

薄壁管高温爆破试验装置研制及应用

韩志博, 杨洪广, 张建通

(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部, 北京 102413)

摘要:为获得燃料组件及燃料相关组件用包壳管的高温爆破性能,研制了薄壁金属管高温爆破试验装置,主要由高压气源单元、试验气氛单元、加热单元、试验台架及测控单元组成。该装置可实现的最高试验温度为1 200 ℃、最高升温速率为10 ℃/s、最大试验压力为100 MPa;可完成压水堆运行工况下的等温高温爆破及模拟事故工况下的瞬态加热高温爆破两种试验。利用该装置完成了316L不锈钢薄壁管的瞬态加热高温爆破试验,获得了600~1 200 ℃、升温速率为5 ℃/s条件下的高温爆破强度(极限环向应力)和周向延伸率数据。试验装置的验证及不锈钢薄壁管的高温爆破试验表明,研制的薄壁金属管高温爆破试验装置满足试验要求,试验灵活方便、控制精度高。

关键词:包壳管;高温爆破;爆破强度;极限环向应力

中图分类号:TL341

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2020)04-0751-06

doi:10.7538/yzk.2019.youxian.0611

Development and Application of High Temperature Burst Facility of Thin-walled Tube

HAN Zhibo, YANG Hongguang, ZHANG Jiantong

(Division of Reactor Engineering Technology Research,
China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: In order to obtain the high temperature burst properties of the cladding for fuel assembly and core components, high temperature burst facility of thin-walled tube was developed, which is mainly composed of high pressure gas source unit, test atmosphere unit, heating unit, test bench and measurement and control unit. The facility can achieve a maximum test temperature of 1 200 ℃, a maximum heating rate of 10 ℃/s, and a maximum test pressure of 100 MPa. It can complete two kinds of tests: Isothermal high temperature burst under the normal operation condition and transient-heating high temperature burst under the simulated accident condition of PWR. The transient-heating high temperature burst test of 316L stainless steel thin-walled tube was completed by using the facility. The data of high temperature burst strength (ultimate hoop stress) and total circumference elongation were obtained under the conditions of 600-1 200 ℃ and heating rate of 5 ℃/s. The results of verification test of the burst facility

and the burst test of the stainless steel thin-walled tube show that the developed high temperature burst facility of thin-walled tube meets the test requirements. And the test is flexible and convenient, with high control accuracy.

Key words: cladding tube; high temperature burst; burst strength; ultimate hoop stress

在核电迅速发展的形势下,对核电厂燃料组件(燃料元件)和燃料相关组件(控制棒、可燃毒物棒等)的安全要求越来越高。压水堆核电厂燃料组件和燃料相关组件在整个设计寿期内都处于高温、高压、强中子辐照、流体的振动与冲刷、压力波动等非常苛刻的条件下,在整个设计寿期内应保持结构的完整性^[1-3]。燃料元件及燃料相关组件的包壳管作为承受高压部件和放射性物质包容的第一道屏障,将直接决定燃料元件及相关组件棒的完整性和安全性。

美国、法国、日本、韩国等核电发达国家对燃料包壳管(Zr-4、Zirlo、M5、HANA等)在模拟压水堆失水事故(LOCA)工况下进行了大量研究,尤其是高消耗燃料元件包壳管在模拟LOCA工况下的高温爆破试验研究^[4-7],美国开展了316L不锈钢包壳管在模拟LOCA温度条件下的瞬态加热高温爆破试验^[8]。国内针对锆合金包壳管开展了室温爆破和运行工况下的高温爆破试验研究。张长义等^[9]、周静等^[10]、彭继华等^[11]开展了M5合金和N36合金包壳管及田春燕等^[12]、陈波全等^[13]、温敦古等^[14]开展了Zr-4合金和两种其他锆合金包壳管的室温爆破及运行工况下的等温高温爆破试验研究;黄玉才等^[15]开展了Zr-4合金包壳管在模拟LOCA工况下的肿胀爆破试验。丁学锋等^[16]、王德华等^[17]、李江江等^[18]自主研制了采用液压油作为介质的爆破试验装置。国内的包壳管爆破试验和高温爆破试验装置除文献^[15]中的试验外均为室温爆破或(和)运行工况下的等温高温爆破试验,未开展针对压水堆用不锈钢包壳管的等温爆破试验及模拟事故工况下的瞬态加热高温爆破试验。

