

# 钨纤维增强铜基复合材料构造木基防弹板的机理研究

吴哲, 杨春梅, 张杨\*, 马岩, 刘千军, 袁伟杰, 邓涛 (东北林业大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要** 对防弹板的研究现状进行了论述, 首次提出将钨纤维增强铜基复合材料与微米木纤维压制的板材通过胶接的方式进行复合制成装饰防弹板的理论。对钨纤维增强铜基复合材料的制备工艺进行了研究, 并分别对制备的钨纤维增强铜基复合材料和微米木纤维板进行微观组织观察, 发现钨纤维增强铜基复合材料界面结合良好, 微米木纤维板中的纤维在胶接的作用下呈现有利于防弹的网状排布结构。随后对防弹板中的钨纤维增强铜基复合材料进行不同应变率条件下的压缩试验, 结果显示钨纤维增强铜基复合材料具有明显的应变率敏感性, 在  $1\ 600\ \text{s}^{-1}$  压缩时材料的流动应力达到  $2\ 350\ \text{MPa}$ , 同时发现在动态压缩的过程中复合材料还出现了应变硬化和应变软化现象。研究结果表明钨纤维增强铜基复合材料具有出色的动态力学性能, 利用钨纤维增强铜基复合材料构造木基装饰防弹板具有可行性。

**关键词** 微米木纤维; 复合材料; 装饰防弹板; 力学性能

**中图分类号** S784 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)28-11407-03

## Investigation of Mechanism of Bulletproof Panel Fabricated with Wood and Tungsten Fiber Reinforced Copper Matrix Composites

WU Zhe et al (College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040)

**Abstract** The research status of bulletproof panel was discussed, and the theory that decorating bulletproof panel was prepared with tungsten fiber reinforced copper matrix composites and panel of micron wood fibers by way of gluing was first introduced. Then the preparing technique of tungsten fiber reinforced copper matrix composites was researched, and the microstructure of the composites and micrometer wood fibers were observed. The results indicated that the interface of the composites was very well and the spatial distribution structure of micron wood fibers with gluing was netty, and the structure of wood fibers was favour of defending bullets. Compression tests under different strain of tungsten fiber reinforced copper matrix composites were performed, and it was shown that the composites appeared strain rate sensitivity, and the flow stress of materials achieved  $2\ 350\ \text{MPa}$  under  $1\ 600\ \text{s}^{-1}$ , as well as strain-hardening and strain-softening occurred during the process of dynamic compression. The research showed tungsten fiber reinforced copper matrix composites owned excellent mechanical properties, and it is viable that decorating bulletproof panel was prepared with wood and tungsten fiber reinforced copper matrix composites.

**Key words** Micron wood fiber; Composites; Decorating bulletproof panel; Mechanical property

目前防弹问题研究主要集中在防弹背心、防弹头盔等人员防护装备以及装甲车、坦克和舰船上的防穿甲弹装备<sup>[1-3]</sup>, 而对国民经济发展中需求日益增长的装饰防弹材料研究甚少, 比如在银行、金店、珠宝行等可能发生持枪盗抢的场所中装饰材料既要有一定的防弹性能, 同时又要兼顾美观。装饰防弹材料在该领域具有广阔的应用空间, 而国内外对该领域的研究还是空白, 因此迫切需要开展装饰防弹材料的研究。

该研究拟采用钨纤维增强铜基复合材料作为防弹板的防弹抗冲击面板, 同时利用木制品的良好装饰性, 拟采用微米木丝压制的板材作为防弹板的外层装饰板, 将二者通过胶接的方式复合制成装饰防弹板。由于微米木丝具有高强度和良好的柔韧性, 因此用其压制的板材具有高的强韧性<sup>[4]</sup>; 同时由于用微米木丝压制的板材还具有木材所特有的高压压缩变形能力和吸能特性, 因此将其用于防弹板的外层, 还可以起到很好的撞击吸能和阻弹作用, 使微米木丝压制的板材兼具防弹和装饰功能。根据装饰防弹板的应用特点, 笔者就防弹抗冲击面板材料——钨纤维增强铜基复合

材料的制备和动态力学性能进行研究, 同时就钨纤维增强铜基复合材料与微米木纤维复合制成装饰防弹材料的设计和工艺问题进行讨论, 并就装饰防弹板的未来发展提出进一步的设想。

