

# 铸造阻尼铝合金的研究现状和发展趋势

刘锦宁<sup>1, 2</sup>, 刘志中<sup>2, 3</sup>, 于波<sup>1, 2</sup>, 关书文<sup>1, 2</sup>, 石典雨<sup>1, 2</sup>

(1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022;

2. 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022;

3. 中国机械总院集团 沈阳铸研科技有限公司, 辽宁沈阳 110022)

**摘要:** 分析讨论了铸造铝合金的阻尼产生机制、材料体系, 并介绍了影响铸造铝合金阻尼性能的因素, 最终基于国内外研究进展的综述分析, 展望了未来阻尼铝合金的发展方向。并指出通过引入新的阻尼机制或综合发挥多种阻尼机制的优点, 获得兼具高强度高阻尼的结构功能一体化材料, 将是未来高阻尼铝合金材料研究的重要方向。

**关键词:** 铝合金; 合金元素; 阻尼机制; 阻尼性能

随着工业和交通业发展日趋轻量化、高速化和大功率化, 由此引起的振动和噪声问题变得尤为突出<sup>[1]</sup>。如今, 低密度、高比强度和大内耗阻尼金属结构材料是航空航天、轨道交通及现代工业发展中迫切需要材料之一<sup>[2]</sup>。而铝合金作为优秀的金属结构材料, 具有轻质高强、易于加工、耐腐蚀性好、导电导热性好和可回收性强等一系列优点, 获得了广泛的应用<sup>[3-6]</sup>。由此除铝合金的力学性能外, 其功能特性中的阻尼性能也愈发得到关注<sup>[7]</sup>, 且铝合金在室温下其阻尼机制被位错机制所主导, 因此在保证力学性能的情况下, 提升阻尼性能, 缓解现有铝合金的阻尼性能与力学性能的矛盾, 开发高阻尼高强度的新型铝基结构功能一体化材料已成为重要的研究方向。

如今, 铸造工艺发展多年且较为成熟, 铸造铝合金在汽车、航空航天和船舶等行业均得到了广泛应用<sup>[8]</sup>。本文针对铸造铝合金的阻尼特性, 综述了铝合金的阻尼机制和各系铸造铝合金的阻尼特性以及阻尼性能的影响因素, 并分析了阻尼铝合金未来的发展趋势。

## 1 铝合金的阻尼机制

铸造铝合金主要阻尼机制有位错阻尼、晶界阻尼与界面阻尼<sup>[9]</sup>, 其阻尼性能通常由上述一种或多种阻尼机制协同发挥作用<sup>[10]</sup>。在常温时, 铝合金由位错阻尼主导, 随着温度逐渐升高, 晶界与界面阻尼的贡献随之增加, 其阻尼机制转变为由晶界阻尼主导<sup>[6, 11]</sup>。

### 1.1 位错阻尼机制

位错阻尼是金属材料最基本的阻尼机制, 可用Granato和Lücke提出的位错钉扎模型来解释, 即G-L模型, 如图1所示<sup>[12]</sup>。该模型认为合金中位错线在缺陷中往复运动中损耗的能量是阻尼的来源, 并将合金的缺陷分为两类, 一类是弱钉扎点, 即应力足够大可能出现脱钉的缺陷如固溶原子和空位等; 另一类是强钉扎点, 即不可动的点缺陷, 如位错网节点和沉淀相等<sup>[13]</sup>。

通过G-L模型, 可将铝合金的位错阻尼分为两部分, 即应变无关阻尼 ( $Q_0^{-1}$ , 图A-C) 和应变相关阻尼 ( $Q_h^{-1}$ , 图D-G), 因此铝合金位错阻尼可用公式(1)表示<sup>[14]</sup>:

作者简介:

刘锦宁(1999-), 男, 硕士生, 研究方向为高性能铝合金。E-mail: 1507680801@qq.com

通信作者:

刘志中, 男, 正高级工程师, 博士生导师。E-mail: 591080541@qq.com

中图分类号: TG113;  
TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)  
05-0571-07

收稿日期:

2025-04-02 收到初稿,  
2025-04-14 收到修订稿。

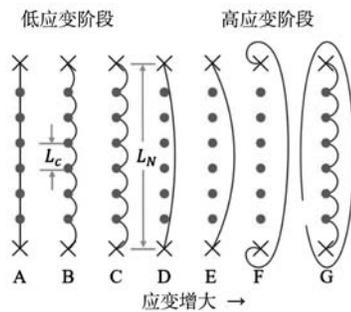


图1 G-L位错钉扎模型

Fig. 1 G-L dislocation pinning model

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

式中:  $Q_0^{-1} = \frac{\rho B L_c^4 \omega}{36 C B^2}$ ;  $Q_h^{-1} = \left( \frac{C_1}{\varepsilon_0} \right) e^{\left( \frac{-C_2}{\varepsilon_0} \right)}$ ;  $C_1$ 、 $C_2$ 可用公式