在假想的压水堆LOCA工况下,燃料元件的温度迅速升高,可燃毒物棒的温度随之快速升高,燃料元件和可燃毒物棒的内部压力也随之增加;由于包壳管的温度升高,其机械性能降低,同时,包壳管在高温蒸汽中急剧氧化及大量吸氢,从而加剧了包壳管的脆化,尤其是寿期末

包壳管的内压较高,可能导致包壳管的鼓胀和破裂,第一道屏障失效后燃料芯块和中子吸收体从包壳管内喷出,棒内产生空位,放射性物质及中子吸收体进入一回路冷却剂中,引起反应性变化,从而影响反应堆的安全及放射性物质的排放。因此,为更好地模拟反应堆内包壳管的真实条件,采用高压气体介质的等温高温爆破及瞬态加热高温爆破方法,获得包壳管的高温爆破性能数据是非常必要的,对燃料组件及燃料相关组件的设计、安全分析及反应堆的安全运行具有重要意义。

高温爆破试验包括等温高温爆破试验及瞬态加热高温爆破试验。等温高温爆破试验是以设定的升温速率升温到试验温度,稳定一定时间后再向样品管内以恒定的加压速率充入高压惰性气体,直到样品管爆破。瞬态加热高温爆破试验是室温时预先向样品管内充入一定压力的惰性气体,然后以恒定的升温速率升温,直到样品管爆破。

为研究压水堆LOCA温度条件下的包壳管高温爆破行为,本文拟研制一套更接近于包壳管实际工况、采用高压气体作为试验介质的高温爆破试验装置,以开展等温高温爆破及瞬态加热高温爆破试验,并完成初步的模拟压水堆LOCA温度条件的不锈钢薄壁管瞬态加热高温爆破试验。

1 装置设计及组成

1.1 设计要求

根据压水堆LOCA工况下的计算分析结果及实际条件,高温爆破试验装置的设计技术要求如下:1)最高工作温度为1 200℃,升温速率为1~10℃/s,偏差 $\leq \pm 10\%$;2)最大工作压力为100 MPa;3)试验介质为惰性气体;4)环境气氛为水蒸气/惰性气体/空气;5)试验样品管外径为8~15 mm,有效长度不小于10倍外径;6)试验样品管内为填充棒,填充棒与样品管之间的间隙为 (0.25 ± 0.05) mm。

1.2 装置组成及功能

试验装置由高压气源单元、试验气氛单元、加热单元、试验台架及测控单元 5 部分组成,试验装置总体构成示意图如图 1 所示。试验装置可实现的最高试验温度为 1 200 ℃,可模拟反应堆运行工况和事故工况下的升温速率;可实现的最大试验压力为 100 MPa,加压速率符合 ASTM 标准^[19-20]中规定的要求。

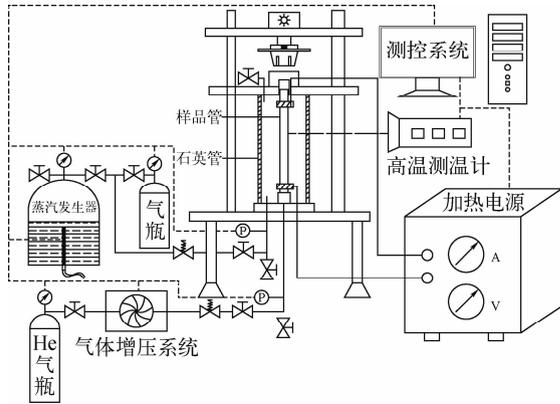


图 1 高温爆破试验装置结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of high temperature burst facility

高压气源单元主要由高压气体增压系统、高压数字压力计、高压阀门及高纯 He/Ar 气瓶等组成,用来提供试验所需的高压惰性气体及气体增压速率,高压气体增压系统输出惰性气体的最大压力为 170 MPa。

