

不同针刺密度预制体厚度的三维扫描及其与人工测试结果的比较

宋彦 刘延友 陈建剑 程海霞

南京玻璃纤维研究设计院有限公司, 江苏 南京 211122

摘要:扫描仪是检测预制体型面精度的有效手段之一。探究分辨率、曝光度及针刺密度对扫描仪测量精度的影响,发现:分辨率对扫描仪测量精度的影响小,曝光度对扫描仪测量精度的影响大;针刺密度越大,对扫描仪测量精度的影响越小,所得扫描厚度与实际厚度的差值越小,反之则反之。并根据全面试验拟合得到预制体扫描厚度与实际厚度之差与针刺密度的线性关系方程。基于该方程,可在已知针刺密度及扫描厚度的基础上,计算得到相对准确的预制体实际厚度,从而极大缩短产品生产过程中的质检时间,有效提高产品及公司的竞争力。

关键词:扫描仪;型面精度;预制体;分辨率;曝光度;针刺密度;扫描厚度;实际厚度;变异系数;线性关系

中图分类号:TS 171.9;TB 92

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2025)05-0047-06

3D scanning of thickness of preforms with varying needle-punched densities and its comparison with manual measurement results

Song Yan, Liu Yanyou, Chen Jianjian, Cheng Haixia

Nanjing Fiberglass Research & Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211122, Jiangsu, China

Abstract: Scanners are one of the effective means to detect the accuracy of preform planar surfaces. The influences of resolution, exposure and needle-punched density on the measurement accuracy of the scanner were studied. It was found that, the influence of resolution on the measurement accuracy of the scanner was little, while the influence of exposure on the measurement accuracy of the scanner was significant. The greater the needle-punched density, the less the impact on the measurement accuracy of the scanner, and the smaller the difference between the scanning thickness and the actual thickness. Conversely, the opposite was true. And based on the comprehensive test fitting, the linear relationship equation between the difference between the scanning thickness and the actual thickness of the preform and the needle-punched density was obtained. Based on this equation, the relatively accurate actual thickness of the preform could be calculated on the basis of the known needle-punched density and scanning thickness. This significantly shortens the quality inspection time in the product production process and effectively enhances the competitiveness of the product and the company.

收稿日期:2024-11-19

作者简介:宋彦,男,1995年生,硕士,工程师,主要从事立体织物的研究工作,790178403@qq.com

Keywords: scanner; body surface accuracy; preform; resolution; exposure; needle-punched density; scanning thickness; actual thickness; coefficient of variation; linear relationship

先进复合材料因在性能和功能方面具有独特的优势而成为航空航天用材的重要组成部分^[1-2]。作为复合材料增强体的预制体,其多由石英纤维、碳纤维等无机纤维经手工或机械编织而成,是一种具备三维结构的立体纺织品。预制体生产过程中,对其型面尺寸的检测十分严格,且对检测结果的精度要求极高^[3]。目前,预制体厚度的检测方法主要有插针法和卡尺法2种,但它们均受限于预制体的状态,无法在产品工序状态下测量,且存在测量效率低、检测流程繁琐、无法反映预制体整体型面精度等不足,因此亟需一种新的检测方式弥补上述2种检测方法的不足。

非接触式扫描检测是测量预制体形变的一种有效方法。如,利用扫描仪可获得预制体外型面数据,并可根据得到的数据指导下一步的作业。该方法作为空间数据采集的有效手段,正以测量快速、精确且无接触等优势,在众多领域发挥着越来越重要的作用^[4]。

当前,预制体形变检测技术已趋于成熟,并具有极大的实用价值,但检测仪器能否达到标称精度还有待验证^[5]。目前,有关三维激光扫描仪的精度研究主要聚焦于中长距扫描仪。此类扫描仪可通过建立室外检校场进行校核^[6],而短程扫描仪则需采取其他方法进行校核。