(2)表示<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} C_1 = \left( \frac{\rho F_b L_N^3}{6 b E L_c^2} \right) \\ C_2 = \left( \frac{F_b}{6 E L_c} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\rho$ 为位错密度;  $L_c$ 为弱钉扎点间位错段的平均长度;  $\omega$ 为角频率;  $G$ 为剪切模量;  $L_N$ 为强钉扎点间位错段的平均长度;  $F_b$ 为位错和溶质原子之间的钉扎力;  $E$ 为弹性模量;  $\varepsilon_0$ 为应变振幅;  $b$ 为柏氏矢量;  $B$ 为常数。根据上述公式可以总结出几个影响铝合金阻尼性能的因素主要有固溶原子、晶粒尺寸、晶粒取向和变形程度等。

## 1.2 晶界与界面阻尼机制

除了位错阻尼机制,晶界阻尼也是金属材料中常见的阻尼机制之一。晶界作为材料内部的一种缺陷,在较大切应力的作用下,当合金中发生晶界滑移时,会将外切应力产生的振动能通过金属材料具有的粘滞性转化为内能耗散掉,由此合金中晶界越多,其阻尼性能越好<sup>[15]</sup>。

早在20世纪40年代,就有晶界阻尼相关的研究,Zener认为晶界具有粘性,在切应力作用下会产生弛豫现象,从而引起晶界阻尼<sup>[16]</sup>。之后在20世纪80年代,葛庭燧<sup>[17]</sup>研究发现,多晶铝中存在一个明显的阻尼峰,而单晶铝中则不存在此峰,第一次从试验上证明了晶界本身具有粘滞性质,同时还发现,晶界阻尼值随温度的升高而增大,显示出对温度很敏感的特性。

界面阻尼主要存在于材料中两相之间的界面,对合金材料施加外力时,合金中的界面处发生滑移运动,将机械能转化为内能,合金中相界面越多,其阻尼性能越好<sup>[18]</sup>。

由此,结合Schoeck相关理论<sup>[19, 20]</sup>,可将相界面阻尼即 $Q_p^{-1}$ 用公式(3)表示为:

$$Q_p^{-1} = \frac{4.5(1-\nu)}{\pi^2(2-\nu)} V_p \quad (3)$$

式中:  $\nu$ 为泊松比,  $V_p$ 为第二相的体积分数。由公式可知,第二相的含量将显著影响合金的相界面阻尼性能。

## 2 高阻尼铸造铝基合金

### 2.1 Al-Si系铸造阻尼合金

Al-Si系铸造铝合金是目前使用最广泛的铸造铝合金,其生产总量高达铸造铝合金的90%以上<sup>[8]</sup>。同时,该合金系由于存在 $\alpha$ -Al与单晶硅相,在界面阻尼机制的作用下,具有一定的阻尼性能,如目前工业中常用的ZL114A铝合金在30℃时,阻尼值为0.018 4<sup>[21]</sup>,在铝合金中阻尼性能具有一定优势,与此同时,该合金系广泛应用于航空航天和汽车等领域中<sup>[22]</sup>,其阻尼性能的提高有利于减轻振动和噪声,并增加其稳定性和使用寿命。

Al-Si系铸造铝合金阻尼性能的相关研究起步较晚,在20世纪80年代才有相关报道<sup>[23]</sup>。固然Al-Si系合金在铝合金中阻尼性能有一定的优势,但该合金系在传统意义上并不能定义为阻尼合金,近年来,北京科技大学张志豪课题组通过添加Sn元素,将Al-Si系铝合金的阻尼性能提高到了阻尼合金的水平<sup>[24-26]</sup>。金属Sn作为一种高内耗的合金,添加在铝合金中能显著提高铸造铝合金的阻尼性能,张志豪等人通过添加2%~4% Sn,显著提高了铝硅合金的阻尼性能,在合金塑性和铸造流动性能基本相当的前提下,实现铸造铝合金强度和阻尼性能的同时提升:抗拉强度161~245 MPa、阻尼值达到0.032~0.038,强度和阻尼性能分别比Al-10Si(ZL102)合金提高6%~62%和45%~73%<sup>[24]</sup>。

相比于传统Al-Si合金系中 $\alpha$ -Al、共晶Si和含铁相外,Al-10Si-1Mg-xSn合金中额外添加了Mg与Sn,Mg对Al-Si合金中的共晶Si具有变质作用,是Al-Si合金系中常用的微合金化元素,添加Mg元素可以显著提高Al-Si合金的强度和时效硬化特性,但降低了合金的塑性。而生成的 $Mg_2Si$ 相是Al-Si-Mg铸造合金固溶处理中需要溶解的主要相, $Mg_2Si$ 相能显著提高合金的时效强化能力,提高力学性能。此外,Mg可以降低合金的层错能,起到同时提高铝合金的力学和阻尼性能的作用,Li等人的研究表明,Mg的固溶强化会显著提高铝合金的强度,并在铝合金中引入大量弱钉扎点,降低层错能,扩展位错变宽,使得合金阻尼得到提高,这也与G-L位错阻尼理论相吻合<sup>[6]</sup>。

