

# 复合材料结构表面状态的红外热成像检测影响研究\*

南方,肖鹏

(上海飞机制造有限公司,上海 200436)

**[摘要]** 针对飞机复合材料零件复杂多样的表面状态,本研究设计试验开展红外热成像技术对各类表面状态下航空复合材料的检测研究,设计并制造了内埋模拟缺陷的表面状态对比试块,其包含8种常见的航空复合材料表面状态。采用红外热成像无损检测系统进行检测试验。试验通过检测灵敏度、表面铜网、其他表面材料和表面粗糙度等方面分析了复合材料表面状态的影响,结果表明不同表面状态的复合材料零件,红外热成像技术对其缺陷的检测结果有明显差异。

**关键词:** 复合材料;飞机;无损检测;红外热成像;表面状态

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.14.083



南方

助理工程师,研究方向为复合材料无损检测。

复合材料具有密度低、强度和刚度大等诸多优点,在航空领域大量应用于机翼、机身等重要结构,如日本的OH-1直升机机身、旋桨等部位使用的碳纤维复合材料占结构材料的40%;我国的直9型直升机整体机身

复合材料覆盖率达60%。然而,在生产制造过程中,由于工艺偏离或其他偶然性因素会导致结构内部产生分层、气孔及疏松等缺陷。此外,在服役过程也会由于冲击、疲劳等因素引入各类其他复杂缺陷<sup>[1-2]</sup>。因此必须建立有效的检测手段为复合材料结构提供质量保障。

红外无损检测技术是随着红外热成像等技术的发展而出现的一种无损检测技术,近年来引起人们的广泛关注。与超声A扫描、超声C扫描和X射线等常规的航空复合材料无损检测技术相比,红外无损检测技术具有快速、直观、非接触、一次观测面积大等优点,对于复合材料结构件的外场、在线、在役检测具有明显优势<sup>[3-5]</sup>。例如,Favro等<sup>[6]</sup>将红外热成像技术应用在碳纤增强复合材料薄板的冲击损伤检测中。杨小林等<sup>[7]</sup>采用闪光灯激励红外热成像技术对垂尾结构的玻璃纤维复合材

料和飞机雷达罩复合材料进行检测,并对于缺陷的定量及位置展开了研究。李艳红等<sup>[8]</sup>采用红外热成像技术通过内埋缺陷尺寸分别为 $\phi 6\text{mm}$ 、 $\phi 13\text{mm}$ 、 $\phi 15\text{mm}$ 、 $\phi 20\text{mm}$ 的缺陷模拟试块验证了该技术在碳纤增强复合材料零件的检测能力。针对复合材料中的分层、脱粘、夹杂等缺陷,张剑等<sup>[9]</sup>开展了闪光灯红外无损检测技术对玻璃纤维复合材料检测的应用研究。除此之外,大型飞机制造商波音和空客公司均制定了红外无损检测标准,该项技术在各类飞机外场检测中均取得了成功的应用。

红外无损检测技术是在检测过程中,通过对物体表面施加可控的温度场,热能从物体表面向内部传递。热量在内部传导过程中遇到缺陷,由于缺陷与本体材料热物理性质不同,导致反射到表面的热量发生变化,从而引起表面温度差异。因此零件的表面状态是影响红外无损检测灵敏

度的重要因素,不同表面状态的零件因其不同的颜色纹理或覆盖物具有不同的物理热性能,其向内吸收或向外辐射的红外线不一致,导致不同表面上的辐射能量差异,进一步影响缺陷的检测<sup>[10-16]</sup>。