关于扫描仪已开展很多研究,如:李泉等^[7]对扫描仪的误差进行了分类,但数据不具有普遍性;张启福等^[8]对扫描仪精度进行了校核,但方法过于复杂,工序时间长,不适用于工业生产线;陈福兴等^[9]基于扫描仪扫描叶片,探究扫描仪的实用性,但研究对象与本文研究对象不一致。综上可知,很少有扫描技术被用于检测预制体的型面^[10-11]。基于此,本文将利用型面扫描仪对预制体型面展开检测,对比分析扫描仪检测结果和人工检测结果,探究扫描检测在预制体型面检测领域的适用性。

1 预制体型面数据的采集

1.1 三维光学扫描仪扫描原理

目前,预制体型面精度控制多使用 TrackScan-

P42 跟踪式三维扫描仪(图1)。该扫描仪采用智能光学跟踪测量技术,并配备了一套高品质光学设备,无需贴点即可完成超高精度动态三维测量,可应用于质量控制、产品开发及逆向工程等多个领域。



图1 TrackScan-P42 跟踪式三维扫描仪
Fig. 1 TrackScan-P42 tracking 3D scanner

基于不同的扫描场景需求,TrackScan-P42 跟踪式三维扫描仪可在多种工作模式间自由切换。如:34束交叉蓝色激光模式,能实现高效、灵活的扫描;7束平行蓝色激光模式,能精细扫描出产品的细节;单束蓝色激光模式,能迅速获取深孔及死角位置的三维数据。

TrackScan-P42 跟踪式三维扫描仪由跟踪单元、扫描单元及计算单元组成。其扫描原理是,扫描头向被扫描对象投射激光,跟踪头实时捕获该激光信号。由于激光会随扫描对象表面形貌发生变形,故被跟踪头捕获的激光信号经解析后,可得到连续的三维数据。TrackScan-P42 跟踪式三维扫描仪最大扫描面幅为310 mm×350 mm,其他技术参数见表1。

表1 TrackScan-P42 跟踪式三维扫描仪技术参数
Tab. 1 Technical parameters of TrackScan-P42 tracking 3D scanner

| 项目 | 参数 |
|-----------|-----------|
| 激光线数量/束 | 42 |
| 测量精度/mm | 0.025 |
| 最高扫描速率/Hz | 1 900 000 |
| 最小分辨率/mm | 0.02 |
| 工作温度/℃ | -10~40 |

1.2 检测数据处理过程

三维光学扫描获取的数据通常包含较多的噪点,因此扫描完成后,需对扫描得到的三维模型进行去噪处理。去除噪点后,将点云模型合成为面云模型,以达到精简数据的目的,同时确保模型曲率不发生明显的变化。最后,将精简的面云模型导入对比软件进行分析,分析内容包括模型配准、三维(3D)比较、二维(2D)比较、预制体截面分析等,并最终生成分析报告。

2 不同扫描参数对预制体型面测量精度的影响

TrackScan-P42 跟踪式三维扫描仪使用的扫描软件涉及分辨率与曝光度 2 项参数。分辨率用于设置激光点的密度即扫描细节的展示程度,曝光度用于设置激光线的亮度。分辨率越小,细节越多,数据量越大。为了准确验证扫描参数的改变对预制体型面测量精度有无影响,本文采用单因素试验法对不同扫描参数条件下得到的扫描结果进行分析验证。

2.1 试验用预制体试样

选择机械化编织工艺制备的预制体作为本研究用试样。预制体试样呈规则矩形,具备一定的厚度,主要规格参数如表 2 所示。

表 2 预制体试样规格参数

Tab. 2 Specification parameters of perform sample

| 项目 | 参数 |
|--------------------------|-----------------------|
| 尺寸/mm | 470(长), 470(宽), 30(高) |
| 质量/kg | 4.0~4.2 |
| 密度/(g·cm ⁻³) | 0.66~0.69 |

