

# 航天气瓶的断裂安全性

白铁钧 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 白铁钧 2004

图书在版编目 (CIP) 数据

航天气瓶的断裂安全性 / 白铁钧著 .— 沈阳 : 东北大学出版社, 2004.6

ISBN 7-81102-045-9

I . 航... II . 白... III . 航天器—气瓶—断裂力学  
IV . V444.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 050710 号

---

出 版 者 : 东北大学出版社

地址 : 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编 : 110004

电话 : 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真 : 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail : neuph @ neupress.com

http : // www.neupress.com

印 刷 者 : 东北大学印刷厂

发 行 者 : 东北大学出版社

幅面尺寸 : 140mm × 203mm

印 张 : 3.25

字 数 : 84 千字

出版时间 : 2004 年 6 月第 1 版

印刷时间 : 2004 年 6 月第 1 次印刷

责任编辑 : 王兆元

责任校对 : 章 平

封面设计 : 唐敏智

责任出版 : 秦 力

---

定 价 : 20.00 元

# 目 录

<b>1</b>	<b>概 述 .....</b>	<b>1</b>
1.1	航天气瓶简介 .....	1
1.1.1	气瓶的结构和工作环境 .....	1
1.1.2	气瓶的载荷特征 .....	2
1.2	航天气瓶断裂安全控制的特殊性 .....	3
1.3	航天气瓶断裂安全性研究的现状 .....	4
<b>2</b>	<b>断裂力学研究方法简述 .....</b>	<b>8</b>
2.1	断裂力学的基本概念 .....	8
2.1.1	断裂力学的基本方法 .....	8
2.1.2	裂纹前缘的应力场, 应力场强度因子 .....	9
2.1.3	线弹性断裂力学的应用 .....	12
2.1.4	弹塑性断裂力学及 J 积分的概念 .....	13
2.2	断裂力学应用的若干问题 .....	15
<b>3</b>	<b>超高强度钢的应力腐蚀特性 .....</b>	<b>20</b>
3.1	应力腐蚀的一般概念和基本特征 .....	20
3.2	超高强度钢的应力腐蚀特征 .....	21
3.2.1	45NiCr1Mo1VA 钢 .....	23
3.2.2	42CrMo 钢 .....	23
3.2.3	300M 钢 .....	24

3.2.4	GC-4 (40CrMnSiMoVA) 钢 .....	25
3.2.5	37SiMnCrMoV 钢 .....	25
3.3	应力腐蚀性能的研究方法.....	26
3.3.1	试件型式的选择.....	26
3.3.2	采用声发射法研究高强钢应力腐蚀机理.....	28
3.3.3	应力腐蚀开裂的断口分析.....	29
<b>4</b>	<b>超高强度钢应力腐蚀门槛值的测试.....</b>	<b>31</b>
4.1	超高强度钢应力腐蚀门槛值测试的特点及问题分析 .....	31
4.2	试件制备.....	32
4.3	试验加载装置及其标定.....	34
4.4	试验数据的记录.....	35
4.5	试件宏观断口形貌.....	37
4.6	表面裂纹应力场强度因子的计算.....	37
4.7	应力腐蚀门槛值的测试结果.....	37
<b>5</b>	<b>过载对超高强度钢应力腐蚀门槛值的影响.....</b>	<b>40</b>
5.1	裂纹受过载过程影响的定性分析.....	40
5.2	一次过载条件下的应力腐蚀门槛值.....	42
5.3	多次过载条件下的应力腐蚀门槛值.....	43
5.4	不同过载量条件下应力腐蚀门槛值的比较.....	44
<b>6</b>	<b>平板拉伸表面裂纹的应力应变场有限元分析.....</b>	<b>46</b>
6.1	有限元计算软件 Marc 2000 简介.....	46
6.2	计算模型.....	47
6.2.1	生成网格.....	48
6.2.2	定义裂纹.....	53