而在Al-Si-Mg合金系中添加Sn,将生成 $Mg_2Sn$ ,但

过量的Sn则以 $\beta$ -Sn存在, Sn最终作为高内耗颗粒,起到增强合金阻尼的作用。王嘉盛等人探究了质量分数

为0~6%的Sn对Al-10Si-1Mg-xSn阻尼性能的影响,并发现Sn含量为4.0%时,阻尼性能较高,如图2所示<sup>[26]</sup>。

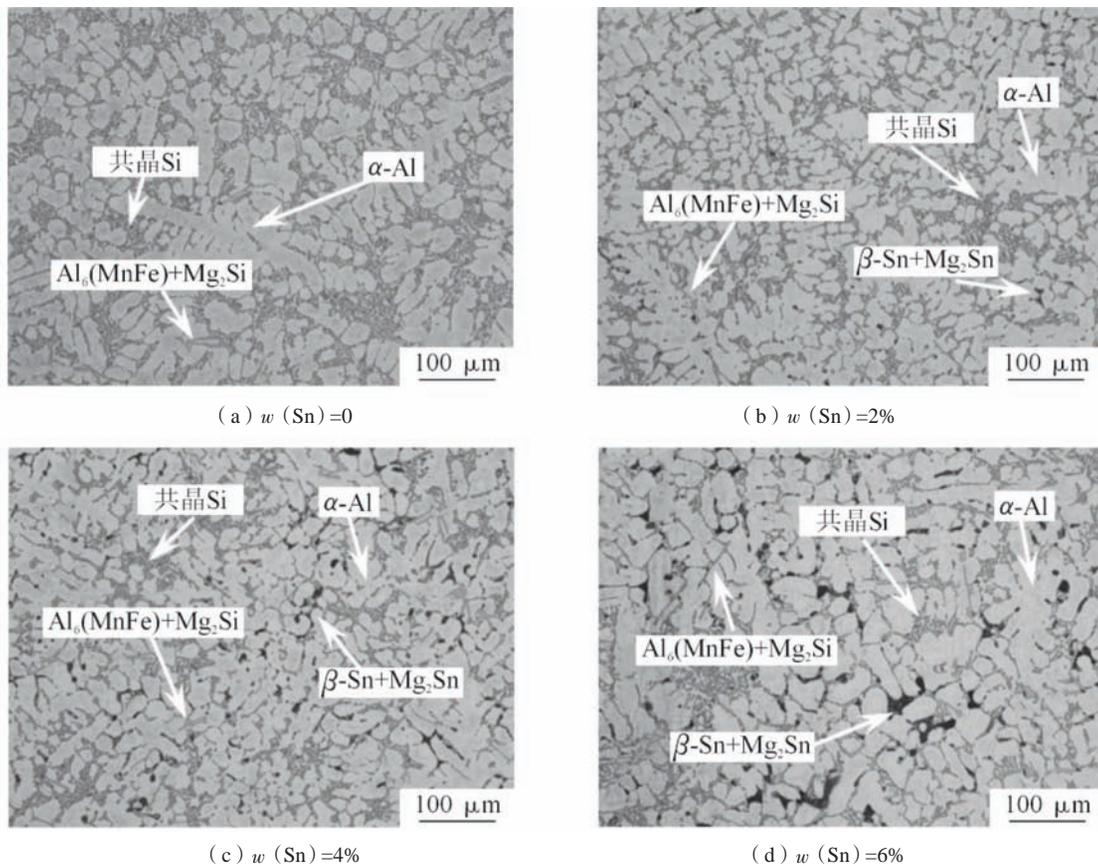


图2 不同Sn含量下Al-10Si-1.5Mg-xSn合金的金相组织  
Fig. 2 Metallographic structures of Al-10Si-1.5Mg-xSn alloys with different Sn contents

并且,由于Sn能与Mg生成 $Mg_2Sn$ ,在显著提高合金阻尼性能的同时,起到一定的强化作用,并可形成 $Mg_2(Si, Sn)$ 复合相,以改善 $Mg_2Si$ 的汉字状结构<sup>[27]</sup>,故常在Al-Si-Mg系合金中Sn的添加能起到更为显著的作用。由此,许吉等人探究了质量分数为0~4%的Mg对铝硅合金阻尼性能的影响,并发现Mg质量分数为1.0%试样的阻尼性能较高,且具有良好的高温和高温阻尼性能<sup>[25]</sup>。

此外,稀土元素添加不仅可起到细化晶粒、净化熔体和改善组织等作用,对提高合金阻尼性能也具有较为显著的作用<sup>[10, 28]</sup>。周慧慧等人发现质量分数为0.2%的稀土元素La改善了 $\beta$ -Sn与铝基体的润湿性,使 $\beta$ -Sn呈细小弥散分布,从而提高了相界面阻尼<sup>[29]</sup>。

