

⑥ 541-545

## 高阻尼材料的阻尼机理及性能评估\*

方前锋

朱震刚

葛庭燧

TB39

(中国科学院固体物理研究所 内耗与固体缺陷开放实验室 合肥 230031)

**摘要** 对高阻尼材料的性能评估方法、常见的高阻尼机理以及高阻尼材料的主要研究热点进行了评述,指出了该领域今后的主要研究课题是发现新的阻尼机理,开发具有优异性能的新型高阻尼材料。

**关键词** 高阻尼材料, 阻尼机理, 性能评估

CHARACTERIZATION AND MECHANISM  
OF HIGH DAMPING MATERIALS

FANG Qian-Feng ZHU Zhen-Gang GE Ting-Sui(T. S. Kè)

(Laboratory of Internal Friction and Defects in Solids, Institute of Solid State Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

**Abstract** The characterization methods and damping mechanism of high damping materials are reviewed. After discussing the hot research topics it is pointed out that the main issues are to discover new damping mechanisms and to develop high damping materials with excellent mechanical properties.

**Key words** high-damping materials, damping mechanism, characterization of property

## 1 引言

材料的内耗(或阻尼)研究兴起于20世纪40年代,但是人们对高阻尼材料产生兴趣却是70年代的事情。当时由于工业的发展,关于振动和噪声的问题越来越突出。在传统的防噪减振措施不能满足需要时,人们希望有一个根本解决问题的方法,即寻找高阻尼材料,将振动和噪声抑制在发生源处。现在,高阻尼材料已经应用在很多场合,但要使高阻尼材料得到更加广泛的应用还有许多问题。主要问题之一是材料的阻尼性能除了取决于材料的成分和结构外,还随外部因素的变化而有很大的改变,使得设计工程师难于掌握材料在工作环境下的阻尼值。因此,对各种高阻尼材料进行阻尼机理研究和阻尼性能评估将是非常重要的。

结构振动在很多情况下是非常有害的,必须加以减低或消除。这些情况大致可以分为以下三个方面:(1)疲劳。疲劳即材料或结构在小于其屈服应力的交变载荷作用下的行为。疲劳会产生裂纹,裂纹的扩展最终导致材料失效。疲劳裂纹的产生和扩展主要取决于交变载荷作用下材料的变形大小。因此,高阻尼材料的应用将降低材料疲劳变形的水平,从而

减低疲劳的危害。(2)噪声。噪声会造成环境污染,对人们的身体健康造成危害。随着人们环保意识的提高,噪声控制将会越来越受到重视。(3)震动。震动会使仪器设备的灵敏度降低甚至失灵。由地震造成的灾害更是众所周知的,所有这些由疲劳、噪声和震动产生的危害都可以通过减低材料或结构的振动幅度来降低。这三个方面也正是高阻尼材料的主要应用领域。对易受疲劳破坏的部件,如汽轮机的叶片,改用镍基高阻尼合金制造后,使用寿命可以成倍增加。对容易产生振动和噪声的结构,如发动机和机床等,其底座或外壳一般都采用铸铁或铸铝,这除了成本的原因外,主要是出于提高阻尼、降低振动和噪声的考虑。用高阻尼合金制造的切削刀具,由于振动幅度小,在减小噪声的同时,也提高了机械加工的精确度。即使对于地震这样重大的自然灾害,人们也可通过提高结构阻尼性能的方法来降低地震带来的损失。有文献报道称,在大楼的适当部位安装铅柱<sup>[1]</sup>和在桥梁上安装由磁流变液组成的阻尼器<sup>[2]</sup>后,可以显著地提高楼房和桥梁的抗地震能力。

减低材料或结构振动的常用方法有三种:(1)将

\* 1999-12-23收到初稿,2000-03-07修回

结构件设计得足够庞大和坚固,以降低振动振幅;(2)巧妙设计结构件,以使它避开共振条件;(3)振动能够被很快地衰减下来(阻尼)。在这三种方法中,第一种方法从成本和重量方面考虑是不可取的;第二种方法是传统的结构设计所经常采用的方法,但如果振动谱非常复杂,则这种方法也只能部分解决问题;而第三种方法则能很好地解决各类与振动有关的问题,它要求引进一种机制,通过这种机制使结构的振动能量能够完全地被耗散掉。这既可以通过引进“系统阻尼”(如界面滑动、水力、电力阻尼等)来实现,也可以通过引进“材料阻尼”(结构材料本身具有阻尼本领)来实现。引进“系统阻尼”将增加结构件的成本、重量和体积,所以,开发具有大的阻尼本领的阻尼材料在减震、防噪和提高结构件的性能等方面具有重要的意义,将成为21世纪材料科学研究的热点之一。

