

# 锰基阻尼合金研发及产业化国内外现状

翁端,刘爽,何嘉昌

清华大学材料学院,先进材料教育部重点实验室,北京 100084

**摘要** 阻尼合金是一类阻尼(内耗)大,能使振动迅速衰减的金属功能材料,按其阻尼机理可分为复相型、铁磁型、位错型、孪晶型四类。利用其制造相关振动源构件,可以有效地解决机械制造及相关工程领域中的振动和噪声问题。目前国内外对于锰基阻尼合金的研究主要集中于对Mn-Cu、Mn-Fe合金的掺杂改性和对新兴的Mn-Ni合金阻尼机理研究方面,而形成产业的主要为Mn-Cu合金,其代表产品为Sonoston、Ingramute和M2052等。相比于传统Mn-Cu合金,Mn-Fe合金具有更好的经济性和力学性能,有望在未来替代Mn-Cu合金取得实际应用。本文简要介绍阻尼合金的种类和特点,对上述合金的主要研究进展和产业化现状进行总结,为需要减振降噪场合的选材提供参考。

**关键词** 阻尼合金;锰基合金;金属功能材料

**中图分类号** TG135+7

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.03.012

## Research and Industrialization Status of Mn-Based Damping Alloys

WENG Duan, LIU Shuang, HE Jiachang

The Key Laboratory of Advanced Materials of Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** Damping alloy is a kind of metallic functional materials with high damping capacity which can dissipate mechanical vibration rapidly. There are mainly four kinds of damping alloys, namely the multiple phase alloys, the ferromagnetic alloys, the dislocation alloys and the twin crystal alloys. Through using them to fabricate the component parts of vibration source, many vibration and noise problems in machine manufacturing and some other fields can be solved effectively. Currently, the corresponding research mainly focuses on the doping modification of the Mn-Cu and Mn-Fe alloys, as well as the damping mechanism of the emerging Mn-Ni alloys. So far, the Mn-Cu base alloys are the only damping alloys whose industrialization has been realized. Typically commercial damping alloys are Sonoston, Ingramute and M2052. Meanwhile, with lower cost and better mechanical properties, the Mn-Fe damping alloy are promising substitutes for the traditional Mn-Cu damping alloys in the future. In this paper, the classification and features of the different damping alloys are briefly introduced, and the research progress and industrialization status of the above-mentioned alloys are also summarized. The results may provide a new idea and a reference for material choice for damping and noise reduction.

**Keywords** damping alloy; Mn-based alloy; metallic functional materials

随着航空航天、武器装备的发展日趋高速化和大功率化,由此产生的宽频带随机激振会引起结构的多共振峰响应,从而使电子器件失效,仪器仪表失灵,严重时甚至造成灾难性后果<sup>[1]</sup>。据统计,在机器制造业中,近80%的事故和设备的损坏是由共振造成<sup>[2]</sup>。火箭、卫星失效分析表明,约2/3的故障与振动和噪音有关<sup>[3]</sup>。飞机在长期使用过程中由于振动的影响,常出现方向舵、机尾罩萌生裂纹、空速管断裂、天线的精度下降、座舱噪音等问题,影响着它们的可靠性和寿命,

严重时会导致机毁人亡。汽车的传动装置、动力装置受震动的影响也很明显,直接影响到驾驶速度和汽车的使用寿命以及驾驶员的生命安全。降低舰艇尤其是潜艇的噪声可减少被敌方声纳发现的机会<sup>[4-5]</sup>。振动和噪声问题日益突出,不仅影响机械设备和军事设备的安全性、隐蔽性、精度和使用寿命,对人们的身心健康也有很大危害,造成严重的环境污染<sup>[6]</sup>。减振降噪成为材料研究及装备制造部门学者迫切需要解决的问题。

收稿日期:2013-11-28;修回日期:2014-01-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51372137)

作者简介:翁端,教授,研究方向为环境材料及工业生态学,电子邮箱:duanwend@tsinghua.edu.cn

引用格式:翁端,刘爽,何嘉昌. 锰基阻尼合金研发及产业化国内外现状[J]. 科技导报, 2014, 32(3): 77-83.