---

6.2.3	定义材料性能.....	53
6.2.4	定义接触特性.....	53
6.2.5	施加边界条件.....	54
6.3	平板表面半椭圆裂纹模型计算过程和结果.....	55
6.3.1	定义工况和提交作业.....	55
6.3.2	材料拉伸强化规律的设定.....	55
6.3.3	算例结果分析.....	58
7	不同载荷循环中表面裂纹周围应力、应变场变化规律的有限元分析.....	64
7.1	计算工况的确定.....	64
7.2	一次加载大小对裂尖塑性区尺寸、塑性变形量和残余应力的影响.....	65
7.2.1	对塑性区尺寸和塑性变形量的影响.....	65
7.2.2	对残余应力分布的影响.....	66
7.3	塑性变形和残余应力随载荷循环的变化.....	67
7.3.1	塑性变形随载荷循环的变化.....	67
7.3.2	残余应力随载荷循环次数的变化.....	71
7.4	过载后工作条件下的应力分布和应力场强度因子.....	76
7.4.1	相同过载大小条件下应力场随过载次数的变化.....	76
7.4.2	相同过载次数条件下应力场随过载大小的变化.....	76
7.4.3	经过过载后应力场强度因子的计算.....	78
8	航天气瓶断裂控制方法.....	79
8.1	航天气瓶概况.....	79
8.1.1	主要技术指标.....	79

---

8.1.2	气瓶的结构形式与主要尺寸.....	79
8.1.3	气瓶材料的主要力学性能指标.....	80
8.1.4	无损探伤划痕标准.....	80
8.1.5	航天结构断裂安全控制的一般原则.....	80
8.2	航天气瓶的断裂安全控制程序.....	81
8.2.1	气瓶不考虑缺陷存在时的爆破压力分析.....	81
8.2.2	验证试验压力下气瓶各部位裂纹的应力场强度 因子的解析计算.....	82
8.2.3	基于过载技术的气瓶验证试验效果比较.....	84
8.2.4	高压气瓶断裂安全分析.....	88
8.3	航天气瓶的验证试验的实施.....	90
8.4	过载技术的效果评价.....	92
参考文献 .....		<b>94</b>
后 记 .....		<b>97</b>

# 1 概 述

随着“神舟五号”载人飞船成功地将航天员送入太空并按计划安全返回指定地面区域，我国成为能够实现载人航天的几个国家之一，标志着我国载人航天事业取得了历史性突破。载人宇宙飞船重要的用途之一就是为空间站和月球基地等接送航天员和物资，以保障航天员在外层空间生活和工作，完成航天任务后返回地面，它运行时间有限，仅能一次使用。

载人飞船作为最简单的载人航天器，装备有航天员生命保障系统，用以维持密闭舱内大气环境，保障航天员安全、生活和工作，具有座舱内调温、调湿、调压、供氧、供食、大气净化等功能。航天员出舱行走时还可以使用便携式生命保障系统。一般来说，载人航天器生命保障系统由6个分系统组成，即环境控制系统、气体贮存系统、供水和水处理系统、航天食品、航天员废物处理系统和航天服。其中气体(氧气、氮气)贮存系统主要为了保证航天员的代谢消耗、密闭舱的泄漏以及应急情况下恢复舱压的需要，可采用气瓶常温高压气态贮存等贮存方法。

本书将结合航天飞船用超高强度钢制高压氧气瓶的断裂安全性，介绍在航天气瓶的验收及安全性评价中有关的理论和应用问题。

## 1.1 航天气瓶简介

### 1.1.1 气瓶的结构和工作环境

航天气瓶选用比强度极高的材料如超高强度钢，通常可采用

热模锻坯，用数控机床加工成半球形壳体，再以 TIG 焊接环焊缝制成封闭球形薄壁气瓶(图 1-1)，焊缝两侧各 20mm 范围内采用局部补强。气瓶的工作环境温度为  $-40\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为  $10\%\sim 90\%$ ，环境压力可为  $101.3\sim 10^{-3}\text{kPa}$ 。按照运行要求，气瓶的工作状态使用期不少于 30 天，充填次数不超过 100 次，同时空载储存不少于 5 年<sup>[1]</sup>。