阻尼本领是材料的一种性质,它能够将材料的机械振动能量通过内部机制不可逆地转变为其他形式的能量(通常是热能)。因为机械振动能的耗散是通过内部机制来完成的,所以材料的这种性质也称

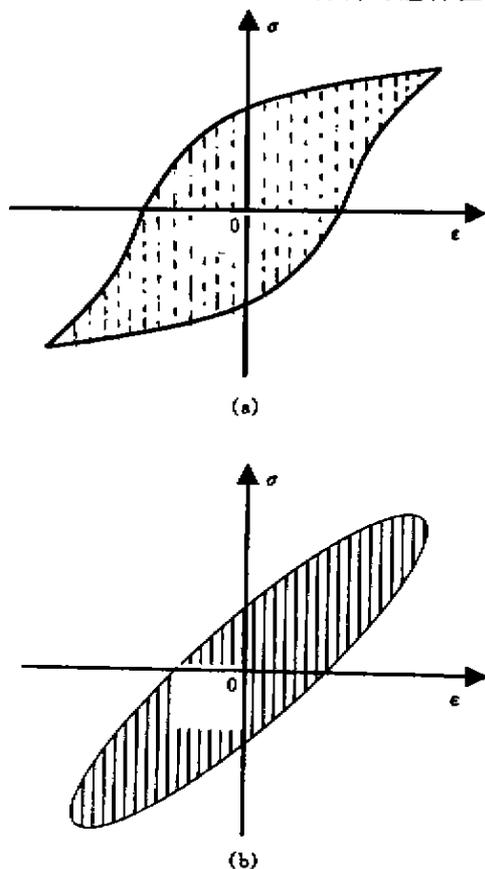


图1 应力应变回线示意图  
(a)静滞后型内耗; (b)动态弛豫型内耗

为内耗(低频时)或超声衰减(高频时)。如对材料施加一周期的应力,其应力-应变曲线为一闭合回线,回线的面积即为单位体积材料的能量损耗(如图1所示)。当把阻尼本领(或内耗)表示成温度、频率、应力振幅、外加电场或磁场等外部参量的函数时,我们将得到一系列分立的或连续的谱,称之为内耗谱或机械振动吸收能谱。探索新谱线和研究这些谱线产生的机制正是内耗与超声衰减这门分支学科的主要研究内容之一。这些谱线将为阻尼材料的设计和应用提供最基本的数据,而新谱线的产生机制也将为新型阻尼材料的开发提供理论指导。

高阻尼材料,顾名思义是阻尼本领较高的材料(比阻尼本领大于0.1,见下文)。高阻尼材料可以分为两大类:有机系统和金属系统。具有粘弹性阻尼特性的有机涂层或夹层具有较高的阻尼本领,且对外加电磁场不敏感,而在室温附近得到了较多的应用。但由于很容易被环境(水、油等)所污染,所以它们只在特定的频率和温度范围内才是有效的。某些金属和合金,在具有足够的强度和韧性而作为结构材料的同时,还具有不依赖于频率、相对于塑料来说较小地依赖于温度的、较高的内禀阻尼特性,因此得到了广泛的应用。为方便起见,引进一个术语“高阻尼金属(合金)”(HIDAMET)来代表这类金属和合金。本文将重点对高阻尼合金的性能和阻尼机制进行分析。

## 2 阻尼(或内耗)的检测原理及评估

材料内耗的大小定义为材料振动一周所损耗的能量  $\Delta W$  与其最大弹性储能  $W$  之比:  $Q^{-1} = \frac{\Delta W}{2\pi W}$ , 其中常数  $2\pi$  的引进是为了便于各种测量方法之间的比较。在工程上,材料的内耗也称为阻尼本领。由于测量方法的不同,有多种关于材料阻尼本领的度量,如对数减缩量  $\delta$ 、能耗系数  $\eta$ 、品质因数  $Q$ 、超声衰减  $\alpha$ 、应变落后于应力的相位差  $\phi$ 、比阻尼本领  $P$  等等。它们的定义如下:

$$P = \frac{\Delta W}{W}, \delta = \ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right), Q = \frac{\sqrt{3}f_r}{\Delta f},$$