依靠传统减振降噪对策,已无法满足人们对设备振动和噪声的控制要求。近年来,人们开始重视从振源入手来减轻或防止振动和噪声,希望通过采用具有减振降噪功能的金属材料制造相应的机械构件来达到目的。随着科学技术的不断发展,人们发现一些金属材料,能够明显的减轻各种应变载荷引起的振动及噪声。这类金属材料又通称为阻尼合金,这类合金具有结构材料应有的强度,并能通过材料内部的各种阻尼机制吸收外部振动能,并将其转化成热能而不可逆地耗散,从而达到对系统的减振降噪功效,是一类新颖的功能结构材料。由于阻尼合金直接从振源入手,与传统减振降噪对策相比,具有工艺简便、成本低、适用范围广及技术先进、效果好等优点<sup>[6-9]</sup>。阻尼合金由英国科学家最先研制,这种合金由54.25%的锰、27%的铜、4.25%的铝、3%的铁和1.5%的镍组成。自此之后,经过多年的不断发展,现已有上百种新型阻尼合金问世,并投入实际应用<sup>[10]</sup>。

### 1 阻尼合金分类及研究进展

目前已开发的阻尼合金按其阻尼机理可分为复相型、铁磁型、位错型、孪晶型4类<sup>[8,11,12]</sup>,4种阻尼合金的性能特点如表

1所示。从阻尼机理看,复相型通过相界面粘性流变或第二相的变形而产生阻尼作用;铁磁型通过磁畴壁的不可逆移动而产生磁机械滞后造成能量耗散;位错型通过位错脱离钉扎点而产生应力-应变滞后;孪晶型则通过热弹性马氏体相变的孪晶或母相与马氏体的相界面的移动应力松弛。

在4种阻尼合金中,目前复相型阻尼合金的研究工作开展的最多。国内主要有西北工业大学<sup>[13,14]</sup>、上海交通大学<sup>[15]</sup>、北京航空材料研究院<sup>[16]</sup>、东南大学<sup>[17]</sup>等。西北工业大学和北京航空材料研究院的主要研究对象为Zn-Al系高阻尼合金,通过改进合金化、变质处理、热处理工艺来提高阻尼性能。上海交通大学和东南大学则在对片状铸铁(flaky casting iron, FC)高阻尼特性的研究中取得了一定进展,通过掺杂适量Cr、Mo、Cu等微合金化元素,获得了兼有比较高的阻尼性能和强度性能的高阻尼铸铁。目前国外在高阻尼铸铁方面的一个重要研究方向是将球铁进行轧制,制成可轧片状铸铁(rolling flaky casting iron, RFC)。如表1所示,与传统片状铸铁相比,可轧片状铸铁具有更为优良的力学性能,更高的阻尼性能<sup>[18]</sup>。其他研究方向主要为高阻尼复合材料,包括纤维增强和颗粒增强复合材料,以及高阻尼复合钢板和铝合金层压板。

表1 各类阻尼合金的性能特点  
Table 1 Characteristics of various damping alloys

分类	实例	工作温度/ ℃	磁场影 响	强度/ MPa	经时变 化	塑性加工性	焊接性	耐蚀性
复相型	Zn-Al合金、 片状石墨铸铁、 泡沫金属	<150	无	100(FC) 450~700(RFC)	无	FC不可 RFC可能	难	差
孪晶型	Mn-37Cu-4.25Al- 3Fe-1.25Ni、 Cu-40Mn-2Al	<80	无	≈600	显著	较好	难	较好
位错型	纯Mg、 Mg-0.6Zr、 Mg-(5.8-19)Ni	室温使用	无	≈200	无	难	不可	较差
铁磁型	Fe-12Cr-3Al、 Fe-12Cr- (0.1-15)Mo	<380	大	≈450	无	容易	良好	较好

位错型阻尼合金以镁基合金<sup>[19]</sup>为主,重量轻、比强度高、阻尼性能优。另外,镁基合金还具有较高的电磁屏蔽性能,目前美国在航空航天领域主要使用的就是这一类合金。尽管镁基合金的阻尼性能很高,但其力学性能偏低,用于制造承受较高载荷的构件存在较大的困难。上海交通大学<sup>[20]</sup>研究并开发了Mg-Zr和Mg-Li系列合金及其复合材料。

铁磁型阻尼合金<sup>[21]</sup>的优点是使用温度较高。缺点是阻尼性能受磁场影响,磁化饱和后完全失去减振作用,对残余变形很敏感,冷塑性成型后阻尼性能下降。而且阻尼强烈地依

赖于应变振幅。四川大学<sup>[22,23]</sup>、中国核动力研究设计院<sup>[24]</sup>、钢铁研究总院、上海交通大学、洛阳船舶材料研究所等相继开展了这一方面的研究工作。

孪晶型阻尼合金是出现较早的一类阻尼合金,其典型代表为锰铜(Mn-Cu)系合金。主要特点是衰减较大(仅次于阻尼钢板)且受应变振幅影响小,同时具有良好的力学性能。对于Mn-Cu而言,其Mn含量越高(>50%)、应变越大、高温热处理时间越长,阻尼性能越高。但由于合金中孪晶存在于热不稳定的热弹性马氏体相之中,所以孪晶本身也是热不稳



