

# 压水堆燃料棒若干设计准则的研讨

刘承新

(北京核工程研究设计院, 北京 100840)

**摘要:** 本文主要研究和讨论目前国内外有差别的若干压水堆燃料棒设计准则方面的问题, 并简介燃料棒燃耗加深、设计和制造工艺改进、新材料应用和使用条件变化等对压水堆燃料棒安全设计准则的影响。

**关键词:** 压水堆; 燃料棒; 设计准则

**中图分类号:** TL352.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2003)S0-0002-03

## Research on Design Criteria for PWR Fuel Rod

LIU Cheng-xin

(Beijing Institute of Nuclear Engineering, Beijing 100840, China)

**Abstract:** The paper mainly researches problems concerned in several design criteria for PWR fuel rod. These design criteria are different between countries. The paper also briefly presents the effects of extended burnup, design improvements, manufacturing process improvements, new material application and operating condition changes, etc on these design criteria for PWR fuel rod.

**Key words:** PWR; fuel rod; design criteria

### 1 概述

尽管压水堆相对其他堆型的燃料棒设计准则较为成熟, 国内外的规定也基本一致, 但若干设计准则仍存在着一些差异, 并且, 随着燃料棒燃耗加深、设计和制造工艺改进、新材料应用和使用条件变化等将有相应的变化, 需要认真地分析研究和讨论。对于压水堆燃料棒设计准则的较全面的评述可参见文献[1]。

### 2 若干设计准则研讨

#### 2.1 燃料温度准则

最热燃料芯块的中心温度应低于二氧化铀

熔点, 二氧化铀熔点的取值应考虑到燃耗等因素的影响<sup>[2]</sup>。

尽管国内外都有类似的叙述, 但笔者认为, 该准则还是以如下的叙述较为恰当: 燃料的最高温度应低于燃料的熔点<sup>[3]</sup>。因为燃料的最高温度不一定在中心, 其中, 环形燃料芯块最为典型; 另外, 还因目前已在应用 MOX(混合氧化物)燃料和含可燃毒物(如  $Gd_2O_3$  和  $Er_2O_3$ ) 燃料, 所以, 特指二氧化铀有其局限性。

俄罗斯对应该准则的条文是: 使内孔处  $UO_2$  芯块开始熔化的燃料棒线功率密度与最高允许的燃料棒线功率密度之比必须不低于  $1.4^{[4]}$ 。可见, 同样也可达到不使燃料熔化的目

收稿日期: 2003-01-22; 修回日期: 2003-03-10

作者简介: 刘承新(1937—), 男, 山东夏津人, 研究员级高级工程师, 反应堆工程专业

的,但看来过于保守。

## 2.2 包壳腐蚀和磨蚀准则

设计寿期末,包壳均匀腐蚀深度或磨蚀深度应小于包壳壁厚的10%<sup>[2]</sup>。

该准则是从保证包壳必要强度的角度提出来的。尽管法国法玛通和日本三菱等公司也有同样的准则规定,但有些公司则通过限制生成氧化膜厚度来达到同样的目的。如,前西德KWU(西德电站联合股份公司)规定:包壳管表面因均匀腐蚀而生成的氧化膜厚度不大于70 μm,包壳管中氢浓度不大于500 μg/g;近期,三菱和西门子公司分别提出91和130 μm的平均和最大氧化膜厚度限值<sup>[1]</sup>。

据上所述,笔者认为:

1) 作为压水堆燃料棒通用设计准则,以小于包壳壁厚的10%作为准则限值是合适的,但在具体设计中,应注意燃料棒直径和包壳壁厚的差别所引起的安全裕量差异;

2) 该准则也可改用限制氧化膜厚度,但一定要使各相关指标协调一致,如,70 μm氧化膜厚度基本上与0.64 mm厚包壳的10%一致,也与500 μg/g包壳氢浓度限值不矛盾。

然而,我国EJ323-88,即EJ/T323-1998修订前的版本,既规定包壳壁厚10%的腐蚀厚度限值,又规定包壳250 μg/g氢含量限值是矛盾的。因为对标准Zr-4合金包壳,其寿期末吸氢量可较准确计算。如包壳壁厚损失57 μm,约相当于66 μm的氧化膜厚度和420 μg/g包壳含氢浓度。

西门子公司提出的130 μm最大氧化膜厚度限值,则尚需验证。。

## 2.3 燃料棒当量水含量准则

燃料棒内自由热空间的当量水含量应低于2 mg/cm<sup>3</sup><sup>[2]</sup>。

该准则是根据20世纪70年代初运行经验提出来的,只要燃料棒内每立方厘米自由冷和热空间的当量水含量分别低于2和2.5 mg,就不会发生一次氢化破损<sup>[5,6]</sup>。

1981年和1996年版的NUREG-0800SRP(标准审查大纲)4.2节均有相同的规定,即2 mg/cm<sup>3</sup>(热空间)。但1993年第6版的

URD(用户要求文件)中规定:产品工艺控制应可靠的使总氢不大于2微克每克铀,并明确指出,ASTMC776-76规定的二氧化铀芯块总氢含量不大于2微克每克铀比2 mg/cm<sup>3</sup>(热空间)的规定更为严格。

然而,ASTM C776-94和00版已将2微克每克铀改为1.3微克每克铀。因此,该准则限值宜改为限制燃料芯块总氢不大于1.3微克每克铀。

## 2.4 RIA(反应性引入事故)准则

在RIA情况下,燃料棒在其任何轴向位置上的径向平均比焓,对新的和辐照过的燃料棒分别不应大于941 J/g(225 cal/g)和836 J/g(200 cal/g)<sup>[3]</sup>。

