

# 结构/阻尼一体化复合材料技术 及其应用研究进展

Review on the Structure/Damping Cocured  
Composite Materials and Their Applications

赵云峰,游少雄

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

ZHAO Yun-feng, YOU Shao-xiong

(Aerospace Research Institute of Materials &  
Processing Technology, Beijing 100076, China)

**摘要:** 结构/阻尼一体化复合材料技术是近 20 年来出现的一项新技术,系统介绍了该项技术的特点和国内外研究进展。并通过成功的应用实例说明,该项技术的应用可使结构的模态阻尼因子明显提高,共振放大系数和振动响应显著减小,而且减重 40%,获得良好的效果。

**关键词:** 结构/阻尼一体化;阻尼;复合材料;航天

**中图分类号:** TB332    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2012)11-0086-06

**Abstract:** The structure/damping cocured composites is a new technique developed about 20 years ago. This paper gives a comprehensive review on this new kind of materials and its applications. By applying the structure/damping cocured composites, the mode damping factor of the structure is obviously increased, and the magnitude and respond of vibration of the structure is decreased, and its mass is reduced about 40%. The practical examples showed that the composites are not only with a high rigidity and strength, but also have a higher damping factor. These would provide a better environment for the instrument installed on the structures. Therefore, it is a good vibration-reduction treatment method with a prospective application in the field of aerospace.

**Key words:** structure/damping cocured; damping; composite; aerospace

随着航空航天工业的发展,先进飞机、运载火箭和导弹的高性能、高可靠性和低成本很大程度上取决于新材料和新工艺的广泛应用。先进复合材料是航空航天高技术的重要组成部分,它能有效降低飞机、运载火箭和导弹的结构质量,增加有效载荷和射程,降低成本。先进复合材料作为航空航天新材料和新工艺的研究重点和发展方向,受到高度重视。美国国防部关键计划已连续多年把先进复合材料作为最优先发展的关键技术列入 A 组,并指出它是“为保证美国武器系统长期居于优先地位而必须发展的最重要的技术之一”。国外各类航空航天器结构已经广泛应用了先进结构复合材料。其中应用最多的是以环氧树脂为主的树脂基结构复合材料。欧洲已经首飞的 A380 采用了 22% 的碳纤维树脂基复合材料,还采用了 3% 的纤维金属层板复合材料 GLARE,复合材料单机用量达到 29937kg,波音 787 飞机的复合材料用量更将达到

50%,创大型民机复合材料用量的新纪录<sup>[1]</sup>。20 世纪 70 年代后 Kevlar 纤维和碳纤维复合材料在卫星结构上开始广泛应用,20 世纪 80 年代后主要以碳纤维树脂基复合材料的应用为主。

随着运载火箭、导弹和航天器等性能的不断改进和提高,其结构振动和噪声问题日益突出。结构振动和噪声恶化了航天产品上精密电子仪器仪表的动力学环境,降低了导航和控制系统的精度和可靠性,因此对结构进行减振降噪,改善其力学环境就显得非常重要,而阻尼材料及其应用是抑制振动噪声最有效的技术手段之一<sup>[2,3]</sup>。

## 1 纤维增强树脂基复合材料的阻尼特性

随着复合材料应用的日益广泛和研究的不断深入,人们开始关注纤维增强复合材料的韧性及阻尼性

能的分析和预报工作。冲击载荷往往造成复合材料层板最敏感的分层损伤问题,而抗冲击损伤能力将直接影响到材料的冲击后压缩强度(CAI)和许用设计应变,因此,它一直是设计和应用复合材料的最重要的前提。CAI已被广泛应用于航空工业树脂基复合材料韧性的评定<sup>[1]</sup>,而树脂基复合材料的韧性与其阻尼性能直接相关。20世纪60年代开始,Schultz & Tsai<sup>[4]</sup>,Hashin<sup>[5]</sup>及Adams<sup>[6-8]</sup>等发表了有关复合材料阻尼的开创性研究工作。而后在1980~2002年期间,这一领域的研究成果大量涌现。R. Chandra<sup>[9]</sup>、任勇生<sup>[10]</sup>和张少辉<sup>[11]</sup>等对国内外有关纤维增强树脂基复合材料结构阻尼研究进行了系统评述。