实用型锰铜阻尼合金,已通过中间试验,并在船舶工业中开始进行应用试验<sup>[35]</sup>。王丽萍等<sup>[36]</sup>等研发的ZMnD-1J高阻尼、高强度锰铜四元合金,可用作结构材料,其典型性能达到比阻尼

SDC为44.5%,抗拉强度 $\sigma_b=678$  MPa,伸长率 $\delta=24.1\%$ 。表3为当前使用过程中的高阻尼锰铜合金的合金成分、力学性能、阻尼性能和研发单位的汇总。

表3 几种Mn-Cu合金的阻尼性能和力学性能

Table 3 Damping capacity and mechanical properties of some Mn-Cu damping alloys

合金名称	化学成分	机械性能		减振性能/%	研制国家
		$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%		
Sonoston	Mn-37Cu-4.25Al-3Fe-1.5Ni	539~588	13~30	20~40	英国
Ingramute	I. 58Cu-40Mn-2Al	490~600	15~30	20~40	美国
	II. 56Cu-40Mn-2Al-2Sn				
ABpopa	Mn-Cu-Al-Fe-Ni-Zn	490	20	10	苏联
M2052	Mn-20Cu-5Ni-2Fe	540	32	40	日本
2310合金	Cu-(49-53)Mn-(3.5-4.5)Al-(1.5-3.5)Fe-(1.5-3)Ni-(1-3.5)Zn	539~608	23~40	20~37	中国
	Cu-50Mn-2Al-5Zn				
ZMnD-1J	50Cu-40Mn-3.5Al-3Fe-1.5Ni	678	24.1	44.5	
		500~600	60~70	-	

## 2.2 Mn-Fe合金研发现状

Mn-Fe合金是一类新型阻尼合金,近年来才开始进行研究。如图1所示,与Mn-Cu相比,Mn-Fe阻尼性能虽然有所降低,但强度明显提高。由于其价格较低(仅为Mn-Cu合金的1/4),使用温度高( $>300^\circ\text{C}$ )、振动越强减振性能越好,故成为锰基阻尼合金的研究热点,有望在未来取得实际应用<sup>[27,37,38]</sup>。从目前发表的论文来看,研究人员主要集中在韩国,有少数在日本、俄罗斯、芬兰和乌克兰,中国研究该方面的主要单位为四川大学。韩国的Seung-HanBaik对Fe-Mn二元合金进行研究,合金在Mn含量为17%时,阻尼性能最好, $\delta$ 可达0.15,此时合金具有良好的力学性能,抗拉强度可达700 MPa以上,伸长率也达到38%,对此类合金进行噪声测试,结果比铸铁降低噪声达5 dB,具有明显降噪效果。Mn-Fe二元合金在韩国、日本、美国都申请了专利<sup>[27,37]</sup>。

材料方面,众多学者研究了化学元素对Mn-Fe二元合金的影响,发现C、N和Nb等强碳化物析出元素易生成沉淀碳化物,降低合金的性能<sup>[39-42]</sup>。但Baik等发现,如果同时引入Ti,则可由于TiC的形成而有效降低C对催化剂性能的伤害<sup>[43]</sup>。于学勇等<sup>[44]</sup>和丁胜等<sup>[45]</sup>对Mn-Fe合金进行研究,发现Si、Mo、Ni和Cr都降低合金的层错能,增加合金中的层错几率,造成较大的晶格畸变,使Shockley不全位错运动困难,不同程度的降低了合金的内耗;而复合稀土能细化晶粒,使马氏体板条变得细薄,增加单位体积内阻尼界面的总面积,可显著提高合金的内耗。另外,Huang等<sup>[46]</sup>和Kim等<sup>[47]</sup>发现,Cr的存在虽然会降低合金的阻尼能力,但能显著提高合金的耐腐蚀性能,具有很强的工程意义。

工艺方面,四川大学于学勇等对Fe-17.5Mn、Fe-14Mn-5Ni、Fe-14Mn-0.2C的热处理工艺进行优化,比较了热处理过程中3种不同的冷却方式,即炉冷、空冷、水冷对合金阻尼性能的影响,发现空冷后合金得到最佳的阻尼性能。并研究了热处理后进一步冷处理的作用,阻尼值随冷处理温度的变化出现波峰,在 $-196^\circ\text{C}$ 冷处理合金的阻尼性能最好。这三类合金以Fe-14Mn-5Ni合金经 $800^\circ\text{C}$ 固溶,综合性能最好,对数衰减率 $\delta$ 高达0.115,抗拉强度达650 MPa,伸长率达19%<sup>[48,49]</sup>。目前研究的各类高阻尼Mn-Fe合金的合金成分、减振性能和研发单位汇总于表4中。