试验气氛单元主要由微型蒸汽发生器、高纯 He/Ar 气瓶、真空泵、数字压力计、阀门等组成,用来对试验气腔内抽真空及提供不同试验所需的试验气氛。

加热单元主要由快速加热电源、加热电极组成,用来实现不同条件下样品管的试验温度及升温速率。

试验台架主要由电子拉压试验机台架、样品固定支架及安全防护网组成。

测控单元主要由高压数字压力计、高温测温计、数据采集模块、通讯模块、测控软件及计算机组成。高温爆破试验的关键参数为样品的内压和表面温度,测量样品内压的数字压力计(GS4200,0~100 MPa,±0.1%)的测点设置在样品入口处;测量样品表面温度的高温测温

计(IGAR 12-LO,350~1 300 ℃,±0.5%读数+1 ℃)的测点在样品管有效长度段中间偏上 15 mm 处的表面最高温度点处。

2 试验条件

2.1 试验样品

样品结构如图 2 所示,试验样品管材料为 316L 不锈钢,其化学成分列于表 1,冷加工量为 14%。试验样品管的尺寸为 φ10 mm×0.53 mm×210 mm,加热长度为 180 mm,有效长度为 150 mm。填充棒材料为氧化铝陶瓷,尺寸为 φ8.5 mm×45 mm。

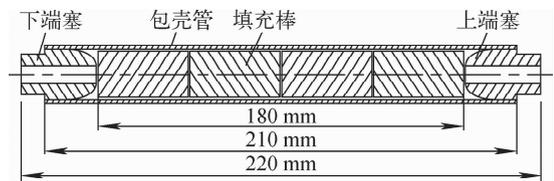


图 2 爆破试验样品结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of burst test sample structure

表 1 316L 不锈钢管化学成分
Table 1 Chemical composition of 316L stainless steel tube

元素	质量分数/%	元素	质量分数/%
C	0.017	S	0.004
Cr	16.89	Cu	0.006
Ni	15.07	V	<0.005
Mo	2.26	Al	0.004
Si	0.52	Nb	0.010
Mn	1.25	Co	<0.005
P	0.006	Ti	0.010

2.2 试验参数

试验温度为 600~1 200 ℃,升温速率为 1~10 ℃/s;室温预充压力为 8~50 MPa 的高纯 He 气。

2.3 爆破性能参数计算

根据美国 ASTM 标准^[19-20]中的公式计算分析试验样品的爆破强度(极限环向应力)和周向延伸率。

1) 爆破强度

爆破强度即极限环向应力,按下式计算:

$$\sigma = pD/2t \tag{1}$$

其中: σ 为样品管在试验条件下的极限环向应力,MPa; p 为样品管在试验条件下的爆破压力,MPa; D 为样品管的平均中径,即平均外径与平均壁厚之差,mm; t 为样品管的最小壁厚,mm。

2) 周向延伸率

周向延伸率按下式计算:

$$\delta = (L_1 - L_0) / L_0 \times 100\% \quad (2)$$

其中: δ 为样品管在试验条件下的周向延伸率,%; L_0 为试验前样品管的外表面周长,mm; L_1 为试验后样品管破口处的最大外表面周长,mm。

3 结果与讨论

3.1 装置的升温速率及温度控制稳定性

在进行316L不锈钢薄壁管高温爆破试验前对试验装置进行了6种等温高温爆破试验条件(3种升温速率、2个温度)的温度控制稳定性及2种模拟事故温度条件的瞬态加热升温速率控制测试。等温高温爆破试验的测试方法是以恒定的升温速率(1、2、5 °C/s)由室温(20 °C)升温到试验温度(700、897 °C)并保温~3 min后停止加热,空冷至室温;模拟事故温度条件的瞬态加热高温爆破试验的测试方法是在室温(20 °C)时先向样品管内充入1 MPa的高纯He

气,以1 °C/s的恒定升温速率升温到350 °C并保温~3 min,然后再以恒定的升温速率(5、10 °C/s)升温到试验温度(915、1 195 °C)后停止加热,空冷至室温。