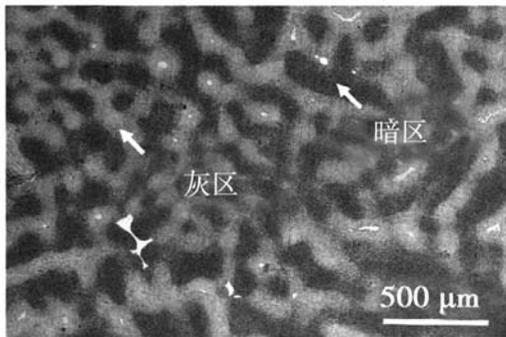
## 2.2 Al-Zn系铸造阻尼合金

与绝大多数铝合金不同,Al-Zn系( $Zn > 15\%$ )合金为复相型阻尼合金,其阻尼的产生主要是由于相界面和晶界的移动。高锌Al-Zn系合金是目前阻尼性能

最好的铝合金,如铸态Al-48.9Zn合金在25℃、应变 $8 \times 10^{-4}$ 、振幅1 Hz时,阻尼值为0.02,且经固溶时效处理后阻尼值可达0.052<sup>[30-31]</sup>。提高Al-Zn系铝合金中Zn的含量可以显著增加合金的阻尼性能<sup>[32]</sup>。

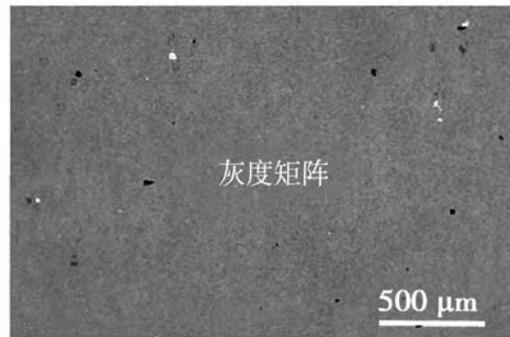
Al-Zn系阻尼铝合金在较早就有相关研究,20世纪50年代国外就有关于Al-Zn合金阻尼的测量<sup>[33]</sup>,当时认为Al-Zn合金的高内耗来源于相和晶界的脱溶,且此合金系在20世纪80年代就开始落实到实际应用中,此时,我国也有固溶时效对Al-Zn铸造合金的组织 and 阻尼性能的研究,如何德坪等人发现Al-Zn阻尼合金经固溶水淬时效处理,使相层片状组织变为细小粒状组织,而自然时效可以获得更为细小的等轴状晶粒,具有更高的阻尼值<sup>[34]</sup>。之后,大量国内外学者对Al-Zn合金阻尼机制进行了探索,如Zhang等人在研究Al-Zn合金阻尼行为的过程中发现,Al-Zn合金的阻尼源于晶界和相界的粘滞性移动,Al-Zn合金组织中主要存在 $\alpha$ -Al相和 $\eta$ -Zn相,其中存在的 $\alpha/\alpha$ 、 $\eta/\eta$ 和 $\alpha/\eta$ 等界面都是其阻尼来源,而 $\alpha/\eta$ 相界面对阻尼的贡献最大<sup>[32]</sup>。

Al-Zn系阻尼合金为保证较优的阻尼性能往往具有较高的Zn含量，且会对合金进行轧制以改善合金的力学性能，并对合金进行固溶时效处理后可以显著提高合金的综合性能，有利于制备结构功能一体化的铝合金材料<sup>[30-31]</sup>。如图3(a)所示，铸态Al-Zn阻尼合金主



(a) 铸态

要由黑色和灰色区域的 $\alpha + \eta$ 共析组织及少量共晶组织组成（共晶组织主要由 $\eta$ -Zn基体和分布在其之上的细小 $\alpha + \eta$ 共析体构成）；经过固溶及时效处理后，如图3(b)所示，则主要由连续均匀的 $\alpha + \eta$ 共析组织组成<sup>[28, 30]</sup>。



(b) T6态

图3 Al-Zn阻尼合金典型SEM像

Fig. 3 Typical SEM images of Al-Zn damping alloys

如今，研究人员大多关注于Zr和Ti等过渡族元素与Sc等稀土元素对Al-Zn合金力学与阻尼性能的影响。Krajewska等人通过对Al-20Zn添加 $400 \times 10^{-6}$ Ti细化了合金，并保持了合金的高阻尼特性<sup>[35]</sup>。Chen等人研究了添加Sc对Al-20Zn组织和性能的影响，发现Sc细化了所有状态的铝合金的晶粒，含Sc合金中的 $Al_3Sc$ 相促进了形变过程中晶粒的动态析出，Sc的加入由此提高了合金的强度，同时使其高温内耗值增加<sup>[36]</sup>。