## 2.3 Mn-Ni合金研发现状

1968年,Hicks等<sup>[50]</sup>将Mn基合金的研究外推到Mn-Ni系,结果发现其室温附近的减振性能SDC可高达10%及更高(未改性的Mn-Cu合金SDC仅有1%~10%)。尽管Mn-Ni合金表现出卓越的高阻尼特性,但由于其相变机理不如Mn-Cu合金成熟,且有镍合金化带来的价格因素,因此Mn-Ni二元高阻尼合金并未取得实际应用<sup>[6]</sup>。

国内研究方面,谢东辉等<sup>[57]</sup>研究了一种新型Mn-Ni阻尼合金,主要成分为(39-42)Mn-(40-47)Ni-(8-10)Cr-(6-8)Fe(简称Mn40)。合金中增加了Ni含量,添加了适量的Cr和Fe,以改善合金的机械强度、耐蚀性能和加工性能。该合金经固溶处理后,在 $550^\circ\text{C}$ 时效处理时具有最佳的阻尼性能,时效处理3 h后,减振性能SDC达到56%。合金的复相结构是内耗增大的主要原因。能否在此基础上,采用部分Fe替代Ni,形成Mn-Ni-Fe三元合金以减少价格较高的Ni的用量,是一个值得注意的发展方向。

表4 不同材料组分 Mn-Fe 合金性能比较

Table 4 Damping capacity of Mn-Fe damping alloys with different additives

化学成分	减振性能 SDC/% <sup>a</sup>	备注	研究单位
Fe-(14-23)Mn	16~30	Mn 含量在 16%~18% 之间时 Mn-Fe 合金阻尼效果最好 <sup>[50]</sup>	
Fe-23Mn-(1-3)Co	18~26	Co 含量越高阻尼效果越好 <sup>[51]</sup>	韩国延世大学
Fe-18Mn-(0-15)Cr	20~30	Cr 能提高合金抗腐蚀能力 <sup>[47]</sup>	
Fe-17Mn-0.2C	10	少量 C 即严重损害合金性能,引入 Ti 可减轻 C 的影响 <sup>[43]</sup>	
Fe-19Mn-1.5Si	8	少量 Si 即可严重损害合金性能 <sup>[46]</sup>	
Fe-14Mn-5Ni	23	Ni 基本不影响合金的阻尼性能,但能显著提高其抗腐蚀性 <sup>[52]</sup>	中国四川大学
Fe-17Mn-0.8Ti	24	Ti 基本不影响合金的阻尼性能,但能显著提高其抗腐蚀性 <sup>[53]</sup>	大学
Fe-17Mn-0.2N	22	N 的引入略微降低了合金的阻尼性能,但能显著提高其机械性能 <sup>[54]</sup>	
Fe-16Mn-1Mg-2Si	28	Mg 的引入能明显抵消 Si 对合金性能抑制的影响 <sup>[55]</sup>	印度 MVJ 工程学院

<sup>a</sup> 均取振幅为  $\epsilon_{\max}=4 \times 10^{-6}$  时结果。

### 3 锰基阻尼合金国内外产业现状

目前 Mn-Cu 合金是锰基阻尼合金中唯一得到实用化的。具有代表性并投入商业化生产的 Mn-Cu 阻尼合金产品有 Sonoston、Ingramute 和 M2052 等。其中 Sonoston 是英国石锰海洋公司专门为潜艇螺旋桨而研制的高阻尼合金, Ingramute 作为变形热处理材料主要用于制造机架、基座和座脚等承支结构, 这两者都有 40 年左右的应用历史。M2052 的应用则刚刚起步, 主要应用在民用领域(精密机械、电子等)。

Sonoston 是由英国 Stone Manganese Marine (SMM) 公司于 20 世纪 60 年代中期发明, 由美国海军和加拿大海军进一步研究发展的一种铸造合金, 成份为 Mn-37%Cu-4%Al-3%Fe-2%Ni (质量分数), 现已广泛用于制造军用/民用舰船的推进器。英国石锰海洋公司 (Stone Manganese Marine, 目前已更名为 Stone Manganese Propulsion) 从事设计和生产船用螺旋桨已有 100 年以上历史, 跻身于世界顶级螺旋桨制造业之列。公司供货范围遍及全球, 目前主要经营设计业务, 制造则在中国委托大连和镇江的工厂进行。军用方面, 英皇家海军已经成功应用 Sonoston 30 年以上, 从 20 世纪 70 年代初起向北约海军扩大使用。民用方面, 国际知名的运输公司如 A. P. Moller, IMC, Rickmers, Torm 旗下货船均使用 SMM 的螺旋桨, 中国的南京油运公司货船也使用 SMM 的螺旋桨。