复合材料与金属材料完全不同,一般认为其阻尼机理主要有<sup>[9-11]</sup>:

(1)树脂基体和纤维的固有黏弹性。复合材料阻尼的贡献主要来自于树脂基体,碳纤维、Kevlar纤维等增强材料也有一定的阻尼。

(2)界面阻尼。界面相是指邻近纤维表面,且具有一定厚度的区域。由于纤维和基体的不连续,界面相内存在较大的剪切应变,这为耗散能量提供了前提。

(3)材料破坏而产生的阻尼。主要有树脂和纤维之间的滑移和摩擦阻尼及基体开裂和纤维断裂造成的能量耗散。

(4)局部应力集中的非线性黏弹性阻尼。在大振幅/高应力条件下,纤维之间局部区域内存在高度应力和应变集中而呈现出明显的非线性阻尼特性。

(5)热弹性阻尼。由从复合材料压应力区域到拉应力区域的循环热流动而引起的。

在上述几种阻尼机理中,第一种和第二种为主要机理。多数研究工作都集中于此。

复合材料阻尼模型主要有微观模型和宏观模型两类。微观研究考虑纤维、基体和界面等各组分,以及它们间的相互作用对阻尼的影响,其分析结果可作为宏观研究基础。宏观模型以单个铺层、层合板以及整个结构为对象,考察结构总体的阻尼特性,大部分应用了复弹性模量法、应变能法和有限元法,其中有限元法在近年来得到了广泛的应用<sup>[9-11]</sup>。分析表明,复合材料纤维基体界面条件及其性质、横向剪切和层间剪切等因素对复合材料的阻尼性能及其预报有主要影响。在模型建立和分析过程中必须给予充分考虑。目前,大部分复合材料阻尼模型基于黏弹性基础,广泛使用了应变能量法。张少辉等<sup>[12]</sup>从单向纤维增强复合材料的阻尼特性出发,应用基于应变能的有限元分析方法研究了复合材料的阻尼特性,证实了这种方法的有效性。

普通纤维增强复合材料的阻尼是金属材料的几十到几百倍,但在大多数情况下仍然无法满足工程应用的需要,必须尽量提高复合材料的阻尼性能。提高和改善复合材料阻尼性能的主要途径可总结如下:

(1)提高复合材料组分的阻尼性能,如采用高阻尼性能的树脂基体和纤维<sup>[13,14]</sup>。

(2)在结构表面进行阻尼处理,将黏弹性阻尼材料粘贴于结构表面,即自由阻尼;也可在上面再覆盖一层约束层,即约束阻尼<sup>[15,16]</sup>。

(3)采用两种以上的纤维混杂铺层,制备混杂复合材料<sup>[17]</sup>。

(4)在纤维表面覆盖高阻尼层,因为纤维和基体的界面存在较大的剪切应变,在该高剪切应变区域加入高阻尼材料是提高复合材料阻尼的有效方法之一<sup>[18]</sup>。

(5)共固化阻尼层,在复合材料内部增加黏弹性阻尼层,这是提高结构阻尼性能的一种有效途径<sup>[19-21]</sup>。

J-M Berthelot等<sup>[22]</sup>对E-玻璃纤维增强环氧树脂复合材料层合板;前述层合板中间加一层0.2mm厚的氯丁橡胶、加一层0.4mm厚的氯丁橡胶、对称加二层0.2mm厚的氯丁橡胶的复合材料层板;分别加三种不同密度的聚氯乙烯泡沫材料夹芯的复合材料结构等进行了阻尼性能分析。针对上述三类结构建立了基于考虑横向剪切效应的一阶层合理理论的有限元分析模型,可导出复合材料中各组分不同方向的应变能。通过材料和结构阻尼耗散能量可作为应变能和与材料不同方向贮存能量相关的阻尼因子函数,可导出复合材料及各组件的阻尼特性,包括层合板的阻尼因子、黏弹层和泡沫夹芯的阻尼特性等。因为这些组分材料的模量和阻尼性能随频率变化,因此这些分析结果是频率的函数。对典型简单结构的实验结果表明,该方法的计算结果和实验结果吻合较好。