### 1 防弹板与钨纤维增强铜基复合材料的研究现状

历史上, 竹子、藤子、丝绸、皮革等都曾被用作过防护材料。近一个世纪以来, 随着枪械技术的提高, 防弹材料从铝、普通钢、防弹均质钢, 发展到高强度钢、高硬度钢、钛合金等, 随后又出现了防弹陶瓷和纤维防弹复合材料<sup>[5-6]</sup>。纤维复合材料综合了增强材料和基体各自的优点, 具有极为优异的性能, 是发展最快、最有前途的用于防弹的材料。随着技术的不断成熟, 复合材料开始在防护过程中被大量使用。子弹与复合材料作用过程中发生侵入, 表现出了多种不同的破坏模式, 如纤维的拉伸断裂、层合板的分层、纤维和树脂的脱粘及材料产生的背凸等。弹体动能就是在这些破坏中被逐渐消耗, 从而达到了防弹的效果<sup>[7]</sup>。

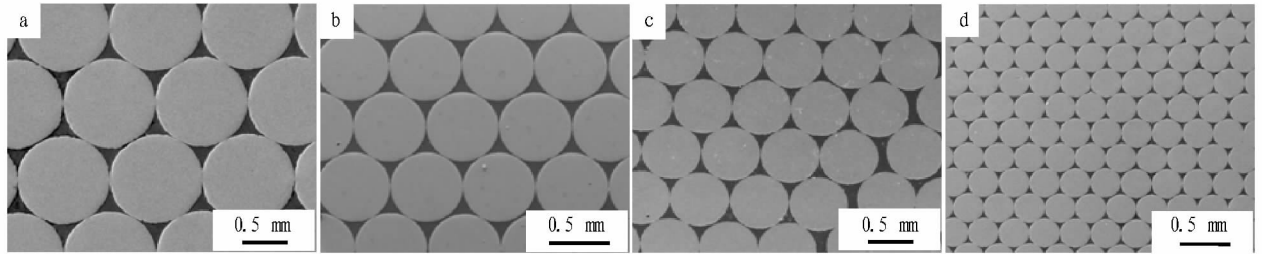
现阶段纤维复合材料中纤维的选择主要有芳纶纤维 (Kevlar)、碳纤维、低密度超高分子量聚乙烯纤维以及高强度玻璃纤维, 这些纤维制成的防弹复合材料主要用于防弹背心、防弹头盔等人员防护装备上<sup>[8]</sup>。而对于特殊行业中的装饰防弹材料采用何种纤维作为防弹增强相还没有相关的报道, 为此该研究提出采用钨纤维作为装饰防弹纤维复合材料中的纤维增强相。采用钨纤维作为纤维增强相是由于其具有高密度、高熔点、优异的力学性能等优点<sup>[9]</sup>, 而且钨丝还可以根据需要被拉长, 并可被任意编织, 因此非常适合用于制备大尺寸、高强度的阻弹增强相。Herrmann

**基金项目** 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (DL11BB31); 东北林业大学大学生创新训练项目; 国家自然科学基金项目 (31070500、31170517、31200434); 教育部博士点基金新教师类 (20120062120009); 中国博士后科学基金 (2013M-531007)。

**作者简介** 吴哲 (1980 -), 男, 黑龙江尚志人, 讲师, 博士, 从事木材加工研究, E-mail: wuzhepersonal@126.com。\* 通讯作者, 讲师, 博士, 研究方向: 模拟仿真, E-mail: zhangyangmath@163.com。

**收稿日期** 2013-08-28

等人<sup>[10]</sup>曾制备出钨纤维增强铜基复合材料,并利用该材料良好的高温力学性能,将其应用于核反应堆的防护装置。国内哈尔滨工业大学学者也曾制备出了钨纤维增强铜基复合材料,并对该复合材料的动态力学性能和断裂特性进行了研究<sup>[11]</sup>,说明该复合材料具有出色的动态力学性能。这都证明了钨纤维增强铜基复合材料在防弹板的应用中有着巨大的潜力,因此笔者选用钨纤维作为装饰防弹板材料中的纤维增强相,进而制备出钨纤维增强铜基复合材料,并对其组织和性能进行研究。



