

# 轧制压下量对 ZK60 镁合金组织和阻尼性能的影响<sup>①</sup>

刘华燊<sup>1</sup>, 孙有平<sup>1,2,3</sup>, 何江美<sup>1</sup>, 朱嘉欣<sup>1</sup>, 罗国健<sup>1</sup>

(1.广西科技大学机械与汽车工程学院,广西柳州 545006; 2.广西土方机械协同创新中心,广西柳州 545006; 3.广西汽车零部件与整车技术重点实验室,广西柳州 545006)

**摘要:**研究了轧制压下量对 ZK60 镁合金显微组织及阻尼性能的影响。结果表明,随着轧制压下量增加,ZK60 镁合金阻尼性能逐渐增强。在应变振幅为 0.01% 时, $Q^{-1}$  值由铸态时的 0.012 7 增加至轧制态(压下量为 50%)时的 0.015 9(轧制面)、0.020 4(侧截面)与 0.018 3(横截面)。合金(0002)基面织构强度随着轧制压下量增加而增强,由压下量 10% 时的 6.547 增加至压下量 50% 时的 10.690,压下量对合金阻尼性能产生了一定影响;组织中再结晶体积分数增加对阻尼性能的影响起主导作用。

**关键词:** 阻尼材料; ZK60 镁合金; 阻尼性能; 轧制压下量; 微观组织

中图分类号: TB302

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.02.034

文章编号: 0253-6099(2023)02-0154-06

## Effect of Rolling Reduction on Microstructure and Damping Properties of ZK60 Magnesium Alloy

LIU Huashen<sup>1</sup>, SUN Youping<sup>1,2,3</sup>, HE Jiangmei<sup>1</sup>, ZHU Jiabin<sup>1</sup>, LUO Guojian<sup>1</sup>

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China; 2.Guangxi Collaborative Innovation Center of Earthwork and Machinery, Liuzhou 545006, Guangxi, China; 3.Guangxi Key Laboratory of Automobile Components and Vehicle Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China)

**Abstract:** The effect of rolling reduction on the microstructure, damping properties and mechanical properties of ZK60 magnesium alloy were studied. The results show that the damping properties of ZK60 magnesium alloy is improved with the increase of rolling reduction. When the strain amplitude is 0.01%, the  $Q^{-1}$  value increases from 0.012 7 in as-cast state to 0.015 9 on rolling surface (RD-TD) with the rolling reduction of 50%, 0.020 4 on side section (RD-ND) and 0.018 3 on cross section (TD-ND). With the increase of rolling reduction, the (0002) basal texture strength of the alloy increases from 6.547 with the rolling reduction of 10% to 10.690 with the rolling reduction of 50%, which brings a certain impact to the damping properties of the alloy. The increased recrystallization volume fraction in the microstructure is the main influencing factor for the damping properties.

**Key words:** damping material; ZK60 magnesium alloy; damping properties; rolling reduction; microstructure

阻尼材料近年来备受关注,广泛应用于汽车、航空航天、3C(计算机,通信和消费电子)等领域。在金属材料中,纯镁表现出极佳的阻尼性能,然而其较差的力学性能阻碍了其应用。大量研究表明,镁合金的阻尼性能主要受位错运动影响,属于位错阻尼机制<sup>[1]</sup>。因此,若要提高镁合金的阻尼性能,必须增加位错的可移动性。但增加位错的可移动性又将导致其力学性能降

低,因此,探索出平衡力学性能与阻尼性能的方法迫在眉睫。ZK60 是一种高强变形镁合金,其强度接近高强 7075 铝合金<sup>[2]</sup>,应用前景广阔,但力学性能与阻尼性能之间的矛盾限制了其应用。因此,有必要探索一种方法,在保证 ZK60 镁合金高强力学性能的同时提高其阻尼性能。

轧制是一种常用的金属塑性变形方式,通过改变

① 收稿日期: 2022-10-24

基金项目: 广西高等学校高水平创新团队资助项目(桂教师范[2019]52号);中央引导地方科技发展专项(2021ZYZX1012)