在实际的航空复合材料生产过程中,根据不同的设计、功能要求以及制造工艺,复合材料零件有不同的表面状态。例如,为达到良好的雷击防护效果,生产商将表面胶膜和导电金属网铺放在有防雷击要求的碳纤维增强树脂基复合材料的外表面<sup>[17]</sup>。在复合材料热压罐固化成型过程中,在复合材料表面铺放可剥布作为导气层和导胶层保证零件质量,也可用于加工形成复合材料的胶接表面<sup>[18]</sup>。Tedlar膜通常用于蜂窝夹芯结构的复合材料蒙皮表面,用于预防蜂窝结构受潮吸湿而影响材料性能。各个航空航天结构制造商大多采用在复合材料表面铺覆表面膜改善表面质量,表面膜的应用不仅给零件提供了光滑致密的表面,更简化了复合材料零件的制造工艺,节省了打磨抛光的成本,而且表面膜的低挥发特点最大限度地降低零件表面的针眼<sup>[19-20]</sup>。通过在复合材料零件表面铺放玻璃纤维织物可防止零件在钻孔或机加过程中劈裂或分层。在制造过程中,由于复材制造工艺的特性,复合材料零件表面也会存在贴真空袋的表面状态与贴工装的面状态。因此,针对飞机复合材料零件复杂多样的表面状态,笔者将设计实验开展红外热成像技术对于各类表面状态下航空复合材料的检测能力研究。

### 对比试块制造

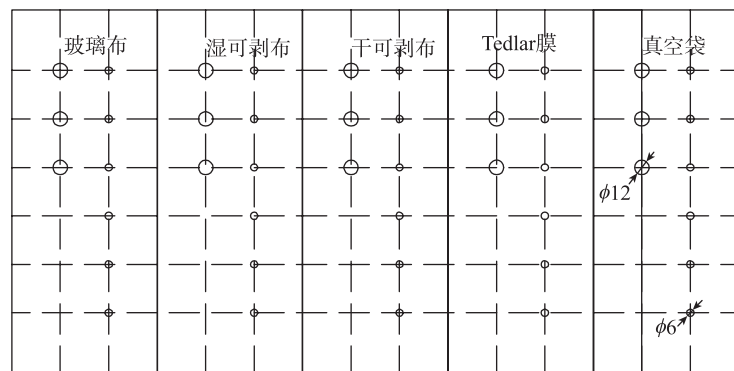
采用标准制造程序制造一块厚度为4mm的碳纤维增强环氧树脂复合材料层压板,作为不同表面状态对比试块的母板。为模拟飞机常见的复合材料表面状态,此试块表面状态

按照图1所示进行设计,在贴真空袋侧分别铺贴玻璃纤维织物预浸料、湿可剥布、干可剥布和Tedlar膜,剩余区域在固化时直接接触真空袋;在贴工装侧铺贴表面膜和铜网/表面膜组合,剩余区域直接接触平板铝工装,并在层压板内部预埋6个直径为6mm的聚四氟乙烯薄膜和3个12mm的聚四氟乙烯薄膜用于模拟缺陷,预埋物在厚度方向上均匀分布。试块在厚度方向共计21层预浸料, $\phi 6\text{mm}$ 缺陷的埋深在0.38mm、0.95mm、1.71mm、2.29mm、3.05mm和3.62mm; $\phi 12\text{mm}$ 缺陷的埋深在

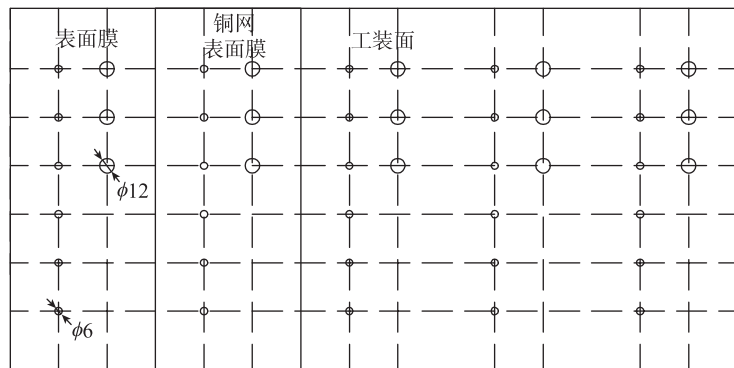
0.38mm、1.90mm和3.62mm(深度从真空袋一侧计算),图1(c)为内埋缺陷深度示意图。根据复合材料制造工艺要求,去除了固化后试块上的干可剥布、湿可剥布,保留了其他铺覆材料,试块如图2所示。最后,在试块表面进行了喷漆处理,以消除表面色彩不同造成的红外能量吸收能力差异,试块图片如图3所示。