## 2 结构/阻尼一体化复合材料技术及其特点

传统的减振方法主要有解耦、隔振和结构的刚化等。对于大型复杂结构,模态密集,解耦方法很难有效,需要在不同结构频率之间调配,复杂而且需要以增加附加质量作为代价;隔振技术主要是通过隔振器将需要减振的敏感设备隔离起来,其显著特点是在低频引入一共振放大峰,占用较大空间,而且结构稳定性较差;刚化方法主要是通过提高结构的刚度,增大结构件的固有振动频率,使之和激励解除耦合,同样需要以增加附加质量作为代价。

阻尼减振技术是通过某种方式将高阻尼材料添加到结构中,增大结构的模态阻尼比,有效抑制共振区附

近动态响应。一般按照阻尼材料添加方式的不同,可以将阻尼减振技术分为附加阻尼减振技术和阻尼/结构一体化技术。附加阻尼减振技术是在结构表面应变较大处粘贴高阻尼附加层,阻尼层上再粘接约束层,其显著特点是对结构的模态频率和振型影响较小,特别适合结构的事后修改,主要用于梁、板和薄壳结构的弯曲振动减振。

结构/阻尼一体化复合材料是将高阻尼材料添加到其他结构材料(主要指碳纤维增强树脂基复合材料)内部形成的一种新型复合材料结构,其结构件既具有较高的刚度和强度,又具有较高的结构阻尼、承重和减振作用。近年来,随着碳纤维增强树脂基复合材料的大面积推广应用,一体化阻尼技术受到越来越广泛的关注,在大型风机叶片、透平机叶片、潜艇推进舵叶片和直升机的螺旋桨叶片等得到应用。当前,采用的理论研究方法和约束阻尼层技术基本相同,主要是有限元法和应变能法,但最近出现了离散层方法。与附加阻尼层技术相比,一体化阻尼技术的特点为:第一,附加阻尼一般应用于结构的修改,即结构产品制造过程已经完成,出现振动问题,在不对结构重新设计的情况下,通过结构表面粘贴附加约束阻尼达到减振降噪目的,而一体化阻尼技术是在产品制造前,通过阻尼设计,将高阻尼材料添加到结构内部,增加结构阻尼,达到减振降噪目的。第二,由于附加阻尼是附加在结构基体的表面,该处模态应变能较小,而一体化阻尼处在结构内部,应变能比较大,因此,一体化阻尼比附加阻尼的减振效率更高。第三,减振原理和约束阻尼层完全一致。

### 3 结构/阻尼一体化技术国内外研究进展

1989 年首次出现有关在树脂基复合材料中共固化黏弹性阻尼材料的文献<sup>[24,25]</sup>。所谓共固化是指复合材料固化前将黏弹性材料嵌入复合材料层间与复合材料同时固化。该嵌入材料须经历复合材料固化所需压力和温度历程。因此,复合材料内部的黏弹性材料在共固化过程中可能出现诸多问题,如阻尼材料在固化过程中可能老化降解,造成复合材料分层;阻尼材料可能产生蠕变或者被挤压到复合材料外部,等等。尽管没有这方面的研究报道,但 20 世纪 90 年代以来,国外一些研究者采用共固化黏弹性阻尼材料的方法显著提高了复合材料结构的阻尼<sup>[20-22,26-29]</sup>。结果表明,引入黏弹性共固化阻尼层是提高复合材料结构阻尼的有效途径,在实际应用中也容易实现,可在保证复合材料结构具有足够的强度和刚度的前提下,大幅度提高复

合材料结构的阻尼性能,且不易出现剥离分层现象。

Janet M. Biggerstaff<sup>[30]</sup>研究表明,尽管共固化可明显提高结构阻尼,但在共固化时,黏弹性阻尼材料的阻尼性能明显下降,其原因主要是因为阻尼材料与环氧树脂基体的相互作用所致。采用预混合低树脂含量试样的阻尼性能较好。如果固化前在阻尼材料和环氧树脂之间置入聚酰亚胺隔膜,以阻止阻尼材料和环氧树脂的相互作用,其阻尼性能明显提高。加聚酰亚胺隔膜的 Avery Demmison FastTape1125 丙烯酸阻尼胶膜试样的有效阻尼因子提高了 15.7%~92.3%,加聚酰亚胺隔膜的 3M ISD112 丙烯酸阻尼胶膜的试样的有效阻尼因子则至少提高 168%。性能与先固化、再粘接的结果接近。复合材料固化温度对阻尼材料的影响不大。