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln\left(\frac{u_1}{u_2}\right),$$

这里  $A_n, A_{n+1}$  分别是在自由衰减法测量中相邻两周的振动振幅,  $\Delta f$  是共振法中共振频率为  $f_r$  的共振峰的半宽度,  $u_1$  和  $u_2$  分别是波传播法中波在位

置  $x_1$  和  $x_2$  的振幅. 在内耗较小的情形下 ( $\delta \ll 1$ ), 有

$$Q^{-1} = \eta = \tan \phi = 1/Q = \delta/\pi \\ = P/2\pi = \alpha\lambda/\pi,$$

其中  $\lambda$  是波传播法中波的波长. 此外, 很多高阻尼合金的阻尼本领与振动振幅有关. 所以工程上有时也采用应力振幅为材料屈服强度的 10% 时的比阻尼本领来作为材料阻尼本领的度量, 记为  $P_{0.1}$ .

阻尼或内耗的测量原理按测量时外加交变应力的频率与被测量系统(包括试样和惯性元件)的共振频率的关系可分为三种基本类型<sup>[3]</sup>: (1) 次共振法; (2) 共振法; (3) 波传播法.

次共振法是外加频率远低于被测量系统共振频率的情况. 当外加一个振幅恒定的交变应力时, 被测量系统的响应(即应变)的频率与外加应力的频率相同但落后一个相位角( $\phi$ ), 试样的内耗值  $Q^{-1} = \tan \phi$ . 该方法的优点是应力恒定, 有利于研究与振动振幅有关的阻尼性质, 而且可以很方便地改变测量频率. 缺点是测量频率不能过高.

共振法是外加频率约等于被测量系统共振频率的情况. 此时有两种不同的测量方法: 一种是自由衰减法, 另一种是共振波形法. 自由衰减法所依据的原理是, 在撤去外加交变应力而让系统以共振频率自由振动时, 系统的振动将由于机械能量的损耗而衰减. 因为系统的振动能量与振动振幅的平方成正比. 所以, 通过测量相邻两周的振幅之比, 就可以求出能量损耗, 即振动振幅的对数减缩量  $\delta = \ln \left( \frac{A_n}{A_{n+1}} \right)$ . 该方法测量装置简单, 测量精度很高, 频率覆盖范围广(通过改变装置可实现  $10^{-5}$  Hz 到约 100 kHz 的频率). 缺点是在同一装置上变化频率较不容易(频率变化范围窄). 共振波形法所依据的原理是, 在外加交变应力的频率与系统的共振频率相等时, 系统的振动振幅最大, 而当外加应力的频率偏离系统的共振频率时, 系统的振动振幅减小. 因此, 当把系统振动振幅作为外加频率的函数时将在共振频率处出现一个共振峰. 此共振峰的半宽度与内耗或阻尼本领成正比:  $Q^{-1} = \frac{\Delta f}{\sqrt{3}f_r}$ . 该方法测量装置简单, 测量精度较高, 缺点是测量过程中振动振幅变化范围大, 不利于研究与振动振幅有关的阻尼性能.

波传播法是外加频率远高于被测量系统共振频率的情况, 此时, 外加的高频应力作为弹性波在试样内部传播(如超声波). 它的测量原理与自由衰减法

相似, 不同之处在于这里测量的是波的振幅随传播距离的衰减量  $\alpha$ . 波的振幅  $u$  随距离  $x$  变化的函数关系为:  $u = u_0 e^{-\alpha x}$ , 其中  $u_0$  是  $x=0$  处的振幅. 该方法测量频率高, 测量周期短, 缺点是不容易处理由于散射引起的波的能量损失.

材料的阻尼本领除了取决于材料本身的性质和微结构外, 还与环境因素(如温度和电磁场等)以及测量条件(如应力应变振幅和测量频率等)密切相关. 对材料阻尼本领的评估, 一方面要求测量出材料在不同环境因素和不同测量条件下材料阻尼本领的大小, 另一方面对产生阻尼的机制进行研究, 在可能的条件下给出材料阻尼本领与环境因素和测量条件等参量的定量函数关系. 这些数据和阻尼机制将对高阻尼材料的实际应用以及新型高阻尼材料的开发研究提供指导. Ritchie 和潘正良等<sup>[4,5]</sup>对铸态 Zn-Al 合金的阻尼机制进行了分析, 给出了该合金的阻尼本领随温度和频率而变化的解析公式, 为其他高阻尼合金阻尼本领的定量评估提供了很好的范例.