图 1-1 航天气瓶外貌

### 1.1.2 气瓶的载荷特征

航天飞行器中的气瓶，其简化了的承载特性如图 1-2 所示。在每一次使用过程中，气瓶可以反复充填  $N$  次，每次可以工作时间为  $t$ 。在每段  $t$  内，要求气瓶满足“无限静疲劳寿命条件”，即气瓶中可能存在的裂纹不会发生任何的扩展，可以工作的时间不限。当然，实际上气瓶中的工作介质不断消耗，终会导致载荷下降，因此每一段工作时间是有限的。经过重新充填以后，载荷重复原来的循环，而每次的重新充填，相当于为气瓶施加了又一次的循环载荷，在这种载荷循环中，气瓶上的裂纹将逐渐疲劳扩展，其从初始值扩展到临界值所对应的循环数即为气瓶的剩余寿

命  $N$ 。

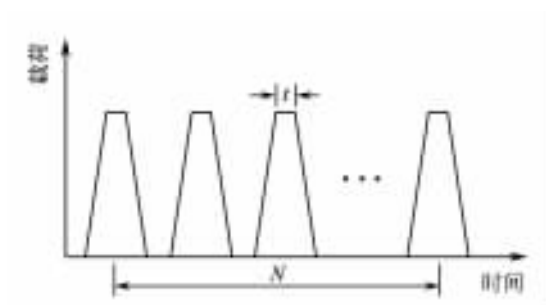


图 1-2 气瓶载荷循环历程

## 1.2 航天气瓶断裂安全控制的特殊性

随着断裂力学理论的发展应用，气瓶的安全控制逐步走上以断裂理论为基础，建立合理的验收和使用的定量条件等断裂控制方法的道路<sup>[2]</sup>。断裂控制方法的确定，核心内容实质上是根据材料的抗断裂性能和裂纹体承受的载荷特征来确定裂纹的临界尺寸，或建立满足抗断裂要求的载荷—结构尺寸—材料性能的定量关系，因此也可以说，航天气瓶的安全性，取决于气瓶的材料特征和载荷特征。一般来说应当注意到以下方面。

① 从减小质量的角度考虑，希望选用高比强度的材料，例如选择超高强度钢等，此时对脆性断裂更为敏感，发生低应力脆断的危险性明显增加。

② 气瓶的安全性不仅决定于静载承压能力和一般意义上的断裂韧性，而且往往在介质中的应力腐蚀性能成为影响安全性的决定因素。

③ 航天气瓶中所填充的气体的作用，在整个气瓶的工作历程中可以简化为恒定长期载荷，即使不考虑偶然发生的瞬间冲击

这种受载特征，也可以成为应力腐蚀现象发生的必要条件。

④ 由于气瓶内的高弹性压缩气体储存着大量的弹性能，一旦气瓶发生爆破，将引起灾难性的事故。

⑤ 裂纹类缺陷容易漏检：超高强度钢制气瓶，一般都是高比强材料，因此按照断裂力学理论所确定的临界初始裂纹尺寸很小，就现有的无损检测方法，漏检的概率很大。

⑥ 对于常规压力容器，当然是希望通过改善材料的抗断裂性能，或者采用更为合理的设计方案和制造工艺，来降低容器发生断裂的可能性，降低验收的废品率；但气瓶的工作特殊性，要求其安全可靠度要达到 100%，气瓶发生任何一次断裂事故都将造成严重的伤害和影响，因此其验收的目标应当是淘汰掉任何一个不满足条件的气瓶产品。可见，航天气瓶的安全性控制条件，与其它气瓶或常规压力容器是有根本区别的，应在所要求的使用期限内所有裂纹不会超过断裂的临界裂纹尺寸作为出发点。

⑦ 根据承载特征，超高强度钢制气瓶发生的断裂，主要是在长期静载作用下的瞬间断裂，而由于超高强度钢具有较明显的环境敏感性，在初始裂纹(包括划痕)的发展过程中，超高强度钢所处的环境介质将与载荷共同形成作用。因此超高强度钢的应力腐蚀性能是影响气瓶断裂安全性的极为重要的性能。这是建立航天气瓶安全性控制条件的另一重要特点。

