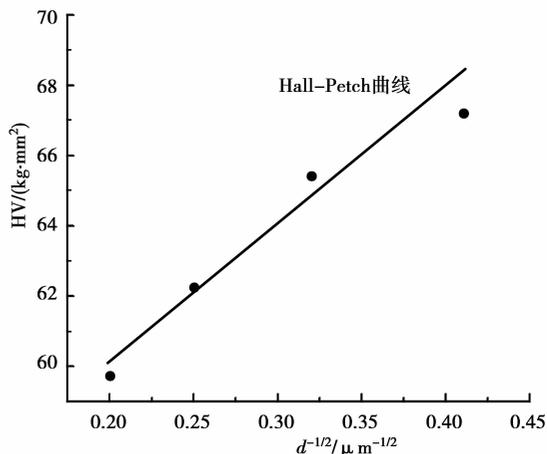


图 6 硬度值与晶粒直径函数关系

图中明显看出,变形过程中没有明显的屈服现象。为了表征其屈服特性值,选用 $\sigma_{0.2}$ 来表示其大小。

图 8 是挤压比为 4.5 和 10.125 下不同挤压温度得到的试样屈服强度。当挤压比为 10.125 时, 250 °C 下挤压不成功,原因是温度太低,挤压比过高,需要足够大的挤压力才能挤压成功。随挤压比的升高,屈服强度升高。在挤压比为 10.125 时, 300 °C 试样的屈服强度达到 232 MPa,随着温度升高屈服强度逐渐下降。挤压比为 4.5 时, 300 °C 试样屈服强度达到 210 MPa,在 400~450 °C 时,屈服强度下降梯度加大,这是因为挤压试样在 400~450 °C 时,晶粒尺寸增加幅度过大造成的。

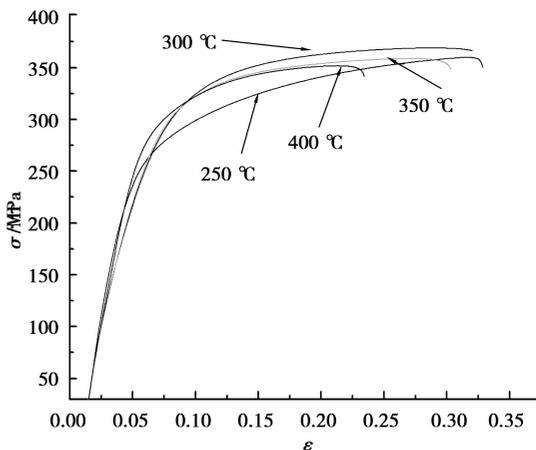


图 7 室温拉伸应力应变曲线

变形镁合金在高温下将发生回复和再结晶,从而降低变形过程中产生的位错密度。堆垛层错能的高低和晶格扩散系数的大小决定了变形过程中发生的是回复还是再结晶,晶格扩散系数越大,堆垛层错能就越低,就越容易发生再结晶。再结晶晶粒的大

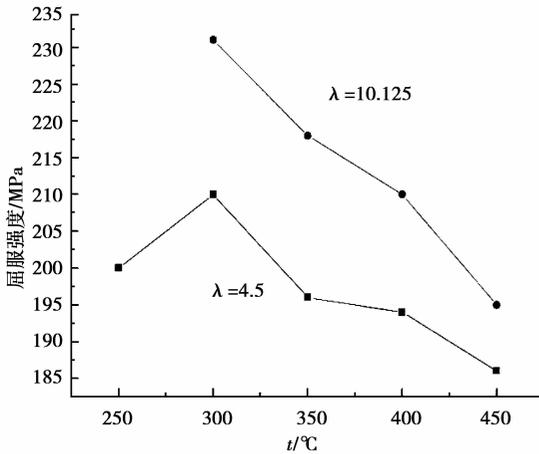


图 8 不同挤压比下屈服强度的对比

小与变形温度、应变速率、原始晶粒尺寸、合金元素及杂质有关^[10]。变形温度越低,挤压比越大,再结晶晶粒越小。因此在挤压过程中,较低的温度和较大的挤压比有利于挤压组织的细化。经过挤压后,实验合金发生了动态再结晶,晶粒得到细化。