此外，由于Zr和Sc具有相似的性质，在铝合金中同时添加这两种元素，可以形成 $Al_3(Sc, Zr)$ 化合物相，该相不仅具备 $Al_3Sc$ 化合物的优异性质，而且由于其与基体的错配度更小，在高温加热下的聚集倾向小，因此热稳定性更高<sup>[10]</sup>。Cao等人验证了Sc和Zr协同添加的Al-Zn合金比单一添加Sc的合金表现出更好的力学性能，同时，铝合金在高温时效下比低温时效具有更高的阻尼性能，这是因为其位错钉扎点数更少，界面滑移能力更强<sup>[37]</sup>。

Al-Zn系阻尼铝合金阻尼性能随温度的变化将对合金实际服役环境产生影响，叶萌测试了铸态Al-Zn合金阻尼性能与温度之间的关系，结果表明，铸态Al-Zn合金阻尼随温度增加呈现出先上升后下降的变化趋势，当温度达到245℃时，合金阻尼性能最好，由此分析认为，高温下的阻尼源于具有不同硬度和弹性模量的富Al和富Zn组织界面，由于高温使富Al相的蠕变性能增加，引起了合金阻尼性能逐渐上升，若温度超过245℃，合金内的组织发生了相变，由 $\alpha + \eta$ 两相共析组织转变为单相 $\beta$ 组织， $\alpha/\eta$ 界面的减少使阻尼性能下降，故认为Al-Zn系阻尼合金服役环境不应超过245℃<sup>[38]</sup>。

## 2.3 其他铸造阻尼铝合金

### 2.3.1 Al-Cu系铸造阻尼合金

Al-Cu系铸造合金是航空航天中常用的合金系，具有轻质高强、易加工、成本低和耐腐蚀等一系列优点<sup>[39]</sup>，然而其阻尼性能存在一定限制，苏宇辉等人通过大幅提高Cu含量，使铝基体中形成的 $Al_2Cu$ 相含量增加，增加了合金中的相界面，提高了合金的阻尼性能，在应变量为0.18%时，Al-20Cu合金的内耗值为0.0156，但这也大幅削弱了合金的力学性能，其抗拉强度仅为122 MPa，难以在工业上应用<sup>[40]</sup>。

### 2.3.2 Al-Mg系铸造阻尼合金

相比于其他铸造铝合金，Al-Mg系铸造阻尼铝合金具有更低的密度和更好的耐蚀性，除航空航天与汽车领域外，在船舶和海洋工程领域中，具有独特的优势<sup>[10]</sup>。合金的阻尼性能介于铸造Al-Si系和铸造Al-Cu系合金之间，且具有优异的高温阻尼性能，但较低的低温阻尼性能使其应用受到一定的限制<sup>[41]</sup>。

国内外关于Al-Mg系合金阻尼性能的研究起始于20世纪中叶，研究主要集中于Mg含量、溶质原子和析出相、热处理和塑性加工工艺、有关内耗峰激活焓值和弛豫时间的表征、以及通过内耗测量研究材料微观组织演变情况<sup>[42-45]</sup>。然而，其发展受限于低温阻尼性能与铸造工艺，如今Al-Mg系合金研究重心已经转向制备复合材料与特种变形工艺<sup>[46-47]</sup>。

表1是铸态铝合金与目前常用的阻尼合金性能对比，通过表中的对比可知铝合金的阻尼性能仍有一定的发展空间。

表1 铸态铝合金、锌铝合金及镁锆合金的阻尼与力学性能对比

Tab. 1 Comparison of damping and mechanical properties of aluminum alloys, zinc-aluminum alloys, and magnesium-zirconium alloys

合金	室温阻尼/ $Q^{-1}$	抗拉强度/MPa	密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )
Mg-0.6Zr <sup>[48]</sup>	0.130	148	1.80
Zn-27Al <sup>[49]</sup>	0.025	400	4.94
Al-12Si <sup>[50]</sup>	0.017	120	2.68
Al-10Si-1Mg-4Sn <sup>[29]</sup>	0.038	161	2.77
Al-35Sn <sup>[37]</sup>	0.014	270	3.45

### 3 铝合金阻尼性能的影响因素

#### 3.1 晶粒尺寸

晶粒尺寸是影响材料阻尼行为的一个重要因素,通过影响位错的可动性及晶界特征进而影响材料的阻尼行为。作为强钉扎点,晶界对材料在高应变振幅下的阻尼行为产生影响。根据G-L理论,合金的晶粒尺寸越大,位错脱钉后通过做弓出运动而扫过的面积越大,耗能就越多,合金的阻尼性能也就越高<sup>[13]</sup>。

然而近年来,也有学者<sup>[51]</sup>研究发现,细小的晶粒同样可能对材料阻尼性能有益。这是由于在细化晶粒的同时增加了晶界阻尼,由此可能增加了合金阻尼性能。如梁爽等人通过对Al-32Zn合金添加Zr、Cr、Ti、Ce和Er等合金元素,发现随着Zr、Cr和Ti的添加,Al-32%Zn合金铸态组织由粗大树枝晶转变为细小均匀的等轴晶,晶粒尺寸由550  $\mu m$ 减小到75  $\mu m$ ,进一步添加0.1%Ce或0.2%Er,其晶粒尺寸减小到45  $\mu m$ 或35  $\mu m$ ,合金阻尼性能都得到了显著提高<sup>[52]</sup>。