Ingramute 合金由美国国际铜研究学会 (INCRA) 于 20 世纪 60 年代初研制成功, Mn 含量为 40% 左右, 其余主要为 Cu。为增强机械性能和抗蚀性能, 还添加了 Al (2.5%~6%)、Ni (<3.5%)、Pb (<10%)、Fe (<5%)、Sn (<2%) 等元素。这种合金主要用于民用, 制造经常发生碰撞冲击的机械部件(如低功率传动齿轮等)。日本开发的 M2052 合金组分为 Mn-20Cu-5Ni-2Fe (原子百分数), 从 2000 年以后已在日本机械设备、电子器件、精密仪器和汽车制造行业得到了广泛应用。

中国锰矿资源较多, 分布广泛, 在全国 21 个省(区)均有产出; 有探明储量的矿区 213 处, 总保有储量矿石 5.66 亿吨, 居世界第 3 位。从地区分布看, 以广西、湖南为最丰富, 占全

国总储量的 56%, 因此在锰矿资源开采利用方面形成了以广西和湖南为主的格局。湖南吉首市 2011 年启动了年产 5 万吨锰基合金生产线建设项目, 由湖南三鑫锰业科技有限公司、湘西州华瑞冶金有限公司共同开发建设。该项目引进减振合金专利技术和先进设备, 生产成分为 (57-68) Mn-(26-37.5) Cu-(1-2Al)-(1.5-2) Ni-(1-2) Zn 的锰基减振消声合金, 拟建设年产 0.5 万吨锰铜阻尼合金生产线。项目建成后, 预计年产值可达 10 亿元以上; 湖南省湘西丰达合金公司已有年产 10 万吨锰锌铝等矿产品精深加工生产线, 即包括锰铜、锰镍、锰铁等几大系列 20 个品种的锰基阻尼合金新型材料。

### 4 结论

锰基阻尼合金具有良好的阻尼性能和力学性能, 在航空航天工业、航海工业、汽车工业、建筑业、家电行业等行业具有广阔的发展前景。目前取得商业应用的 Mn-Cu 合金综合性能极好, 但加工和生产成本较高, 同时其阻尼性能具有较高的温度敏感性, 特别是在室温下随存储时间的延长, 阻尼性能会大幅降低。因此根据合金的阻尼机理进行合金设计以及成分优化, 在 Mn-Fe、Mn-Ni 等新型阻尼合金的基础上开发出无磁、耐蚀的高阻尼合金, 将有效降低阻尼合金的生产成本并提高其实用性。此外, 如能建立典型纯金属和合金的阻尼性能数据库, 有针对性地将各种阻尼机制复合到一种材料中制成复合材料, 则可发挥各种阻尼机制的长处, 也将成为未来阻尼合金开发的重要方向之一。

### 参考文献(References)

- [1] 刘广, 张振忠, 张少明, 等. 高阻尼镁锆合金的研究进展及展望[J]. 材料导报, 2006, 20(7): 425-428.  
Liu Guang, Zhang Zhenzhong, Zhang Shaoming, et al. Research progress and prospect of high damping Mg-Zr alloys[J]. Materials Review, 2006, 20(7): 425-428.
- [2] 高鹏, 齐笑冰, 宋照伟, 等. 铁基阻尼合金的研究现状及展望[J]. 铸造, 2010, 59(11): 1190-1194.

