

# 工业 CT 技术检测喷管扩散段绝热层坯料的缺陷

李金鹿 王从科 柴娟 赵付宝 于波 张霞

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

**摘要** 采用工业 CT 技术对复合材料布带缠绕的喷管扩散段绝热层坯料内部缺陷进行了检测。通过工业 CT 密度值、密度降值结合 CT 图像分析对喷管扩散段绝热层坯料的内部主要缺陷特征进行了描述。将工业 CT 检测技术与制造工艺相结合,可及时发现缺陷并改进制品生产工艺,对提高制品质量有较大的实际意义。

**关键词** 工业 CT 技术 CT 密度值 CT 密度降值

火箭发动机的喷管扩散段绝热层坯料由复合材料布带缠绕而成,该布带缠绕制品一般由两种材料构成,内层为碳纤维材料,外层为高硅氧材料,它的隔热性能和耐烧蚀性能适中,而且成型工艺简单。国内外大部分的火箭发动机喷管扩散段都是由它缠绕而成。火箭发动机内部任何一部分出现缺陷都会严重地影响整体性能,生产使用单位对制品质量要求相当严格。为了确保固体火箭发动机内部质量,可将工业 CT 技术进一步应用于固体火箭发动机部件的内部质量检测。

喷管扩散段绝热层坯料各层之间具有明显的各向异性,在布带的层间方向上,制品的质量缺陷影响最严重。复合材料布带缠绕制品的成型工艺按基体材料的状态可分为干法缠绕和湿法缠绕两种。大型的喷管扩散段构件一般采用预浸胶布带缠绕(干法缠绕)成型。实际生产的布带缠绕制品,由于缠绕初始密度限制及抽真空加压固化工艺的实施,会呈现出周向皱折或径向皱折。在不同材质的布带缠绕层的交界面上,常会出现无规律的凹凸状,这些凹凸部位是由于工艺限制而形成的,也是最容易出现缺陷的部位。而工业 CT 检测是最为理想的检测方法。

## 1 实验部分

### 1.1 工业 CT 技术

工业 CT 技术是获得制品截面图像的一种技术。它是根据物体外部获取的某种物理量的测试值,重建物体内部某一个特定断面上的物理量的无重迭二维图像。

工业 CT 技术能以计算机图像的形式,清晰、直观、准确地呈现被检测物体断面内部的结构、密度变化以及缺陷的性质、位置和大小。

运用 CT 技术研究材料在使用过程中损伤破坏的机理是目前材料科学和力学等领域研究的一个热

点课题。工业 CT 技术是 20 世纪 80 年代发展起来的先进无损检测技术,由于 CT 的检测特点是不受制品材料种类、形状结构等因素的影响,成像直观、分辨率高,尤其在检查复杂的制品方面显示了特有的优势。工程结构材料在使用过程中呈现出各种尺度和维数的缺陷,微结构形态、缺陷分布和形貌、界面特性、孔隙率等都极大地影响着材料宏观整体韧性、强度、硬度等力学性能,因此对内部结构的检测成为深入认识工程结构材料性能的首要任务,CT 技术是材料内部微观结构状况的最佳无损检测手段<sup>[1]</sup>。

### 1.2 密度测量原理

CT 图像是一幅无量纲的 X 射线密度图。由于使用过程中材料内部一定区域微孔洞、微裂纹的活动必然引起该区域密度的变化,材料内部一定区域密度的异常变化反映本区域微孔洞、微裂纹的活动效应。根据 CT 物理原理,CT 图像值与材料对应区域的密度成正比,CT 图像的灰度高低反映出对应部位的材料密度大小。

由重建得到的二维灰度图像能得到图像的像素值(即 CT 密度值),CT 密度值与小体元内材料衰减系数的平均值成比例。由于衰减系数与材料的物理密度  $\rho$  成近似比例关系,通过标定技术可建立 CT 值与物理密度之间的对应关系,见式(1):

$$\rho = A + B \times CT \quad (1)$$

式中:  $A$ ——常数,随不同的检测环境而不同。

该方法是在一定条件下,用几种已知密度的材料进行检测,来标定出公式(1)中的  $B$  值;

在相同条件下,对被检物进行检测,利用式(1)的关系,求出其  $\rho$ <sup>[2-3]</sup>。再通过对 CT 密度值的分析得到缺陷位置的密度降,见式(2)。

缺陷位置密度降值 =

$$\frac{\text{整体 CT 密度平均值} - \text{缺陷局部 CT 密度平均值}}{\text{整体 CT 密度平均值} - \text{本底噪声平均值}} \quad (2)$$