2.2 试验过程及分析

利用 TrackScan-P42 跟踪式三维扫描仪对预制体试样进行扫描,具体步骤:先取距离预制体试样相邻侧面 150 mm 的 4 个点,分别标记为 D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 ;随后,将试样平放在工位台上,工位台须确保水平放置,并利用小木槌轻敲试样上表面,使试样下表面与工位台贴合;接着,设置曝光度为 1 lx·s,分辨率分别为 1、5 和 9 mm,开始扫描;扫描结束后,将点云模型合成为面云模型,再导入后处理分析软件进行对比分析,即得图 2 所示的型面对比图。

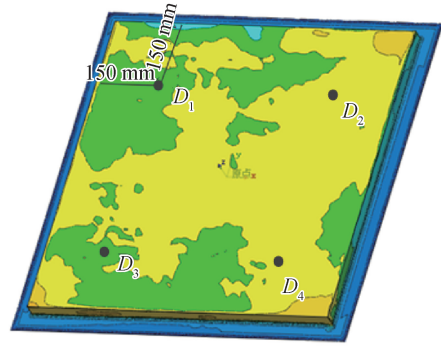


图 2 预制体试样型面对比图

Fig. 2 Comparison diagram of preform specimen surface

对比分析完成后,利用点比较测量 D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 这 4 个点位的厚度,结果如表 3 所示。

表 3 用不同分辨率参数测得的试样厚度(曝光度为 1 lx·s)

Tab. 3 Sample thicknesses measured with different resolution parameters (exposure was 1 lx·s)

| 分辨率/mm | 厚度/mm | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| | D_1 点位 | D_2 点位 | D_3 点位 | D_4 点位 |
| 1 | 29.876 | 30.134 | 29.956 | 30.276 |
| 5 | 29.534 | 29.767 | 29.843 | 30.313 |
| 9 | 29.635 | 29.919 | 29.954 | 29.997 |

同样,设置分辨率为 1 mm,曝光度分别为 1、5 和 9 lx·s,开始扫描。扫描结束后,将点云模型合成为面云模型,导入后处理分析软件进行对比分析。最后,利用点比较测量 D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 这 4 个点位的厚度,结果如表 4 所示。

表 4 用不同曝光度参数测得的试样厚度(分辨率为 1 mm)

Tab. 4 Sample thicknesses measured with different exposure parameters (resolution was 1 mm)

| 曝光度/(lx·s) | 厚度/mm | | | |
|------------|----------|----------|----------|----------|
| | D_1 点位 | D_2 点位 | D_3 点位 | D_4 点位 |
| 1 | 29.735 | 30.211 | 30.176 | 30.218 |
| 5 | 29.768 | 30.011 | 30.126 | 30.117 |
| 9 | 29.860 | 29.989 | 29.909 | 29.789 |

最后,利用插针法测量这 4 个点位的实际厚度。具体操作为,取 100.0 mm 长的钢针,分别垂直插入预制体测量点位 D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 处,待钢针一端触及桌面时,垂直轻放钢板尺于预制体试样上表面,读取钢针露出预制体试样外的长度,并计算各测量点位处预制体的实际厚度(分别为 $\delta_{a,1} = 29.4$ mm、 $\delta_{a,2} = 30.0$ mm、 $\delta_{a,3} = 30.5$ mm、 $\delta_{a,4} = 30.8$ mm)。根

据式(1)计算扫描厚度相对插针法测得实际厚度的变异系数(C_V):

$$C_V = \frac{\sqrt{(\delta_{s,1} - \delta_{a,1})^2 + (\delta_{s,2} - \delta_{a,2})^2 + (\delta_{s,3} - \delta_{a,3})^2 + (\delta_{s,4} - \delta_{a,4})^2}}{4} \quad (1)$$

式中: $\delta_{s,i}$ ——扫描仪测得不同点位的扫描厚度, mm,其中*i*=1、2、3、4,分别对应点位 D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 ;