以2 °C/s的恒定升温速率加热至700 °C保温和以5 °C/s的恒定升温速率加热至897 °C保温的试验结果示于图3a、b,实际升温速率分别为(2.0±0.1) °C/s和(5.0±0.2) °C/s。以1 °C/s的恒定升温速率升温至350 °C并保温~3 min,然后再以5 °C/s的恒定升温速率升温至1 195 °C和以10 °C/s的恒定升温速率升温至915 °C的试验结果示于图3c、d,实际升温速率分别为(5.0±0.3) °C/s和(10.0±0.3) °C/s。测试结果表明:试验装置的最高试验温度可达1 200 °C,升温速率为1~10 °C/s,升温速率相对偏差不得超过±10%,温度控制稳定性为±3 °C。

3.2 爆破性能

在高温爆破试验装置上,采用试验样品管在600~1 200 °C、升温速率为5 °C/s条件下进行瞬态加热高温爆破试验。本试验模拟压水堆LOCA工况温度条件,室温(20 °C)时先向样品管内充入8~50 MPa的高纯He气,然后以1 °C/s的恒定升温速率升温到350 °C并保温~3 min,再以5 °C/s的恒定升温速率升温至样品管爆破。

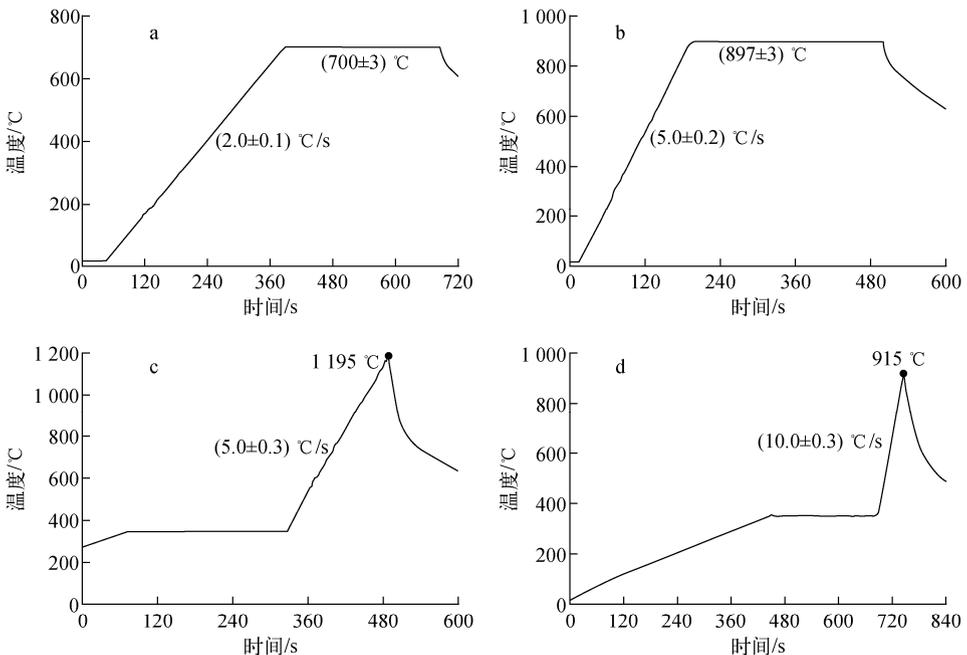


图3 高温爆破试验装置的控温曲线

Fig. 3 Temperature control curve of high temperature burst facility

高温爆破强度、周向延伸率随温度的变化示于图4。由图4可见,试验样品管的高温爆破强度随温度的升高线性降低,周向延伸率随温度的

升高而增加,尤其是约950℃以上增幅明显,但周向延伸率均较低。试验样品管的爆破温度最高为1184℃,爆破最高压力为70MPa。

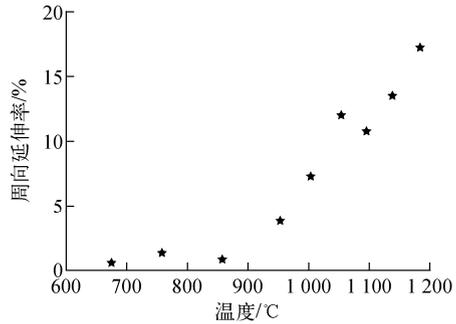
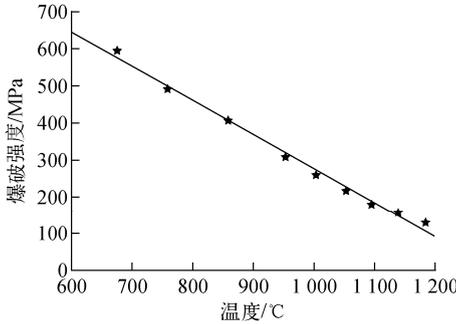


图4 爆破强度和周向延伸率与温度的关系

Fig. 4 Relationship between burst strength and elongation vs temperature