1.3 原材料

喷管扩散段绝热层坯料: 锥形体, 最大直径 800 mm, 高 850 mm, 中国兵器工业集团第五三研究所。

1.4 仪器设备

X 射线工业 CT 检测系统: GTIP-450 型, 德国依科视朗公司。

2 结果与讨论

2.1 CT 检测工艺

X 射线工业 CT 检测系统有两套射线探测器: 线阵扫描探测器、面阵扫描探测器。最大出射线电压 450 kV, 最大出射线电流 10 mA, 射线焦点 2.5 × 2.5, 空间分辨率 4 线对/mm, 密度分辨率 0.1%。

根据坯料情况, X 射线检测系统采用线阵扫描探测器, 三代 CT 扫描方式检测。为了提高空间分辨率, 一般在作 CT 断层扫描时将制品紧贴探测器, 采用小焦点 (2.5 × 2.5) 出射线。由于喷管扩散段绝热层坯料直径较大, 为了保证单个角度的采集数据量, 因此采样的角度设 3 600 个。同时增加行扫描合并数量, 提高采样数据量和图像清晰度。具体 X 射线工业 CT 检测工艺参数见表 1。

表 1 X 射线工业 CT 检测工艺参数

| SOD   | ODD | 焦点 | 准直器宽度 | 采样角度数 | 重建范围        | 像素合并数 | 行合并数 | 积分时间 | 电压 / kV | 电流 / mA |
|-------|-----|----|-------|-------|-------------|-------|------|------|---------|---------|
| 1 120 | 380 | 小  | 1.5   | 3 600 | 024 × 1 024 | 3     | 10   | 24   | 350     | 2.5     |

2.2 结果分析

在复合材料制品中主要缺陷依次为分层、孔隙、气孔、富脂、贫胶、脱粘、疏松、变形和弱粘, 其中分层所占比例最高, 超过 50%, 气孔、孔隙的比例也比较高, 其它缺陷相对较低。

由 CT 断层图像分析可以检测出复合材料布带缠绕喷管扩散段绝热层坯料内部的分层、气孔、夹杂等几种常见缺陷。喷管扩散段绝热层坯料的图像特征与 CT 的密度值、CT 的密度降值有对应的关系, 结合 CT 密度曲线、密度降等参数可以确定缺陷类别。由于复合材料成型过程的复杂性、结构形式的多样化和成型工艺的差异, 引起成型过程受力和温度分布的复杂, 致使树脂流动形式也相对复杂得多, 产生的缺陷类型及分布也有所不同。

(1) 分层缺陷

对于层间检测, CT 检测结果只能提供复合材料

层间的结合信息, 无法给出缺陷形成的确切原因。缺陷与被检测体的结构形式有一定的关联性, 分层的形成机制较为复杂, 原因较多。

图 1 为分层缺陷。该分层缺陷距离小端面 148 mm、距离内壁 7.8 mm, 长度约为 1/3 圆周, 分层最大宽度为 1.67 mm, 该处缺陷密度降为 22.979%。颜色接近黑色, 呈连续或断续的不规则环状或皱折状。缠绕层之间孔隙内的密度均匀, 接近空气密度曲线, 这种缺陷一般发生在喷管扩散段绝热层坯料碳层内部。

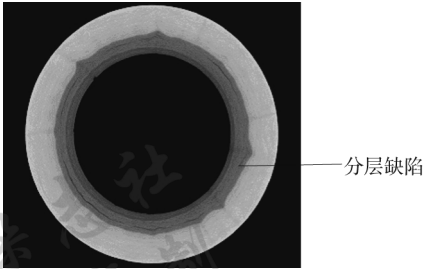


图 1 分层缺陷

图 2 为分层缺陷的密度降曲线。层间孔隙的长度越大, CT 曲线的密度降值就越大。CT 密度降大于 20% 的区域, 其大部分为分层。CT 检测对于层间孔隙较小的分层检出效果不明显, 因此 CT 密度降曲线中密度降低于 20% 的缺陷并不能准确反映缺陷情况。实验发现, 分层的密度降一般在 20% ~ 40%。

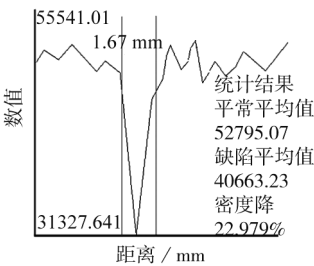


图 2 分层缺陷的密度降曲线

结合该坯料加工工艺分析, 局部的分层表征着严重的局部损伤。一方面复杂坯料结构上的非对称性和复杂性会造成纤维分布不均, 以及结构中温度分布不均, 降温过程中制品内部产生较大的内应力, 会导致分层; 另一方面排气不畅, 成型过程中气孔长大形成分层, 其形成机制与孔隙相同; 还有可能预浸料局部污染、夹杂等造成分层。

