文章编号:1673-9981(2016)01-0048-05

# 核用锆合金包壳管内压爆破试验及性能研究

温敦古,谭 军,陈刘涛,邹 红,徐 杨,高长源

中广核研究院有限公司,广东 深圳 518026

**摘 要:**在室温及 350 ℃和 400 ℃下对核用锆合金包壳管的两种合金进行了爆破试验,并对爆破试验的 数据进行了分析研究.研究结果表明:针对不同试验温度,二种合金的爆破强度随温度的升高而降低,且 2 号合金的爆破强度优于1 号合金的;通过对爆破的破口形貌进行观察发现,相对室温爆破,350 ℃和 400 ℃下包壳管的肿胀较大,破口开裂较小,破口生长方向与管材轴向成一定角度,破口均为韧性断口. 关键词:核用锆合金;包壳管;爆破性能

**中图分类号:**TG146.4

#### 文献标识码:A

随国内在运核电站及在建核电站数量的不断增加,核安全备受公众关注<sup>[1-2]</sup>.核电站设计有多道安 全屏障,实际上核燃料包壳管是第一道核安全屏障, 包壳管对铀陶瓷芯块起到包覆作用,使铀与冷却剂 隔离,并在中间起到传热作用,该包壳管称之为燃料 棒.同时,燃料棒的另一个重要作用是将轴裂变产物 保留在包壳管里,使之不泄露,因此包壳管是第一道 核安全屏障.核电站运行期间,由于裂变气体的释放 及芯块与包壳管相互作用等原因<sup>[3]</sup>,使燃料棒承受 的内压持续增加,反应堆安全运行与包壳管的耐压 性能密切相关.根据现行核安全准则,燃料棒在整个 生命周期里必须保证其结构的完整.内压爆破试验 是体现包壳管承压性能的有效办法,因设备条件所 限,国内高温爆破试验开展尚少<sup>[4-5]</sup>.

本文对核用两种锆合金包壳管进行了室温和高 温下的爆破试验,并对核用锆合金包壳管内压爆破 试验数据进行了分析,同时也对合金管的性能进行 了研究.

## 1 试验部分

1.1 试验样品

试验使用的样品为两种锆合金成品包壳管,分

**收稿日期:**2015-12-04 作者简介:温敦古(1981-),男,广东普宁人,硕士研究生,工程师. 别命名为1号合金和2号合金.在管材上截取固定 长度,试样长度没有标准要求,对于内压爆破试验一 般要求长径比大于10,本试验的试样长度为22 cm. 试验前使用千分尺对试样的外径和壁厚进行测量, 为提高测量精度,在试样中间位置沿周向测量6个 外径值,取平均值作为试样外径值;在试样两端 1 cm 的位置,沿周向各测量6个壁厚值,取平均值 作为试样壁厚,在这12个值中取最小值作为试样的 最小壁厚.包壳管的成分和规格列于表1,样品实物 图如图1 所示.

#### 表 1 包壳管的化学成分及尺寸规格

Table 1 Chemical compositions and dimension specifications of cladding tubes

样品	△△冉八 /0/	尺寸规格/mm	
	〒金成万 ₩/ 70	外径	壁厚
1号	Zr-1Nb	9.5	0.57
2号	Zr-1.5Sn-0.2Fe-0.1Cr	10	0.7

#### 1.2 试验方法

将测量后的试样置于超声波清洗机中清洗,以 去除试样在加工过程中残留的润滑油脂和其他表面 污染物,在清洗过程中可加入少量的清洗液或用酒



图 1 包壳管样品 Fig.1 Samples of cladding tubes

精清洗,可有效提高试样洗清效果.