作者简介: 刘华燊(1998-),女,广东惠州人,硕士研究生,主要研究方向为镁合金的阻尼与力学性能。

通信作者: 孙有平(1979-),男,吉林松原人,博士,教授,主要从事金属材料先进成形理论研究。

轧制工艺可以改变金属材料的力学性能和阻尼性能<sup>[3]</sup>。目前,对镁合金轧制工艺的研究主要集中在轧制工艺对镁合金力学性能<sup>[4-7]</sup>、成形性<sup>[8]</sup>和显微组织<sup>[9]</sup>的影响上,而轧制工艺参数对镁合金阻尼性能影响的研究还甚少。本文选择 ZK60 变形镁合金,探究不同轧制压下量对 ZK60 镁合金组织、阻尼性能和力学性能的影响规律。

## 1 试验材料与方法

试验原材料为半连续铸造 ZK60 镁合金铸锭。首先采用 SX-16-14Q 型箱式电阻炉对铸锭进行均匀化退火处理,使合金成分趋于均匀,改善铸锭的成分偏析<sup>[10]</sup>。均匀化退火工艺采用双级固溶处理,先在 330 ℃ 下保温 24 h 后水冷,接着在 420 ℃ 下退火,保温 4 h 后水冷。将均匀化退火后的铸锭用铣床铣到厚度 12.5 mm。铸锭在箱式电阻炉中 300 ℃ 下预热,保温 20 min,采用  $\Phi 420 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  双辊轧机对 ZK60 镁合金铸锭进行预轧制,从 12.5 mm 轧制到 10 mm;预轧制料空冷至室温,重新加热到 300 ℃,保温 20 min,进行不同压下量的单次轧制,轧辊转速 0.512 m/s,轧制工艺见表 1。板材轧后立即水淬。

表 1 轧制工艺

序号	初始板厚/mm	轧后板厚/mm	轧制压下量/%
1	10	9	10
2	10	8	20
3	10	7	30
4	10	6	40
5	10	5	50

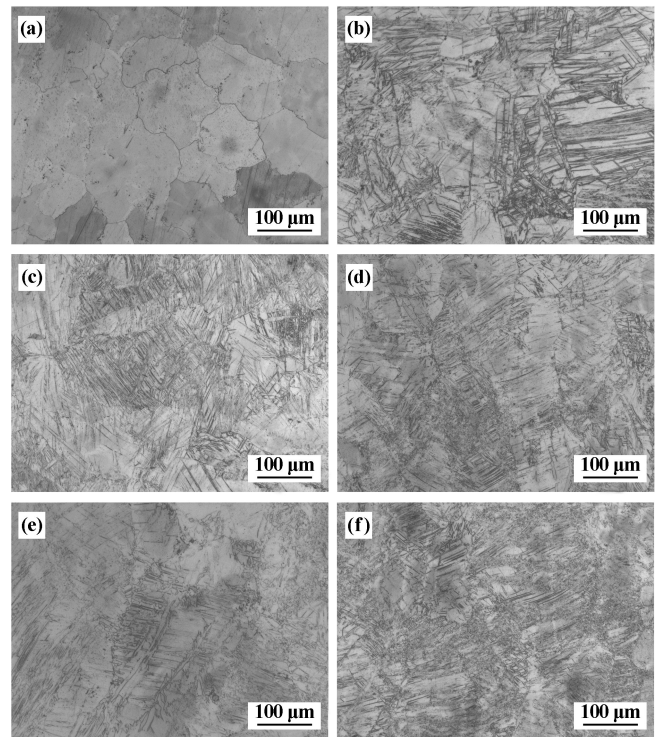
从板材中切取试样,并用腐蚀液(0.3 g 苦味酸+7 mL 无水乙醇+1.5 mL 冰醋酸+2 mL 蒸馏水)腐蚀。采用 Leica DMI3000M 型光学显微镜观察其显微组织;采用 Bruker D8 Advance 型衍射仪分析合金试样的物相组成;用 DMA Q850 型动态热机械分析仪测试试样阻尼性能,室温下测试,频率为 1 Hz,试样尺寸为 30 mm × 3 mm × 1 mm;用 ETM105D 型电子万能试验机进行拉伸实验,测试试样力学性能;用 SIGMA 型场发射扫描电子显微镜观察拉伸试样的断口形貌。

