

# 不同温度下复合材料层板冲击后剩余强度研究

黄智,温卫东

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**通过对 T300/QY8911-IV 复合材料层板进行不同温度和不同能量下的低速冲击试验,并在冲击后进行静拉伸试验,研究温度和冲击能量对复合材料层板的冲击损伤及冲击后剩余强度的影响。结果表明,在相同温度下,冲击能量越大,层板的剩余强度越低;在相同冲击能量下,随着温度升高,层板的剩余强度也会随之降低。

**关键词:**复合材料层板;温度;低速冲击;剩余强度

**中图分类号:**TB332 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)04-0044-03

## Research on Residual Strength of Impacted Composite Laminates Under Different Temperatures

HUANG Zhi, WEN Weidong

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Static tensile tests are carried out on T300/QY8911-IV composite laminates after low-velocity impact under different temperatures and impact energies. Then the effects of temperature and impact energy on impact damage and residual strength of laminates are studied. The results indicate that the higher the impact energy at the same temperature is, the lower the residual strength of the impacted laminate is. Under the same impact energy, the residual strength of the laminate decreases with the increase of temperature.

**Keywords:** composite laminate; temperature; low-velocity impact; residual strength

## 0 引言

复合材料层板以其高比强度、高比刚度、易成型、抗疲劳等特点而被广泛应用于现代飞行器结构中,而复合材料结构在制造、使用及维护的过程中,不可避免地会受到来自外物的冲击。这类冲击大多属于低速、低能的冲击,在层板的表面所造成的损伤较小,但在层板内部造成多种形式的损伤。这些损伤往往无法直接观察检测,却会造成层板的强度大幅度下降。因此,对受冲击的复合材料层板进行研究是非常有必要的。

目前,国内外许多学者对冲击后的复合材料层板进行了实验研究。DE Moura、程小全等<sup>[1-4]</sup>通过实验研究了层板的冲击损伤,研究表明,在冲击能量较低时,层板内部主要损伤为基体开裂和分层,分层只产生在铺层方向不同的两铺层之间,呈花生壳状,主轴沿下层的纤维方向。温卫东等<sup>[5]</sup>通过对不同尺寸和不同铺层顺序的层板进行低速冲击试验,发现试验件的几何尺寸对冲击损伤投影面积影响较大,铺层顺序主要影响投影区域的形状。WANG Shixun<sup>[6]</sup>通过实验研究了冲击能量对层板拉伸剩余强度的影响,将冲击后层板的拉伸剩余强度分为低能量退降、稳定、高能量退降 3 个阶段。KOO J M 等<sup>[7]</sup>提出,在相同的冲击能量下,改变冲头质量,对层板剩余强度影响

不大。王志等<sup>[8]</sup>通过实验发现,碳纤环氧复合材料在不同温度下应力-应变曲线整体变化趋势大致相同,其高温力学性能受铺层角度影响。姚佳伟等<sup>[9]</sup>研究了非连续湿热作用对复合材料层板性能的影响,研究表明,单一温度作用下,层板弯曲性能降低,层间剪切性能增强。

目前对复合材料层板的冲击和剩余强度试验主要在室温环境下进行,在温度环境下进行冲击试验还鲜有报道。本文通过对 T300/QY8911-IV 复合材料层板进行低速冲击和冲击后的静拉伸试验,研究了 3 种不同温度和冲击能量下层板的冲击损伤和剩余拉伸强度。

## 1 实验

### 1.1 试件

试件材料体系为 T300/QY8911-IV 复合材料(图 1),纤维体积含量约为 41%,试件铺层顺序为[45/90/-45/0/45/0/90/0],共 16 层,单层板厚度为 0.153 mm,试件尺寸为 200 mm×38 mm。冲击试验结束后,在两端粘贴 50 mm 加强片,用于静拉伸实验。