#### 3.2 第二相

第二相常被看作位错的强钉扎点,其类型、尺寸、数量及分布特征对合金阻尼也有重要影响。而在铝合金中,添加本征阻尼较高的含Mg和Sn第二相,可在起到晶粒细化作用的同时,以增加本征阻尼的方式提高合金的阻尼性能,此外,添加过渡族元素如Zr和Ti等和稀土元素如La和Sc等,将改变合金的相组成,并起到变质、除气以及改善不同相与铝基体的润湿性等作用,这也将增加合金的阻尼性能。如王嘉盛等人通过在Al-Si-Mg合金中添加Sn,生成Mg<sub>2</sub>Sn相<sup>[26]</sup>,张松等人通过在铝合金中添加Ti,生成Al<sub>3</sub>Ti相<sup>[53]</sup>,陈勇等人通过在铝合金中添加Sc,生成Al<sub>3</sub>Sc相,都显著提高了合金的阻尼性能<sup>[54]</sup>。

#### 3.3 热处理

热处理及加工工艺可以通过影响合金的晶粒尺

寸、位错密度和析出相特征等来影响合金的阻尼性能与力学性能。其中,固溶时效工艺作为铝合金常用的一种强化方式,能有效提高铝合金的阻尼性能与力学性能。

Carneiro等人通过对A356合金进行固溶处理,发现由于共晶Si的粗化/球化、Mg<sub>2</sub>Si/ $\pi$ 相的溶解和 $\alpha$ -Al固溶强化,固溶处理可以提高合金的屈服强度和阻尼性能<sup>[55]</sup>。陶德福等人研究了不同工艺参数对自然时效与人工时效后Al-Mg-Si-Cu合金的阻尼性能,发现人工时效改善了Al-Mg-Si-Cu合金的阻尼性能,时效温度对Al-Mg-Si-Cu合金时效后的阻尼性能的影响最大,Al-Mg-Si-Cu合金的阻尼值在时效温度170  $^{\circ}C$ ,时效时间3 h,应力200 MPa下达到最大<sup>[56]</sup>。

### 4 结语

铸造阻尼铝合金材料因对低密度、高比强度、大内耗阻尼金属结构材料需求的日益增加,具有广阔的发展前景。面临的主要问题和前景主要表现在以下几方面。

当前铸造阻尼铝合金发展所面临的主要问题包括但并不限于:

(1) 如何通过成分设计+制备工艺获得兼顾合金阻尼性能与力学性能是制备铸造阻尼铝合金材料的首要问题。

(2) 如何调控第二相尺寸和含量与基体位向关系,使合金兼具较高阻尼性能和较好的力学性能。

(3) 如何针对合金实际服役环境,选择在不同温度和频率下阻尼性能相对更优的阻尼合金系。

(4) 铸造阻尼铝合金的阻尼机制仍需进一步深入研究,如大晶粒与小晶粒对阻尼影响所遵循的不同规律及其内在联系。

综合铸造阻尼铝合金的研究现状及应用需求,铸造阻尼铝合金未来发展主要集中在:

(1) 通过高通量试验、大数据和机器学习等方式建立合金成分-组织-阻尼性能的关系,对合金成分进行设计,获取阻尼性能更好的合金成分,并探索新型的合金体系。

(2) 研究第二相与基体的关系,并探究其对合金阻尼性能的影响,建立微观组织-综合性能的联系。

(3) 通过引入新的阻尼机制或发挥多种阻尼机制的协同作用优点,获得兼具高强度高阻尼的结构功能一体化材料,并针对特定服役环境的需要,如针对海洋工程的重大需求,研究集功能与结构(阻尼-强度-耐腐蚀性)一体化的新材料。

