

激光熔覆仿生非光滑表面磨粒磨损性能的研究

Research on Abrasive Wear Properties of Bionic Non-smooth Coating by Laser Cladding

刘 敬,高晓丽,徐 杨,陈晓敏,凌 刚

(中国农业大学 工学院,北京 100083)

LIU Jing,GAO Xiao-li,XU Yang,CHEN Xiao-min,LING Gang

(College of Engineering,China Agricultural University,Beijing 100083,China)

摘要:以鲨鱼盾鳞表面非光滑形态为模型,制备了由镍基合金粉末熔覆层和 45 钢基体构成的起伏型、平面型仿生非光滑试样,并进行磨粒磨损实验和磨痕观察,分析磨损机理。结果表明:平面型涂层耐磨性明显优于起伏型涂层;设计和制备耐磨性良好涂层的判据是几何硬化率(GHR)不小于 50%。起伏型涂层的磨损机理:硬化带表面自身非光滑磨损机制与磨头对硬化带的冲击磨损机制共同作用。平面型涂层的磨损机理:硬化带表面自身非光滑磨损机制与表面几何形貌非光滑磨损机制相结合。

关键词:激光熔覆;仿生非光滑涂层;磨粒磨损;开沟圆盘

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.12.006

中图分类号: TG174.453 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2013)12-0032-05

Abstract: On the basis of the morphology of organism's surface, bionic non-smooth coatings of wave and plane-type on 45 steel were prepared by laser cladding. The abrasive wear test was carried out with abrasion tester, and the wear scar was observed. The wear mechanism was analyzed. The results show that the wear resistance of plane type coating is remarkably better than that of the wave type. The criterion for designing and preparing a good wear-resistant coating is: geometric hardening rate (GHR) was no less than 50%. The wear mechanism of wave-type coating is that the hardening belt's non-smooth surface and the impact of the grinding head function together. The wear mechanism of flat-type coating is the combination of the wear mechanisms of the hardening belt's non-smooth surface and its non-smooth geometric surface morphology.

Key words: laser cladding; bionic non-smooth coating; abrasive wear; disc opener

开沟圆盘是免耕播种机的关键部件,工作过程中承受剧烈的磨粒磨损。因此,开沟圆盘除了需要足够的强度和韧性外还需要良好的耐磨性^[1-4]。摩擦学和仿生学的相关研究表明^[5-8],工件表面并非越光滑越耐磨,通过模仿生物体表形貌制备一定非光滑形态的表面往往更耐磨。鲨鱼皮肤上布满了许多盾鳞,这些鳞片呈齿状样突起,顺着头尾方向,每个鳞片上有 3~5 条径向肋条,研究表明通过模仿鲨鱼盾鳞体表形态制备硬韧结合的肋条型仿生非光滑表面能有效地起到减黏降阻的作用^[9-13]。

激光熔覆技术是近年发展起来的一种新的表面工程技术,可根据应用需要调整熔覆层的成分、厚度等参数,具有操作简单、工艺灵活等优点^[14-16]。因此,采用激光熔覆技术制备仿生涂层,并开展磨粒磨损性能的研究,将对研制高质量的开沟圆盘具有理论和工程意

义。本工作根据鲨鱼盾鳞模型,采用激光熔覆方法制备系列起伏型和平面型的仿生非光滑耐磨涂层,进行了磨损实验和磨痕观察,并分析了磨损机理。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

基体为热轧态 45 钢,厚度 10mm。熔覆材料是 KF-300A 型镍基自熔性合金粉末, -140+325 目(45~106 μ m),HRC 为 60~75,成分为 Ni60+35%(质量分数)WC-Ni,即:含有 35%Ni 包 WC,其余为 Ni60。

1.2 试样制备

1.2.1 涂层的结构设计

为了让耐磨涂层具有肋条型仿生非光滑特征,设

计了一种软硬相间条带状涂层,结构如图 1 所示。阴影部分宽度为 D ,在其上涂覆涂层材料,形成硬化条带,两条硬化条带中心间距为 L ,其余部分为基体材料。这样就在基材表面形成了有规律分布的软硬相间条带状仿生非光滑结构。激光光斑直径略大于 3.0mm,则熔覆条带的宽度 D 确定为 3.0mm。为研究熔覆条带中心间距大小对涂层耐磨性的影响,将 L 分别设定为 4.5,5.0,6.0,7.0mm 和 9.0mm。