- Gao Peng, Qi Xiaobing, Song Zhaowei, et al. Research status and prospect of Fe-based damping alloys[J]. Foundry, 2010, 59(11): 1190-1194.
- [3] 李沛勇, 戴圣龙, 刘大博, 等. 材料阻尼及阻尼合金的研究现状[J]. 材料工程, 1999(8): 44-48.  
Li Peiyong, Dai Shenglong, Liu Dabo, et al. Status of research on material damping and damping alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 1999(8): 44-48.
- [4] 赵稼祥. 加强发展军用功能材料[J]. 材料工程, 1995, 3(31): 1.  
Zhao Jiaxiang. Strengthening to develop military functional materials[J]. Journal of Materials Engineering, 1995, 3(31): 1.
- [5] 王敬丰, 魏文文, 潘复生, 等. 金属阻尼材料研究的新进展及发展方向[J]. 材料导报, 2009, 23(7): 15-19.  
Wang Jingfeng, Wei Wenwen, Pan Fusheng, et al. New development and prospect of research on metallic damping materials[J]. Materials Review, 2009, 23(7): 15-19.
- [6] 邓华铭, 陈树川. 锰基高阻尼合金的研究进展[J]. 金属功能材料, 2000, 7(2): 1-6.  
Deng Huaming, Chen Shuchuan. General review of present research on Mn-based high damping alloys[J]. Metallic Functional Materials, 2000, 7(2): 1-6.
- [7] 西山胜广, 徐金璋. 减振合金的开发现状和展望[J]. 上海钢研, 2002(3): 48-51.  
Xishan Shengguang, Xu Jinzhang. Development status and prospects of damping alloys[J]. Shonghai Steel & Iron Research, 2002(3): 48-51.
- [8] 方前锋, 朱震刚, 葛庭燧. 高阻尼材料的阻尼机理及性能评估[J]. 物理, 2000, 29(9): 541-545.  
Fang Qianfeng, Zhu Zhengang, Ge Tingsui. Characterization and mechanism of high damping materials[J]. Physics, 2000, 29(9): 541-545.
- [9] 田蔚. 金属物理性能[M]. 北京: 航空工业出版社, 1994.  
Tian Shi. Physical property of metal[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1994.
- [10] 窦光宇. 减振合金噪声的克星[J]. 金属世界, 2000(5): 32.  
Dou Guangyu. Damping alloy the crusher of noise[J]. Metal World, 2000(5): 32.
- [11] Kekalo I B. High-Damping Alloys, Encyclopedia of Materials Science and Engineering[M]. Oxford: Pergamon Press Ltd., 1986.
- [12] Igata N, Takeuchi S. Damping mechanisms in high damping materials [J]. Key Engineering Materials, 2006, 319: 225-230.
- [13] 黄俊, 张忠明, 袁中岳, 等. Al-5Ti-B变质高锌铝合金的组织 and 性能 [J]. 铸造技术, 2001(6): 60-62.  
Huang Jun, Zhang Zhongming, Yuang Zhongyue, et al. Microstructure and properties of high zinc aluminum alloy modified by Al-5Ti-B[J]. Foundry Technology, 2001(6): 60-62.
- [14] 刘永长, 张忠明, 吕衣礼, 等. 喷雾共沉积 SiC 增强铝基复合材料的阻尼特征[J]. 复合材料学报, 1999, 16(3): 62-66.  
Liu Yongchang, Zhang Zhongming, Lü Yili, et al. Internal friction behavior of SiC particle reinforced MMCs prepared by spray co-deposition[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1999, 16(3): 62-66.
- [15] 施瑞鹤, 林凡, 曾念波, 等. 高阻尼铸铁及阻尼机理[J]. 上海交通大学学报, 1991, 25(6): 92-98.  
Shi Ruihe, Lin Fan, Zeng Nianbo, et al. High damping cast iron and its damping mechanism[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1991, 25(6): 92-98.
- [16] 李伟, 李沛勇, 何晓磊. 高强阻尼铝合金轧制板材的组织与性能[J]. 金属功能材料, 2009(6): 11-14.  
Li Wei, Li Peiyong, He Xiaolei. Microstructure and properties of high strength-damping rolled aluminum sheet[J]. Metallic Functional Materials, 2009(6): 11-14.
- [17] 陆文龙, 王云华. 高阻尼铸铁的机械性能和阻尼性能[J]. 南京航空航天大学学报, 1997, 29(1): 85-89.  
Lu Wenlong, Wang Yunhua. The mechanical and damping properties of high damping cast iron[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1997, 29(1): 85-89.
- [18] Akdemir A, Kus R, Simsir M. Investigation of the tensile properties of continuous steel wire-reinforced gray cast iron composite[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(10/11): 3897-3904.
- [19] Qian M, Stjohn D H, Forst M T. Character zirconium-rich coring structures in Mg-Zr alloys[J]. Scripta Materialia, 2002, 46(9): 649-654.
- [20] 廖利华, 王浩伟, 张修庆, 等. 铸造镁硅合金组织和阻尼性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2007, 15(4): 556-559.  
Liao Lihua, Wang Haowei, Zhang Xiuqing, et al. Research on microstructure and damping capacity of cast Mg-Si alloys[J]. Materials Science and Technology, 2007, 15(4): 556-559.
- [21] Azcoitia Ch, Karimi A. Magnetomechanical damping in Fe-Cr alloy and effect of Al and Mo additions[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 310(1/2): 160-164.
- [22] Xu Y G, Li N, Shen B L, et al. Effect of annealing treatment on damping capacity of Fe-7Al-0.5Ti alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 447(1/2): 163-166.
- [23] 胥永刚, 李宁, 于学勇, 等. 环境温度及外磁场对 Fe-13Cr-2.5Mo 合金阻尼性能的影响[J]. 材料工程, 2005(4): 15-20.  
Xu Yonggang, Li Ning, Yu Xueyong, et al. Effects of ambient temperature and magnetic field on damping capacity of Fe-13Cr-2.5Mo damping alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2005(4): 15-20.
- [24] 王卫国, 周邦新. 铁磁合金中的磁弹转换[J]. 金属学报, 2000, 36(1): 81-86.  
Wang Weiguo, Zhou Bangxin. Magneto-elastic interchange in ferromagnetic alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(1): 81-86.
- [25] Tanji T, Moriwaki S, Mio N, et al. Measurement of damping performance of M2052 alloy at cryogenic temperatures[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 355(1/2): 207-210.
- [26] 方正春. 减振材料的最近发展[J]. 材料开发与应用, 1993, 8(1): 10-16.  
Fang Zhengchun. The recent development of damping materials[J]. Development and Application of Materials, 1993, 8(1): 10-16.
- [27] Baik S H. High damping Fe-Mn martensitic alloys for engineering applications[J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, 198(3): 241-252.
- [28] 高光惠, 顾敏, 贾禄坤. 减振合金种类、特性及其应用[J]. 金属功能材料, 1989, 1: 12-14.  
Gao Guanghui, Gu Min, Jia Lukun. The variety, characterization and application of damping alloy[J]. Metallic Functional Materials, 1989, 1: 12-14.
- [29] 吴宝榕. Vacrosil-010 合金阻尼性能的研究[J]. 金属功能材料, 1993, 10(7): 8-16.  
Wu Baorong. Research on the damping capacity of vacrosil-010 alloy [J]. Metallic Functional Materials, 1993, 10(7): 8-16.
- [30] 李长龙, 李国彬, 吴玉会. 阻尼减振合金的研究现状[J]. 金属功能材料, 2003, 10(4): 32-34.