试样准备完成后,通过专用夹具,将试样与内压 爆破装置高压管道连接,该装置为包壳管爆破测试 专用设备,具备升压速率可控、温度和压力在线监测 及爆破自动停机等功能,其爆破示意图如图 2 所示. 爆破试验参数主要有升压速率和试验温度.参考标 准 ASTM B811<sup>[6]</sup>,升压速率设置为 13.8 MPa/min, 试验温度根据试验需要分别设置为室温、350 ℃和 400 ℃.考虑到样品为二种,需进行六组爆破试验. 在试样管材中注入高压硅油,待爆破后可在爆破装 置的仪表上读出各试样的爆破压力.炉体冷却后,从 设备的高压管道拆卸出试样,针对试样的爆裂口,进 行破口周长测量及观察破口形貌. 为降低成本及减少注油量,可在试样里插入芯棒,要求该芯棒的外径比管材内径小 0.25 mm 以上,并在芯棒上开槽,以确保试验时高压硅油能快速 注满管体.对于高温爆破试验,试样插入芯棒有利于 加强试验均温效果.



图 2 包壳管爆破示意图 Fig.2 Burst diagram of cladding tube

# 2 结果与分析

#### 2.1 爆破曲线

爆破过程中设备会自动记录包壳管内压变化及 持续时间,从而获得爆破曲线.图 3 为合金爆破曲 线.从图 3 可以看出,爆破曲线呈直线向上递增趋 势,没有出现波动,斜率保持恒定,说明在六组爆破 试验的升压过程中压力均保持递增,升压速率均保 持稳定,满足了试验要求.



(a)  $\sim$  (c) No. 1 alloy; (d)  $\sim$  (f) No. 2 alloy

#### 2.2 爆破数据计算

试样准备时已对试样的外径和壁厚进行测量, 获得每个试样平均外径和平均壁厚、最小壁厚.核用 包壳管名义厚度为 0.57 mm 属于薄壁管,管内充压 后其受力情况适用内压薄壁容器力学模型来表述 (图 4),计算公式如下:

$\sigma_{\theta} = P \cdot D/2t;$	(1)
$\sigma_{\rm m} = P \cdot D/4t.$	(2)



式(1)~式(2)中 $\sigma_{\theta}$ 和 $\sigma_{m}$ 分别为周向应力和轴向应力, MPa; P为管内充压压力, MPa; D为试样平均外径减去平均壁厚, mm; t为最小壁厚, mm.

爆破数据计算结果列于表 2. 由表 2 可知,随温 度升高,二种合金的爆破强度下降,成分为 Zr-1.5Sn-0.2Fe-0.1Cr的2号合金爆破性能优于成 分为 Zr-1Nb的1号合金.



#### 图 4 包壳管爆破受力模型 Fig. 4 Burst mechanical model of cladding tube

表	2	包壳管	爆破	数据	
Table 2	Bur	st data	of cl	adding	tubes

样品	试验温度	平均外径	平均壁厚	最小壁厚 t	爆破压力 P	周向应力σθ
编号	/℃	/ mm	/ mm	/ mm	/ MPa	/ MPa
1 # -1	室温	9.458	0.572	0.561	82.4	655.9
1 # -2	室温	9.484	0.571	0.562	80.4	639.8
1 # -3	350	9.499	0.571	0.569	42.9	336.6
1 # -4	350	9.485	0.570	0.565	45.3	360.6
1 # -5	400	9.50	0.570	0.569	40.7	319.4
1 # -6	400	9.50	0.571	0.569	40.8	320.1
2 # -1	室温	9.998	0.704	0.702	116.5	771.2
2 # -2	350	9.998	0.701	0.699	59.5	395.7
2 # -3	400	9.999	0.70	0.699	51.8	344.6

#### 2.3 破口分析

图 5 为二种锆合金包壳管爆破试样实物图.从 图 5 可以看出,破口处出现明显肿胀,说明爆破过程 中管材首先发生局部塑性肿胀,然后爆裂.破口生长 方向与管材轴向成一定角度,该方向可能与管材爆 裂时在高压硅油作用下,管材周向和轴向同时受力 有关<sup>[7]</sup>.

针对破口,依据公式  $\epsilon = (C_1 - C_2) / C_1 \times 100$ , 对破口变形进行定量评估.式中  $\epsilon$  为变形量,%; $C_1$ 为试验前管外径周长,mm; $C_2$ 为试验后管材肿胀处 周长(不包括破口),mm.破口变形数据列于表 3.由 表 3 可知,试验温度越高,肿胀变形越大.表 3 数据 表明,不同种类管材,肿胀行为有所差别.