$\delta_{a,i}$ ——插针法测得不同点位的实际厚度, mm,其中*i*=1、2、3、4,分别对应点位 D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 。

不同分辨率参数及不同曝光度参数下测得扫描厚度相对实际厚度的 C_V 值如图3所示。可以看出:当曝光度为 $1 \text{ lx}\cdot\text{s}$,分辨率分别为1、5和9 mm时,测得扫描厚度相对实际厚度的 C_V 值变化较小,故可以判定分辨率的改变对预制体型面测量精度的影响较小,实际扫描作业过程中可采用较小的分辨率,这样能缩短软件合并点云与对比的时间,进而缩短测试时间,提高效率;当分辨率为1 mm,曝光度分别为1、5和9 $\text{lx}\cdot\text{s}$ 时,测得扫描厚度相对实际厚度的 C_V 值逐渐增大,故扫描过程中可使用较小的曝光度减小 C_V 值,提高测量精度。

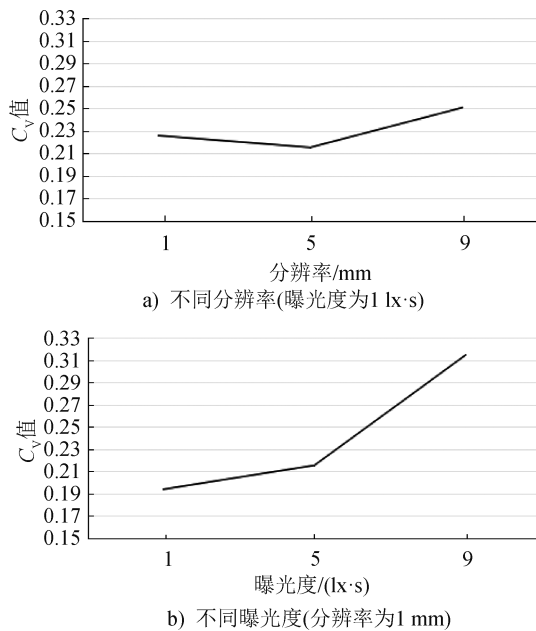


图3 用不同参数测得扫描厚度相对实际厚度的 C_V 值
Fig. 3 C_V values of scanning thickness relative to actual thickness with different parameters

3 针刺密度对预制体型面测量精度的影响

3.1 试验过程及分析

为探究针刺密度对扫描仪测量精度的影响,继续以 D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 点位为中心,在预制体试样上划分4块 $100 \text{ mm}\times 100 \text{ mm}$ 的区域,并根据不同的针刺密度对这4块区域进行针刺,具体如图4和表5所示。

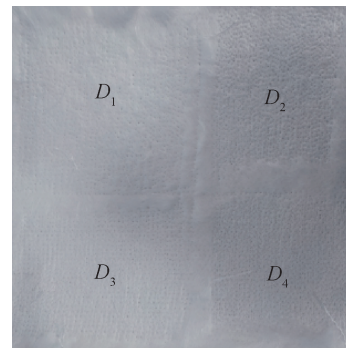


图4 各区域针刺效果图

Fig. 4 Illustration of needle-punched effect of each area

表5 各区域针刺密度

Tab. 5 Needle-punched density of each area

| 测试区域 | 针刺密度/(刺 $\cdot\text{cm}^{-2}$) |
|----------|---------------------------------|
| D_1 区域 | 5 |
| D_2 区域 | 10 |
| D_3 区域 | 15 |
| D_4 区域 | 20 |

针刺完成后,利用插针法测量试样4块区域的实际厚度,各区域测4次,结果取平均值。再将预制体试样放置于工位台上,设置软件的曝光度为 $1 \text{ lx}\cdot\text{s}$ 、分辨率为1 mm,并在扫描后将点云模型合成为面云模型,再导入后处理分析软件进行对比分析,得到试样4块区域各自的扫描厚度。各区域结果取4次测试的平均值。表6归纳了各区域的实际厚度与扫描厚度。