- Li Changlong, Li Guobin, Wu Yuhui. The status of research on damping alloys[J]. *Metallic Functional Materials*, 2003, 10(4): 32-34.
- [31] 刘克非. 锰铜基高阻尼合金氩弧焊专利焊丝[J]. *材料开发与应用*, 1991, 6(1): 20-21.
- Liu Kefei. Mn-Cu base high damping alloy hydrogen argon arc welding wire for patent[J]. *Development and Application of Materials*, 1991, 6(1): 20-21.
- [32] 方正春, 哈学基. 舰船螺旋桨用2301高阻尼合金的研究[J]. *材料开发与应用*, 1989, 1: 14-25.
- Fang Zhengchun, Ha Xueji. Study of 2301 high damping alloy for ship propeller[J]. *Development and Application of Materials*, 1989, 1: 14-25.
- [33] Wu Y Q, Yin F X, Hono K. The decomposed  $\gamma$ -phase microstructure in a Mn-Cu-Ni-Fe alloy studied by HRTEM and 3D atom probe[J]. *Scripta Materialia*, 2002, 46(10): 717-722.
- [34] 王海龙, 吕秀芬, 刘和法, 等. 螺旋桨用高阻尼合金降噪效果试验研究[J]. *华东船舶工业学院学报*, 1997, 11(2): 15-19.
- Wang Hailong, Lü Xiufen, Liu Hefa, et al. A study on the damping effect of high damping propeller alloy[J]. *Journal of East China Shipbuilding Institute*, 1997, 11(2): 15-19.
- [35] 王碧文, 刘丽娟. 锰铜阻尼合金的研究[J]. *有色金属: 冶炼部分*, 1995(6): 46-49.
- Wang Biwen, Liu Lijuan. Study of Mn-Cu damping alloy[J]. *Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy*, 1995(6): 46-49.
- [36] 王丽萍, 郭二军, 葛青文. Zn、Al对Mn-Cu减振合金减振性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 1998, 8(1): 78-84.
- Wang Liping, Guo Erjun, Ge Qingwen. Influences of Zn and Al content of Mn-Cu damping casting alloy on damping property[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1998, 8(1): 78-84.
- [37] Baik S H, Kim J C, Han D W, et al. Fe-Mn martensitic alloys for control of noise and vibration in engineering applications[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 438-440(25): 1101-1105.
- [38] Huang S K, Li N, Wen Y H, et al. Temperature dependence of the damping capacity in Fe-19.35Mn alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 455(1/2): 225-230.
- [39] Takahiro S, Takehiko K. Internal friction of an Fe-28Mn-6Si-5Cr-0.5NbC shape memory alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 438-440(25): 796-799.
- [40] Gavriljuk V G, Yakovenko P G. Influence of Nitrogen on Vibration Damping and Mechanical Properties of Fe-Mn Alloys[J]. *Scripta Materialia*, 1998, 38(6): 931-935.
- [41] Granato A, Luecke K. Theory of mechanical damping due to dislocations[J]. *Journal of Applied Physics*, 1956, 27(6): 583-593.
- [42] 李宁, 黄妹珂, 滕劲, 等. 合金元素对Fe-Mn合金层错几率和阻尼性能的影响[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2007, 39(4): 99-102.
- Li Ning, Huang Shuke, Teng Jin, et al. Effect of alloy elements on stacking fault probability and damping capacity of Fe-Mn alloy[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2007, 39(4): 99-102.
- [43] Kim J C, Han D W, Baik S H, et al. Effects of alloying elements on martensitic transformation behavior and damping capacity in Fe-17Mn alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 378(1): 323-327.
- [44] 于学勇, 郭国林, 杨莉. Fe-Mn基高阻尼合金的研究现状及展望[J]. *铸造技术*, 2012, 33(7): 774-776.
- Yu Xueyong, Guo Guolin, Yang Li. Research development of Fe-Mn based high damping alloys[J]. *Foundry Technology*, 2012, 33(7): 774-776.