表 3 肿胀变形数据

	Table 3	Ballooning data of claddings			
编号	温度/℃	$C_1 / mm$	$C_2 / \text{ mm}$	$\epsilon / \frac{0}{0}$	
1 # -1	室温	29.8	52	74	
1 # -2	室温	29.8	51	71	
1 # -3	350	29.8	57	91	
1 # -4	350	29.8	56	88	
1 # -5	400	29.8	56	88	

续表 3						
编号	温度/℃	$C_1 / \text{ mm}$	$C_2 / \text{ mm}$	$\epsilon / \frac{0}{0}$		
1 # -6	400	29.8	52	74		
2 # -1	室温	31.4	43	37		
2 # -2	350	31.4	52	66		
2 # -3	400	31.4	54	72		

图 6 为试样爆破破口的形貌图. 从图 6 可见:在 室温下爆破时,破口较大,且破裂严重,甚至贯穿整 个直径;在 350 ℃和 400 ℃下爆破时,破口相对较 小,这与室温爆破内压大,高温管材爆破压力相对较 小有关;高温爆裂与室温爆裂一样,断口均为韧性 断裂.





图 5 爆破试样实物图 (a)1 号试样;(b)2 号试样 Fig.5 Images of burst samples (a) samples of no.1 alloy;(b) samples of No.2 alloy



图 6 爆破试样破口形貌图 (a)室温;(b)350 ℃;(c)400 ℃ Fig.6 Open morphology of burst samples (a) room temperature;(b)350 ℃;(c)400 ℃

# 3 结 论

对核用锆合金包壳管 1 号合金及 2 号合金在室 温、350 ℃和 400 ℃下进行了内压爆破试验,在不同 试验温度下,二种合金爆破强度随温度升高而降低; 2 号合金的爆破耐压性能优于 1 号合金的.通过对 爆破破口观察,结合包壳管受力模型进行分析研究 发现,相对室温爆破,在 350 ℃和 400 ℃下的爆破肿 胀量较大,破口开裂较小,破口生长方向与管材轴向 成一定角度,破口均为韧性断口.

## 参考文献:

- [1] 杨湘山, 吕焱, 李冰, 等. 新形势下的核安全与辐射安全 对策[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(7): 44-47.
- [2] 秦风. 由数字说机遇[J]. 中国核工业,2013(9):3.
- [3] 张长义,徐远超,杨启法,等. M5 合金包壳管高温爆破 性能[J]. 中国原子能科学研究院年报,2006,6(1): 220-221.
- [4] 彭继华,李文芳,BECHADE JL,等. 织构对锆合金拉伸 和爆破性能的影响[J]. 材料研究与应用,2007,1(2):

122-126.

- [5]王峰,王快社,马林,等. 核级锆及锆合金研究状况及发展前景[J]. 兵器材料科学与工程,2012,35(1): 107-110.
- [6] American society for testing and materials (ASTM).B811-02 (Reapproved 2007) Standard Specification for

Wrought Zirconium Alloy Seamless Tubes for Nuclear Reactor Fuel Cladding[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2007.

[7]周静,王正品,高巍,等. M5 合金室温爆破性能研究[J].
铸造技术,2010,31(4):433-436.

## Study on the burst tests and properties of zirconium alloys for nuclear reactor

WEN Dungu, TAN Jun, CHEN Liutao, ZOU Hong, XU Yang, GAO Changyuan China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen 518026, China

**Abstract**: The burst tests at room temperature,  $350 \,^{\circ}$  and  $400 \,^{\circ}$  of two kinds of zirconium alloys for nuclear reactor were studied. By analyzing results from burst tests, it is shown that the burst strengths of the two kinds of zirconium alloys decreased with testing temperatures rising. The No. 2 alloy was stronger than No. 1. By observing the opening of the burst, burst swellings at  $350 \,^{\circ}$  and  $400 \,^{\circ}$  were bigger than at the room temperature, the openings were smaller. The directions of the opening growths were different from the axial directions of the claddings, and the openings of burst were ductile fractures. **Key words**: zirconium alloy for nuclear reactor; cladding tube; burst properties