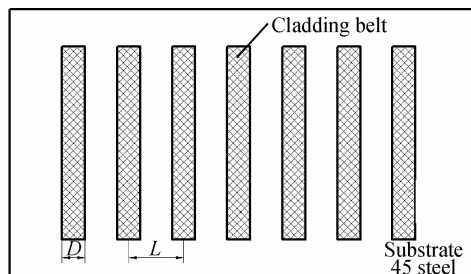


图 1 条带状仿生非光滑涂层结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of banded bionic non-smooth coating

1.2.2 激光熔覆工艺过程

实验采用 HLD1001.5 型固体激光器,多模连续输出,同步同轴送粉并采用氮气保护。工艺参数:激光功率 $P=700\text{W}$,离焦量 $f=14\text{mm}$,扫描速率 $V=3.0\text{mm/s}$,送粉电压 2.1V。为了提高激光熔覆层与 45 钢基体的结合效果,在 45 钢基体上用铣床加工出宽 3mm 深 1mm 的沟槽。在熔覆过程中,KF-300A 镍基自熔性粉末送入已开好的沟槽中,在沟槽中进行激光熔覆,每次熔覆厚度为 0.25mm,总堆积厚度为 2.0~3.0mm,高出 45 钢基材表面 1.0~2.0mm。图 2 为激光熔覆制备的仿生非光滑耐磨涂层照片。

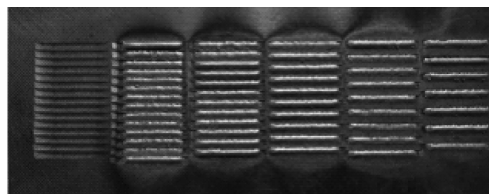


图 2 激光熔覆制备的仿生非光滑耐磨涂层照片

Fig. 2 Picture of bionic non-smooth wear-resistant coating by laser cladding

1.2.3 肋条型仿生非光滑试样的制备

用线切割机床将每组熔覆条带切割成 $60\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的磨损试样。将切割后的磨损试样分成两组,用磨床进行磨削处理。其中一组将熔覆层磨削至高出 45 钢基材表面 1.0mm,形成表面高低起伏的沟槽型结构,称为起伏型仿生非光滑耐磨涂层试样,编号对应

硬化带间距 L ,为 TD4a,TD5a,TD6a,TD7a,TD9a;另一组将熔覆层磨削至与 45 钢基材表面一致的高度,形成表面平整的沟槽型结构,称为平面型仿生非光滑耐磨涂层试样,编号为 TD4b,TD5b,TD6b,TD7b,TD9b。图 3 为两组试样实物照片。

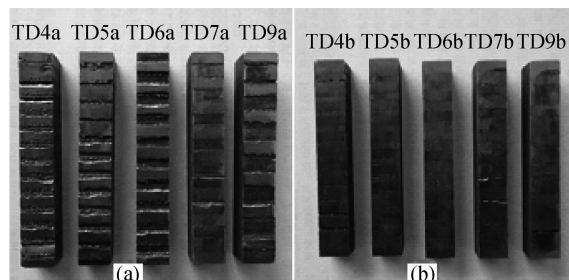


图 3 仿生非光滑耐磨涂层磨损试样照片

(a)起伏型试样;(b)平面型试样

Fig. 3 Wear sample of bionic non-smooth wear-resistant coating

(a) wave-type; (b) plane-type

2 结果与分析

2.1 仿生非光滑涂层的磨损性能

利用自制磨损试验机进行磨粒磨损实验,磨头材料为白刚玉,磨头压力 30N。曲柄转速为 410r/min,曲柄每转 50000 转,拆下试样清洗并干燥,用精度为 0.1mg 的电子天平称重。

起伏型涂层试样的磨损失重曲线如图 4(a)所示。当 $L=4.5, 5.0, 6.0\text{mm}$ 时,线性方程的斜率较小,分别为 1.27,0.91,0.86,平均为 1.01,耐磨性相差不大。曲柄旋转 70 万转后累计失重量 $\Sigma\Delta g$ 分别为 61.9, 67.6, 87.6mg。当 $L=7.0, 9.0\text{mm}$ 时,线性方程的斜率大幅度增加,分别达到 2.18,3.18,平均为 2.68,是 $L=4.5, 5.0, 6.0\text{mm}$ 时的 2.6 倍,累计失重量 $\Sigma\Delta g$ 快速增加到 192, 222.9mg。这说明硬化条带间距 L 处于较大值时,起伏型涂层的耐磨性急剧下降。