### 红外热成像检测系统

试验使用以色列 Opgal LTD 公司生产的型号为 NDTherm<sup>®</sup> NT 的红外热成像无损检测系统。该检测



(a) 对比试块贴袋面表面设计图



(b) 对比试块贴工装面表面设计图

$\phi 6\text{mm}$						
深度	+	+	-	-	+	+
$\phi 12\text{mm}$			+			
深度	+	-				

(c) 内埋缺陷埋深深度设计图

图1 表面状态对比试块设计图

Fig.1 Defect design of surface condition reference specimen

系统由3个部分组成:热激励系统、热像采集系统和热像处理系统,热激励系统采用大功率卤素白炽灯对材料表面进行主动热激励,最大功率达到3.8kW。热像采集采用一个红外照相机,其热灵敏度为30mK,图像分辨率为640×480,并将采集的热像图传输至计算机进行处理分析。

## 试验结果

图4为各表面状态对比试块的红外热像图检测结果。由于设备的单次检测面积较小,检测结果为多次的检测图片拼接而成。根据缺陷的埋深设计,表1为不同表面状态对比试块中 $\phi 6\text{mm}$ 和 $\phi 12\text{mm}$ 缺陷的检测深度。图5、图6为不同表面状态对比试块中 $\phi 6\text{mm}$ 和 $\phi 12\text{mm}$ 缺陷的检测深度对比图。结果显示,红外热成像技术对于不同表面状态复合材料零件的检测能力有明显差异。可剥布、表面膜和贴工装表面可检测到2mm左右深度的 $\phi 6\text{mm}$ 缺陷,而玻璃纤维织物、Tedlar膜、真空袋和铜网表面均只能达到近表深度。而对于 $\phi 12\text{mm}$ 内埋缺陷,铜网表面试块只可检测到近表层深度,而其他表面状态均可检测到试块中间层。

### 1 检测灵敏度

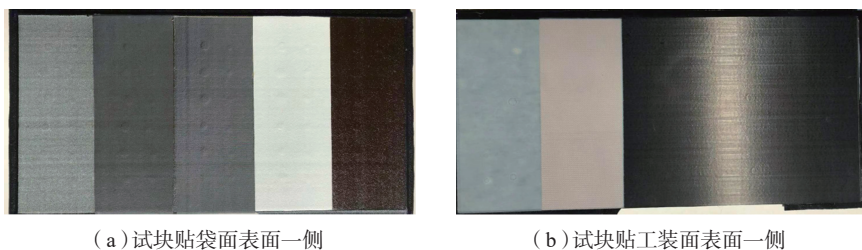
对比试块贴真空袋表面和贴工装表面为未额外处理的复合材料工艺表面,其检测结果可作为基准检测灵敏度。对于 $\phi 12\text{mm}$ 的缺陷,两侧的基准灵敏度相同,可检测到1.90mm埋深的缺陷。而对于 $\phi 6\text{mm}$ 缺陷,贴真空袋表面试块灵敏度在0.95mm之间,贴工装表面试块灵敏度在1.71mm之间。由此可以看出,红外热像检测对于贴工装表面复合材料试块的检测能力优于贴真空袋表面。这是由于相比真空袋一侧,在固化过程中光滑的工装表面不仅保持试块表面的形面平整,也保证了其质地均匀,红外热能可均匀地被表面

吸收或释放,保证了试块内部足够的能量传递。

### 2 铜网影响

根据图6所示,红外热成像在其他表面状态的试块上可检测到中

间层深度的 $\phi 12\text{mm}$ 缺陷,而表面覆盖铜网的试块上只能检测到表层深度。原因分析有如下两点:首先铜网的导热性优于复合材料主体,加热局部检测区域,对比其他表面状态,其