表 6 各区域的实际厚度与扫描厚度

Tab.6 Actual thickness and scanning thickness of each area

| 测试区域 | 实际厚度/mm | 扫描厚度/mm |
|-------------------|---------|---------|
| D ₁ 区域 | 31.5 | 35.6 |
| D ₂ 区域 | 31.2 | 34.3 |
| D ₃ 区域 | 31.0 | 33.5 |
| D ₄ 区域 | 30.5 | 31.2 |

从表 6 可以看出,针刺密度对扫描仪得到的扫描厚度值影响很大。当针刺密度为 5 刺/cm² 时,扫描厚度较实际厚度大 4.1 mm;当针刺密度为 10 刺/cm² 时,扫描厚度较实际厚度大 3.1 mm;当针刺密度为 15 刺/cm² 时,扫描厚度较实际厚度大 2.5 mm;当

刺密度为 20 刺/cm² 时,扫描厚度较实际厚度大 0.7 mm。可以得出,针刺密度越大,预制体试样的扫描厚度越接近实际厚度。这是因为针刺密度较低时,网胎有部分浮起,此时采用插针法测量时,蓬松的浮起部分被钢板尺压下,导致出现扫描厚度值大于实际厚度值的情况。为解决此类问题,后文将展开全面试验,以找出实际厚度值与扫描厚度值之间的关系。

3.2 全面试验及分析

选取 5 块相同的预制体试样 1[#]、2[#]、3[#]、4[#] 及 5[#],按照前述方法找出 D₁、D₂、D₃、D₄ 这 4 个点位,测试 4 个区域的实际厚度和扫描厚度,结果如表 7 所示。

表 7 5 块试样各区域的实际厚度及扫描厚度

Tab.7 Actual thickness and scanning thickness of each area of five samples (单位:mm)

| 试样 | D ₁ 区域 | | D ₂ 区域 | | D ₃ 区域 | | D ₄ 区域 | |
|----------------|-------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|
| | 实际厚度 | 扫描厚度 | 实际厚度 | 扫描厚度 | 实际厚度 | 扫描厚度 | 实际厚度 | 扫描厚度 |
| 1 [#] | 31.8 | 35.3 | 31.5 | 33.1 | 31.4 | 32.8 | 31.0 | 31.8 |
| 2 [#] | 31.6 | 34.2 | 31.3 | 33.2 | 31.3 | 33.3 | 30.5 | 31.6 |
| 3 [#] | 31.6 | 34.4 | 31.4 | 33.4 | 31.0 | 33.1 | 30.7 | 31.9 |
| 4 [#] | 32.0 | 35.1 | 31.5 | 34.6 | 31.2 | 33.8 | 31.0 | 31.6 |
| 5 [#] | 31.5 | 35.3 | 31.3 | 33.5 | 31.0 | 33.1 | 30.5 | 31.5 |

从表 7 可以看出;D₁ 区域的实际厚度平均值为 31.70 mm,扫描厚度平均值为 34.86 mm,两者差值为 3.16 mm;D₂ 区域的实际厚度平均值为 31.40 mm,扫描厚度平均值为 33.56 mm,两者差值为 2.16 mm;D₃ 区域的实际厚度平均值为 31.18 mm,扫描厚度平均值为 33.22 mm,差值为 2.04 mm;D₄ 区域的实际厚度平均值为 30.74 mm,扫描厚度平均值为 31.68 mm,差值为 0.94 mm。将扫描厚度与实际厚度之差与针刺密度进行线性拟合,得到厚度差值和针刺密度的线性关系如图 5 所示。