3 高阻尼合金的分类及特点

3.1 按其阻尼本领的大小来分类<sup>[6,7]</sup>

按其阻尼本领的大小, 高阻尼合金可以分为三类: 低阻尼 ( $0.1 < P_{0.1} < 1$ ), 中阻尼 ( $1 < P_{0.1} < 10$ ) 和高阻尼 ( $P_{0.1} > 10$ ). 图 2 给出了按这种方法分类

### 3.1 按其阻尼本领的大小来分类<sup>[6,7]</sup>

#### 3.1 按其阻尼本领的大小来分类<sup>[6,7]</sup>

按其阻尼本领的大小, 高阻尼合金可以分为三类: 低阻尼 ( $0.1 < P_{0.1} < 1$ ), 中阻尼 ( $1 < P_{0.1} < 10$ ) 和高阻尼 ( $P_{0.1} > 10$ ). 图 2 给出了按这种方法分类

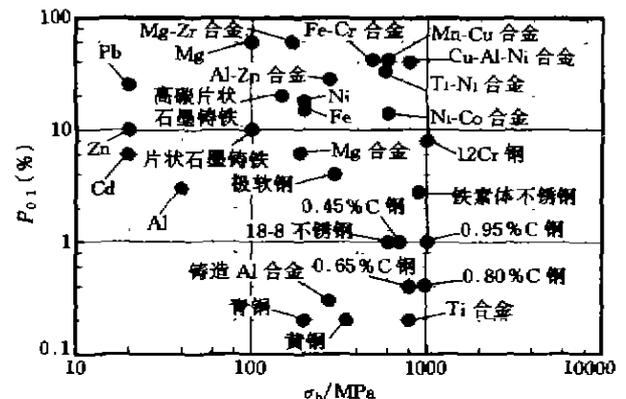


图 2 高阻尼合金按阻尼本领大小的分类示意图

时一些合金的阻尼性能, 其中横坐标是抗拉强度  $\sigma_b$ , 纵坐标是比阻尼本领  $P_{0.1}$ . 可见, 一些常用的高阻尼合金(如 Mn-Cu 合金、Ti-Ni 合金、Cu-Al-Ni 合金、Fe-Cr 合金、Al-Zn 合金、Mg-Zr 合金和 Pb 等)的比阻尼本领都在 10 至 100 之间.

#### 3.2 按阻尼机制分类<sup>[7,8]</sup>

目前在市场上出售的高阻尼合金, 按其阻尼机

制可以分为5类(如表1所示). 阻尼的作用并不只是按单一机制进行, 但将结构件的振动弹性能在阻尼合金的内部转变为热能而放出去, 在这一点上则

都是相同的. 各类合金的共同特点归纳在表2中, 下面对此作一简要说明.

表1 高阻尼合金按阻尼机制的分类

分类	典型合金系	例子及其成分(除 Ti-Ni 外均为 wt%)
复合型	铸铁系	球状、片状石墨铸铁: Fe-3% C-2% Si-0.7% Mn
	减振钢板	软钢板+塑料
孪晶或界面型	Mn-Cu系	Cu-40% Mn-2% Al; Mn-37% Cu-4% Al-3% Fe-1.5% Ni
	Ti-Ni系	Ti-50% Ni; Ti-20% Ni-30% Cu; Ti-47% Ni-3% Fe
	Fe-Mn系	Fe-17% Mn; Fe-27% Mn-3.5% Si;
	Cu-Al系	Cu-10.6% Al-19.5% Zn; Cu-14.1% Al-4.2% Ni; Cu-17.5% Al-8% Zn-0.4% Si
	Al-Zn系	Zn-22% Al; Zn-27% Al-2.5% Cu; Zn-9% Al-1% Cu-0.1% Fe
位错型	Mg系	Mg-0.6% Zr; Mg-0.6% Zr-0.6% Cd-0.2% Zn; Mg-0.7% Si
铁磁性型	Fe系	Fe-12% Cr-3% Al; Fe-15% Cr-2% Mo-0.5% Ti; Fe-12% Cr-1.3% Al-0.08% C; Fe-20% Cr-2% Co-4% Mo
	Co系	Nivoo-10; Co-23% Ni-1.9% Ti-0.2% Al
其他(表面裂纹)	不锈钢	Fe-18% Cr-8% Ni