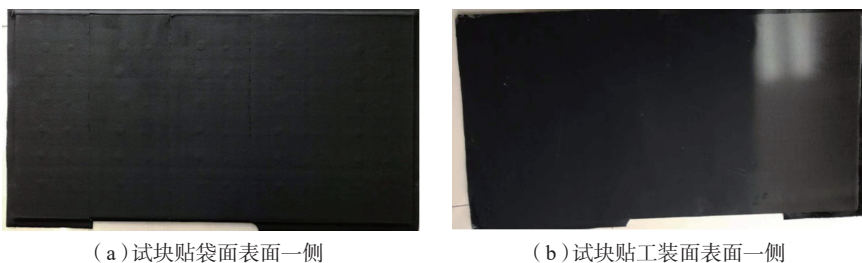


(a) 试块贴袋面表面一侧

(b) 试块贴工装面表面一侧

图2 对比试块

Fig.2 Picture of surface condition reference specimen

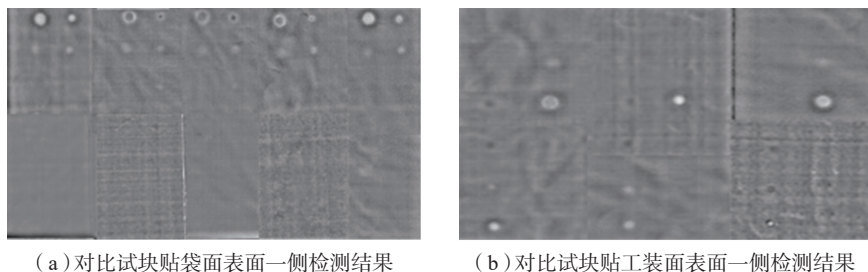


(a) 试块贴袋面表面一侧

(b) 试块贴工装面表面一侧

图3 喷漆后对比试块

Fig.3 Surface condition reference specimen after painting treatment



(a) 对比试块贴袋面表面一侧检测结果

(b) 对比试块贴工装面表面一侧检测结果

图4 表面状态对比试块红外热成像检测结果

Fig.4 Thermography results of surface condition reference specimen

表1 各表面状态 $\phi 6\text{mm}$ 和 $\phi 12\text{mm}$ 缺陷的检测深度

Table 1 Inspected depth of  $\phi 6\text{mm}$  and  $\phi 12\text{mm}$  defects under various surface conditions

试块表面状态	检测 $\phi 6\text{mm}$ 缺陷深度 /mm	检测 $\phi 12\text{mm}$ 缺陷深度 /mm
玻璃纤维织物	0.95	1.90
湿可剥布	1.71	1.90
干可剥布	1.71	1.90
Tedlar膜	0.95	1.90
真空袋面	0.95	1.90
表面膜	2.29	1.90
铜网表面膜	0.95	0.38
工装面	1.71	1.90

传递到复合材料零件内部的热能减少,因此检测能力被削弱;其次,由于金属铜网的外形质地,零件表面温度场呈铜网的网格状(图7),影响缺陷判断。

### 3 其他材料影响

根据图5所示的检测结果,玻璃纤维织物和 Tedlar 膜表面与贴真空袋表面试块的缺陷检测深度一致,说明表面铺放玻璃纤维织物和 Tedlar 膜对试块表面接收、传递和发射红外热能量的影响较小。然而在试块贴工装的一侧,表面膜铺覆试块的可检深度明显大于贴工装面,这是因为表面膜可以改善复合材料零件的表面质量,不仅有导气排胶的作用,减少内部挥发气体带来的表面针孔缺陷,同时还避免了纤维织物

等材料固化时材料表面游离纤维所产生的其他缺陷。所以在复合材料零件铺覆表面膜将提高红外热像系统的检测能力。

### 4 粗糙度影响

在贴真空袋一侧,对比5种表面状态,干、湿可剥布固化后从复合材料表面被去除留下了可剥布织物印记;在贴真空袋表面、玻璃纤维织物表面和 Tedlar 膜表面有真空袋印记。相比真空袋,可剥布的织物粗糙度更低。结合图5的检测结果,玻璃纤维织物、Tedlar 膜和贴真空袋3种表面试块的可检测深度基本一致,均可检测到0.95mm深度的 $\phi 6\text{mm}$ 缺陷,干、湿可剥布试块可检测到中间层缺陷。结果证明低粗糙度的表面形貌有助于红外信号的吸收和反射。