### 1.2 低速冲击实验

#### 1) 冲击实验装置

参照 ASTM D7136 试验标准,采用落锤式冲击试验装

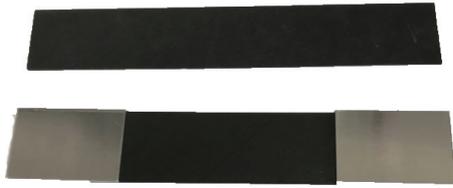


图1 试验件

置对复合材料层板进行低速冲击试验,装置如图2所示。落锤总质量为1.2 kg,底部为直径16 mm的球形冲头,通过电磁铁吸附在上横梁上,可通过调节上横梁高度来调节冲击能量的大小。试验机自带防二次冲击装置,在冲头反弹后落下时,电磁阀门自动吸合,防止造成二次冲击损伤。冲击能量选择分别为6 J、8 J和10 J,相应落锤高度设定为510 mm、680 mm和850 mm。

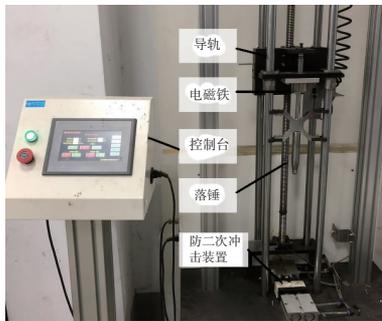
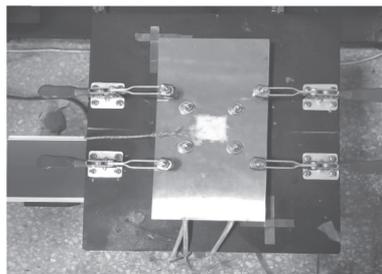


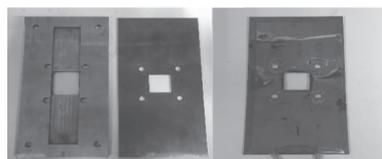
图2 冲击试验装置

### 2) 冲击实验夹具

由于试件尺寸较小,无法直接装夹到冲击台面上,需要用夹具固定后装到冲击台上。如图3所示,在下夹具上开有凹槽用来放置试验件,上、下夹具用螺栓紧固后放置到台面上,四周用夹子固定;对于高温试件,将两块电加热板和夹具装夹在一起,待加热到指定温度并保温15 min之后进行试验。加热过程中使用硅酸铝保温棉塞住冲击缺口,待冲击时取出保温棉,迅速进行冲击试验。



(a) 整体装夹



(b) 上下夹具 (c) 电加热板

图3 冲击试验夹具

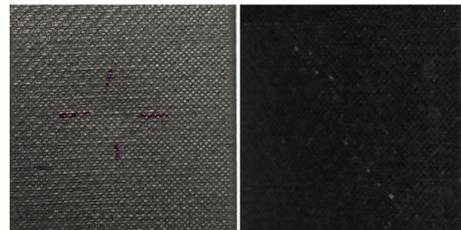
## 1.3 静拉伸试验

对冲击后试件进行静拉伸试验,试验温度和冲击试验中的温度保持一致。静拉伸试验在MTS810电液伺服疲劳试验机上进行,采用位移控制的加载方式,加载速率为1 mm/min。对于高温试件,采用电加热带对试件进行加热,待达到指定温度后保温15 min,再进行静拉伸试验,记录试件的破坏载荷,每个数据点取4~5件试验件。

## 2 冲击损伤和剩余强度分析

### 2.1 冲击损伤分析

复合材料层板受到冲击后,试件表面损伤如图4所示。试件的正面在冲击位置处出现了凹坑,背面沿45°方向出现了少量基体开裂和分层的现象。冲击过程中,落锤的冲击能量以可恢复的弹性变形和不可恢复的多种形式的损伤变形被层板所吸收,上表面与落锤直接接触,基体和纤维发生损伤,形成凹坑;整板受到冲击载荷作用,发生弯曲,在层板背面形成较大的弯曲正应力,引起背面基体开裂,沿厚度方向的剪切应力则引起了层间分层。



