

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.02.024

核电站反应堆堆芯温度测量 K 型热电偶的国产化研制

高鹏

(中国中原对外工程有限公司, 上海 20023)

摘要: 用于测量核电站反应堆堆芯出口温度的 K 型热电偶是重要的 1E 级设备, 但该设备一直依赖进口; 巴基斯坦恰希玛核电站 3、4 号机组为我国向巴基斯坦出口的第三、四座核电站, 考虑到重要设备国产化对我国核电走出去的积极意义, 这两座核电站所用堆芯温度测量 K 型热电偶由国内相关单位进行研制。通过对运行环境和安装要求的详细研究, 在 K 型热电偶结构上采用了全铠装、分段式及新型热电偶接插件进行连接的创新设计, 充分考虑了各部件材料选择对于 K 型热电偶性能及安全的影响, 对传统铠装热电偶的制作工艺进行了优化与改进, 最终研制的样品通过了性能试验及 1E 级鉴定试验, 实际产品也顺利安装于巴基斯坦恰希玛核电站 3、4 号机组, 核电站堆芯温度测量 K 型热电偶的研制取得了阶段性的成功。

关键词: K 型热电偶; 堆芯测量; 1E 级; 国产化

中图分类号: TH811

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)02-132-05

Localization of Type K Thermocouples of In-core Temperature Measurement for Nuclear Power Plant Reactor

GAO Peng

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Type K thermocouples applied in the In-core exit temperature measurement for nuclear power plants are important class 1E equipment, which have always been dependent on imports in China. With the consideration of meanings of important equipment's localization for "Chinese nuclear go global" strategy, in-core temperature measurement type K thermocouples were researched and developed by related Chinese stakeholders, and were applied in CHASHMA Nuclear Power Plants Unit 3/4, which are the third and fourth nuclear power plants built by China in Pakistan. Based on a thorough study over operation environment and installation requirements, an innovative design were applied on the thermocouple structure, which were all-sheathed, segmented and with new type thermocouple connectors, the influence of material choose on the characteristics of thermocouples and nuclear safety were carefully analyzed, the traditional thermocouples fabrication procedures were optimized and improved, eventually the samples passed the type test and 1E qualification test, and the products were successfully installed and commissioned in CHASHMA Nuclear Power Plants Unit 3/4, therefore the localization of type K thermocouples of in-core temperature measurement for nuclear power plant reactor reached a periodical success.

Key words: type K thermocouple; in-core measurement; 1E; localization

堆芯出口温度是核电站反应堆的重要热工参数, 被用于堆芯液位密度补偿计算及过冷度的计算。此外, 在设计基准事故和严重事故工况下, 操作人员可根据堆芯出口温度确定堆芯冷却剂的温度

收稿日期: 2016-12-01

作者简介: 高鹏(1986), 男, 湖北洪湖人, 工程师, 硕士, 主要从事核电站热工仪表采购管理工作(e-mail) gaopeng@czec.com.cn。

情况。核电站反应堆堆芯温度, 通常使用 K 型热电偶对其进行测量, 其具有灵敏度高、测量精度高、高温及辐照环境下性能稳定等优点。目前我国核电处于蓬勃发展之际, 第三代自主核电技术也成功出海, 但用于堆芯温度测量的 K 型热电偶却主要依赖进口, 尽管国内生产热电偶的厂家众多, 但却没有国产热电偶应用于核电站堆芯温度测量。

巴基斯坦恰希玛核电站 3 号、4 号机组为我国向巴基斯坦出口的第三、四座核电站, 采用的堆型为压水堆, 功率为 300 MW, 研制用于堆芯温度测量的 K 型热电偶(以下简称为堆芯热电偶)对我国核电出口具有积极意义。

1 热电偶的基本原理

热电偶的测量原理是基于赛贝克效应^[1], 其原理如图 1 所示。两种不同金属构成的回路中, 如果两种金属的结点处温度不同, 该回路中就会产生一个温差电动势。两种金属称为热电极(工业上通常称为热电偶丝), 右端结点处两种热电极通常焊接在一起, 用于感受被测环境温度, 称为测量端(或称为热端), 而左端结点则称为参比端(或称为冷端)。

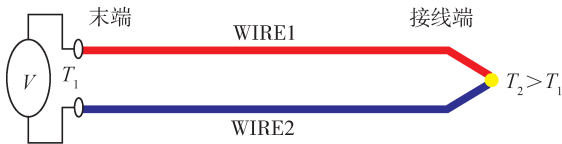


图 1 赛贝克效应原理图

Fig. 1 Schematic of SEEBECK effect

赛贝克效应产生的电动势为:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} (S_1 - S_2) dT \quad (1)$$

式中: S_1 和 S_2 分别为热电极 1 和 2 的赛贝克系数, 其取决于热电极材料本身的特性, 当热电极材料为均质材料时, S_1 和 S_2 为常数; E 为赛贝克效应产生的电动势, 仅与两端的温差即 $T_2 - T_1$ 相关, 而当温度 T_1 (参比端) 确定时, 便可测得温度 T_2 。