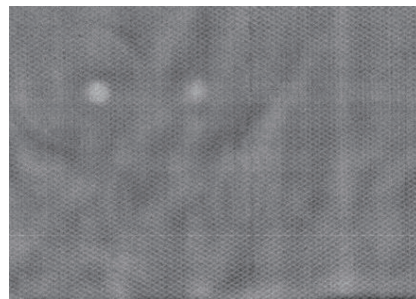


图7 铜网表面试块红外热像图  
Fig.7 Infrared thermogram of cooper net surface specimen

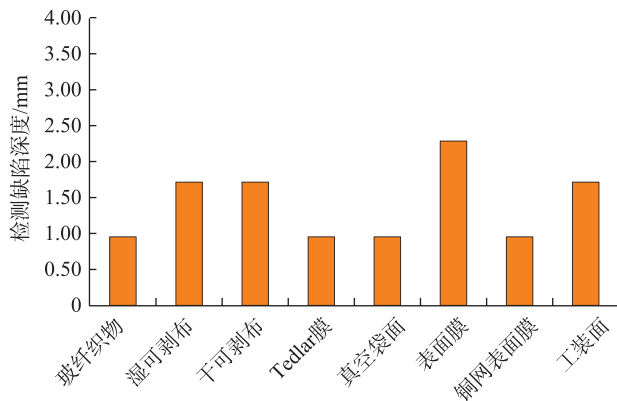


图5 各表面状态试块 $\phi 6\text{mm}$ 缺陷可检深度图  
Fig.5 Inspected depth of  $\phi 6\text{mm}$  defects under various surface conditions

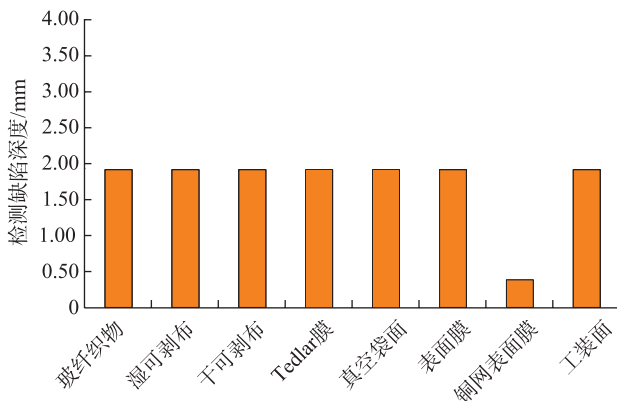


图6 各表面状态试块 $\phi 12\text{mm}$ 缺陷可检深度图  
Fig.6 Inspected depth of  $\phi 12\text{mm}$  defects under various surface conditions

## 结论

试验结果显示,对于相同材料不同表面状态的复合材料零件,红外热成像技术对其缺陷的检测结果有明显差异。故在使用红外热成像技术时,应考虑被检零件的表面工艺和表面状态。

(1) 红外热像检测对于贴工装表面复合材料试块的检测能力优于贴真空袋表面。因此,在实际的飞机复合材料零件检测应用中,红外热成像检测的检测面更适合从飞机气动面进行检测,即复材零件的贴工装面。

(2) 铜网的金属材质影响红外热能在零件中的均匀性,网格状的外形质地影响缺陷的判断。故在进行红外热像检测时应特别注意铜网表面的零件。

(3) 复合材料零件表面铺放玻璃纤维织物和 Tedlar 膜对红外检测没有影响,然而表面膜可以改善复合材料零件的表面质量,提高红外热像系统的检测能力。

(4) 红外检测对于复合材料零件的表面粗糙度比较敏感,影响检测的灵敏度和检测能力。在使用红外检测技术时应关注表面粗糙度,表面越光滑,检测效果越好。

## 参考文献

[1] 牛春匀. 实用飞机复合材料结构设计

计与制造[M].北京:航空工业出版社,2010.

NIU Chunyun. Composite airframe structures[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.

[2] 杨乃宾,章怡宁.复合材料飞机结构设计[M].北京:航空工业出版社,2002.

YANG Naibin, ZHANG Yining. Composite airframe structures design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002.

[3] 郑凯,江海军,陈力.红外热波无损检测技术的研究现状与进展[J].红外技术,2018,40(5):401-411.

ZHENG Kai, JIANG Haijun, CHEN Li. Infrared thermography NDT and its development[J]. Infrared Technology, 2018, 40(5):401-411.

[4] CARLOMAGNO G M, MEOLA C. Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT[J]. NDT & E International, 2002, 35(8):559-565.

[5] WANG X. Pulse-echo thermal wave imaging of metals and composite[D]. Detroit: Wayne State University, 2001.

[6] FAVRO L D, KUO P K, THOMAS K L. Thermal wave imaging for NDE of composites and coatings[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2944:232-237.