### 1.3 航天气瓶断裂安全性研究的现状

高压气瓶是航天器生命保障系统的关键部件，最大程度地提高气瓶的安全度是十分重要的。

一般来说，气瓶安全使用的最基本要求，应当是在所要求的使用期限内气瓶中可能存在的最大裂纹的亚临界扩展不超过引起脆性破坏的临界尺寸。而对于高比强材料，只要  $K_I > K_{th}$ ，则由

于裂纹扩展速率较大，不能保证气瓶安全使用。所以实际上这类气瓶最大裂纹在持续工作载荷下的条件更为苛刻，应当保证  $K_I < K_{th}$ ，即不发生亚临界扩展，具有“无限静疲劳寿命”。由此条件可以反过来确定一个初始裂纹尺寸的临界值  $\left(\frac{a}{Q}\right)_{icr}$ ，并且把

$\left(\frac{a}{Q}\right)_i < \left(\frac{a}{Q}\right)_{icr}$  作为气瓶安全使用的验收条件。

但是该条件的使用实际上很难实现。原因之一，高比强材料的  $\left(\frac{a}{Q}\right)_{icr}$  很小，在无损检验中很容易被漏检；原因之二， $\left(\frac{a}{Q}\right)_{icr}$  是由裂纹所在部位的名义应力计算出的，而气瓶的应力并不均匀分布，尤其是存在一些应力集中部位，按气瓶公称应力计算出的  $\left(\frac{a}{Q}\right)_{icr}$  显然无法限制高应力区内裂纹的断裂。

美国国家宇航局(NASA)提出采用气瓶的验证试验应力  $\sigma_P$  和气瓶最弱区断裂韧性  $K_{IC}$  来估算气瓶中可能存在的最大初始裂纹<sup>[10]</sup>。可以理解为：在验证试验中，所有能够通过验证试验的裂纹(无论在何部位)，其最大应力场强度因子都不超过  $K_{IC}$ ，则该最大初始裂纹在气瓶运行中工作应力  $\sigma_{OP}$  的作用下，应力场强度因子成比例降为  $K_I = \frac{\sigma_{OP}}{\sigma_P} K_{IC}$ ，按无限寿命要求  $K_I < K_{th}$ ，则

$$\alpha = \frac{\sigma_P}{\sigma_{OP}} > \frac{K_{IC}}{K_{th}} \quad (1-1)$$

比值  $\alpha$  称为验证应力系数。该式含义可理解为：把运行工作状态(在  $\sigma_{OP}$  下的长期持续工作，其应力场强度因子界限值为  $K_{th}$ )与验证试验状态(在  $\sigma_P$  下的短暂承载，其应力场强度因子界限值为  $K_{IC}$ )相比较，相对韧性( $K_{th}/K_{IC}$ )应当高于相对应力值( $\sigma_{OP}/\sigma_P$ )。式(1-1)物理意义明晰，且避免了针对由无损检测查出的具体裂纹的计算，仅用短暂的验证试验即可保证随后长期工

作的安全性。这种方法的最大好处在于避免了无损探伤的漏检。在同一次载荷变化历程中，各条可能存在的裂纹同时经历了加载（或卸载），可以大致认为它们受到的载荷是相同的，只是由于裂纹尺寸不同而产生不同的应力场强度因子。对于满足以上条件的气瓶，设根据验证试验确定的最大可能的初始裂纹尺寸为 $\left(\frac{a}{Q}\right)_i$ ，而工作应力下不发生亚临界扩展的最大允许裂纹尺寸为 $\left(\frac{a}{Q}\right)_{th}$ （如图 1-3 所示），则在发生亚临界扩展之前最多只允许裂纹经历  $N$  次载荷循环，以保证裂纹从 $\left(\frac{a}{Q}\right)_i$  扩展到 $\left(\frac{a}{Q}\right)_{th}$ ， $N$  就是通过验证试验后的气瓶的允许使用寿命；通过验证试验的气瓶中就不可能再有超过该最大初始裂纹的其他裂纹（换句话说，含有超过该最大初始裂纹的其他裂纹的气瓶已经通过验证试验被淘汰了）。