注:a.1 mm;b.0.5 mm;c.0.25 mm;d.0.1 mm。

图1 钨纤维增强铜基复合材料的电镜扫描图

图1为制备的4种钨丝直径的单向式钨纤维增强铜基复合材料的扫描照片,钨丝直径分别为1 mm、0.5 mm、0.25 mm和0.1 mm,钨丝体积分数为80%,可以看到在复合材料中钨丝排布均匀且没有宏观的铸造缺陷,钨丝和基体铜复合得很好,这说明复合材料的制备工艺还是比较合理的。由于复合材料中钨丝排布均匀,可以使复合材料在受外力作用时均匀承受载荷,因此可以期望复合材料具有较高的力学性能。

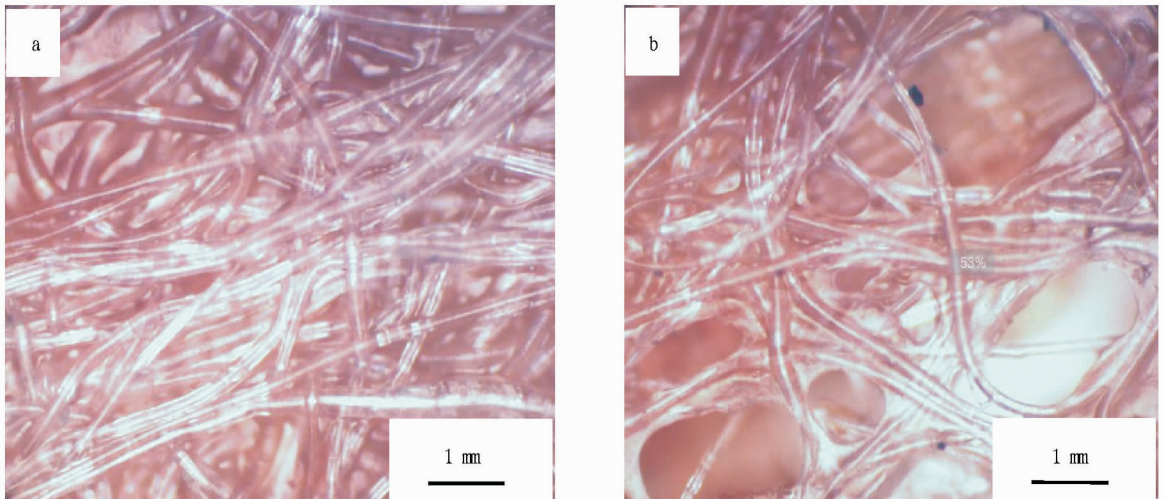
微米木纤维板是通过热压合的方式在初始状态下的微

## 2 装饰防弹板的制备及组织观察

采用挤压铸造法完成钨纤维增强铜基复合材料的制备,挤压铸造法(Squeeze casting)也叫压力浸渗法(Pressure infiltration),它的工艺是:首先按照零件的形状制备出增强体预制件,然后再将预制件放入铸型,在重力或一定附加压力作用下,使液态金属渗入预制件进而制备出材料<sup>[12]</sup>。由于该方法工艺简单,制品价格相对低廉,因此适合于规模化的工业性生产。目前哈尔滨工业大学已成功运用挤压铸造法制备出多种金属基复合材料<sup>[11]</sup>。

米级木纤维丝中压入胶接剂,随后固化而制成的。图2a为初始状态下的微米木纤维微观组织图片,图2b为通过加胶浸渗热压合制成的微米木纤维板的微观组织图片。可以发现制成木纤维板之后,木纤维之间已经通过胶接的方式形成了立体的网状结构,该结构更有利于阻止弹体的侵入。

分别完成钨纤维增强铜基复合材料板和微米木纤维板的制备后,再将钨纤维增强铜基复合材料板与微米木纤维板通过胶接的方式复合在一起,进而制备出木基复合材料装饰防弹板。



注:a.初始状态;b.加胶热压合后。

图2 微米木纤维材料的微观组织

## 3 高应变率下钨纤维增强铜基复合材料的动态响应行为

子弹在侵彻防弹板时,整个过程就是一个高应变率动态压缩过程,因此研究防弹板在压缩状态下的动态响应行为对了解防弹板的抗弹性具有重要的意义。通常,复合材料的力学性能与基体合金和增强相的匹配相关。一方面,选择高强