[7] 杨小林,代永朝,李艳红,等.红外热波技术在飞机复合材料损伤检测中的应用[J].无损检测,2007,29(4):200-202.

YANG Xiaolin, DAI Yongchao, LI Yanhong, et al. Application of the thermal wave testing technology in composites of airplane[J]. Nondestructive Testing, 2007, 29(4):200-202.

[8] 李艳红,张存林.碳纤维复合材料的红外热波检测[J].激光与红外,2005(4):262-264.

LI Yanhong, ZHANG Cunlin. IR thermal wave nondestructive inspection of carbon fibre composite material[J]. Laser & Infrared, 2005(4):262-264

[9] 张剑,齐署华.红外热成像技术在复合材料无损检测中的应用现状[J].工程塑料应用,2015,43(11):122-126.

ZHANG Jian, QI Shuhua. Application of infrared thermography in nondestructive testing of composites[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(11):122-126.

[10] MALDAGUE X, GALMICHE F, ZIADI A. Advances in pulsed phase thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2002, 43(4):175-181.

[11] GRYZAGORIDIS J, FINDEISD. Impact damage detection on composites using optical NDT techniques[J]. Insight, 2010, 52(5):248-251.

[12] IBARRA CASTANEDO C, GENEST M, SERVAIS P. Qualitative and quantitative assessment of aerospace structures by pulsed thermography[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2007, 22(2):199-215.

[13] ZENZINGER G, BAMBERG J, DUMM M, et al. Crack detection using eddytherm[C]//Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Conf. Golden City: AIP Conference Proceedings, 2004.

[14] MALDAGUE X. Introduction to NDT by active infrared thermography[J]. Materials Evaluation, 2002, 60(9):1060-1063.

[15] WILSON J, TIAN G Y, ABIDIN L Z. Pulsed eddy current thermography: system development and evaluation[J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring,

2010, 52(2):87-90.

[16] CHENG L, TIAN G Y. Surface crack detection for carbon fiber reinforced plastic(CFRP) materials using pulsed eddy current thermography[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(12):3261-3268.

[17] 赵金龙,陈晓宁,耿勇.浅析飞机复合材料雷击防护措施与试验[J].玻璃钢/复合材料,2013(Z2):40-43.

ZHAO Jinlong, CHEN Xiaoning, GENG Yong. Measures and test of lightning protection of airplane composite materials[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013(Z2):40-43.

[18] 王旭,陈璐圆,陈萍,等.民用航空复合材料成型用可剥布评价与选用[J].航空制造技术,2015,58(19):88-91,94.

WANG Xu, CHEN Luyuan, CHEN Ping, et al. Evaluation methods and selection of peel ply in fabrication process of civil aviation composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(19):88-91, 94.

[19] 刘代军,陈亚莉.先进树脂基复合材料在航空工业中的应用[J].材料工程,2008(Z1):194-198.

LIU Daijun, CHEN Yali. Application of advanced polymer matrix composites in aviation industry[J]. Materials Engineering, 2008(Z1):194-195.

[20] 张扬,李洪峰,王德志,等.复合材料表面膜的研究进展[J].化学与粘合,2016,38(1):59-61.

ZHANG Yang, LI Hongfeng, WANG Dezhi, et al. Research process in composite surface films[J]. Chemistry and Adhesion, 2016, 38(1):59-61.

通讯作者:南方,E-mail:nanfng@comac.cc.

## Research of Composites Surface Influence on Thermography Detection Technology

NAN Fang, XIAO Peng

(Shanghai Aircraft Manufacture Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

**[ABSTRACT]** Aimed to multifarious surface conditions of aircraft composites, a research was conducted to apply thermography technology to composites with common aeronautic surfaces. A surface condition reference specimen with simulated defects was designed and manufactured, which included 8 kinds of common aircraft composites surfaces. NDTherm<sup>®</sup> NT thermography system was applied to conduct tests. For the composites part with same material and different surface conditions, the defect test results have obvious differences. And the results had been discussed from aspects of the detection sensitivity, copper net, surface materials and surface roughness.

**Keywords:** Composites; Aircraft; Nondestructive testing (NDT); Infrared thermography; Surface condition

(责编 铃兰)