3.3 样品宏观形貌

试验样品管瞬态加热高温爆破后外观及破口形貌如图5所示。可看出,破口鼓胀较小,由高温低压时的开裂到低温高压时的撕破,甚至是撕断,表明样品管的周向延伸率较低。破口的外观形貌与爆破温度、爆破压力及样品材料有关。

薄壁金属管高温爆破试验装置,该装置灵活方便、控制精度高,满足试验要求。

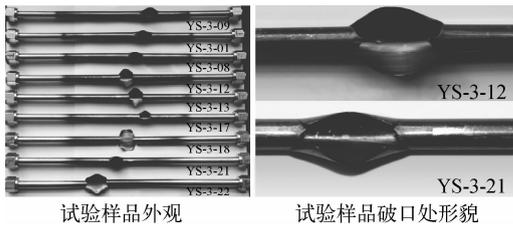


图5 高温爆破试验样品外观及破口形貌

Fig. 5 Appearance and fracture morphology of burst test sample

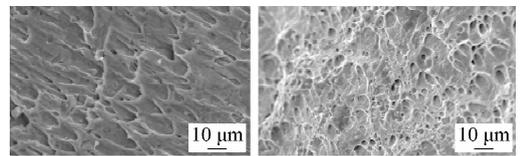


图6 高温爆破试验样品破口SEM微观形貌

Fig. 6 SEM observation on fracture of burst test sample

3.4 样品破口微观形貌

采用扫描电子显微镜(SEM)对316L不锈钢试验样品的破口截面进行微观形貌分析,结果如图6所示。图6表明,试验样品破口具有韧性断裂特征,韧窝拉长方向由内壁向外壁,表明力的方向由内壁向外壁扩展;韧窝多为小而浅且大小不均匀,表明它们的韧性较差;微观形貌分析结果与高温爆破试验样品外观的破口鼓胀较小及破口周向延伸率较低的试验结果非常吻合。

2) 完成了316L不锈钢薄壁管在模拟LOCA工况温度条件的瞬态加热高温爆破试验,获得了316L不锈钢薄壁管的高温爆破性能数据及与温度的关系。

本工作得到TMT团队成员的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] EJ 498—89 三十万千瓦压水堆核电站控制棒组件设计和制造技术条件[S]. 北京:中国核工业总公司,1989.

[2] NB/T 20057.3—2012 压水堆核电站反应堆系统设计堆芯 第3部分:燃料组件[S]. 北京:中国原子能出版社,2012.

[3] NB/T 20057.4—2012 压水堆核电站反应堆系统设计堆芯 第4部分:燃料相关组件[S]. 北京:中国原子能出版社,2012.