## 2 试验结果分析与讨论

### 2.1 轧制压下量对合金微观组织的影响

图 1 为 ZK60 镁合金铸态和不同轧制压下量下的光学显微组织。由图 1 看出, ZK60 镁合金的铸态组织为粗大晶粒,而 5 种轧制态合金组织都存在孪晶,且

随着轧制压下量增加,动态再结晶的体积分数逐渐增加。压下量 10% 时, ZK60 合金组织出现了大量平行的细长孪晶,少量晶粒内部出现交叉孪晶,再结晶体积分数极小;压下量 20% 时,孪晶数量增加,平行孪晶之间再结晶数量也逐渐增加;压下量 30% 时,可以观察到晶粒尺寸比前 2 个压下量时要小,这是因为此时孪晶贯穿了整个晶粒,产生了“分割”作用,原始的大尺寸晶粒被分割为几个小尺寸晶粒,产生了晶粒细化现象<sup>[4]</sup>;压下量 40% 时,孪晶数量减少,动态再结晶主要集中在晶界处,再结晶机制由孪晶再结晶机制转变为晶界再结晶机制<sup>[4-5]</sup>;压下量 50% 时,孪晶和“空岛区域”明显减少,在晶界和孪晶界出现了“链状”的动态再结晶组织,这是一种典型的旋转动态再结晶模式,是变形量过大引起的<sup>[4]</sup>。



(a) 铸态; (b) 压下量 10%; (c) 压下量 20%;  
(d) 压下量 30%; (e) 压下量 40%; (f) 压下量 50%

图 1 铸态及不同轧制压下量下 ZK60 镁合金的显微组织

图 2 为铸态和不同轧制压下量下 ZK60 镁合金的 XRD 图谱。由图 2 可知,6 种状态下的合金组织都是由  $\alpha$ -Mg 基体、MgZn 相和 MgZn<sub>2</sub> 相组成,因此,可以排除第二相成分对轧制变形后镁合金阻尼性能的影响。

### 2.2 轧制压下量对合金室温阻尼性能的影响

室温下不同状态 ZK60 镁合金阻尼-应变曲线如图 3 所示。其中,XY 面为轧制面(RD-TD),XZ 面为侧截面(RD-ND),YZ 面为横截面(TD-ND)。图 4 为不同压下

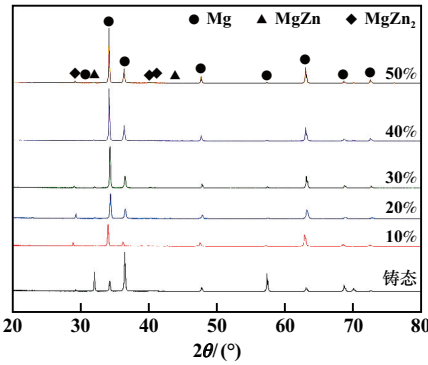
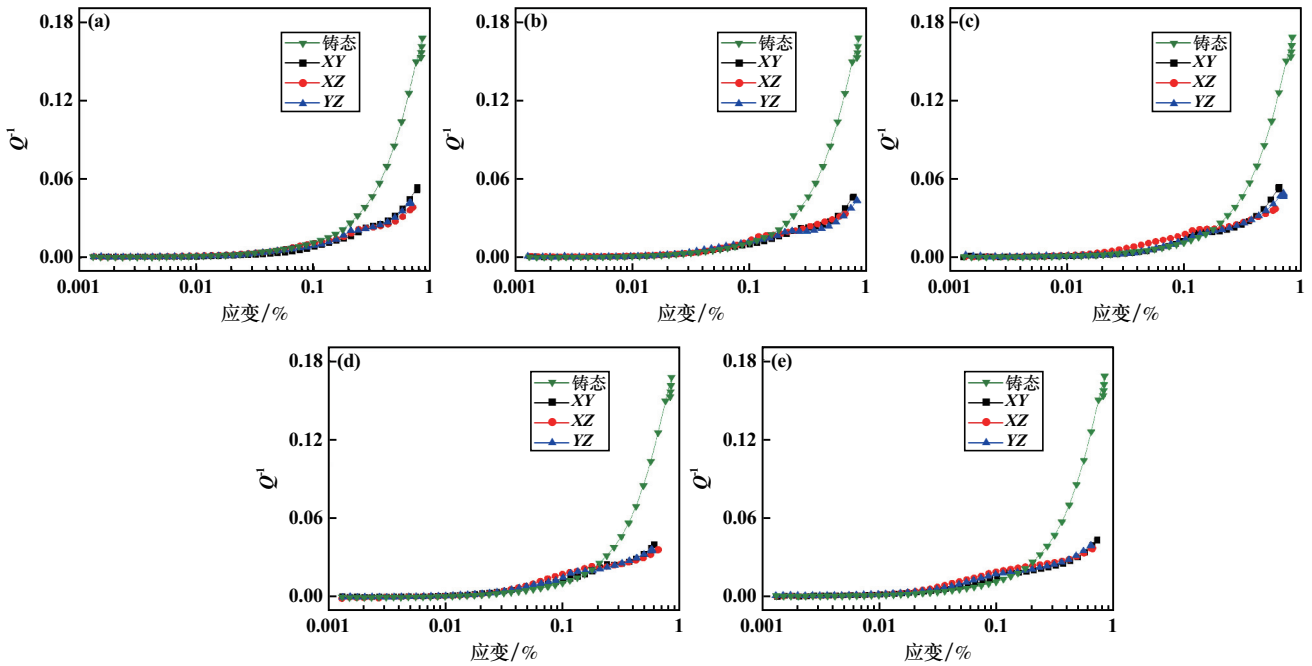