度的基体合金和增强相来获得高的强度;另一方面,也希望材料具有高的应变率敏感性,可以在高应变率冲击下获得高的流变应力。为此笔者研究了阻弹板中起主要抗冲击作用的钨纤维增强铜基复合材料的动态力学性能和应变率敏感性。

**3.1 动态力学性能** 采用万能力学试验机进行钨纤维增强铜基复合材料的准静态压缩试验,霍普金森压杆进行动态压缩试验。图3为钨纤维增强铜基复合材料在常温不同应变率下压缩的应力—应变曲线,试验在4个应变率条件下对试样进行了压缩,分别是 $0.0002\text{ s}^{-1}$ 、 $800\text{ s}^{-1}$ 、 $1200\text{ s}^{-1}$ 和 $1600\text{ s}^{-1}$ 。从图3可以看到,随着应变率的增加,复合材料的流动应力也随之增加。对复合材料在不同应变率压缩后,应变为6%时的流动应力进行比较,当应变率为 $0.0002\text{ s}^{-1}$ 时,材料的流动应力达到了约1750 MPa;当应变率为 $800\text{ s}^{-1}$ 时,材料的流动应力达到了约2250 MPa;当应变率为 $1200\text{ s}^{-1}$ 时,材料的流动应力达到了约2280 MPa;在更高应变率 $1600\text{ s}^{-1}$ 压缩时,材料的流动应力达到了约2350 MPa。

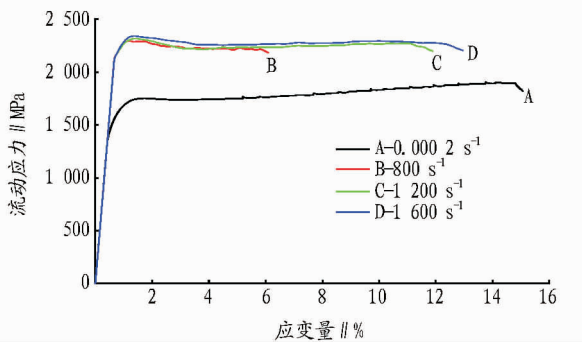


图3 钨纤维增强铜基复合材料的压缩应力—应变曲线

**3.2 应变率敏感性** 从图3对比的结果可以看到钨纤维增强铜基复合材料具有明显的应变率敏感性,在应变率为 $800\text{ s}^{-1}$ 、 $1200\text{ s}^{-1}$ 和 $1600\text{ s}^{-1}$ 下压缩复合材料的流动应力比在应变率为 $0.0002\text{ s}^{-1}$ 下压缩的结果有明显的增大,但在应变率为 $800\text{ s}^{-1}$ 、 $1200\text{ s}^{-1}$ 、 $1600\text{ s}^{-1}$ 压缩时复合材料的流动应力相差不大,主要原因是应变率的变化太小,仔细观察可以发现流动应力的总体变化趋势是随着应变率的升高而升高的,复合材料表现出明显的应变率敏感性。该研究采用应变率敏感系数来评价这种材料的应变率敏感性,其表达式为<sup>[13]</sup>:

$$R = \frac{\sigma_d - \sigma_s}{\sigma_s} \frac{1}{\ln(\delta\dot{\epsilon}_d / \delta\dot{\epsilon}_s)} \quad (1)$$

其中, $R$ 为应变率敏感系数; $\sigma$ 和 $\delta\dot{\epsilon}$ 分别表示流变应力和应变率。下角标 $d$ 和 $s$ 分别表示高应变率和准静态压缩。采用应变率为 $0.0002\text{ s}^{-1}$ 准静态压缩和 $1600\text{ s}^{-1}$ 动态压缩时塑性变形阶段的流动应力来计算复合材料的应变率敏感性,根据式(1)可以得到常温下复合材料的应变率敏感系数,计算结果显示复合材料的应变率敏感系数为0.175。试验中所用的基体铜合金应变率敏感性与纯铜的应变率敏感性相近,而纯铜的应变率敏感性随晶粒尺度的改变而发生变化,一般在0.01~0.04之间<sup>[14]</sup>,说明复合材料的应变率敏感性主要来自于高体积分数的钨丝。