平面型涂层试样的磨损失重曲线如图 4(b)所示。与起伏型涂层相似,平面型涂层的累计失重量 $\Sigma\Delta g$ 也与 L 大小密切相关,可分为 $L=4.5, 5.0, 6.0\text{mm}$ 的缓慢增长型(斜率分别为 0.59,0.40,0.72,累计失重量为 30.7, 26.5, 39.9mg)和 $L=7.0, 9.0\text{mm}$ 的快速增长型(斜率分别为 1.33, 2.46, 累计失重量为 77.3, 135.5mg)。同样显示了硬化条带间距 L 对累计失重量 $\Sigma\Delta g$ 的重要影响。当 $L>6\text{mm}$ 后, $\Sigma\Delta g$ 随曲柄旋转次数的增加急剧增加,涂层的耐磨性能明显下降。

2.2 设计和制备仿生非光滑耐磨涂层的 GHR 原则

除了考察在实验周期内累计失重量 $\Sigma\Delta g$ 外,单次实验的失重量 Δg 也是一个很重要的指标。图 5 为仿

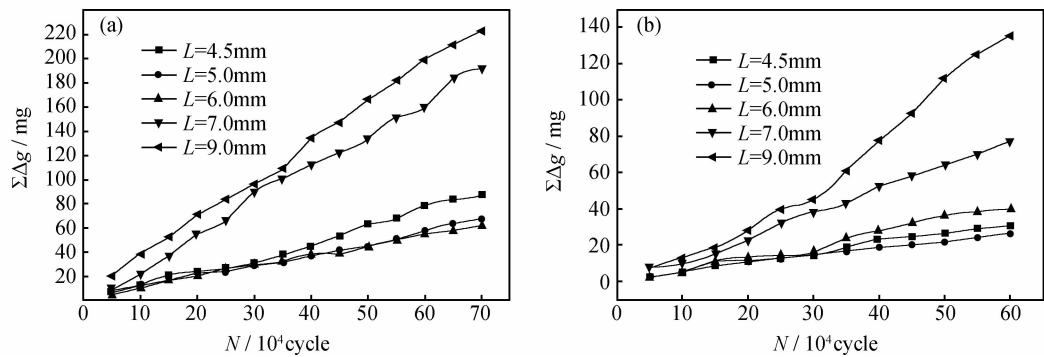


图 4 试样涂层磨损失重曲线 (a)起伏型涂层;(b)平面型涂层
Fig. 4 Wear loss curves of sample coating (a) wave-type coating;(b) plane-type coating

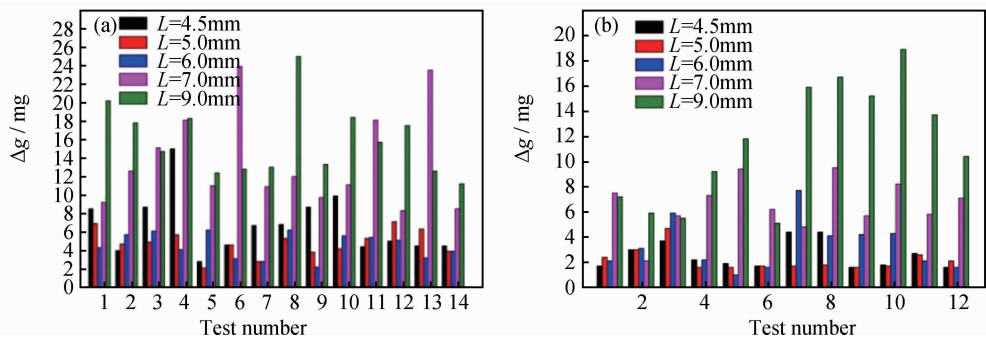


图 5 仿生非光滑耐磨涂层单次磨损实验的失重量 (a)起伏型涂层;(b)平面型涂层
Fig. 5 Wear loss of bionic non-smooth wear-resistant coating in a single wear test
(a) wave-type coating;(b) plane-type coating

生非光滑耐磨涂层单次磨损实验的失重量。表 1 是单次磨损实验失重量 Δg 的平均值。

表 1 试样单次磨损实验平均失重量 (mg)

Table 1 Average wear loss of the sample in a single wear test(mg)