分层不易控制, 缺陷件比例因结构形式的差异而相差较大。含曲率制品多采用阳模成型, 如果曲率半径过小, 则预浸料铺层时与模具配合不好, 造成预浸料层间粘接不好, 易产生分层。自由边界产生

的缺陷具有一定的随机性,分层相对多一些,固化加压不好,也会产生分层缺陷。

坯料表面分层则有可能是缠绕工艺不当引起的层间出现错位滑移或者其它原因造成的。制品厚度对分层影响较大,制品较厚时,成型过程中厚度方向存在温差,有时外表面树脂已凝胶而内部尚未凝胶,夹杂空气和挥发份不易排出,会在制品外表面产生疏松和分层。

(2) 夹杂缺陷

对于夹杂检测,CT 检测结果只能提供复合材料内部夹杂尺寸、形状、位置等信息,但无法给出缺陷形成的确切原因及夹杂缺陷的属性。

图 3 为夹杂缺陷。该缺陷距离小端面 50 mm、距离内壁 1.05 mm,长度约为 2.228 mm,该处缺陷密度降为 -115.48%。其灰度特征多为亮色,其形状多为点状、块状、条状,缺陷产生部位非常明显,密度降曲线的峰值很高,最大 CT 密度值达到 65535。

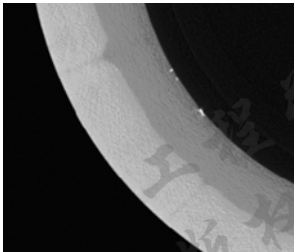


图 3 夹杂缺陷

图 4 为夹杂缺陷的密度降曲线。由图 4 可知,在对高密度夹杂物的检测中,CT 密度值曲线的最大值一般对应夹杂物的物理密度大小。对于高密度夹杂物质的检测,CT 曲线中密度降的数值为负值。实验发现,高密度夹杂的密度降一般在 -50% 以上。由于自然界中存在很多密度一致的金属材料和非金属材料,因此在判定夹杂属性时有很大难度。结合生产工艺分析,夹杂缺陷可能是由于原材料中自带的,或者是固化过程中模具内的脱落物造成。

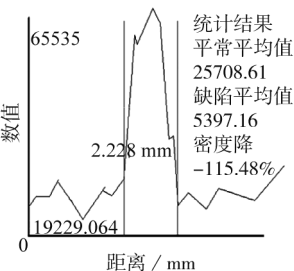


图 4 夹杂缺陷的密度降曲线

(3) 气孔缺陷

气孔和孔隙形成机制基本相同,主要来源均是

夹杂空气、吸湿水、挥发性溶剂等,气孔是孔隙长大到一定程度,呈宏观状态出现的一种缺陷形式。气孔多以单个状态出现,而孔隙多呈密集型分布。

制品厚度对气孔影响较大,制品较厚时,成型过程中厚度方向存在温差,有时外表面树脂已凝胶而内部尚未凝胶,夹杂空气和挥发份不易排出,会在制品内部形成气孔和孔隙。

图 5 为气孔缺陷。该缺陷距离小端面 20 mm、距离内壁 1.05 mm,长度为 1.34 mm,该处缺陷密度降为 74.658%。其特征多为黑色孤立的小范围区域存在,其形状多为圆形、椭圆形、条状、块状,缺陷处 CT 密度均匀,与空气的 CT 密度相近。



图 5 气孔缺陷

图 6 为气孔缺陷的密度降曲线。由图 6 可知,气孔缺陷曲线斜率较大,说明气孔与制品界限明确,无过渡区。实验发现,气孔的密度降一般在 40% ~ 80%。

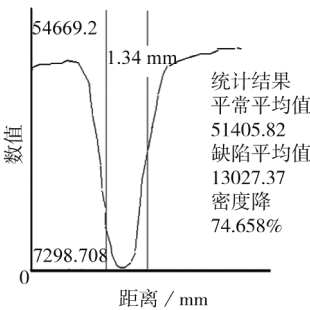


图 6 气孔缺陷的密度降曲线

结合生产工艺分析,气孔可能是由于含胶量过高、含胶量不均匀或固化工艺不当、夹杂空气和挥发份不易排出等原因造成的。

(4) 裂纹缺陷

CT 图像中裂纹区域的平均灰度较周围等面积区域的平均灰度会出现一个突变,采用区域灰度均值进行分析。

图 7 为裂纹缺陷。该缺陷距离小端面 60 mm、距离内壁 7.2 mm,长度约为 16 mm,裂纹最大宽度为 0.718 mm,该处缺陷密度降为 16.67%。其颜色特征多为黑色孤立的小范围区域存在,其形状多为