该准则,尽管各国都有大致相同的规定,如法国、俄罗斯和EUR(欧洲用户要求)均以836 J/g作为准则限值,日本三菱公司和URD分别以较高的962和1170 J/g作为准则限值<sup>[1]</sup>,但日本近期试验表明,该准则限值应较大幅度的降低<sup>[7]</sup>。如,压水堆燃料棒燃耗(以铀计)在40~60 GW·d/t范围内,在RIA情况下的破损阈值为209 J/g(50 cal/g)。

依此,笔者认为,该准则不必按新的和辐照过的燃料棒分别规定准则限值,但具体准则限值应比现行的836 J/g要低得多,且宜按燃料棒燃耗范围分别规定准则限值。

显然,具体的准则限值确定,尚待国内外试验研究结果。

## 3 高燃耗等因素对安全准则的影响

压水堆燃料棒的安全准则绝大多数是20世纪60年代和70年代初确立的,当时有较大安全裕量。随着燃耗加深、设计和制造工艺改进、新材料和MOX燃料应用、水化学变化以及运行策略变更等,安全裕量有的已降低,有的在降低,有的甚至没有安全裕量,需谋求新的安全准则限值(如2.4节所述)。

为清楚起见,下面以表1的形式列出燃料棒各安全准则与各个影响因素的关系,以便于感兴趣者进行深入的研究。

表1 燃料棒安全准则与各个影响因素的关系<sup>[8]</sup>  
Table 1 Fuel rod safety criteria versus affecting elements

| 安全准则                      | 工况 <sup>1)</sup> | 影响准则的新因素 <sup>2)</sup>  |
|---------------------------|------------------|-------------------------|
| a) CPR/DNBR <sup>3)</sup> | A, B, C          | 1, 2, 5, 6, 7, 9        |
| b) 反应性系数                  | B, C             | 2, 5, 6, 7, 8, 9        |
| c) 停堆裕量                   | A, B, C          | 1, 2, 5, 6, 7, 8, 11    |
| d) 富集度                    | A, B, C          | 1, 2, 5                 |
| e) 垢沉积                    | A                | 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10    |
| f) 应变                     | A, B             | 1, 7, 8                 |
| g) 氧化                     | A, B, C          | 3, 4, 7, 8, 10          |
| h) 氢化物浓度                  | A, B, C          | 3, 4, 7, 8, 10          |
| i) 棒内压                    | A, B, C          | 1, 5, 6, 7, 9           |
| j) PCMI <sup>4)</sup>     | A, B             | 1, 3, 4, 7              |
| k) 应力腐蚀开裂                 | A, B, C          | 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 11 |
| l) 燃料爆裂(RIA)              | C                | 7, 8                    |
| m) 燃料棒破损(RIA)             | C                | 1, 3, 4, 7, 8           |
| n) 包壳最高温度                 | C                | 3, 4, 7, 8              |
| o) 包壳脆化/氧化                | C                | 3, 4, 7, 8              |
| p) 喷放/地震载荷                | C                | 3, 7                    |
| q) 燃料组件压紧力                | A, B, C          | 1, 11                   |
| r) 冷却剂活度                  | A, B, C          | 5, 6, 7, 8              |
| s) 间隙活度                   | C                | 5, 6, 7, 8              |
| t) 源项                     | C                | 5, 6, 7, 8              |

注: 1) A——正常运行, 相当于工况 I; B——预期运行瞬态, 相当于工况 II; C——事故, 相当于工况 III、IV

2) 1——新的燃料设计; 2——新的堆芯设计; 3——新的包壳设计; 4——新的制造工艺; 5——长燃料循环; 6——高功率; 7——高燃耗; 8——MOX; 9——混合堆芯; 10——水化学变化; 11——目前/新的运行策略

3) CPR——临界功率比; DNBR——偏离泡核沸腾比

4) PCMI——芯块-包壳机械相互作用

#### 4 结束语

尽管压水堆相对于其他堆型的燃料棒准则较为成熟, 且国内外的准则限值也基本一致, 但因大部分准则制定的年代较早, 有些准则尚需研讨, 有些准则必将随着压水堆燃料棒的发展而有相应的变化, 因此, 燃料元件的设计者应予以关注。

#### 参考文献:

- [1] 刘承新, 宓培庆. 压水堆燃料棒设计准则分析[J]. 核标准计量与质量, 1998, (3): 11~15.
- [2] EJ/T 323-1998, 压水堆核电站燃料组件设计准则[S].
- [3] EJ/T 1029-1996, 压水堆核电站燃料系统设计限值规定[S].
- [4] IAEA. Design and Performance of WWER Fuel;

Technical Reports Series No 379 [R]. Vienna: IAEA, 1996.

- [5] Garzarolli F, Von Jan R, Stehle H. The Main Causes of Fuel Element Failure in Water-cooled Power Reactors [J]. Atomic Energy Review, 1979, 17(1): 31~128.
- [6] Joon K. Primary Hydride Failure of Zircaloy-clad Fuel Rod [J]. Trans Nucl Soc, 1972, 15: 186~187.
- [7] Michio I. International Working Group on Water Reactor Fuel Performance and Technology Plenary Meeting, Country Report (Japan) [R]. Vienna: IAEA, 2001.
- [8] Van Doesburg W. Fuel Safety Criteria and Review by OECD/CSNI Task Force [A]. Topfuel'99 [C]. France: French Nuclear Society, 1999. 259~261.