M. J. Robinson 等人<sup>[31]</sup>提出了黏弹阻尼层经过穿孔后再参与共固化的改性方法。阻尼层经少量穿孔后,基体树脂可通过穿孔与玻璃纤维结合,每一个穿孔处构成一个交联点,而交联点的刚度较大。可通过改变交联点的大小和数量控制阻尼层的变形,进而控制整个复合材料的阻尼性能和弹性模量,使复合材料阻尼性能和力学强度达到理想的平衡点。

在国内,这方面的研究已有一些文献报道,主要集中在一些基础理论和分析研究。张少辉等<sup>[32,33]</sup>应用基于有限元的模态应变能法,采用国外文献<sup>[34]</sup>中复合材料黏弹阻尼梁结构及其数据,研究了共固化复合材料结构的阻尼因子;同时考虑了黏弹性阻尼材料的频率依赖性和复合材料本身对振动能量的损耗,提出了该类结构有限元模型,并进行了验证。通过简支梁模型,考察了复合材料本身的阻尼因素、柔性层的引入及其位置对复合材料黏弹阻尼结构阻尼因子的影响。结果表明:纤维增强复合材料本身的阻尼因素对结构阻尼因子的影响与铺层结构和模态有关;在保证结构刚度前提下,在邻近阻尼层的位置增加一定数目柔性层可提高结构阻尼;将黏弹阻尼层离散分布于偏离结构厚度中心适当距离的位置,有利于结构阻尼的改善。

潘利剑等<sup>[35-37]</sup>基于模态叠加法和模态应变能法,导出任意简谐激励下黏弹阻尼结构阻尼因子的计算方法,并用于分析共固化复合材料黏弹阻尼结构简谐激励下阻尼因子,该分析结果与 DMA 实测结果基本吻合。他们研究了实验温度对 0.3mm 丁腈橡胶膜和 T700 碳纤维增强 TT85 环氧树脂基共固化复合材料单向板阻尼性能的影响。结果表明:当温度介于阻尼层玻璃态区和高弹态区时,共固化复合材料阻尼因子较小,且随温度变化不大;当温度处于阻尼层黏流态区时,共固化复合材料阻尼因子迅速增加到最大值后再

减小,最大阻尼因子约为未插入黏弹阻尼层复合材料的 13 倍;共固化过程中阻尼层阻尼因子减小,共固化复合材料的阻尼性能降低;在阻尼层的黏流态区,其阻尼因子明显小于预报结果;界面阻尼的影响提高了共固化复合材料的阻尼性能,在阻尼层的玻璃态区其阻尼因子大于预报结果。

Liao 等<sup>[38]</sup>研究了中间层铺设了聚乙烯-丙烯酸酯的单向碳纤维/环氧树脂杆件的阻尼性能,结果表明结构的宏观阻尼显著增加,外层复合材料刚度的影响作用也很明显。H. J. Wang<sup>[39]</sup>等分析了中间夹黏弹性层的三层复合材料的对称及非对称圆盘的振动和阻尼特性,讨论了材料性能、半径/厚度比、面板及芯层厚度等的影响。除非选取适宜的面板和芯层的模量和厚度,厚的黏弹性芯层不一定可使复合材料圆盘有较好的阻尼性能。

余启勇等<sup>[40]</sup>采用 3M 公司的阻尼材料 ISD112、高强玻璃纤维布和环氧树脂,使用共固化工艺制备了复合材料,在 0~500Hz 范围内材料的阻尼因子 $\geq 0.03$ ,抗弯强度接近 550MPa,弯曲模量 20GPa。采用航天材料及工艺研究所的厚度 0.15mm 的新型丁腈橡胶阻尼材料,制备了穿孔阻尼层/基体树脂/玻璃布共固化复合材料,研究结果表明,阻尼胶膜穿孔面积比在 8%以内时,复合材料阻尼性能和静态力学性能都有较大变化;阻尼层穿孔面积比在 12%~30%之间变化时,有一定的阻尼效果,阻尼层面积比小于 70%时,复合材料的损耗因子略有提高,静力学性能与未加阻尼层的复合材料相当。