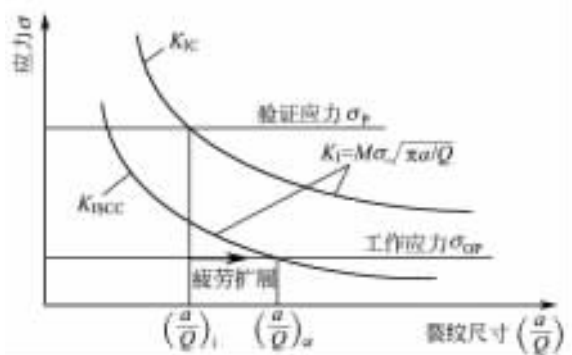


图 1-3 NASA 方法示意图

由此可见，要保证气瓶安全使用，需要确定一个合适的验证应力  $\sigma_p$ ，以满足式 (1-1)。

然而式 (1-1) 的使用过程还存在一定的问题。主要在于：

- ① 气瓶长期工作时产生裂纹亚临界扩展的门槛值  $K_{th}$  取为应

力腐蚀门槛值  $K_{ISCC}$ ，而超高强度钢的  $K_{IC}/K_{ISCC}$  值一般约为 3 左右甚至更高，从而使得所需要的  $\alpha$  值太大；

② 由于使用预制疲劳裂纹试件测试  $K_{ISCC}$ ，受预制裂纹载荷的影响，使得  $K_{ISCC}$  不是材料本身固有的常数；

③ 即使使用材料固有的  $K_{ISCC}$ ，由于气瓶考核过程中的超载将对其值产生影响，也影响了控制程序的准确性；

④ 在建立气瓶的断裂安全性条件时，还需要考虑到载荷循环引起的残余应力的影响。

由此可见，探讨影响气瓶安全性的各种因素及其相互作用的关系，提出更符合实际并更具有可操作性的气瓶验证试验规范，对不断从实践到理论来完善气瓶的断裂安全控制手段是非常必要的。

## 2 断裂力学研究方法简述

20 世纪的后 30 年，断裂力学理论在工程应用的实践中得到了迅速的发展，成为越来越成熟的分析概念和方法。它不仅在很大程度上改变了人们的工程设计理念，而且在产品的生产、验收、使用过程中同样发挥着指导作用。

### 2.1 断裂力学的基本概念

#### 2.1.1 断裂力学的基本方法

断裂力学理论的出发点是承认材料和结构中裂纹(包括可以当作裂纹处理的各类缺陷)的存在，因此，它打破了传统力学理论的分析前提，建立了裂纹特征、断裂载荷特征和材料抵抗断裂特征之间的定量关系，有效地解释了实际结构强度大大低于理论强度的现象，并在工程中得以运用。

大量的事故分析表明，实际结构中存在着各种形状、尺寸的一类裂纹缺陷是不可避免的，而这些缺陷经常成为导致结构发生断裂的直接原因，从断口上可以观察到断裂过程所经历的裂纹发生、扩展的不同阶段。因此，以断裂力学理论为基础的设计、验收方法，必然对裂纹的位置和尺寸等特征提出要求，越是易于发生断裂的材料、重要的结构，对裂纹特征的要求就越严格。进一步来看，材料在冶炼、冷热加工过程中可能带来一些微观缺陷，虽然尺寸较小，但也可能成为裂纹源，因此在特定的场合也需要对其特征提出要求。

结构中存在的裂纹( 主要指宏观裂纹 )可以按其位置分为穿透裂纹、埋藏裂纹、表面裂纹, 按其受载方式分为张开型、滑开型和撕开型裂纹( 图 2-1 ), 其中张开型穿透裂纹的分析方法和结果最具典型性, 一般作为分析的基础。作为承受内压的压力容器( 如本书讨论的气瓶 ), 不可能允许存在穿透裂纹, 一般都可以作为张开型表面裂纹对待。