条状、块状、皱折状、线状等。缺陷处 CT 密度均匀,与空气的 CT 密度相近。

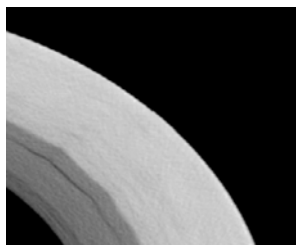


图 7 裂纹缺陷

裂纹缺陷一般分为短裂纹、长裂纹或短裂纹群。

图 8 为裂纹缺陷的密度降曲线。裂纹的长度越大,CT 曲线的密度降值就越大。CT 检测对于层间孔隙较小裂纹的检出效果不明显。实验发现,裂纹的密度降一般在 10% ~ 20%。

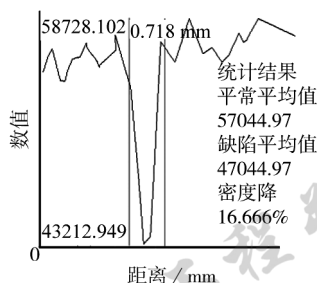


图 8 裂纹缺陷的密度降曲线

结合工艺分析裂纹(制品内部裂纹及外部裂纹)可能是由于产品局部含胶量过低或内部应力与机械加工时共同作用产生的。

### 3 CT 扫描图像的影响因素

CT 扫描图像时有许多影响因素。这些影响因素会引起误判,掩盖缺陷。CT 扫描图像的主要影响因素是产生伪像。由于 X 射线 CT 系统对微弱信号

变化十分敏感且图像上每一点都是经过大量运算给出的结果,这有可能引入与被测件物理结构不相符的伪像。伪像的出现容易产生误判而且影响图像的空间分辨率及图像对比度。

形成伪像的原因主要为:体积效应伪像、边缘效应伪像、空洞效应伪像、射束硬化伪像、散射引起的伪像、探测器不一致引起的伪像等。采样数据不足、机械系统存在偏差、机械系统精度不够、探测器通道之间存在干扰或不匹配、射线能量输出不稳定、系统的噪声等也会引起伪像。

通过实验发现,采用以下方法可以有效地消除或降低伪像:①前置滤波。射线源前置滤波器为 3 mm 铜片,使射线能量单一。②楔块补偿。利用相同材质的楔块进行补偿,减小厚度比。③移动被测件位置。对于难以消除的环状伪像可以通过移动被测件位置,将伪像从重建图像移除(仅限于三代扫描,可能会引起空间及密度分辨率的变化)。

### 4 结论

采用工业 CT 技术对复合材料布带缠绕的喷管扩散段绝热层坯料的内部缺陷特征进行了分析研究,其结果准确可靠,将工业 CT 检测与制造工艺相结合,可及时发现缺陷并改进制品生产工艺,对提高制品质量有较大的实际意义。

### 参考文献

- [1] 敖波,张定华,赵歆波,等. CT 图像中裂纹缺陷的理论分析[J]. CT 理论与应用研究,2005,14(4):10-16.
- [2] 杨文海,何得昌,绦军培,等. γ射线工业 CT 技术在高能炸药密度检测中的应用[J]. 火炸药学报,2001(3):33-34.
- [3] 王珏,黄苏红,蔡玉芳. 工业 CT 材料密度测量方法研究[J]. 计算机工程与应用,2010,46(2):203-205.

## INDUSTRIAL CT TECHNOLOGY TESTING DIFFUSION SECTION OF THE BLANK LAYOUT OF NOZZLE DEFECTS

Li Jinlu, Wang Congke, Chai Juan, Zhao Fubao, Yu Bo, Zhang Xia

(CNGC Institute 53, Jinan 250031, China)

**ABSTRACT** Adopting industrial CT technology, the internal defect of the nozzle diffusion section of the blank layout winding with composite cloth belt was tested. Adopting industrial CT density values, density drop value combining CT image analysis, the nozzle diffusion period internal main defect feature were described. Combining industrial CT technology with manufacturing technology, the defects could be found in time and the production technology could be modified, the application had practical significance for improving the quality of the product.

**KEYWORDS** industrial CT technology, CT density values, CT density drop value

### 福特座椅垫与椅背 40% 为大豆聚氨酯泡沫材料

福特 2011 款 Explorer 车采用可回收循环再利用材料比例高达 85%,其中 40% 为大豆聚氨酯泡沫材料,用于座椅垫

与椅背;25% 为回收再利用纤维材料,用于座椅装饰、垫枕以及地毯;此外,福特 F-150 车型生产剩余的回收再利用钢材用于 2011 款 Explorer 的隔音挡泥板/降噪板。(慧聪网)