Hall-Petch 公式是材料的晶粒尺寸对屈服强度的一般规律。其中 K 值随泰勒系数的增加而增加,通常泰勒系数取决于滑移系的多少。由于镁是 HCP 结构,与面心立方及体心立方金属相比,镁的泰勒系数大,因此其 K 值也大^[11-12]。因此对于 AZ31B 镁合金而言,挤压过程中的动态再结晶所产生的晶粒细化作用将显著提高合金的室温强度水平。

图 9 是挤压比分别为 4.5 和 10.125 的 DDE 成型样室温压缩率和伸长率对比曲线图,从图中得出,在挤压比为 4.5,温度为 250 °C 时,室温压缩率和伸长率达到最大,分别为 14.75%,16.27%;挤压比为 10.125 时,温度为 300 °C 时,室温压缩率和伸长率达到最大,分别为 18.6%,19.5%;随着温度的升高,室温压缩率和伸长率均呈现出下降的趋势,并且下降的梯度逐渐增大,在 450 °C 时,挤压比为 4.5 和 10.125 的室温压缩率和伸长率差值最小,说明了提高挤压比后在较高温度挤压时晶粒细化效果不显著。

材料的塑性好坏主要取决于晶粒大小,随着晶粒细化效果的提高,压缩率与伸长率增大,也就是随温度降低而增大,这主要是因为晶粒越细,在一定体积内的晶粒数目就越多,则在同样变形量下,变形分散在更多的晶体内进行,变形较均匀,从而每个晶粒中塞积的位错少,因应力集中引起的开裂机会也就较少,有可能在断裂之前承受较大的变形量,即表现

出较好的塑性^[13]。细晶粒金属中,裂纹不易萌生(应力集中少),也不容易传播(晶界曲折多),因而在断裂过程中吸收了更多的能量,表现出较高的韧性^[14],在 DDE 变形 AZ31 镁合金时,为提高镁合金的综合力学性能,需降低挤压温度和提高挤压比来提高晶粒细化效果,所以 DDE 工艺是一种既提高材料的强度,又提高材料塑性和韧性的方法。

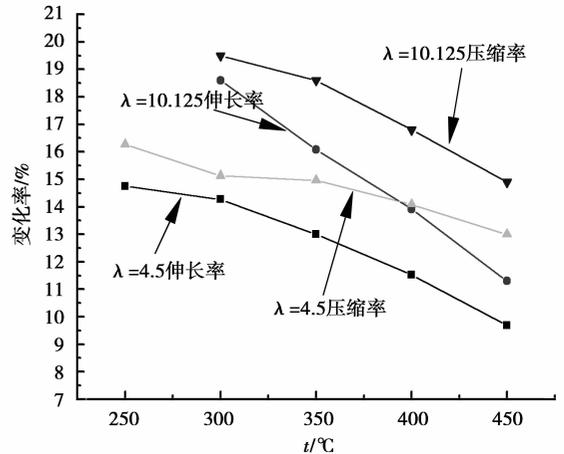


图 9 不同挤压比伸长率压缩率对比

3 结 论

1) 铸态 AZ31 镁合金经 DDE 热变形后晶粒细化效果明显,挤压比为 4.5 时,综合考虑挤压温度为 250 °C 时,晶粒细化效果最好;在挤压比为 10.125 时,250 °C 挤压成型失败,300 °C 为较好的挤压温度。随着挤压比的升高,得到的组织越均匀细小。

2) 经不同温度 DDE 挤压成型后,硬度值随着温度的升高而降低,在挤压比为 4.5 时,其各个温度下得到的硬度值曲线与 Hall-Petch 关系曲线相符合,随着挤压比的升高,硬度值有所升高,但增长幅度不大。

3) 经 DDE 挤压成型后,变形材料的抗压强度、压缩率和屈服强度值有了很大程度的提高,并且随着挤压温度的升高,压缩率、伸长率和屈服强度值呈降低趋势。随着挤压比的升高,其力学性能相应提高。

参考文献:

- [1] 张津,张宗和. 镁合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] 陈震华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [3] WANTANBE H, MUKAI T, ISHIKAWA K, et al. Superplastic behavior of an ECAE processed ZK60 magnesium alloy[J]. Materials Science Forum, 2003, 415-416: 103-106.