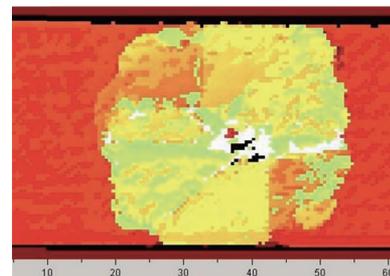
(a) 20 °C、6 J正面 (b) 20 °C、6 J背面



(c) 180 °C、10 J正面 (d) 180 °C、10 J背面

图4 层板冲击后损伤外观图

对比图4(a)和图4(c)、图4(b)和图4(d),可以发现,对于20 °C下的6 J冲击试件和180 °C下的10 J冲击试件,其正面产生的凹坑大小差别并不明显,且背面基体开裂的长度和宽度差别也不是很大,单纯依靠目视检测表面损伤,并不能有效地判断出其损伤程度。故采用超声水浸C扫设备对损伤后的层板进行损伤检测,检测结果如图5所示。



(a) 20 °C、6 J

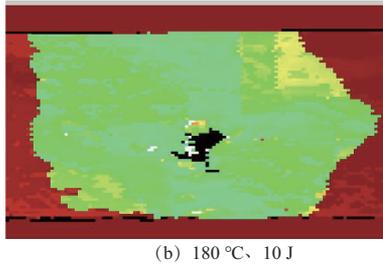


图 5 层板冲击后 C 扫描伤图

C 扫结果显示,对于 20 °C 下的 6J 冲击试件和 180 °C 下的 10J 冲击试件,沿宽度方向的损伤都已经扩展到了约束边界,而且在沿试件的长度方向;20 °C 下 6J 冲击试件的损伤长度为 34 mm 左右,180 °C 下 10J 冲击试件的损伤长度则达到了 50 mm。虽然目视检查表面损伤较小且差别不明显,但层合板内部的损伤面积已经很大,且随着温度升高和冲击能量增大,其内部损伤也在变大。

### 2.2 拉伸剩余强度与结果分析

表 1 为冲击后层板拉伸剩余强度实验结果。拉伸实验过程中,载荷-位移曲线近似呈线性关系。整个拉伸过程,试件的伸长率并不高,故其拉伸剩余强度可通过破坏载荷除以层板的横截面积获得。在试件拉伸的过程中,会先听到基体断裂的声音,此时层板承载能力基本不受影响,随着位移增加,载荷随之继续增大,当纤维断裂后,其载荷迅速降低。试验件的断口均位于冲击位置附近,这是由于冲击位置处有损伤的存在,强度和刚度降低,应力较为集中,各层断口基本为纤维垂直的方向。

表 1 层板冲击后拉伸实验结果

试件编号	实验温度/°C	冲击能量/J	破坏载荷/kN	截面积/mm <sup>2</sup>	破坏强度/MPa	
					$\sigma$	$\bar{\sigma}$
T20-6-1	20	6	62.81	84.7	741.6	702.4
T20-6-2			62.06	84.5	734.4	
T20-6-3			55.37	85.1	650.6	
T20-6-4			59.62	86.5	689.2	
T20-6-5			60.36	86.7	696.2	
T20-8-1	20	8	58.71	87.5	671.0	651.5
T20-8-2			54.34	87.3	622.5	
T20-8-3			55.62	86.4	643.8	
T20-8-4			57.83	86.5	668.6	
T20-10-1	20	10	50.31	84.5	595.4	547.0
T20-10-2			46.06	86.2	533.8	
T20-10-3			46.12	90.4	510.1	
T20-10-4			47.23	86.1	548.5	
T130-6-1	130	6	55.82	87.6	637.7	676.7
T130-6-2			64.10	91.5	700.5	
T130-6-3			62.42	91.2	684.4	
T130-6-4			59.32	86.7	684.2	
T130-8-1	130	8	56.73	91.7	618.7	621.4
T130-8-2			58.72	91.9	639.0	
T130-8-3			55.82	91.4	610.7	
T130-8-4			54.36	86.5	628.4	
T130-8-5			53.82	86.8	620.0	