表2 高阻尼合金的特点

分类	热处理	使用极限温度/℃	时效变化	与应变振幅的关系	与频率的关系(声频)	与磁场的关系	塑性加工性	耐腐蚀性	强度/MPa	表面硬化处理	焊接性	成本
复合型	不需要	~150	无	小	有	无	不行	差	—	可能	难	低
孪晶型	要(难)	~80	大	中	无	无	容易	稍差	~600	可能	难	高
位错型	不需要	—	无	中	无	无	难	稍差	~200	不行	不行	高
铁磁型	要(容易)	~380	无	大	无	有	容易	好	~450	容易	良好	低

3.2.1 复合型

石墨铸铁和减振钢板, 是通过铸铁内的石墨和钢板内的树脂的粘塑性流动来产生阻尼作用的. 片状石墨铸铁的优点是成本低, 耐磨性能好, 缺点是强度和韧性低, 不能超过一定的使用温度. 后来发展的可轧片状石墨铸铁克服了以上的缺点.

3.2.2 孪晶型或界面型

振动应力使得热弹性马氏体孪晶晶界或界面运动而引起衰减和静态滞后. 如 Mn-Cu 系合金和 Ti-Ni 合金等形状记忆合金. 它们的优点是阻尼本领较大, 强度高, 受应变振幅的影响小, 耐磨损性和耐腐蚀性都较好; 缺点是使用温度偏低(100℃以下), 成本相对较高, 长时间时效会引起性能下降, 对 Ti-Ni 合金来说加工性能不好.

3.2.3 位错型

由析出物和杂质原子所钉扎的位错, 在外加的振动应力作用下松开后, 由表现的位移增大而引起静态滞后, 从而产生能量损耗, 如 Mg 系合金等. 其优点是阻尼本领高, 密度低, 主要缺点是强度偏低, 耐腐蚀性以及压力和切削加工性都较差.

3.2.4 铁磁性型

伴随着由变形而引起的磁畴壁的非可逆运动而产生磁力学(magnetomechanical)的静态滞后, 产生

能量损耗, 如 Fe-Cr 系合金等. 该类合金的主要优点是成本低, 加工性能好, 具有一定的耐磨损和耐腐蚀性能, 受频率的影响较小, 使用极限温度高, 性能稳定, 并且可以用合金化和表面处理来提高性能. 主要缺点是受应变振幅的影响较大, 要求的热处理温度较高(1000℃左右).

3.2.5 其他(表面裂纹型)

由于裂纹面的相对滑动(摩擦)而产生的弹性能的损耗, 使结构衰减发生于材料内部, 如 Al-18-8 不锈钢等. 在软钢表面轧出微细的摩擦界面也具有减振作用.

4 高阻尼合金研究的新近进展

目前得到广泛应用的高阻尼合金主要是以 Mn-Cu 系合金和 Ti-Ni 合金等为代表的形状记忆合金类<sup>[9]</sup>. 这类材料具有很高的阻尼本领, 但由于它们多是有色金属, 所以原材料较昂贵, 加工工艺也较复杂. 今后的发展趋势将是原材料低廉和加工工艺相对成熟的 Fe 基合金逐步占主导地位. 如 Fe-Cr-X 合金<sup>[10,11]</sup>和 Fe-Mn-X 合金<sup>[12-14]</sup>, 其中 X 为添加元素. 前者的阻尼机制来源于铁磁畴壁的应力感生运动, 而后的阻尼机制来源于马氏体

物理

相界和层错界面的应力感生运动.通过适当的热处理和成分控制,Fe基高阻尼合金的阻尼本领也可达到很高的水平.研究不同添加元素的影响,可望发展出加工性能好,具有足够高的强度和韧性,好的抗腐蚀性和焊接性能的Fe基高阻尼合金.

材料的强度与阻尼性能在一般情况下是相互矛盾的,阻尼越大,则强度越低,反之亦然.所以高阻尼合金的强度不是很高.在普通工件的表面喷涂一层高阻尼合金(如Fe-Cr基合金<sup>[11]</sup>),可以在不改变原工件的强度的前提下较大地增加工件的阻尼本领,是一个很有发展前途的研究方向.如果涂层的阻尼性能与应力振幅有关,还可以利用涂层的内应力来提高阻尼层的阻尼本领.主要的问题是涂层与工件的结合.