杨加明等<sup>[42]</sup>分析了复合材料夹杂双层黏弹性阻尼材料的对称夹层板的线性弯曲,用 Ritz 法研究各应力分量的应变能,计算分析了复合材料层的应变能以及复合结构的损耗因子。结果表明,复合材料层中的面内应变能占主要地位,黏弹性层中的  $xz$  方向和  $yz$  方向的切应力应变能较大,芯层的应变能很小。杨加明等<sup>[43]</sup>以该类材料结构的损耗因子最大化为优化目标,用改进遗传算法对其阻尼性能进行优化设计的效果明显,多变量优化设计结果优于单变量优化设计,优化后结构的损耗因子明显增大。

航天材料及工艺研究所从 20 世纪 90 年代开始开展了树脂基阻尼复合材料研究工作,制备的阻尼/结构一体化复合材料和传统的纤维复合材料相比,在相同厚度条件下,材料的阻尼因子增大近一个数量级,且各向同性层合板弯曲强度、弯曲模量和层剪强度等均有较高的保持率。采用这类高阻尼复合结构材料研制的惯性组合复合梁全面满足了技术要求,经过了飞行试验考核,实现了定型批产。

与西北工业大学合作,对阻尼/结构一体化复合材料及其典型结构的动态力学特性、数学模型、有限元分析及结构设计等方面进行了深入研究。文献[44,45]基于 Layerwise 层合理理论推导了阻尼梁单元的有限元计算程式,用于计算嵌入多阻尼层的复合阻尼结构梁。通过与 NASTRAN 软件的计算结果进行对比,证明该梁单元满足层间位移、应力连续条件并避免了剪切自锁,并且具有单元数量和节点数量少、计算精度高的优点。可应用于复杂多阻尼夹层复合结构的损耗因子分析和阻尼参数优化设计。文献[46]分别对嵌入多层或单层阻尼层的复合材料工字梁模型建立多目标优化模型,应用多目标遗传算法进行优化求解。结果表明,对于嵌入单层较厚阻尼和嵌入多层较薄阻尼的复合材料工字梁,获得的阻尼效果与动刚度损失基本相当,但对于高阻尼的方案,前者比后者的动刚度损失更大。

## 4 结构/阻尼一体化复合材料技术的应用

### 4.1 某卫星阻尼/结构一体化支架

某卫星飞轮支架采用镁铝合金铸造,盒形薄壁加筋截面设计。地面试验中发现,飞轮组件的振动响应异常,加速度放大倍数 10 倍以上,需要进行减振设计。首先等代设计了无阻尼层复合材料飞轮支架原型,应用有限元法对支架结构进行了理论分析。约束阻尼结构的原理要求阻尼层应放置在模态应变能较大处,通过分析确定结构的第一阶、第二阶模态为阻尼减振设计的关键模态。采用有限元方法,计算无阻尼层复合材料支架结构的模态应变能分布,通过对应变能分布的分析可知,结构在振动时,主要的应变能主要集中在底板和支架前盖板上,因此确定支架前盖板、底板作为阻尼层添加的位置<sup>[47,48]</sup>。

通过试验,在底板距上、下表面一定厚度处,各铺设一层阻尼胶膜;在支架前盖板上,铺设单层阻尼胶膜。振动试验结果表明,经阻尼/结构一体化处理后减振效果明显,有阻尼层碳纤维复合材料支架与铝镁合金支架相比,在可以减重 41%的同时,各测点的共振放大倍数均有大幅度的降低,最高下降了 70%,改进效果明显,完全满足了设计要求。

### 4.2 某卫星阻尼/结构一体化仪器安装支架

某卫星仪器安装支架原由铝合金加工而成,共振放大倍数达 16 倍,仪器设备容易损坏。采用阻尼/结构一体化技术设计了新的碳纤维复合材料阻尼支架,有效改善了仪器的力学环境,其最大共振放大倍数降至 8 倍左右,同时大幅度减轻了质量。

### 4.3 某型号阻尼/结构一体化仪器安装板

某型号仪器安装板原本采用铝合金制作,不仅质量重,更重要的是由于其阻尼太小,造成安装板振动力学环境恶劣,从而严重影响了其上仪器的正常使用。地面试验表明,共振放大倍数在 400Hz 时高达 25 倍,设备不能正常工作。根据安装板的结构安装方式和受力状态,提出初步设计方案,建立有限元模型,通过计算分析进行逐步优化,进而确定最终优化设计方案,按照最终优化方案制备了安装板,进行振动试验考核,根据试验结果再进行进一步优化,直至全面满足设计要求。