图2 铸态及不同轧制压下量下 ZK60 镁合金的 XRD 图谱

量下 ZK60 镁合金 XY 面、XZ 面和 YZ 面的阻尼-应变曲线。

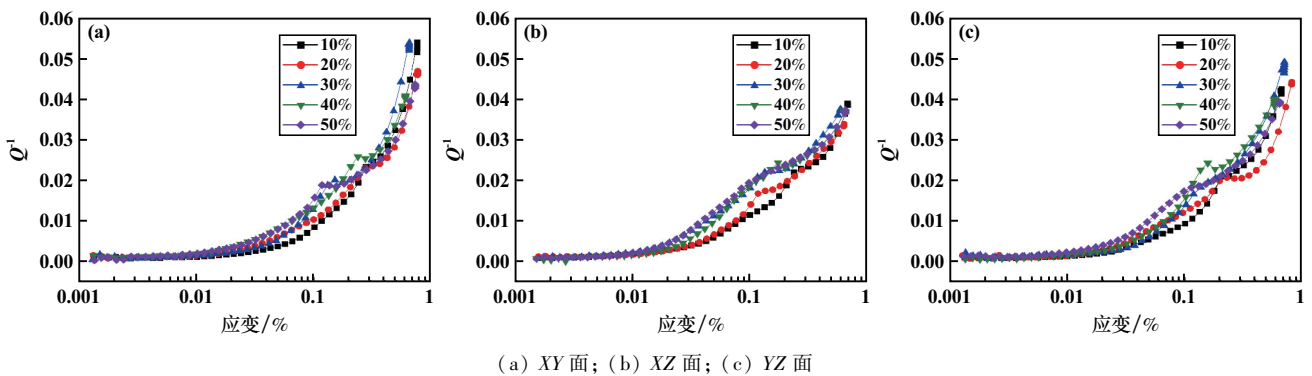
阻尼性能采用品质因子的倒数  $Q^{-1}$  表示。从图 3 和图 4 可以看出, ZK60 镁合金的阻尼-应变曲线可以分为 2 个阶段: 在第 1 个阶段, 应变振幅值较小,  $Q^{-1}$  值几乎没有变化, 称为应变振幅无关阶段, 用  $Q_0^{-1}$  表示; 在第 2 个阶段, 应变振幅值较大,  $Q^{-1}$  值随着应变振幅增加显著提升, 称为应变振幅相关阶段, 用  $Q_h^{-1}$  表示。即:

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



(a) 10%; (b) 20%; (c) 30%; (d) 40%; (e) 50%

图3 不同轧制压下量下 ZK60 合金的阻尼-应变曲线



(a) XY 面; (b) XZ 面; (c) YZ 面

图4 不同轧制压下量下 XY、XZ、YZ 面的阻尼-应变曲线

在室温下, 合金中的位错被弱钉扎点(空位及溶质原子等)和强钉扎点(位错缠结点及晶界等)钉扎<sup>[2]</sup>, 在应变振幅无关阶段, 位错被强钉扎点和弱钉