泡沫金属材料是新近发展起来的一种新型高阻尼合金<sup>[15,16]</sup>.它既保留了金属具有一定强度的特性,同时也具有类似于泡沫塑料的高阻尼性能,其阻尼性能高出块体材料的5—10倍,具有99%的吸声能力.泡沫金属材料的高阻尼本领一方面来源于较高的孔隙率,另一方面来源于孔洞周围的高密度缺陷.由于它所具备的多种优异物理性能特别是阻尼性能,将在消声、减震、过滤分离和电磁屏蔽等一些高技术领域获得广泛应用.预计近期内泡沫金属材料在军事和民用领域的应用将有较大的突破.

多功能的和智能化的新型高阻尼复合材料也是一个有前途的研究发展方向<sup>[17]</sup>.通过在结构系统的适当位置安装位移传感器和压电驱动器,再配合微电脑控制,就可以得到很好的减振效果.其基本原理是:通过位移传感器检测到结构系统的振动信息,经过微电脑处理产生一激励信号,使压电驱动器产生一个振动频率与结构系统的相同但振动方向相反的振动,从而降低结构系统的振动幅度.在实际应用中,仍须解决诸如如何合理布置传感器和驱动器,以及传感器和驱动器的加入对结构系统性能的影响等问题.但是在对减振效果要求特别高而对结构系统的强度要求较低场合,这种方法是非常适用的,因为它在理论上可以达到100%的减振效果.

作为今后的重要课题,希望开发价格较低廉的便于使用的高阻尼合金,例如,它可以不需要热处理,加工性能好,具有足够高的强度和韧性,好的抗腐蚀性和焊接性能,可以作为结构材料使用.为此,希望在改进现有的高阻尼合金的同时,进而开发具

有新的阻尼机制(特点)的高阻尼合金.传统的阻尼机制都是指使机械振动能量向其他能量形式(如热能)的转化机制,这是最彻底的消除机械振动的机制.但是,从实际应用的角度来看,凡是使机械振动能量密度减小的机制都应作为可考虑的阻尼机制,包括机械波的散射机制.这就使得我们可以通过对机械波进行调制,利用机械波的干涉和在梯度材料或多孔材料或多界面材料中的反射和散射来达到减弱机械振动的目的.

### 参 考 文 献

- [1] Skinner R I, Robinson W H, McVerry G H. *An Introduction to Seismic Isolation*. Wiley, Chichester, 1993
- [2] Dyke S J, Spencer B F, Sain M K *et al*. *Smart Mater & Struc*. 1998, 7: 693
- [3] Nowick A S, Berry B S. *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids*. New York and London: Academic Press, 1972. 578—608
- [4] Ritchie I G, Pan Z L. *Metall. Trans. A*, 1991, 22: 607
- [5] Ritchie I G, Pan Z L, Goodwin F E. *Metall. Trans. A*, 1991, 22: 617
- [6] James D W. *Mater. Sci. Eng.*, 1969, 4: 1
- [7] Takeuchi S 著, 张名大等译. *金属功能材料*. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1988. 180—191 [Takeuchi S ZHANG Ming - Da *et al* trans. *Metallic Functional Materials*. Shenyang: Liaoning Science & Technology Press, 1988. 180—191 (in Chinese)]
- [8] Golovin S A, Golovin I S. *Proc. ICIFUAS-9*, Ké T S ed Beijing: International Academic Publishers, Pergamon Press, 1989. 345—352
- [9] Srinivasan A V, Cutts D G, Schetky L M. *Metall. Trans. A*, 1991, 22: 623
- [10] Masumoto H, Sawaya S, Hina M. *Trans. JIM*, 1979, 20: 409
- [11] Karim A, Gauge P H, Martin J L. *J. Appl. Phys.*, 1996, 79: 1670
- [12] Lee Y K, Jun J H, Choi C S. *ISIJ International*, 1997, 37: 1023
- [13] Lee K K, Jang W Y, Baik S H *et al*. *Scripta Mater.*, 1997, 37: 943
- [14] Jun J H, Baik S H, Lee Y K *et al*. *Scripta Mater.*, 1998, 39: 39
- [15] Liu C S, Zhu Z G, Han F S. *J. Mater. Sci.*, 1998, 33: 1769
- [16] Liu C S, Zhu Z G, Han F S. *Philos. Mag. A*, 1998, 78: 1329
- [17] 侯静泳编. *功能材料*. '96 中国材料研讨会论文集, I-1 北京: 化学工业出版社, 1996. 618—680 [HOU Jing - Yong ed. *Functional Materials*. In: '96 National conference on materials science and engineering, I-1 Beijing: Chemical Industry Press, 1996. 618—680 (in Chinese)]