通过有限元方法分析各种结构因素对复合阻尼安装板阻尼性能的影响,最终确定在安装板的厚度方向铺设丁腈橡胶阻尼材料,安装 4 个减振器,采用碳纤维增强环氧树脂复合材料制造安装板。振动试验结果和有限元计算结果比较吻合,仪器上的最大放大倍数由 25 倍降至 5.9 倍,且高频响应大大降低,且质量减少了 40%,有效改善了仪器的力学环境,使该设备在恶劣的力学条件下仍然可以正常工作。

### 4.4 某惯性组合复合梁

采用阻尼/结构一体化的高阻尼碳纤维增强环氧树脂复合材料研制了惯性组合复合梁,极大地改善了惯性组合的工作环境,全面满足了技术要求,经过了多次成功飞行试验考核,已经实现了定型批产。

## 5 结束语

应用实践表明,将结构/阻尼一体化复合材料技术应用用于航天产品结构,可有效增大结构的模态阻尼比,大幅降低其共振响应,极大地改善结构上仪器设备的工作环境,对提高装备的命中精度、延长装备工作寿命、保障其工作效能有良好的效果。应当进一步开展结构/阻尼一体化复合材料技术的相关基础研究和应用研究,掌握其设计和制备技术,积极拓展其应用范围。

### 参考文献

- [1] 益小苏. 先进复合材料技术与进展[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] 赵云峰. ZN 系列黏弹性阻尼材料性能及应用[J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(2): 19—23.
- [3] 赵云峰. 高性能黏弹性阻尼材料及其应用[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(5): 1—6.
- [4] SCHULTZ A B, TSAI S W. Dynamic moduli and damping ratio in fiber-reforced composites [J]. J Composite Materials, 1968, 2: 368—379.
- [5] HASHIN Z. Complex moduli of viscoelastic composites; I. Gen-

- eral theory and application to particulate composites[J]. International Journal of Solids and Structure, 1970, 6: 539—552.
- [6] ADAMS R D, MAO F, FLOOD R J L, et al. The dynamic properties of unidirectional carbon and glass fibre-reforced plastics in torsion and flexure[J]. J Composite Materials, 1969, 3: 594—603.
- [7] ADAMS R D, BACON D G C. Measurement of flexureal dynamic capacity and dynamic Young's modulus of metals and reforced plastic[J]. J Physics D: Applied Physics, 1973, 6: 27—41.
- [8] ADAMS R D, Bacon D G C. Effect of fibre-orientation and laminate geometry on properties of CFRP[J]. J Composite Materials, 1973, 7: 402—428.
- [9] CHANDRA R, SINGH S P, GUPTA K. Damping studies in fiber-reforced composites-a review [J]. Composite Structures, 1999, 46: 41—51.
- [10] 任勇生, 刘立厚. 纤维增强复合材料结构阻尼研究进展[J]. 力学与实践, 2004, 26(1): 9—16.
- [11] 张少辉, 陈花玲. 国外纤维增强树脂基复合材料阻尼研究综述[J]. 航空材料学报, 2002, 22(1): 58—62.
- [12] 张少辉, 陈花玲, 梁天锡. 纤维增强树脂基复合材料阻尼特性的数值模拟[J]. 航空材料学报, 2004, 24(3): 10—14.
- [13] CREMA L B, CASTELLANI A, DRAGO U. Damping characteristics of fabric and laminated Kevlar composites[J]. Composites, 1989, 20(6): 593—596.
- [14] GRANT I D, LOWE A, THOMAS T S. Good vibration, the science and application of intrinsically damped composite materials[J]. Composite Structures, 1997, 38(14): 581—587.
- [15] RIKARDS R, CHATE A, KORJAKIN A. Vibration and damping analysis of laminated composite plates by the finite element method[J]. Engineering Computation, 1995, 12: 61—74.
- [16] MANTENA P R, GIBSON R F, HWANG S J. Optimal constrained viscoelastic tape lengths for maximizing damping in laminated composites[J]. AIAA Journal, 1991, 29: 1678—1685.
- [17] MANTENA P R, GIBSON R F. Dynamic mechanical properties of hybrid polyethylene/graphite composites [A]. Proceeding of 22<sup>nd</sup> International SAMPE Technical Conference[C]. CA: Covina, 1990. 370—382.
- [18] FINEGAN I C, GIBSON R F. Analytical modeling of damping at micromechanical level in polymer composites reforced with coated fibers[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60: 1077—1084.
- [19] ROTZ C A, BARRETT D J. Cocured damping layers in composite structures[A]. Proceeding of 23<sup>rd</sup> International SAMPE Technical Conference[C]. CA: Covina, 1991. 352—363.
- [20] SARAVANOS D A, PEREIRA J M. Effects of interply damping layers on the dynamic characteristics of composite plates [J]. AIAA Journal, 1992, 30(12): 2906—2913.
- [21] SARAVANOS D A. Dynamic characteristics of specially composite structures with embedded damping layers [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1995, 117: 62—69.
- [22] BERTHELOT J-M. Damping analysis of composite materials and structures [J]. Composite Structures, 2008, 85: 189—204.
- [23] SOOVERE J, DRAKE M L. Aerospace Structures Technology Damping Design Guide[R]. AD-A178313, 1985.
- [24] BRONOWICKI A J, HENRY D P. Analysis, optimization, fabrication and test of composite shells with embedded viscoelastic layers[A]. Proceedings of Damping'89 Conference[C]. AFW-