L/mm	Wave-type coating	Plane-type coating
4.5	6.4	2.6
5.0	5.2	2.2
6.0	4.6	3.3
7.0	13.4	6.6
9.0	16.6	11.3

硬化带(熔覆层)宽度为 D , 相邻硬化带中心间距为 L , 则软化带的宽度 $B=L-D$ 。为了准确地表达仿生非光滑涂层 B 和 D 之间的关系, 定义参量几何硬化率 GHR(geometric hardening rate)为

$$GHR=\frac{D}{D+B}\times 100\% \quad (1)$$

从图 5 和表 1 可知, 无论是起伏型涂层还是平面型涂层, 当 $B\leq D$ 时, 累计失重量 $\Sigma\Delta g$ 明显小于 $B>D$ 时的值, 这种趋势随着磨损过程的进行越来越显著。即当 $GHR\geq 50\%$ 时, 仿生非光滑涂层具有很好的耐磨

性, 反之则耐磨性明显下降。又因减少硬化带的比例可以节省成本, 则在保证耐磨性的前提下, 可以选取 $GHR=50\%$ 作为设计和制备肋条型仿生非光滑涂层的原则。

2.3 条带状仿生非光滑涂层磨损机理分析

在所有硬化条带间距 L 下, 平面型涂层的累计失重量 $\Sigma\Delta g$ 均显著小于起伏型涂层 $\Sigma\Delta g$ 。这种现象是不同的磨损机理造成的。图 6 是条带状仿生非光滑涂层磨损表面示意图。

2.3.1 起伏型涂层的磨损机理

在磨损初期, 表层硬度较低的 Ni60 合金基体很快被磨粒犁削、切削; 随着磨损过程的进行, Ni60 合金基体不断流失, 表层及次表层的增强硬质颗粒相 WC 颗粒不断凸现并裸露出来, 在磨损面上形成凸凹不平的几何非光滑表面。由于软化带低于硬化带表面 1.0mm, 磨头不能接触到软化带, 软化带的运行轨迹呈弧线状(图 6(a))。磨头运行到硬化带时, 对硬化带产生明显的冲击作用, 这种冲击作用使得 WC 破碎, 加快 WC 的脱落和裂纹的产生。图 7 为条带状仿生非光滑涂层磨损表面的裂纹。图 7(a)表现了冲击作用对 WC 的影响, 图 7(b)显示了横向裂纹特征。

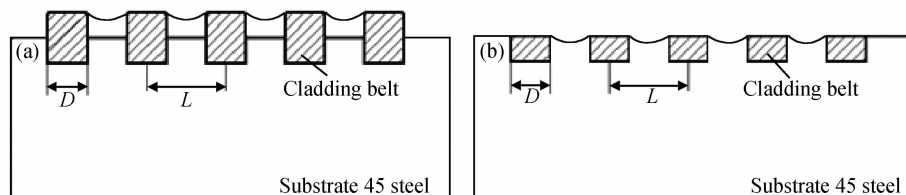


图6 条带状仿生非光滑涂层磨损表面示意图 (a)起伏型涂层;(b)平面型涂层

Fig. 6 Diagram of banded bionic non-smooth coating's worn surface (a) wave-type coating; (b) plane-type coating

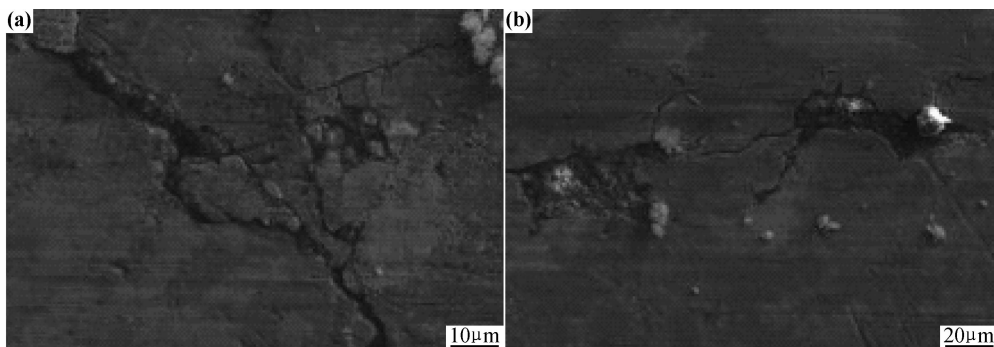


图7 条带状仿生非光滑涂层磨损表面的裂纹($L=4.5\text{mm}$) (a)大颗粒 WC 周围的裂纹;(b)横向脱落区

Fig. 7 Cracks on the banded bionic non-smooth coating's worn surface ($L=4.5\text{mm}$)