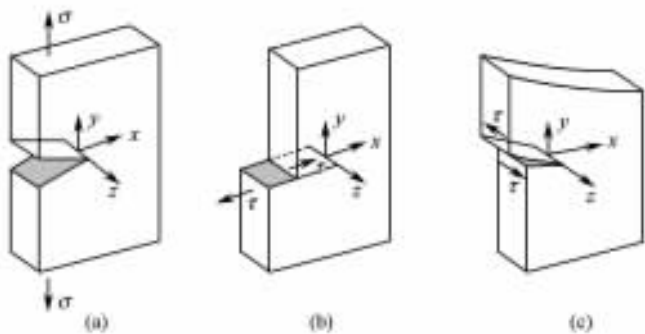


图 2-1 裂纹按受载方式分类

裂纹的存在, 将使得结构承载时的应力场等力学量的分布特征发生变化, 传统力学量( 如应力等 )将难以继续准确、唯一地描述裂纹体的承载状况。因此在断裂力学中提出了新的力学概念, 包括应力场强度因子、裂纹尖端张开位移、 $J$  积分等, 这是断裂力学区别于传统力学理论的又一特点。

### 2.1.2 裂纹前缘的应力场, 应力场强度因子

以张开型穿透裂纹为例。为了分析方便, 假设裂纹体处于弹性状态, 意味着材料的应力—应变关系满足广义虎克定律。

长度为  $2a$  的穿透裂纹位于一个各向同性的无限大板上, 远处施加与裂纹面垂直的均匀拉伸应力为  $\sigma$ , 则在图 2-2 所示的坐

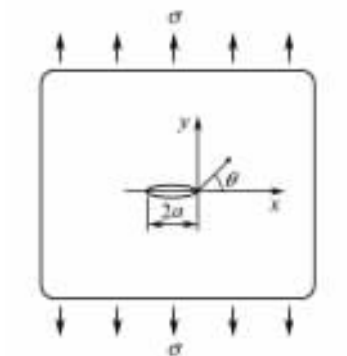


图 2-2 受拉伸平板中的穿透裂纹

标系中，应用弹性力学理论可以给出裂纹尖端附近(即  $r \ll a$ )区域内各坐标轴方向的应力分量表达式：

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (2-1)$$

式中

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2-2)$$

分析式(2-1)和(2-2)可以发现：

① 应力场的表达式由表征坐标的函数  $\frac{1}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$  与表征受载程度和裂纹尺寸的因子  $K_I$  两部分组成，前者给出应力分布的特征，后者反映应力场的整体水平。

② 由表达式(2-1)可见，当  $r \rightarrow 0$  时，应力分量  $\sigma_{ij}$  趋向于无穷大，因此应力分布的表达式出现奇异性；同时注意到，事实上在非常接近裂纹尖端的地方，应力早已超过了材料的屈服点甚至接近强度极限，从而产生一定尺寸的塑性变形，所以仅用应力的概念已不再能够唯一地表征裂纹的受载状态了，必须采用能够反映应力场整体水平的新的力学量，这个力学量就是综合地包含了

载荷大小、裂纹尺寸大小的  $K_I$ ，如果进一步地把裂纹形状以及所在部位的影响因素考虑进去，则  $K_I$  的一般表达式可写为

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2-3)$$

式中， $K_I$  称为应力场强度因子； $Y$  称为裂纹形状系数。

在具体问题中，应力场强度因子的表达式可以用数学方法或者实验研究方法确定，常见的结果可以在专门的手册中查出。虽然有些情况下可以推导出  $K_I$  的解析结果，但多数情况下因为解析方法经常需要作一些与实际情况有出入的假设，故此应力场强度因子的表达形式需要借助实验研究的方法进行修正，以获得准确结果。例如，按照 Shah-Kobayashi 提出的公式，图 2-3 所示的受均匀拉伸的无限大有限厚度平板表面半椭圆形裂纹底部  $A$  点处的应力场强度因子可表达为

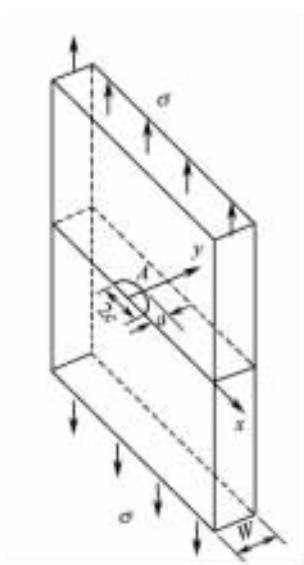


图 2-3 受拉伸平板中的表面裂纹