**3.3 应变硬化与应变软化** 从图3中对比的结果可以看到,在钨纤维增强铜基复合材料中也有一定的应变硬化存在,但随着应变率的增大,应变硬化的趋势减小。复合材料在应变率为 $0.0002\text{ s}^{-1}$ 准静态压缩时还可以看到明显的应变硬化,但是当应变率达到 $1600\text{ s}^{-1}$ ,应变达到4%时复合材料的应力—应变

曲线趋势几乎为平台,这是因为在准静态载荷作用下,产生的热大部分都从变形慢的区域传出去了,因而试件仍然保持等温状态,然而当变形非常迅速时,比如在高速压缩或高速撞击时,这个过程就近似于绝热了,由于没有足够的时间去散开和传导塑性变形所产生的热量,试样内温度就会急剧上升,导致材料发生热软化从而使应变硬化效果降低,导致复合材料在高应变率下压缩的应力—应变曲线比较平直。

材料在高应变率冲击条件下是一个绝热温升的过程,复合材料在高应变率冲击下发生熔化区域的绝热温升可以按照公式(2)计算<sup>[15]</sup>:

$$\Delta T = \int_0^{\epsilon_f} \frac{\beta\sigma}{\rho C_m} d\epsilon \quad (2)$$

其中 $\sigma$ 为材料的流动应力; $\epsilon_f$ 为失效应变; $\beta$ 为塑性变形功热转化率; $\rho$ 为材料密度; $C_m$ 为比热。

#### 4 存在的问题及发展趋势

研究结果证明钨纤维增强铜基复合材料具有优异的力学性能,可以预见用其构建的钨纤维增强铜基复合材料木基装饰防弹板具有很大的应用潜力。但应用钨纤维增强铜基复合材料木基防弹板还需要解决许多问题,如:①钨纤维增强铜基复合材料中钨丝的最优防弹排布结构。②防弹板中钨纤维增强铜基复合材料与微米木纤维板各自的厚度设定和结构设计。③防弹板中钨纤维增强铜基复合材料与微米木纤维板胶接的工艺。④多重复合结构防弹板的防弹机理。

对于木基装饰防弹板的研究虽然存在诸多问题,但由于木基装饰防弹板兼具防弹和装饰的双重功能,注定其在银行等特殊行业会有广阔的应用前景。随着对木基装饰防弹板研究的深入以及对该材料应用领域的拓展,这类材料的应用价值还会得到进一步体现,未来木基装饰防弹材料以及木基装饰防冲击材料在防弹领域、汽车保险杠、高速公路防撞栏以及相关的撞击防护吸能领域都会有广阔的应用空间。

#### 5 结论

该文首次提出将钨纤维增强铜基复合材料与微米木纤维压制的板材进行复合制成装饰防弹板的理论。在研究中发现微米木纤维板中的纤维在胶接的作用下呈现有利于防弹的网状排布结构;同时发现用于制备装饰防弹板的钨纤维增强铜基复合材料具有明显的应变率敏感性,在 $1600\text{ s}^{-1}$ 压缩时材料的流动应力达到2350 MPa。该研究结果说明钨纤维增强铜基复合材料具有出色的动态力学性能,利用钨纤维增强铜基复合材料构造木基装饰防弹板具有可行性,并且该材料具有广阔的应用空间。

#### 参考文献

- [1] 吕海荣,韩大伟.高性能纤维在软质防弹服材料中的应用[J].防护装备技术研究,2012(2):13-15.
- [2] 邱桂杰,杨洪忠,赵俊山,等.多功能/多层次结构防弹复合材料的研究进展[J].中国有色金属学报,2005,15(2):145-149.
- [3] 刘贻尧,王伯初,赵虎城,等.防弹复合材料的研究进展[J].广西科学,2000,7(2):90-92.
- [4] 马岩.纳微米科学与技术在木材工业的应用前景展望[J].林业科学,2001,37(6):109-112.
- [5] 张佐光,梁志勇,张大兴,等.防弹复合材料[J].航空制造工程,1997(4):9-11.