扎点钉扎, 位错线在弱钉扎点间做“弓出”往复运动; 在应变振幅相关阶段, 应力增大, 位错线脱离弱钉扎点的钉扎, 产生雪崩式的脱钉, 此时位错线需要更多的能

量在强钉扎点间做“弓出”往复运动,因此在应变振幅相关阶段, $Q^{-1}$ 值更高,阻尼性能更强。

从图 3 可看出,在应变振幅无关阶段,6 种状态下合金的阻尼性能几乎相同,而在应变振幅相关阶段,铸态 ZK60 镁合金的阻尼性能比轧制态的提升程度更高。在一定应变振幅以下,阻尼值  $Q^{-1}$  基本不随应变振幅增加而增加,当应变振幅超过某一值之后,阻尼值  $Q^{-1}$  随着应变振幅增加而增加。这一应变振幅值即称为临界应变振幅,也就是区分应变振幅无关阶段与应变振幅相关阶段的应变幅值。压下量 10% 时,3 个面的临界应变振幅比铸态的高,且 3 个面的阻尼性能几乎相同;压下量 20% 时,3 个面的临界应变振幅稍小于铸态的临界应变振幅,其中 XZ 面的临界应变振幅小于另外 2 个面;压下量大于 30% 时,3 个面的临界应变振幅皆小于铸态,其中 XZ 面的临界应变振幅小于另外 2 个面。当应变振幅值为 0.01% 时,铸态的  $Q^{-1}$  值为 0.012 7,轧制压下量 10%、20%、30%、40% 和 50% 时,XY 面的  $Q^{-1}$  值分别为 0.008 6、0.011 5、0.013 4、0.014 8 和 0.015 9,XZ 面的  $Q^{-1}$  值分别为 0.011 5、0.014 1、0.018 2、0.019 8 和 0.020 4,YZ 面的  $Q^{-1}$  值分别为 0.009 4、0.013 2、0.014 1、0.015 7 和 0.018 3。可见,随着轧制压下量增加,3 个面的阻尼性能也逐渐增强;同一种状态下,XZ 面的阻尼性能高于另外 2 个面的阻尼性能。

从图 4 可以看出,随着轧制压下量增加,3 个面的临界应变振幅逐渐减小。由图 3 和图 4 可知,轧制态的 ZK60 镁合金出现了 2 个临界应变振幅,即在 2 个临界应变振幅之间出现了个“小平台”,因此得出该试验的阻尼-应变曲线并不是典型的 G-L 模型阻尼-应变

曲线。文献[2-3]曾对 G-L 位错阻尼模型进行了扩展,认为在阻尼-应变振幅曲线中表现出 2 个临界脱钉应变振幅点的现象是合金中的刃型位错和螺旋型位错的脱钉能力不同所致,因为螺旋型位错比刃型位错更容易移动。G-L 理论模型只考虑了一种位错(刃型位错),但实际上阻尼性能的增加与螺旋型位错和刃型位错的脱钉都有关,因此可以得出本试验所得的第 1 个临界点是螺旋型位错脱钉,导致阻尼值缓慢增长,但此时应变振幅不大,不能让刃型位错启动,因此出现了一个阻尼平台;当应变振幅增大到足够使刃型位错启动时,阻尼值迅速增大。

结合图 1 可知,ZK60 镁合金在经过轧制变形后,晶粒产生很大变化,包括产生孪晶和动态再结晶等。随着轧制压下量增加,动态再结晶的体积分数增加<sup>[1]</sup>,位错密度减少,使位错缠结点减少,强钉扎点减少,位错的可动性增加,阻尼性能增强。从图 4 观察得出,在第 2 个临界应变振幅前,阻尼性能随着轧制压下量增加而增加,在第 2 个临界应变振幅以后,3 个面的阻尼性能变化规律不一,可能与在高应变振幅阶段合金发生了微塑变有关,产生了晶界型阻尼。因为室温下镁合金的阻尼机制主要为位错阻尼机制,在第 2 个临界应变振幅前,随着轧制压下量增加,ZK60 镁合金的阻尼性能逐渐增加。

图 5 为 ZK60 镁合金的 G-L 曲线图。从图 5 可以看出,铸态及不同轧制压下量下 ZK60 镁合金的 G-L 曲线基本拟合成一条直线,与 G-L 理论相符。因此可以使用 G-L 理论去解释 ZK60 镁合金的阻尼演变规律<sup>[11]</sup>。