## 参考文献:

- [1] BATESOVA F, OMIRBAY R, SATTAROVA G, et al. Reducing industrial noise by the use of damping alloys when manufacturing mining equipment parts [J]. *Heliyon*, 2023, 9 (6): e17152.
- [2] 赵太霖, 牛犇, 王清, 等. 阻尼合金研究进展 [J]. *材料工程*, 2023: 1-16.
- [3] 华寿美, 张同根, 李秀云. Al-Zn合金阻尼性能研究 [J]. *稀有金属*, 1990 (1): 16-20.
- [4] 金曼, 杨丽丽, 夏朝峰. Al-Mg-Si合金和Al-Mg-Si-0.6%Cu合金的内耗研究 [J]. *上海金属*, 2011, 33 (2): 28-31.
- [5] 石纯义, 刘殿学, 李德勤. 新型Al-Si合金的阻尼性能 [J]. *材料开发与应用*, 1988 (1): 33-38.
- [6] LI Z, YAN H, CHEN J, et al. Effect of Mg content on the damping behavior of Al-Mg alloys [J]. *Metals and Materials International*, 2020, 27 (9): 3155-3163.
- [7] WANG W, YI D, HUA W, et al. High damping capacity of Al-40Zn alloys with fine grain and eutectoid structures via Yb alloying [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 870: 159485.
- [8] 毕江, 刘雷, 张东生, 等. 铸造、快凝及增材耐热铝合金的研究进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33 (4): 969-996.
- [9] 张平. Al-Cu二元合金微观结构及其阻尼行为研究 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.
- [10] 罗兵辉. 三种铝合金组织及阻尼性能研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [11] LEE C D. Damping properties on age hardening of Al-7Si-0.3Mg alloy during T6 treatment [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 394 (1-2): 112-116.
- [12] Granato A, Lücke K. Theory of mechanical damping due to dislocations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1956, 27 (6): 583-593.
- [13] 文幼林. Mg-Sn合金组织、力学与阻尼性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [14] LI Y, BAI Y, LIU Z, Et al. Additive manufacturing-induced anisotropy in damping performance of a dual-phase high-entropy alloy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 29: 5752-5764.
- [15] WANG H, ZHANG W, GAO P, et al. AlxCrFeNi medium entropy alloys with high damping capacity [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 876: 159991.
- [16] ZENER C M, SIEGEL S. Elasticity and anelasticity of metals [J]. *Nature*, 1949, 164: 84-85.
- [17] 葛庭燧. 晶粒间界粘滞滑动过程的力学模型 [C]//第二次全国固体内耗与超声衰减学术会议, 中国安徽合肥, 1988.
- [18] 裴政, 王进华, 郭洪光, 等. 铝基复合材料阻尼的微观机制分析 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2001 (1): 8-11.
- [19] SCHOECK G. Internal friction due to precipitation [J]. *Physica Status Solidi (b)*, 1969, 32 (2): 651-658.
- [20] SCHOECK G, BISOGNI E. Internal friction in Al-Ag alloys [J]. *Physica Status Solidi*, 1969, 32 (1): 31-40.
- [21] 孟德浩, 李培杰, 徐文涛, 等. Mg-6Gd-3Y-0.5Zr镁合金和ZL114A铝合金阻尼性能 [J]. *宇航材料工艺*, 2020, 50 (6): 98-102.
- [22] 孙建波, 曾广凯, 王雨辰, 等. 铸造耐热Al-Si合金的研究进展 [J]. *中国金属通报*, 2020 (9): 116-117.
- [23] 谭铭, 柳林. 快速凝固Al-Si合金内耗的研究 [C]//第二次全国固体内耗与超声衰减学术会议, 中国安徽合肥, 1988.
- [24] 张志豪, 谢建新, 赵梓尧, 等. 一种高强度高阻尼铸造铝合金及其制备方法: CN116716500A [P]. 2023-09-08.
- [25] 许吉, 王志磊, 赵帆, 等. Mg含量对AlSi10Sn4Mg $\alpha$ 合金阻尼和力学性能的影响 [J]. *工程科学学报*, 2023, 45 (12): 2049-2058.
- [26] 王嘉盛, 许吉, 张志豪, 等. Sn含量对Al-10Si-1.5Mg-xSn合金阻尼和力学性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44 (3): 408-414.
- [27] 高爱华, 王福荣, 张建新. Mg-5Sn-1Si铸态合金的相组成及其演化过程分析 [J]. *热加工工艺*, 2017, 46 (17): 90-92.
- [28] 张卓琳. Ti合金化对Al-Zn阻尼合金组织及性能的影响 [D]. 重庆: 西南交通大学, 2022.
- [29] 周慧慧, 杨宁源, 张志豪. 稀土La及Sn对铸造铝合金组织、力学和阻尼性能的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50 (3): 932-938.
- [30] 王舒一, 张松, 胥永刚. 均匀化及时效处理对Al-Zn共析阻尼合金组织及性能的影响 [J]. *材料导报*, 2023, 37 (S1): 420-423.
- [31] 张松, 王舒一, 胥永刚, 等. 一种高强度高阻尼Al-Zn共析阻尼合金及其制备方法: CN116555629A [P]. 2023-08-08.
- [32] ZHANG Z H, XIAO F, WANG Y W, et al. Mechanism of improving strength and damping properties of powder-extruded Al/Zn composite after diffusion annealing [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28 (10): 1928-1937.
- [33] NOWICK A S. Anelastic effects arising from precipitation in aluminum-zinc alloys [J]. *Journal of Applied Physics*, 1951, 22 (7): 925-933.
- [34] 何德坪, 徐亮, 包雪鹏. 固溶时效对Al-Zn铸造合金组织和阻尼性能的影响 [J]. *机械工程材料*, 1989 (6): 60+59.
- [35] KRAJEWSKIA W K, HABERL-FAERBERB K, BURAS J, et al. Damping properties vs. structure fineness of the high-zinc aluminum alloys [J]. *Archives of Foundry Engineering*, 2012, 12 (3): 63-66.
- [36] CHEN Y, LIU C Y, MA Z Y, et al. Effect of Sc addition on the microstructure, mechanical properties, and damping capacity of Al-20Zn alloy [J]. *Materials Characterization*, 2019, 157.
- [37] CAO K, LIU C Y, LI Z L, et al. Microstructure, mechanical properties, and damping capacity of high-Zn-content Al-Zn-Mg alloys with Sc and Zr additions [J]. *Vacuum*, 2023, 216.