- 419(4): 557-569.
- [4] MURAI T, MATSUOKA S, MIYAMOTO S, et al. Effects of extrusion conditions on microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy extrusions [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 141(2):207-212.
- [5] KLEINER S, UGGOWITZER P J. Mechanical anisotropy of extruded Mg-6% Al-1% Zn alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 379(1/2): 258-271.
- [6] GALIYEV A, KAIBYSHE R, GOTTSTEIN G. Correlation of plastic deformation and dynamic recrystallization in magnesium alloy ZK60 [J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(7): 1199-1206.
- [7] KIM W J, AN C W, KIM Y S, et al. Mechanical properties and microstructures of an AZ61 Mg alloy produced by equal channel angular pressing [J]. *Scripta Materialia*, 2002, 47(1): 39-44.
- [8] VOGEL M, KRAFT O, DEHM G, et al. Quasi-crystalline grain-boundary phase in the magnesium die-cast alloy ZA85 [J]. *Scripta Materialia*, 2001, 45(5): 517-526.
- [9] KIM W J, SAY K. Micro-extrusion of ECAP processed magnesium alloy for production of high strength magnesium micro-gears [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54(7): 1391-1395.
- [10] WATANABE H, MUKAI T, ISHIKAWA K, et al. Realization of high-strain-rate superplasticity at low temperatures in a Mg-Zn-Zr Alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 307(1/2): 119-128.
- [11] DELVALLE J A, CARREN F, RUANO O A. Influence of texture and grain size on work hardening and ductility in magnesium-based alloys processed by ECAP and rolling [J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(16): 4247-4259.
- [12] BARNETT M R, KESHAVARZ Z, BEER A G, et al. Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg-3Al-1Zn [J]. *Acta Materialia*, 2004, 52: 5093-5103.
- [13] FIGUEIREDO R, LANGDON T. The development of superplastic ductilities and microstructural homogeneity in a magnesium ZK60 alloy processed by ECAP [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 430(1/2): 151-156.
- [14] MEHROTRA P, M LILLO T, AGNEW S R. Ductility enhancement of a heat-treatable magnesium alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55(10): 855-858.
- (编辑 陈移峰)
-
- (上接第 924 页)
- [4] 郑家树. 地震动拟合与大跨度桥梁抗震综述 [J]. *西南民族大学学报*, 2008, 34(4): 772-775.
ZHENG JIA-SHU. Earthquake fitting and long span bridge seismic review [J]. *Journal of Southwest University for Nationalities*, 2008, 34(4): 772-775.
- [5] HAO H. Arch response to correlated multiple excitations [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1993(22): 389-404.
- [6] LIANG S. Seismic design for steel trussed arch to multi-support excitations [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, 63(6): 725-734.
- [7] ZHANG Y H, LI Q S, LIN I H, et al. Random vibration analysis of long-span structures subjected to spatially varying ground motions [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(4): 620-629.
- [8] CHOUW N, HAO H. Study of SSI and non-uniform ground motion effect on pounding between bridge girders [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005(8): 717-728.
- [9] SOYLUK K. Comparison of random vibration methods for multi-support seismic excitation analysis of long-span bridges [J]. *Engineering Structures*, 2004 (9): 1573-1583.
- [10] RUIZ P, PENZIEN J. Probabilistic study of the behavior of structures during earthquakes [R]. California: University of California, 1969.
- [11] 屈铁军, 王君杰, 王前信. 空间变化的地震动功率谱的实用模型 [J]. *地震学报*, 1996, 18: 55-62.
QU TIE-JUN, WANG JUN-JIE, WANG QIAN-XIN. Model of power spectrum for spatial variable seismic ground motion [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1996, 18(1): 55-62.
- [12] 屈铁军, 王前信. 空间相关的多点地震动合成—合成实例 [J]. *地震工程与工程振动*, 1998, 18(6): 25-32.
QU TIE-JUN, WANG QIAN-XIN. Simulation of spatial correlative time histories of multi-point ground motion—application of fundamental formulas [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1998, 18(6): 25-32.
- [13] 范立础, 胡世德, 叶爱君. 大跨度桥梁抗震设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [14] 李正英. 大跨度拱桥地震反应特性及减震控制研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- (编辑 侯湘)