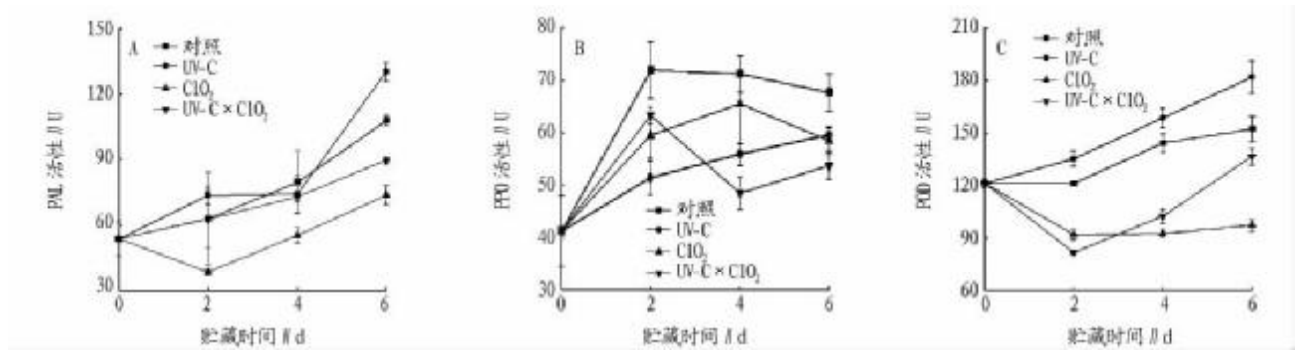


图3 UV-C 结合 ClO<sub>2</sub> 处理对鲜切毛竹笋 PAL (A)、PPO (B)和 POD (C)活性的影响

显著抑制香菇丙二醛(MDA)含量的上升<sup>[15]</sup>。杜金华等报道,低浓度 ClO<sub>2</sub> 能够显著抑制青椒的呼吸强度,降低丙二醛积累<sup>[16]</sup>。

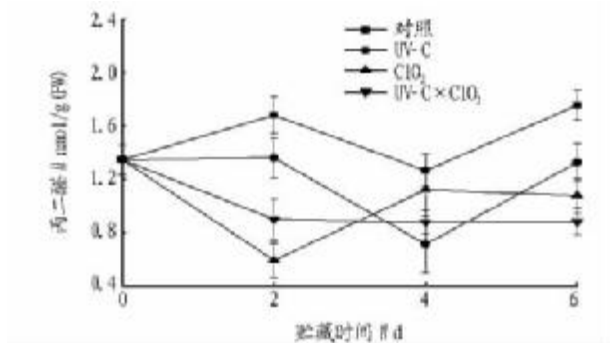


图4 UV-C 结合 ClO<sub>2</sub> 处理对鲜切毛竹笋丙二醛含量的影响

### 3 结论

UV-C 结合 ClO<sub>2</sub> 处理能够有效抑制鲜切毛竹笋 PAL、PPO 和 POD 活性,减少组织中木质素的合成和丙二醛的积累,延缓组织老化;同时,还能减少毛竹笋的水分损失,保持较好的感官品质。

### 参考文献

[1] MARQUENIE D,GEERAE RD A H,LAMMERTYN J,et al. Combinations of pulsed white light and UV-C or mild heat treatment to inactivate conidia of *Botrytis cinerea* and *Monilia fructigena* [J]. International Journal of Food Microbiology,2003,85:185-196.

[6] 邱桂杰,王勇祥,杨洪忠,等. 新型复合防弹装甲结构材料的研究[J]. 纤维复合材料,2005(2):12-15.

[7] 陈磊,徐志伟,李嘉禄,等. 防弹复合材料结构及其防弹机理[J]. 材料工程,2010(11):94-100.

[8] 郑震,杨年慈,施楣梧,等. 硬质防弹纤维复合材料的研究进展[J]. 材料科学与工程学报,2005,23(6):905-910.

[9] SCHADE P. 100 Years of doped tungsten wire [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials,2010,28(6):648-660.

[10] HERRMANN A,SCHMID K,BALDEN M,et al. Interfacial optimization of tungsten fibre-reinforced copper for high-temperature heat sink material for fusion application [J]. Journal of Nuclear Materials,2009,386/388:453-456.