续表 1

试件编号	实验温度/°C	冲击能量/J	破坏载荷/kN	截面积/mm <sup>2</sup>	破坏强度/MPa	
					$\sigma$	$\bar{\sigma}$
T130-10-1	130	10	48.91	93.6	522.5	510.0
T130-10-2			44.67	90.4	494.1	
T130-10-3			46.80	91.3	512.6	
T130-10-4			44.32	86.3	513.6	
T130-10-5			43.87	86.5	507.2	
T180-6-1	180	6	52.86	89.2	592.5	615.5
T180-6-2			59.51	93.7	635.0	
T180-6-3			55.32	89.2	620.2	
T180-6-4			54.23	88.3	614.2	
T180-8-1	180	8	52.62	92.4	569.5	568.9
T180-8-2			50.17	92.8	540.6	
T180-8-3			55.21	93.3	591.7	
T180-8-4			50.86	88.6	574.1	
T180-10-1	180	10	37.32	86.7	430.4	425.2
T180-10-2			32.05	87.3	367.1	
T180-10-3			44.20	91.9	481.0	
T180-10-4			35.28	87.2	404.6	
T180-10-5			39.69	89.6	443.0	

对实验数据进一步分析,可以发现,在相同温度下,冲击能量越大,冲击后层板的剩余强度越低(图 6);在相同冲击能量下,环境温度越高,冲击后层板的剩余强度也越低(图 7)。

温度从 20 °C 上升到 130 °C 时,在 6J、8J、10J 冲击能量下,剩余强度分别下降了 3.7%、4.6%、6.8%,而温度从 130 °C 上升到 180 °C 时,剩余强度分别下降了 9.0%、8.4%、16.6%。由此可见,随着温度升高,温度对试件冲击损伤及剩余强度的影响会越大。

这是由于复合材料是各向异性材料,热膨胀率在各个方向上并不相同,当温度升高时,除了材料性能有所下降外,由于层板内部各层铺设角度不同,其热膨胀也会受到相邻铺层的限制,因而各层之间有热应力的存在,且各层之间热应力的大小也随着铺层角度的变化而变化,温度越高,层板内部的热应力越大,对强度的影响也越明显。

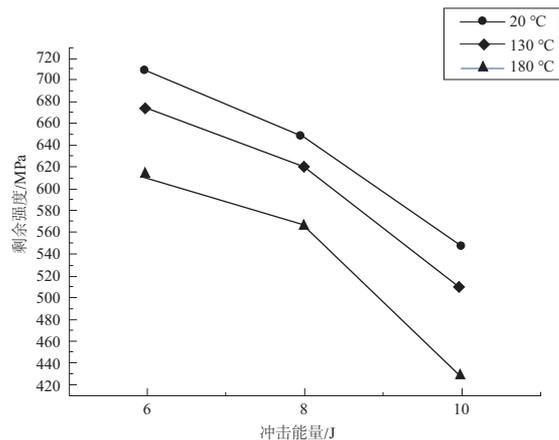


图 6 剩余强度随冲击能量变化曲线

## 4.5 实验结果分析

从图 13 可看出,在施加压力 0~10 N 之间,回波高度随压力增加而迅速升高,而在 10 N~20 N 之间,压力加倍,但回波高度仅增加 16%,在 20 N 以后,回波高度稳定在 80%。从上述分析可得出结论,为保证检测结果准确性,对探头施加的耦合力至少为 20 N。

根据式(3),在已知  $F_n = 20 \text{ N}$ 、 $D = 10 \text{ mm}$  前提下,可计算出气缸所需压力  $P$ :

$$P = \frac{F_n \times 2 \times L_2}{\pi D^2 \times L_1} \quad (4)$$

将上述已知参数代入计算式(4):

$$P = \frac{20 \times 2}{3.14 \times 0.01^2} \div 0.2 = 0.63 \times 10^6,$$

计算出  $P = 0.63 \text{ MPa}$ ,即  $0.6 \text{ MPa}$  的气压。

## 5 结语

针对径向空间狭小的管道需进行超声检测,笔者设计了一款扁平式多连杆探头架。本文对该探头架进行了力

学分析,确定了气缸压力与探头耦合力的数学关系;搭建实验平台,对耦合力与反射体回波高度之间的关系进行了研究,得出了需保证得到最大反射回波的耦合压力值;由所需耦合压力及数学关系,计算出气缸所需气压。经现场测试,施加该气压值,可保证缺陷回波信号最高,缺陷不漏检、缺陷尺寸不偏小。

