

碳/环氧复合材料缠绕压力容器的冲击损伤效果及无损检测评价技术

王小永

(兰州空间技术物理研究所, 甘肃兰州 730000)

摘 要:碳/环氧复合材料压力容器已广泛应用于空间系统。此类容器对冲击损伤非常敏感, 冲击损伤可造成容器结构强度的严重降低。详细介绍了国外进行的冲击损伤研究成果, 并对检测冲击损伤的各种无损检测技术进行了比较和评价。

关键词:碳/环氧复合材料; 压力容器; 冲击损伤; 爆破强度; 无损评价

中图分类号: TG115. 28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)03-0183-03

Effects and Nondestructive Testing Technique Evaluation of Impact Damage on Graphite/Epoxy Composite Overwrapped Pressure Vessels

WANG Xiao-Yong

(Lanzhou Institute of Space Technology Physics, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Graphite/Epoxy composite overwrapped pressure vessel was used on space system widely. This type of vessel is very susceptible to impact damage, which will seriously degrade structure strength of vessels. The research result acquired by foreign corporation was presented in detail, and all kinds of NDT techniques on impact damage were compared and evaluated comprehensively.

Keywords: Graphite/Epoxy materials; Pressure vessels; Impact damage; Burst strength; NDT evaluation

复合材料压力容器(COPVs)因具有重量轻、压力容限高和失效模式安全等优点,在空间系统中得到了广泛应用^[1]。典型 COPVs 是通过在薄壁金属(或塑胶)内衬上缠绕在复合材料基体中浸渍过的高强度纤维制造而成。国外的许多空间系统都使用了复合材料压力容器。与其它复合材料相比,碳/环氧复合材料具有更高的比强度和比模量。使用碳/环氧复合材料缠绕技术可以使压力容器的减重效果更为明显。但是,碳/环氧 COPVs 却对冲击损伤非常敏感,容器在经受肉眼不可见的低速冲击损伤后其爆破强度降低因子高达 2^[2]。因此,如果遭受冲击损伤,其发生灾难性失效的可能性就会大大提高^[3]。鉴于上述原因,开展碳/环氧 COPVs 冲击损伤效果及冲击损伤的无损检测技术研究至关重要。

笔者对国外取得的科研成果进行了介绍,并对冲击损伤的各种无损检测技术进行了比较和评价。

1 冲击损伤效果

1.1 冲击损伤效果的表征

碳/环氧 COPVs 经受外力冲击后,最直接的结果是在容器中产生了各种缺陷,如金属内衬凹陷翘屈、复合层与内衬脱粘、基体开裂和分层,严重时还可能导致纤维断裂。冲击后产生的缺陷可以采用目视检测。图 1 为碳/环氧 COPVs 经历冲击损伤时的状态变化过程。图 1 可见,冲击消失后,复合层在弹性应力作用下恢复到原位置,而内衬由于冲击时发生了塑性变形而无法恢复至原位,产生了凹陷翘屈,内衬与复合层之间发生分离,同时复合层出现了分层和裂纹等缺陷。大量试验发现,如果对冲击后的 COPVs 加压到最大预期工作压力(MEOP)或更高的压力,已发生凹陷翘屈的内衬在容器内压作用

收稿日期: 2006-07-12

作者简介: 王小永(1968—),男,硕士,高级工程师,主要从事航天复合材料压力容器的设计与研究工作。

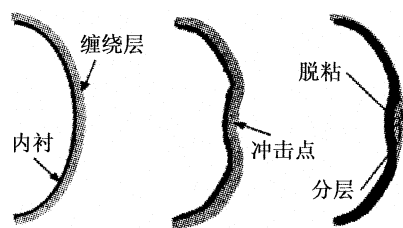


图1 碳/环氧 COPVs 冲击损伤过程示意图

下可能恢复原状,重新与复合层紧密贴合,但两者之间的脱粘依然存在,导致目视检测的有效性大大降低。由于内部产生的缺陷会导致容器的内压承载能力等性能下降,通过测量容器在经历不同能量水平冲击后其爆破强度的降低程度,就可以反映出冲击对压力容器造成的损伤效果。因此,可以通过 COPVs 被冲击后的损伤程度或容器爆破强度的降低程度来表征容器的冲击损伤效果。