- AL-TR-89-3116; 1989. GCA1-21.
- [25] SCHMIDT K, CURTIS F, MUZIANI E. Relsat damped equipment panels fabrication[A]. Proceedings of Damping'89 Conference [C]. AFWAL-TR-89-3116; 1989. JBD1-18.
- [26] BARRETT D J. Damped composite structures[J]. Composite Structures, 1991, 18: 283-294.
- [27] ROTZ C A, BARRETT D J. Cocured damping layers in composite structures[J]. SAMPE Quarterly, 1991, 23(2): 43-47.
- [28] RAO M D, HE S. Dynamic analysis and design of laminated composite beam with multiple damping layers[J]. AIAA Journal, 1993, 31: 736-745.
- [29] NAPOLITANO K L. A comparison of two cocured damped composite torsion shafts[J]. Composite Structures, 1998, 43: 115-125.
- [30] BIGGERSTAFF J M. Vibrational damping of composite materials[D]. San Diego: University of California San Diego, 2006.
- [31] ROBINSON M J, KOOSMATKA J B. Embedding viscoelastic damping materials in low-cost VARTM composite structures [A]. Proceedings of SPIE[C]. 2005, 5760: 349-360.
- [32] 张少辉, 陈花玲. 共固化复合材料黏弹阻尼结构的损耗因子研究[J]. 航空材料学报, 2005, 25(1): 53-57.
- [33] ZHANG Shao-hui, CHEN Hua-ling. A study on the damping characteristics of laminated composite with integral viscoelastic layers[J]. Composite Structures, 2006, 74: 63-69.
- [34] SUZUKI K, KAGEYAMA K, KIMPARA I, et al. Vibration and damping prediction of laminates with constrained viscoelastic layers-numerical analysis by a multilayer higher-order-deformable finite element and experimental observations [J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2003, 10(1): 43-75.
- [35] 潘利剑, 张博明, 戴福洪. 简谐激励下共固化复合材料黏弹阻尼结构的损耗因子研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 57-60.
- [36] 潘利剑, 张博明, 戴福洪. 黏弹阻尼层共固化复合材料不同温度下的阻尼性能[J]. 复合材料学报, 2008, 25(1): 168-172.
- [37] PAN Li-jian, ZHANG Bo-ming. A new method for the determi-

\*\*\*\*\*  
(上接第 85 页)

(2)对于预拉伸应变试样,在 800℃时断口组织主要为铁素体,晶界处形成网状先共析铁素体,造成塑性下降。在 900℃时,断口组织主要为贝氏体、针状铁素体以及大量细小的 Nb 碳氮化物,出现塑性低谷。实验结果表明,预拉伸加速铌碳氮化物沿晶内和晶界析出,这是在 800~920℃的温度区间 Nb 微合金化 09MnNiDR 低温钢高温塑性恶化的主要原因。