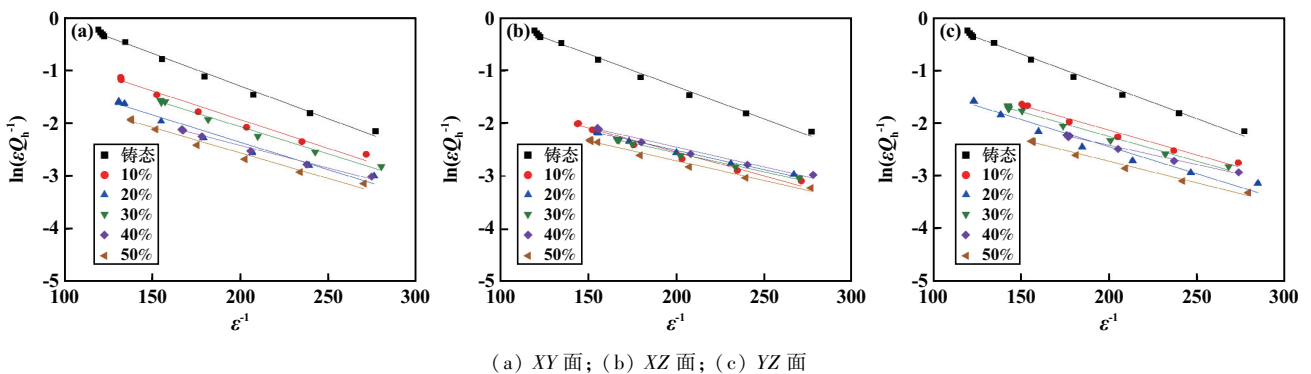


图 5 不同轧制压下量下 XY、XZ、YZ 面的 G-L 曲线

由 G-L 理论可知,在应变振幅无关阶段,合金中的位错线在弱钉扎点之间做“弓出”往复运动,此时  $Q_0^{-1}$  值为:

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

式中  $\rho$  为可动位错线的密度; $L_c$  为弱钉扎点间的距离; $\omega$  为角频率; $G$  为剪切模量; $b$  为柏式矢量; $B$  为常数。

在应变振幅相关阶段,位错线在大应变振幅下挣脱开弱钉扎点的束缚,在强钉扎点间做“弓出”往复运动,产生更大的能量消耗,此时  $Q_h^{-1}$  值为:

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

式中  $C_1 = \Omega \rho L_N^3 K \eta \alpha / (\pi^2 L_C^2)$ ;  $C_2 = K \eta \alpha / L_C$ ;  $\varepsilon$  为应变振幅;  $\Omega$  为取向因子;  $K$  为常数;  $\eta$  为钉扎溶质原子与溶剂原子的错配系数;  $\alpha$  为点阵常数;  $L_N$  为强钉扎点间的距离。

对式(3)两边分别取对数,可得:

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

由式(4)可知,  $\ln(\varepsilon Q_h^{-1})$  与  $\varepsilon^{-1}$  是线性关系,斜率为  $-C_2$ ,截距为  $\ln C_1$ 。故可从  $C_1$  和  $C_2$  的大小来判断阻尼性能,即  $C_1$  越大,  $C_2$  越小,合金的阻尼性能越好<sup>[6,12]</sup>。通过对 G-L 曲线拟合,得出  $C_1$  和  $C_2$  的值如表 2 所示。

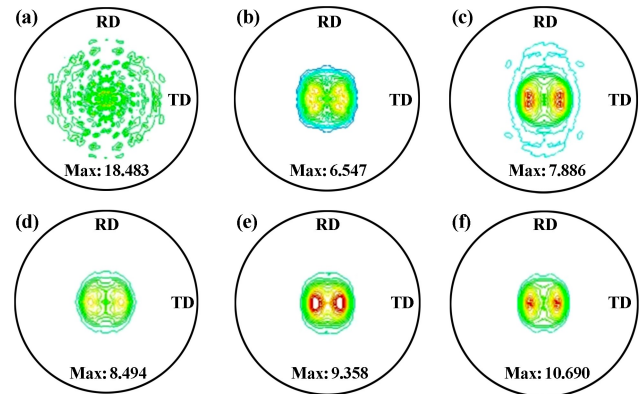
表 2 不同轧制压下量下 ZK60 镁合金 XY、XZ、YZ 面的  $C_1$ 、 $C_2$  值