- [38] 叶萌, 黄良余. Al-Zn阻尼合金的研究 [J]. 浙江工学院学报, 1991 (2): 77-81.
- [39] 罗先甫, 查小琴, 夏申琳. 2X X X系航空铝合金研究进展 [J]. 轻合金加工技术, 2018, 46 (09): 17-25.
- [40] 苏宇辉, 江鸿杰, 张平, 等. Cu含量对Al-Cu合金阻尼性能和储存模量的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (12): 1688-1693.
- [41] JIANG H J, LIU C Y, ZHANG B, et al. Simultaneously improving mechanical properties and damping capacity of Al-Mg-Si alloy through friction stir processing [J]. Materials Characterization, 2017, 131: 425-430.
- [42] NILSON W G. The effects of quenching and neutron irradiation on internal friction of Al-5%Mg alloy [J]. Canadian Journal of Physics, 1961, 39: 119-132.
- [43] DEY B N, QUADER A Q. Internal friction study of Al alloy containing 7.5 weight percent magnesium [J]. Canadian Journal of Physics, 1965, 43: 1347-1357.
- [44] TAN Q, K&C T S. Development of the double amplitude internal friction peaks in cold worked aluminium-magnesium solid solutions [J]. Physica Status Solidi, 1991, 126: 345-354.
- [45] ATODIRESEI M, GREMAUD G, SCHALLER R. Study of solute atom-dislocation interactions in Al-Mg alloys by mechanical spectroscopy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 442 (1-2): 160-164.
- [46] 于博文, 江鸿杰, 杨振兴, 等. 搅拌摩擦加工5086铝合金的微观组织与阻尼行为 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (5): 575-579.
- [47] ZHAO L, YAN H, CHEN J, et al. Effects of Zn content on damping behaviours of Al-Mg alloys [J]. Materials Science and Technology, 2021, 37 (4): 405-412.
- [48] 牛瑞龙. 高阻尼和高力学性能的Mg合金制备及机理研究 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院过程工程研究所), 2019.
- [49] DEMIRTAS M, ATLI K C, YANAR H, et al. Effect of grain refinement and phase composition on room temperature superplasticity and damping capacity of dual-phase Zn-Al alloys [J]. Journal of Materials Research, 2018, 33 (8): 1032-1045.
- [50] JIANG H J, LIU C Y, YANG Z X, et al. Effect of friction stir processing on the microstructure, damping capacity, and mechanical properties of Al-Si alloy [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28 (2): 1173-1179.
- [51] CHINTADA S, DORA S P, KARE D, et al. Powder metallurgy versus casting: damping behavior of pure aluminum [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31 (11): 9122-9128.
- [52] 梁爽, 黄福祥, 张照超, 等. 合金化及热处理对Al-32%Zn合金组织和阻尼性能的影响 [J]. 金属热处理, 2019, 44 (8): 77-83.
- [53] 张松, 张卓琳, 胥永刚, 等. 一种Al-3Ti增强Al-Zn基原位复合阻尼材料及其制备方法: CN113981283A [P]. 2022-01-28.
- [54] 陈勇, 侯远飞, 徐峥峥, 等. 钇元素对Al-20Zn合金拉伸性能及阻尼性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2020, 44 (7): 88-91, 97.
- [55] CARNEIRO V H, PUGA H. Solution treatment enhances both static and damping properties of Al-Si-Mg alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49 (12): 5942-5945.
- [56] 陶德福, 孙有平, 王文熙, 等. 蠕变时效后Al-Mg-Si-Cu合金的阻尼性能 [J]. 金属热处理, 2019, 44 (2): 73-77.

## Research Status and Development Trends of Cast Damping Aluminum Alloys

LIU Jin-ning<sup>1,2</sup>, LIU Zhi-zhong<sup>2,3</sup>, YU Bo<sup>1,2</sup>, GUAN Shu-wen<sup>1,2</sup>, SHI Dian-yu<sup>1,2</sup>

(1. China Academy of Machinery Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang 110022, Liaoning, China; 3. China Academy of Machinery Shenyang Cast Research Technology Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China)

### Abstract:

The damping generation mechanisms and material systems of casting aluminum alloys have been analyzed and discussed, and the factors affecting the damping properties of casting aluminum alloys have been introduced. Based on a review and analysis of research progress at home and abroad, the future development directions of damping aluminum alloys are outlined. It is pointed out that introducing new damping mechanisms or leveraging the combined advantages of multiple damping mechanisms to obtain integrated structural-functional materials with both high strength and high damping properties will be an important direction for future research on high-damping aluminum alloys.

### Key words:

aluminum alloys; alloying elements; damping mechanisms; damping properties