[11] WU Z,KANG P C,WU G H,et al. The effect of interface modification on

[2] 荣瑞芬,冯双庆. 不同剂量短波紫外线照射对采后番茄后熟和发病的影响[J]. 中国农业大学学报,2006,6(1):68-73.

[3] 荣瑞芬,郭莹,李京霞,等. UV-C 处理采后桃防御酶活性与贮藏效果研究[J]. 食品科学,2007,28(8):505-509.

[4] 谭伟,杜金华. 二氧化氯在食品行业中的应用[J]. 中国食品与营养,2006(5):26-28.

[5] 钟梅,吴斌,王吉德,等. 二氧化氯气体对红提与巨峰葡萄采后呼吸速率、品质及货架期的影响[J]. 食品科技,2009,34(3):64-67.

[6] 胡双启,晋日亚. 气体二氧化氯对水果的杀菌作用及其应用前景展望[J]. 中国安全科学学报,2007,17(3):153-155.

[7] 李成,章文霞. 稳定性二氧化氯处理对杏保鲜的影响研究[J]. 太原科技,2007(7):82-83.

[8] 周运华,张愨. 鲜切竹笋的保鲜研究[J]. 保鲜与加工,2004(4):27-29.

[9] 曹健康,姜微波,赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京:中国轻工业出版社,2007.

[10] MORRISON I M. A semi-micro methods for the determination of lignin and its use in predicting the digestibility of forage crops [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,1972,23:455-463.

[11] 李天路,史载锋,梅平波. 紫外照射对莲雾贮藏保鲜效果的影响[J]. 安徽农业科学,2009,37(21):10136-10138.

[12] 陈晓亚. 植物次生代谢及调控[M]//余叔文,汤章城. 植物生理与分子生物学. 2版. 北京:科学出版社,1998.

[13] CAMPBELL M M,RONALD R. Variation in lignin content and composition [J]. Plant Physiology,1996,110(1):3-13.

[14] LUO Z S,XU X L,CAI Z Z,et al. Effects of ethylene and 1-methylcyclopropene (1-MCP) on lignification of postharvest bamboo shoot [J]. Food Chemistry,2007,105(2):521-527.

[15] 姜天甲,陆仙英,蒋振晖,等. 短波紫外线处理对香菇采后品质的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(2):108-112.

[16] 杜金华,傅茂润,李苗苗,等. 二氧化氯对青椒采后生理和贮藏品质的影响[J]. 中国农业科学,2006,39(6):1215-1219.

(上接第 11409 页)

[6] 邱桂杰,王勇祥,杨洪忠,等. 新型复合防弹装甲结构材料的研究[J]. 纤维复合材料,2005(2):12-15.

[7] 陈磊,徐志伟,李嘉禄,等. 防弹复合材料结构及其防弹机理[J]. 材料工程,2010(11):94-100.

[8] 郑震,杨年慈,施楣梧,等. 硬质防弹纤维复合材料的研究进展[J]. 材料科学与工程学报,2005,23(6):905-910.

[9] SCHADE P. 100 Years of doped tungsten wire [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials,2010,28(6):648-660.

[10] HERRMANN A,SCHMID K,BALDEN M,et al. Interfacial optimization of tungsten fibre-reinforced copper for high-temperature heat sink material for fusion application [J]. Journal of Nuclear Materials,2009,386/388:453-456.

[11] WU Z,KANG P C,WU G H,et al. The effect of interface modification on

fracture behavior of tungsten fiber reinforced copper matrix composites [J]. Materials Science and Engineering:A,2012,536:45-48.

[12] YONG M S,CLEGG A J. Process optimizations for a squeeze cast magnesium alloy metal matrix composite [J]. Journal of Materials Processing Technology,2005,168(2):262-269.

[13] GHOSH A K. On the measurement of strain-rate sensitivity for deformation mechanism in conventional and ultra-fine grain alloys [J]. Materials Science and Engineering:A,2007,463(1/2):36-40.

[14] WEI Q. Strain rate effects in the ultrafine grain and nanocrystalline regimes - influence on some constitutive responses [J]. Journal of Materials Science,2007,42:1709-1727.

[15] 汪冰峰. 钛及钛合金中绝热剪切带微观结构演化及其集体行为研究 [D]. 长沙:中南大学,2006.