压下量/%	XY 面		XZ 面		YZ 面	
	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$
0(铸态)	3.225 89	0.012 35	3.225 89	0.012 35	3.225 89	0.012 35
10	1.271 52	0.010 86	0.489 99	0.009 13	0.790 62	0.009 48
20	0.750 94	0.010 36	0.356 40	0.007 39	0.684 42	0.010 33
30	0.992 59	0.010 29	0.333 20	0.007 29	0.692 63	0.009 42
40	0.493 08	0.008 55	0.393 95	0.007 58	0.388 41	0.007 36
50	0.533 47	0.009 65	0.301 43	0.007 54	0.344 13	0.008 27

### 2.3 轧制压下量对合金织构的影响

镁合金中晶粒取向也是决定材料阻尼性能的重要因素之一,晶粒的取向显著影响位错从弱钉扎点处脱钉所需应力。研究表明,镁合金在变形过程中晶粒的转动和定向流动是变形织构形成的根本原因,镁合金基面滑移系启动的临界切应力最低,容易形成强烈的基面织构<sup>[13]</sup>。图 6 为 6 种状态下 ZK60 镁合金的织构强度变化图。由图 6 可知,铸态 ZK60 镁合金(0002)基面具有轴对称织构,基面极密度集中在外围。随着板坯轧制的进行,ZK60 板材由理想的丝织构逐渐转变为双峰板织构<sup>[14]</sup>,形成平行于轧制方向的(0002)强基面织构,即大多数晶粒的基面平行于板材轧向,织构的类型及极密度使材料具有明显的各向异性从而影响材料的阻尼性能。轧制压下量 10%、20%、30%、40%、50% 时的织构最大强度分别为 6.547、7.886、8.494、9.358、10.690,可以看出随着轧制压下量增加,织构强度逐渐增加。结合图 1 可知,随着轧制压下量增加,再结晶体积分数增加。虽然再结晶增加可以减弱织构,但再结晶晶粒在形核之后的长大过程中同样会在外加荷载作用下发生转动,并有逐渐形成织构的倾向<sup>[15]</sup>,因此随着轧制压下量增加,织构逐渐增

强<sup>[16]</sup>。文献[17]对 Mg-0.5%Zn-0.5%Ce-0.5%Zr 合金在 400 °C 下分别进行 20%、30% 和 50% 压下量的轧制变形,发现随着轧制压下量增加,板材基面织构强度也逐渐增加。



(a) 铸态; (b) 10%; (c) 20%; (d) 30%; (e) 40%; (f) 50%

图 6 铸态及不同轧制压下量下 ZK60 镁合金(0002)织构

轧制时,轧制压下量与应变速率的关系如下:

$$\varepsilon = \frac{2V\sqrt{\Delta h/R}}{H+h} \quad (5)$$

式中  $V$  为轧辊速度, mm/s;  $\Delta h$  为道次压下量, mm;  $R$  为轧辊半径, mm;  $H$  和  $h$  分别为板材轧前厚度与轧后厚度, mm。

由式(5)可知,轧制压下量与应变速率成正相关关系,即轧制压下量越大,应变速率也越大。应变速率对织构主要有两方面的影响:① 应变速率对轧制过程中板材的温度产生影响;② 高温轧制时,应变速率对轧制过程中的塑性变形机制产生影响,最终导致织构类型的不同以及织构强弱的变化。轧制压下量对镁合金织构强度的影响由两方面共同决定。

在材料阻尼测试过程中,仪器的振动方向与镁合金板材 ND 方向平行。另外,镁合金属于密排六方晶体结构,与锥面滑移和柱面滑移相比,处于基面的位错线进行滑移时所需要的剪切力小得多,因此更容易滑移消耗能量。而轧制后的板材形成了(0002)基面平行于板材轧向的织构,也就是晶粒的  $c$  轴垂直于板材轧向,与 ND 方向平行。位错的滑移方向与振动方向垂直,处于基面的位错不易于挣脱钉扎点的束缚进行滑移,相同应变条件下的阻尼值降低,并且随着织构增强,越来越多晶粒基面与轧制面平行,越来越多晶粒的  $c$  轴与振动方向平行。因此,随着板材基面织构增强,阻尼值会逐渐降低,但是因为织构增强幅度不大,结合试验结果分析,对合金阻尼性能起主导作用的还是再结晶体积分数。