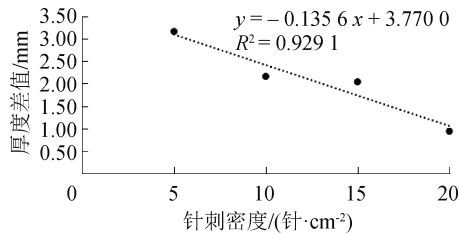


图 5 扫描厚度与实际厚度之差和针刺密度的线性关系
Fig.5 Linear relationship between the difference between scanning thickness and actual thickness and needle-punched density

拟合的线性方程:

$$y = -0.1356x + 3.7700 \quad (2)$$

式中:y——扫描厚度与实际厚度之差;

x——针刺密度。

基于式(2),在 5~20 刺/cm² 的针刺密度范围内,利用得到的扫描厚度可计算出相对准确的预制体实际厚度,从而缩短产品生产过程中的质检时间。

4 试验验证

对得到的线性方程进行试验验证。选取 1 块预制体随意针刺,测得针刺密度为 13 刺/cm²。对扫描仪扫描的结果进行后处理,得到预制体的扫描厚度为 15.50 mm。将该扫描厚度值代入式(2),得到计算的实际厚度值约为 13.49 mm,而预制体实测厚度为 13.40 mm,计算的实际厚度值在合理的误差范围内。

5 结论

(1) 多次试验发现,分辨率对预制体型面测量精度影响较小,可使用较小的分辨率扫描以缩短软件将点云模型合成为面云模型的时间,以及对比分析的时间,进而缩短产品生产过程中的质检时间,提高生产效率。

(2) 曝光度增加,测得扫描厚度相对实际厚度的 C_v 值增大。因此,实际生产过程中可使用较小的曝光度提高扫描仪测量精度。

(3) 针刺密度影响预制体扫描厚度值与实际厚度值的接近程度。针刺密度越大,扫描厚度值越接近实际厚度值。针刺密度越小,扫描厚度值越偏离实际厚度值。

(4) 针刺预制体扫描厚度与实际厚度之差与针刺密度呈一定的线性关系,拟合的线性方程为 $y = -0.1356x + 3.7700$ 。基于该方程,利用得到的扫描厚度可计算出相对准确的预制体实际厚度。



(上接第 39 页)

- [33] GAO Y, LI Z H, CHENG B W, et al. Superhydrophilic poly(*p*-phenylene sulfide) membrane preparation with acid/alkali solution resistance and its usage in oil/water separation[J]. Separation and Purification Technology, 2018, 192: 262-270.
- [34] WANG Y F, HUO X Y, PENG M, et al. Superhydrophilic polyphenylene sulfide membrane with enhanced ion transfer for alkaline water electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 65: 872-880.
- [35] 杨光, 孙颖, 王志杰, 等. 一种聚苯硫醚纤维织物型亲水隔膜及其制备方法: CN118292259A[P]. 2024-07-05.
- [36] ZHANG X J. Polyphenylene sulfide fabric for water electrolysis cell and method for producing the same: JP2019513902A[P]. 2019-05-30.
- [37] 邢颖, 杨晓红, 李明, 等. 改性聚苯硫醚纤维的性能研究[J]. 棉纺织技术, 2023, 51(1): 28-31.
- [38] 郭雪萍. 吸湿性聚苯硫醚纤维的制备及其结构与性能的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [39] 申霄晓, 张蕊萍, 连丹丹, 等. 吸湿性 PPS 共混母粒的制备及性能研究[J]. 合成纤维工业, 2013, 36(5): 12-15.
- [40] REN H H, XU D X, YAN G M, et al. Effect of carboxylic polyphenylene sulfide on the micromechanical properties of polyphenylene sulfide/carbon fiber composites [J]. Composites Science and Technology, 2017, 146: 65-72.
- [41] YAN D W, LI X D, CHEN X L, et al. Breaking the hydrophilic limitation of polyphenylene sulfide through the introduction of bulky polar monomers[J]. Polymer, 2024, 291: 126598.