### 参考文献:

- [1] 陈桂辉. 轻水堆核电站的原理与应用前景[J]. 能源与环境, 1996(1): 15-16.
- [2] 张琦. 大容量高保真海底管道超声检测数据处理技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- [3] 王朝晖, 石永春, 朱欢勤. 管道检测技术[J]. 管道技术与设备, 1999(1): 40-41.
- [4] 郑伟和, 付汝龙, 张定成, 等. 管道纵缝检测扫查器: 中国, CN201320768647.X[P]. 2014-05-28.
- [5] 胡建恺. 超声检测原理和方法[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1993.

收稿日期:2019-04-16

(上接第 46 页)

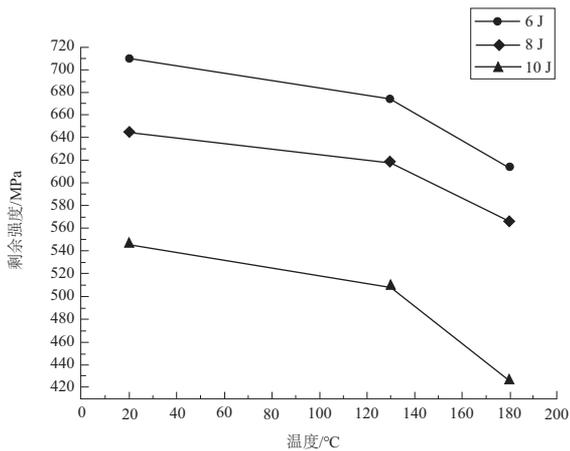


图 7 剩余强度随温度变化曲线

## 3 结语

1) 低速冲击在复合材料层板表面造成损伤较小,但会在层板内部造成基体开裂、纤维断裂和大量的分层损伤,且冲击能量越大,损伤面积越大,层板的剩余强度越低。

2) 复合材料层板内部铺层方向不同,在受热时内部会产生热应力,且随着温度升高,材料性能会有下降,在承

受相同冲击能量时,温度越高,层板损伤程度越严重,剩余强度越低。

### 参考文献:

- [1] DE Moura M, MARQUES A T. Prediction of low velocity impact damage in carbon-epoxy laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002, 33(3): 361-368.
- [2] 程小全, 张子龙, 吴学仁. 小尺寸试件层合板低能冲击后的剩余压缩强度[J]. 复合材料学报, 2012, 19(6): 8-12.
- [3] 闫李昕, 王秋成, 陈光耀. 碳纤维复合材料低速冲击特性及损伤分析研究[J]. 机电工程, 2016, 33(7): 815-821.
- [4] 吴盼, 阎建华, 俞建勇, 等. 碳纤/环氧树脂复合材料层合板低速冲击损伤机理研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(3): 31-37.
- [5] 温卫东, 崔海坡, 徐颖. T300/BMP316 复合材料层板冲击损伤研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(5): 749-754.
- [6] WANG Shixun. Low-velocity impact and residual tensile strength analysis to carbon fiber composite laminates [J]. Materials and Design, 2010, 42: 118-125.
- [7] KOO J M, CHOI J H, SEOK C S. Prediction of residual strength of CFRP after impact [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 54: 28-33.
- [8] 王志, 张雷, 陈健, 等. 碳纤维环氧树脂复合材料高温力学性能研究[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(12): 1659-1663.
- [9] 姚佳伟, 张腾, 牛一凡. 非连续湿热作用下树脂基复合材料性能变化及机理的研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(12): 83-86.

收稿日期:2019-04-26