(a) cracks around the large WC particles; (b) lateral abscission zone

2.3.2 平面型涂层的磨损机理

与起伏型涂层一样,在硬化带表面由于磨粒犁削、切削作用使得硬化带表面自身形成了动态、稳定的非光滑表面,降低了磨损速率。但平面型涂层的硬化带和软化带处于同一水平面上,磨损过程中能较平稳地接触到软化带,没有起伏型涂层的冲击作用。图8是平面型涂层硬化带与45钢软基材结合区的磨痕形貌。左侧熔覆硬化带上,犁沟浅且稀少;右侧软的45钢软化带上,犁沟稠密、深且宽。



图8 平面型涂层的磨痕形貌($L=4.5\text{mm}$)

Fig. 8 Grinding crack morphology of plane-type coating ($L=4.5\text{mm}$)

涂层的累积失重量 $\Sigma\Delta g$ 显著大于平面型涂层,即:平面型涂层耐磨性明显优于起伏型涂层。

(2)起伏型仿生非光滑涂层的磨损机理:硬化带表面自身非光滑磨损机制与磨头对硬化带的冲击磨损机制共同作用。平面型涂层的磨损机理:硬化带表面自身非光滑磨损机制与表面几何形貌非光滑磨损机制相结合。

(3)设计和制备耐磨性能良好的仿生非光滑涂层的判据:几何硬化率 GHR 不小于 50%。从节省成本的角度考虑,在保证耐磨性的前提下,可以选取 $\text{GHR}=50\%$ 作为设计和制备的依据。

参考文献

- [1] 魏小波,李洪文,凌刚,等. 免耕播种机开沟圆盘材质与加工工艺的研究[J]. 农机化研究,2007,(1):96-99.
WEI Xiao-bo, LI Hong-wen, LING Gang, et al. Analysis of materials of different disc opener for no-tillage planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, (1): 96-99.
- [2] 王继山. 免耕播种机开沟器的分析与研究[J]. 山西农业大学学报:社会科学版,2007,6(5):7-10.
WANG Ji-shan. Analysis and research on the drill opener of no-tillage planter[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Social Science Edition), 2007, 6(5): 7-10.
- [3] 孙浩,凌刚,李洪文,等. 扫描间距对45钢激光熔凝强化组织性能的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(2):156-160.
SUN Hao, LING Gang, LI Hong-wen, et al. Influence of scanning interval on microstructure and abrasive wear resistance of 45 steel by laser melting [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27