1.2 冲击损伤效果

20 世纪 90 年代中期,美国航天公司开展的复合材料缠绕压力容器加强技术研究^[4]对近 200 个直径 152~508 mm 的球形和圆柱形碳/环氧 COPVs 进行冲击试验研究,根据试验中获得的数据对碳/环氧 COPVs 的冲击损伤效果进行了评价。研究表明,用不同的能量冲击碳/环氧 COPVs 产生的损伤效果各不相同^[5]。1997 年, Matt Triplett 等人对薄壁碳/环氧纤维缠绕圆柱形 COPVs 的冲击损伤效果进行了研究^[6]。研究表明,随着冲击能量的提高,裂纹长度随之增大;当能量增加到一定数值时,裂纹长度却出现减小的趋势。

2 影响冲击损伤效果的因素

大量试验结果表明,冲击能量是影响碳/环氧 COPVs 冲击损伤效果的重要因素,但不是唯一的因素,容器的几何结构对冲击损伤效果也发挥着相当重要的作用。将同样水平的冲击能量作用在几何结构不同的压力容器上,产生的损伤效果大相径庭。除此之外,冲击锤的几何尺寸、冲击位置、容器内压与填充介质也对冲击损伤效果有一定的影响。

2.1 冲击位置

对球形容器而言,冲击位置越是靠近接头处,其所引起的损伤就越弱,原因是由于与接头连接而使得此处刚度增加。容器上赤道区域的冲击与薄膜区域的冲击对容器强度产生的降低基本相同。

2.2 冲击锤尺寸

分别用直径为 12.7 mm 和 25.4 mm 半球形冲

击锤对球形和圆柱形碳/环氧 COPVs 进行了冲击试验,结果发现,对于球形容器,冲击锤尺寸对损伤结果没有影响;对于圆柱形容器,25.4 mm 的冲击锤引起的损伤比 12.7 mm 冲击锤要轻。

2.3 容器内压

内压对容器冲击损伤也有很大影响。对于球形容器,内压能够增强容器的损伤抵抗力,加压时容器刚度的增加可能是产生这种效果的主要原因。圆柱形容器在 0.5 倍 MEOP 下具有更强的冲击抗力,这可能是内压增加后容器刚度增加所产生的效果。但如果将容器内压增加到 MEOP,容器的损伤程度将加剧,使容器爆破强度额外多降低 5%~10%。其原因可能是该容器外层环向纤维的高应力状态使得这一铺层产生的损伤更为严重。

2.4 填充介质

增压介质对球形容器的损伤容限没有明显影响,但对圆柱形容器的冲击容限影响较大。气体增压介质的冲击容限低于液体介质,由此所引起的容器强度降低量将增加 10%。

3 冲击损伤的无损检测技术

几乎所有的无损检测技术都可以检测碳/环氧 COPVs 中的冲击损伤。

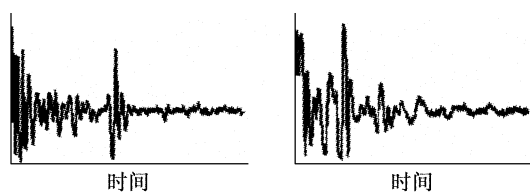
3.1 目视检测

目视法是检测 COPVs 冲击损伤最简单的方法。用肉眼或借助放大镜对容器外表面进行检查,可以发现表面纤维受损伤情况,使用着色渗透或酒精擦拭可以加强显示效果;用内窥镜对内衬内部进行检查,能够发现裂纹、凹陷翘屈等缺陷。

目视法虽然简单方便,但检测结果受到许多因素的制约,对于容器内部的各种缺陷无法检测;当损伤程度较弱时,复合层内部与内衬即使产生了比较明显的缺陷,在表面却不会有明显的肉眼可见的痕迹。另外,检测人员所掌握的知识和专业技能对目视检测结果影响很大。

3.2 超声检测

超声检测对内衬的凹陷翘屈和复合层分层非常敏感,采用超声反射法可以对冲击损伤后 COPVs 中出现的分层与脱粘进行准确定量检测。它不仅能够探测出缺陷的面积大小,而且还能对缺陷的深度进行定位。图 2 显示的是碳/环氧 COPVs 冲击损伤(脱粘)区域和完好区域超声检测波形^[6]。