## 参考文献

- [1] 翁宇庆. 超细晶钢—钢的组织细化理论与控制技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [2] 杨春楣, 胡盼苏, 辛义德. 含 Nb、V 高强度钢强韧化机理研究[J]. 重庆大学学报, 1998, 21(6): 73-78.
- [3] 杨菊娣, 殷碧群, 解宝荣. Nb 微合金化钢连铸坯表面裂纹[J]. 钢铁研究学报, 1990, 2(3): 46-51.
- [4] 王新华, 刘新宇, 吕文景, 等. 含 Nb、V、Ti 钢连铸坯中碳、氮化物的析出及钢的高温塑性[J]. 钢铁研究学报, 1998, 10(6): 32-36.
- [5] MINTZ B, YUE S, JONAS J J. Hot ductility of steels and its re-

- nation of damping in cocured composite laminates with embedded viscoelastic layer[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 319: 822-831.
- [38] LIAO F S, SU A C, HSU T C. Vibration damping of interleaved carbon fiber-epoxy composite beams[J]. Journal of Composite Materials, 1994, 28(18): 1840-1854.
- [39] WANG H J, CHEN L W. Vibration and damping analysis of a three-layered composite annular plate with a viscoelastic mid-layer [J]. Composite Structures, 2002, 58: 563-570.
- [40] 余启勇, 马玉璞, 郭万涛, 等. 结构阻尼复合材料及其研究进展[J]. 材料工程, 2007, (增刊 1): 253-258.
- [41] 余启勇, 郭万涛, 马玉璞, 等. FRP 的共固化阻尼改性[J]. 材料工程, 2009, (增刊 2): 20-24.
- [42] 杨加明, 钟小丹, 赵艳影. 复合材料夹杂双层黏弹性材料的应变能和阻尼性能分析[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 212-216.
- [43] 杨加明, 张义长, 吴丽娟. 多层黏弹性复合材料结构阻尼性能优化设计[J]. 航空学报, 2011, 32(2): 265-270.
- [44] 张醒, 徐超, 李莉, 等. 复合阻尼结构梁动力特性分析[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(6): 11-14.
- [45] 徐超, 张醒, 李瑞杰, 等. 多黏弹性胶膜夹层约束阻尼梁损耗因子分析[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 458-462.
- [46] 林松, 徐超, 吴斌. 嵌入多层黏弹性胶膜复合材料阻尼工字梁的多目标设计优化[J]. 计算机辅助工程, 2010, 19(4): 44-49.
- [47] 徐超, 李瑞杰, 游少雄. 卫星飞轮支架的共固化阻尼减振设计[J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 907-910.
- [48] 徐超, 田伟. 卫星飞轮安装支架的黏弹性阻尼减振设计[J]. 噪声与振动控制, 2010, 30(3): 1-4.

收稿日期: 2011-11-01; 修订日期: 2012-06-07

作者简介: 赵云峰(1964—), 男, 研究员, 工学博士, 主要从事高分子材料、复合材料及其应用研究工作, 联系地址: 北京 9200 信箱 73 分箱 (100076), E-mail: zhaoyf@yahoo. cn

lationship to the problem of transverse cracking during continuous casting [J]. International Materials Reviews, 1991, 36: 187-220.

- [6] 柳学胜, 李玉清, 钟松. Cr21Mn9Ni4N 奥氏体耐热钢晶界碳化物对高温塑性的影响 [J]. 材料科学与工艺, 1997, 5(4): 125-128.
- [7] 雍岐龙, 马鸣图, 吴宝榕. 微合金钢——物理和力学冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989. 210.
- [8] YUAN Z X, SONG S H, LIU J, et al. Role of pre-deformation in age hardening of a niobium-microalloyed steel [J]. ISIJ International, 2005, 45: 388-391.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50734004)

收稿日期: 2011-11-09; 修订日期: 2012-08-15

作者简介: 李建华(1966—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事钢铁材料的检测、分析及新产品开发研究, 联系地址: 武汉市青山区冶金大道 28 号武钢研究院(430080), E-mail: jianhua-li@163. com

通讯作者: 吴开明(1966—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事钢铁材料相变、钢铁材料设计与焊接性研究, 联系地址: 武汉市青山区武汉科技大学 8# 信箱(430081), E-mail: wukaiming@wust. edu. cn; wukaiming2000@yahoo. com