- [45] 丁胜, 李宁, 胥永刚, 等. 稀土对Fe-17.5Mn合金阻尼性能的影响[J]. *材料工程*, 2006(9): 17-19.
- Ding Sheng, Li Ning, Xu Yonggang, et al. Effects of rare-earth on damping capacity of Fe-17.5Mn alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2006(9): 17-19.
- [46] Huang S K, Li N, Wen Y H, et al. Effect of Si and Cr on stacking fault probability and damping capacity of Fe-Mn alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 479(1/2): 223-228.
- [47] Kim J C, Baik S H, Jun J H, et al. Effect of chromium addition on damping capacity, mechanical property, and corrosion resistance of Fe-18%Mn alloy[J]. *Key Engineering Materials*, 2006, 319: 73-78.
- [48] 李宁, 胥永刚, 于学勇, 等. 热处理工艺对Fe-14.04Mn-0.22C阻尼合金组织和性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2004, 28(11): 7-9.
- Li Ning, Xu Yonggang, Yu Xueyong, et al. The effect of heat treatment on the microstructure and properties of Fe-14.04Mn-0.22C damping alloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2004, 28(11): 7-9.
- [49] 于学勇, 李宁, 胥永刚. 固溶处理温度对Fe-14Mn-0.22C减振合金阻尼性能的影响[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2003, 35(5): 84-87.
- Yu Xueyong, Li Ning, Xu Yonggang. Effect of solution treatment temperature on the damping capacity of Fe-14Mn-0.22C[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2003, 35(5): 84-87.
- [50] Choi C S, Jun J H. The influence of Mn content on microstructure and damping capacity in Fe-(17-23)%Mn alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1998, 252(1): 133-138.
- [51] Jun J H, Kong D K, Choi C S. The influence of Co on damping capacity of Fe-Mn-Co alloys[J]. *Materials Research Bulletin*, 1998, 33(10): 1419-1425.
- [52] 李宁, 胥永刚, 于学勇, 等. 碳、镍元素对铁-锰合金的阻尼性能与相变行为的影响[J]. *机械工程材料*, 2006, 30(3): 8-10.
- Li Ning, Xu Yonggang, Yu Xueyong, et al. Effect of carbon and nickel on phase transformation behavior and damping capacity in the Fe-Mn alloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2006, 30(3): 8-10.
- [53] 于学勇, 易风, 华征潇, 等. 钛对铁锰基减振合金阻尼性能和耐腐蚀性能的影响[J]. *腐蚀与防护*, 2011, 32(6): 438-444.
- Yu Xueyong, Yi Feng, Huang Zhengxiao, et al. Effect of Ti on damping and corrosion properties of Fe-Mn alloys[J]. *Corrosion & Protection*, 2011, 32(6): 438-444.
- [54] 于学勇, 程凤军, 杨廷贵. 含氮铁锰合金阻尼性能和力学性能的研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2007, 30(1): 63-65.
- Yu Xueyong, Cheng Fengjun, Yang Tinggui. Influence of nitrogen on damping and mechanical properties of Fe-Mn alloys[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2007, 30(1): 63-65.
- [55] Girish B M, Satish B M, Mahesh K. Effect of stacking fault probability and  $\epsilon$  martensite on damping capacity of Fe-16% Mn alloy[J]. *Materials and Design*, 2010, 31(4): 2163-2166.
- [56] Hicks T J, Pepper A R, Smith J H. Antiferromagnetism in  $\gamma$  phase manganese-palladium and manganese-nickel alloys[J]. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 1968, 1(6): 1683-1689.
- [57] Xie D H, Fu Z M, Cai K H, et al. The research on the microstructure and damping behavior of a new-type Mn-Ni damping alloy[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 27: 1110-1120.

(编辑 田恬)