4 结论

1) 研制了采用高压气体作为试验介质的

- [4] NAGASE F, FUKETA T. Behavior of pre-hydrided Zircaloy-4 cladding under simulated LOCA conditions[J]. Nuclear Science and Technology, 2005, 42(2): 209-218.
- [5] KIM J H, LEE M H, CHOI B K, et al. Deformation of Zircaloy-4 cladding during a LOCA transient up to 1 200 °C[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 234: 157-164.
- [6] JEONG Y H, PARK S Y, LEE M H, et al. Out-of-pile and in-pile performance of advanced zirconium alloys (HANA) for high burn-up fuel [J]. Nuclear Science and Technology, 2006, 43 (9): 977-983.
- [7] NAGASE F, CHUTO T, FUKETA T. Behavior of high burn-up fuel cladding under LOCA conditions[J]. Nuclear Science and Technology, 2009, 46(7): 763-769.
- [8] MCKINNON M A. Cladding strength and pellet relocation testing results from tritium target rods [R]. Richland, Washington; Pacific Northwest Laboratory, 1992.
- [9] 张长义,徐远超,杨启法,等. M5 合金包壳管高温爆破性能[M]//中国原子能科学研究院年报. 北京:原子能出版社,2006:220-221.
- [10] 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.
ZHOU Jing, WANG Zhengpin, GAO Wei, et al. Study on the room temperature blasting properties of M5 zirconium alloy[J]. Foundry Technology, 2010, 31(4): 433-436(in Chinese).
- [11] 彭继华,李文芳,BECHADE Jean-Luc,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.
PENG Jihua, LI Wenfang, BECHADE Jean-Luc, et al. Study on the effect of texture on tension and burst properties of zirconium alloys[J]. Materials Research and Application, 2007, 1(2): 122-126(in Chinese).
- [12] 田春燕,周长善,杨继才,等. Zr-4 包壳管高温内压爆破性能研究[C]//国产 Zr-4 合金性能研究论文集. 北京:原子能出版社,1994:66-68.
- [13] 陈波全,彭倩,洪晓峰,等. 氢化物取向对 Zr-4 包壳管室温拉伸和爆破性能的影响[J]. 核动力工程,2019,40(1):60-64.
CHEN Boquan, PENG Qian, HONG Xiaofeng, et al. Effect of hydride orientation on tensile and bursting properties of Zr-4 cladding tubes at room temperature[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(1): 60-64(in Chinese).
- [14] 温敦古,谭军,陈刘涛,等. 核用锆合金包壳管内压爆破试验及性能研究[J]. 材料研究与应用, 2016,10(1):48-52.
WEN Dunggu, TAN Jun, CHEN Liutao, et al. Study on the burst tests and properties of zirconium alloys for nuclear reactor [J]. Materials Research and Application, 2016, 10(1): 48-52(in Chinese).
- [15] 黄玉才,张述诚,尚成宇,等. 压水堆燃料棒锆-4 包壳在大破口 LOCA 条件下的鼓胀爆破实验 [J]. 核科学与工程,1997,17(1):45-51.
HUANG Yucui, ZHANG Shucheng, SHANG Chengyu, et al. Zircaloy-4 cladding ballooning and burst experiment on PWR fuel rod under LB-LOCA conditions[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 1997, 17(1): 45-51(in Chinese).
- [16] 丁学锋,杜彦亭,刘建章,等. 管材内压闭端爆破测试系统的研制[J]. 原子能科学技术,2003,37 (增刊):98-101.
DING Xuefeng, DU Yanting, LIU Jianzhang, et al. Development of tester for burst property of close-end tube[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2003, 37(Suppl.): 98-101(in Chinese).
- [17] 王德华,袁改焕,李恒羽. 核用锆合金管材爆破试验工艺的改进[J]. 稀有金属快报,2006,25 (10):36-38.
WANG Dehua, YUAN Gaihuan, LI Hengyu. Improvement of burst test for zirconium alloy tube applied in reactor[J]. Rare Metals Letters, 2006, 25(10): 36-38(in Chinese).
- [18] 李江江,杜彦亭,热合曼·艾比布力. 锆管强度检测系统的研究与设计[J]. 液压与气动,2011 (9):25-29.
LI Jiangjiang, DU Yanting, Rahman·Hebibul, et al. The study and design of super-high pressure tube burst test system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2011(9): 25-29(in Chinese).
- [19] ASTM B353-12 (Reapproved 2017) Standard specification for wrought zirconium and zirconium alloy seamless and welded tubes for nuclear service (except nuclear fuel cladding)[S]. USA: ASTM International, 2017.
- [20] ASTM B811-13 (Reapproved 2017) Standard specification for wrought zirconium alloy seamless tubes for nuclear reactor fuel cladding[S]. USA: ASTM International, 2017.