3 结论

(1)起伏型和平面型仿生非光滑涂层,累计失重量 $\Sigma\Delta g$ 均随曲柄旋转周次的增加呈线性增加。起伏型

- (2):156—160.
- [4] 万其号,布库,李岩,等. 大型免耕播种机开沟器结构研究[J]. 农机化研究,2012,34(3):45—48.
WAN Qi-hao, BU Ku, LI Yan, et al. Structure analysis of the large no-till seeder openers[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(3): 45—48.
- [5] 杨志贤,戴振东,甲虫生物材料的仿生研究进展[J]. 复合材料学报,2008,5(2):1—9.
YANG Zhi-xian, DAI Zhen-dong. Progress in bionic research on biomaterials of beetles[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 5(2): 1—9.
- [6] 韩志武,任露泉,刘祖斌. 激光织构仿生非光滑表面抗磨性能研究[J]. 摩擦学学报,2004,24(4):289—293.
HAN Zhi-wu, REN Lu-quan, LIU Zu-bin. Investigation on anti-wear ability of bionic nonsmooth surfaces made by laser texturing[J]. Tribology, 2004, 24(4): 289—293.
- [7] ANDERS H, ANDERS N. Adhesion testing of thermally sprayed and laser deposited coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 184(2—3): 208—218.
- [8] 王再宙,王忠良,任露泉,等. 仿生非光滑表面磨损机理的试验研究[J]. 材料科学与工艺,2006,(3):275—279.
WANG Zai-zhou, WANG Zhong-liang, REN Lu-quan, et al. Experiment research on wear mechanism with bionic non-smoothed surface[J]. Materials Science and Technology, 2006, (3): 275—279.
- [9] KARNIADAKIS G E. Mechanisms on transverse motions in turbulent wall flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 35: 45—62.
- [10] 佟金,荣宝军,马云海,等. 仿生棱纹几何结构表面的土壤磨料磨损[J]. 摩擦学学报,2008,28(3):193—197.
TONG Jin, RONG Bao-jun, MA Yun-hai, et al. Abrasive wear of the biomimetic ridge surfaces against soil[J]. Tribology, 2008, 28(3): 193—197.
- [11] 杨卓娟,韩志武,任露泉. 激光处理凹坑形仿生非光滑表面试件的高温摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报,2005,25(4):374—376.
YANG Zhuo-juan, HAN Zhi-wu, REN Lu-quan. Friction and wear behavior of bionic non-smooth surface at high temperature[J]. Tribology, 2005, 25(4): 374—376.
- [12] MICHAEL J W. Riblets as a viscous drag reduction technique[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1983, 21(4): 485—486.
- [13] 董立春,韩志武,吕尤,等. 凹坑型仿生形态环块样件耐磨性能[J]. 吉林大学学报:工学版,2011,41(6):1659—1663.
DONG Li-chun, HAN Zhi-wu, LYU You, et al. Anti-wear properties of ring model with bionic concave morphology[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2011, 41(6): 1659—1663.
- [14] 王晓荣,王新洪,杜宝帅,等. 激光熔覆 Fe-Ti-V-Cr-C 合金涂层的微观组织和性能[J]. 材料工程,2011,(3): 50—54.
WANG Xiao-rong, WANG Xin-hong, DU Bao-shuai, et al. Microstructure and property of laser cladding Fe-Ti-V-Cr-C alloy coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 2011, (3): 50—54.
- [15] 曾维华,刘洪喜,王传琦,等. 工艺参数对不锈钢表面激光熔覆 Ni 基涂层组织及耐腐蚀性能的影响[J]. 材料工程,2012,(8): 24—28.
ZENG Wei-hua, LIU Hong-xi, WANG Chuan-qi, et al. Effects of technological parameters on microstructure and corrosion resistance of laser cladding Ni-based coating on stainless steel surface[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, (8): 24—28.
- [16] 郭绍义,李兴俊,杨秋合,等. 激光熔覆 WC-Ni/TiC 涂层的组织和摩擦磨损性能研究[J]. 材料工程,2008,(6): 72—76.
GUO Shao-yi, LI Xing-jun, YANG Qiu-he, et al. Microstructure and tribological properties of laser clad WC-Ni / TiC composite coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 2008, (6): 72—76.

基金项目:“十二五”农村领域国家科技计划课题资助项目(2011BAD20B01)

收稿日期:2012-12-19;修订日期:2013-08-10

作者简介:刘敬(1989—),女,硕士研究生,主要从事新材料、新工艺的研究,联系地址:中国农业大学工学院(100083),E-mail:liujing8908@126.com

通讯作者:凌刚(1962—),男,博士,副教授,主要从事新材料及表面工程研究,联系地址:中国农业大学工学院(100083),E-mail:mstl88@126.com

(上接第 31 页)

- [13] 汪海,陈秀华,郭杏林,等. 复合材料蜂窝夹芯结构修理后强度研究[J]. 航空学报,2001,22(3):270—273.
WANG Hai, CHEN Xiu-hua, GUO Xing-lin, et al. Strength investigation of composite honeycomb structures after repair[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(3): 270—273.
- [14] 航空航天工业部科学技术研究院. 复合材料设计手册[M]. 北京:航空工业出版社,1990. 224—225.
- [15] 方海,刘伟庆,陆伟东,等. 泡桐木夹层结构材料的力学性能[J]. 南京工业大学学报:自然科学版,2011,33(5):7—12.
FANG Hai, LIU Wei-qing, LU Wei-dong, et al. Mechanics properties of paulownia core sandwich composites[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 33(5): 7—12.
- [16] ZIAD K AWAD, ARAVINTHANHIRU T, YAN Zhua-ge. Experimental and numerical analysis of an innovative GFRP sandwich floor panel under point load[J]. Engineering Structures, 2012, 41: 126—135.

基金项目:中国商飞关键技术攻关项目支持(SAMC12-JS-13-053)

收稿日期:2012-10-16;修订日期:2013-08-27

作者简介:郭霞(1985—),女,博士研究生,从事复合材料修理方面研究工作,联系地址:北京航空航天大学航空科学与工程学院(100191),E-mail:guoxiaibei@163.com