(a) 正常区域

(b) 脱粘区域

图2 碳/环氧 COPV 脱粘区与正常区超声波形对比

3.3 射线照相检测

射线照相法适于对冲击后的 COPVs 进行整体检测,其检测结果可视,可判定缺陷类型(区分分层与内部空隙)。但射线照相方法需要使用相当复杂的仪器,并且在检测过程中需要对检测人员进行安全防护。

3.4 红外成像检测

红外成像法能够检测出 COPVs 中影响容器强度的各类缺陷,该方法对容器内衬的凹陷翘屈非常灵敏(此类缺陷与容器冲击凹陷中心周围的变形区域直接相关)。但如果对 COPVs 遭受冲击后重新加压,那么红外成像面积会大幅下降,原因是由于加压使得内衬凹陷重新恢复到了与碳纤维缠绕层更紧密的接触状态。相关的试验结果也表明,如果对冲击损伤后的碳/环氧 COPVs 重新进行加压,将会抹掉金属内衬凹陷翘屈的损伤痕迹,此时,采用红外成像法所能检测到的缺陷面积大约是初始缺陷面积的 70% 左右^[5,7]。

3.5 涡流检测

涡流检测对碳/环氧复合层中的损伤并不敏感,但对内衬的凹陷翘屈却异常灵敏。但 COPVs 在冲击后一旦进行了加压,用涡流方法在较低频率(5~40 kHz)下就不再能够辨别出除表面目视可测凹陷之外的影响区域。但如果将涡流传感器的工作频率提高到 3 MHz,就能够改善对碳/环氧缠绕层中损伤(包括纤维断裂)的检测灵敏度。

3.6 声发射检测

声发射技术对流体加压系统中的气体噪声非常敏感。对于存在损伤的容器,声发射信号的频率一般会变高,与原始容器相比,至少在第一次将容器压力循环到 MEOP 或更高时会出现声发射信号。

4 结论

综合分析国外在碳/环氧 COPVs 冲击损伤及无损检测方面的研究成果,可以得到如下结论:

(1) 较低能量下($<50\text{ J}$)的冲击损伤可造成碳/环氧 COPVs 结构强度的严重降低。

(2) 碳/环氧 COPVs 冲击损伤效果受多种因素的影响,冲击能量、容器几何结构与尺寸和冲击位置影响较大,冲击物尺寸、容器内压和填充介质的影响也不容忽视。

(3) 许多无损检测技术都能有效检测碳/环氧 COPVs 中的冲击损伤缺陷,不同技术对不同缺陷的检测灵敏度不同。

(4) 碳/环氧 COPVs 冲击损伤检测时应考虑各个方面的因素,如容器几何结构、材料厚度、涂层、冲击部位和检测仪器对损伤部位的可达性以及所要求的检测灵敏度等。

参考文献:

- [1] 张天平. 空间应用复合材料压力容器研制技术[J]. 上海航天, 2002, 19(1): 54—58.
- [2] Adler W F, Carlyle J D, Dorsey J J. Damage tolerance assessment of six-inch composite pressure vessel[J]. General Research, 1984, 1(3): 1—12.
- [3] Patterson J Graphite. Composite Case Assessment Strain Rate Behavior and Impact Damage Threshold[R]. US: Army Missile Command, 1988: RD-PR-88-4.
- [4] Chang J B, Chiu S T, Johnson E C, et al. Enhanced technology for composite overwrapped pressure vessel program plan[J]. The Aerospace Corporation, 1993, (8): 1—8.
- [5] Beeson H D, Payne K S. Effects of impact damage and exposure on graphite/epoxy composite overwrapped pressure vessel[J]. AIAA, 1996, 3264: 1—10.
- [6] Matt Triplett, Joel Patterson, Joseph Zalameda. Impact Damage Evaluation Graphite Cylinders [J]. AIAA, 1997, 1056: 1809—1813.
- [7] Johnson E C, Nokes J P. Systems Planning & Engineering Nondestructive Evaluation (NDE) Techniques Assessment for Graphite/Epoxy (Gr/Ep) Composite Overwrapped Pressure Vessel[R]. US: Air Force Material Command, 1998: TR-98(8054)-3: 1—21.

本刊启事

2008 年《无损检测》征订已经开始,请新老读者尽快到邮局办理杂志订阅手续。邮发代号: 4-237, 定价每期 8 元, 全年 96 元。漏订的期刊请联系本刊发行部补订, 联系人: 王敏; 电话: 021-65556775-311。