### 3 结 论

1) 随着轧制压下量增加,ZK60 镁合金轧制面、侧截面与横截面上的室温阻尼性能皆逐渐增加,临界应变振幅逐渐减小。相同轧制压下量下,侧截面的阻尼性能优于轧制面与横截面,临界应变振幅小于轧制面与横截面。

2) ZK60 镁合金轧制面、侧截面与横截面上的 G-L 曲线皆可以拟合一条直线,即符合 G-L 阻尼理论,因此 ZK60 镁合金的阻尼机理为位错型阻尼。

3) 随着轧制压下量增加,ZK60 镁合金板材织构强度逐渐增强,从压下量 10% 时的 6.547 增加到压下量 50% 时的 10.690,压下量对合金阻尼性能产生了一定影响;组织中再结晶体积分数的增加对阻尼性能的影响起主导作用。

#### 参考文献:

- [1] 翟传田,孙有平,何江美,等. 轧制变形量对 Mg-Zn-Y 合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2022,47(6):39-45.
- [2] 张 军,寇子明,杨亚琴,等. AZ31 和 ZK60 变形镁合金阻尼性能的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2017,40(3):115-118.
- [3] HU X S, WU K, ZHENG M Y, et al. Low frequency damping capacities and mechanical properties of Mg-Si alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007,452-453:374-379.
- [4] 李 奇. ZK60 镁合金板材轧制工艺研究[D]. 合肥:合肥工业大学材料科学与工程学院, 2017.
- [5] 聂志诚,张 欣,刘 筱. 多向锻造变形和退火处理对 AZ31 镁合金微观组织和力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):194-197.

- [6] 张 佳,朱红梅,吴 炜. 轧制变形对 Mg-0.6Zr 合金阻尼性能的影响[J]. 热加工工艺, 2014,43(14):53-55.
- [7] 刘玫秀. 轧制工艺对 Mg-4Zn-1Gd 镁合金板材织构及力学性能影响的研究[D]. 重庆:重庆大学材料科学与工程学院, 2020.
- [8] 赵磊杰,马立峰,韩廷状,等. 变形镁合金轧制成形研究进展[J]. 材料导报, 2020,34(21):21135-21145.
- [9] 梁书锦,刘祖岩,王尔德. AZ31 镁合金轧制变形后组织与性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2017,46(5):1411-1418.
- [10] 杨春洋,孙有平,何江美,等. 轧制温度对大应变轧制 Al-4.5Cu-1.5Mg-0.1Sc 合金组织与性能的影响[J]. 矿冶工程, 2022,42(2):132-135.
- [11] Rogers D H. An extension of a theory of mechanical damping due to dislocations[J]. Journal of Applied Physics, 1962,33(3):781-792.
- [12] 王敬丰,高 珊,潘复生,等. 加工工艺对 ZK60 镁合金力学性能和阻尼性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009,19(5):821-825.
- [13] 张丁非,刘杰慧,胡红军,等. 挤压-剪切工艺挤压 AZ31 镁合金的组织与织构演变[J]. 材料工程, 2010(7):24-28.
- [14] Biswas S, Suwas S. Evolution of sub-micron grain size and weak texture in magnesium alloy Mg-3Al-0.4Mn by a modified multi-axial forging process[J]. Scripta Materialia, 2012,66(2):89-92.
- [15] Sakai T, Utsunomiya H, Koh H, et al. Texture of AZ31 magnesium alloy sheet heavily rolled by high speed warm rolling[J]. Materials Science Forum, 2007,539-543:3359-3364.
- [16] 王军亮,尹登峰,王 华,等. Al-Sc-Zr-Er-Ti 铝合金累积叠轧组织性能及织构研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):126-130.
- [17] 张亚萍,靳 丽,董 杰,等. 道次压下量和退火工艺对 Mg-Zn-Ce-Zr 合金微观组织及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012,22(11):2985-2991.

引用本文: 刘华燊,孙有平,何江美,等. 轧制压下量对 ZK60 镁合金组织和阻尼性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):154-159.

### 版权声明

本刊已许可国内外文献检索系统或数据库在其官网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。同时矿冶工程杂志官网已实行论文全文免费开放获取。本刊按矿冶工程杂志相关规定向作者一次性支付稿酬及著作权使用费后,本刊及相关合作单位不再向作者支付其他费用。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意本刊上述声明。

矿冶工程杂志编辑部

2023 年 4 月