2 堆芯热电偶的国产化研制

2.1 国产化研制范围

根据堆内测温的结构设计要求^[2], 堆芯热电偶在安全壳内的结构需被分为 3 段, 各段间通过热电偶连接器进行连接。热电偶第 1 段(热电偶

I) 从堆内构件压紧部件底部引至堆内构件测温柱; 热电偶第 2 段(热电偶 II) 由测温柱处引出, 穿过压力容器顶盖, 直至压力容器顶盖吊具平台; 热电偶第 3 段(热电偶 III) 由堆顶吊具平台至安全壳贯穿件。本次国产化研制的热电偶也正是位于安全壳内的部分。图 2 给出了热电偶在安全壳内的结构布置。

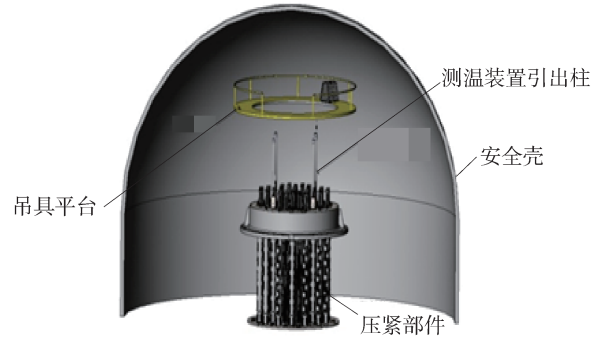


图 2 热电偶在安全壳内的结构布置图

Fig. 2 Layout of TC in the containment

2.2 国产化研制难点

堆芯热电偶国产化研制存在诸多难点。第一, 其运行环境恶劣, 位于核电站一回路水压边界, 需长期处于高中子通量、高剂量辐照、高温高压的环境条件下, 具体如表 1 所示; 第二, 其敷设范围大、接口众多, 结构设计上相比于普通热电偶更为复杂; 第三, 其技术指标要求高, 为 1E 级设备, 使用寿命要求长, 这也增加了制作工艺的难度。

表 1 环境条件

Tab. 1 Environment condition

安全壳内正常环境	压力容器内正常工况
温度 ≤ 49 °C	设计温度: 350 °C
压力: 常压(微负压)	设计压力: 17.16 MPa
辐照剂量: 2×10^5 Gy(40 a)	正常运行温度: 315.5 °C
/	正常运行压力: 15.2 MPa

为克服这些难题, 我们需从结构设计、材料选择、制作工艺及试验验证等方面进行综合考虑。

2.3 堆芯热电偶的结构设计

2.3.1 热电偶的截面结构

热电偶 I 的长度约为 9 m, 热电偶 II 的长度约为 5 m, 热电偶 III 的长度约为 50 m。通常情况下, 热电偶 I 和热电偶 II 采用铠装, 热电偶 III 采用软电缆, 但软电缆与铠装结构的连接处在恶劣环境下易

出现断裂,因此本设计整体上均采用铠装,其中铠装热电偶截面各部分尺寸应满足表2的要求^[3]。

2.3.2 测量端结构

由于堆芯热电偶需接入堆芯温度测量系统,考虑到系统需接地处理,因此热端应采用不接壳型结构。而为保证热电偶的快速响应时间,测量端前段外径缩小为2.28 mm,长度为19 mm。

表2 铠装热电偶I截面尺寸要求

Tab. 2 Dimension requirements of sheathed TC mm

标称尺寸	外径		外壳最小值	绝缘层最小值	热电极最小直径
	最小值	最大值			
3.175	3.150	3.213	0.30	0.30	0.51

2.3.3 热电偶I与堆内构件测温装置的接口结构

热电偶I的外径为 $\phi 3.175^{+0.039}_{-0.250}$ mm,堆内构件测温柱与热电偶的接口部分为规格 $\phi 8 \times 2$ 的热电偶导管,此连接处为一回路压力边界的重要组成部分,设计压力为17.16 MPa,因此需设计可靠的密封卡套进行连接。

封卡套的结构设计如图3所示。

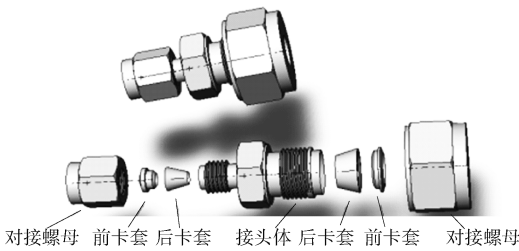


图3 密封卡套结构图

Fig. 3 Structure of seal union

其密封结构采用了双卡套密封,卡套连接泄漏量^[4]的公式为如下。

$$Q = \frac{\pi \cdot d \cdot \delta^3 \cdot \Delta p}{12 \cdot \mu \cdot l} \quad (2)$$

式中: Q 为泄漏量; d 为管路直径; δ 为卡套和管路间的间隙; Δp 为卡套接头内外压力降; μ 为流体动力黏度; l 为间隙长度。

根据公式可知,管接头泄漏量 Q 与间隙大小 δ^3 、密封截面周长 d 均成正比,与密封长度 l 成反比,因此在保证卡套和接头体的尺寸精度以及表面光洁度的前提下,可以有效控制密封程度。另双卡套结构使得密封功能和对卡套管的抓紧功能分开,可降低了扭矩力矩,进而降低装配难度。

2.3.4 热电偶之间的连接

为保证热电偶信号的有效传输,采用热电偶连接器连接分段热电偶,热电偶连接器又称热电偶接插件。热电偶连接器设计为直插式,2芯类型,热电极通过焊接的方式与接插件相连,并灌注高温环氧树脂进行密封及绝缘操作。接插件之间通过插针、插孔连接,并利用半月形结构进行定位,其结构简图如图4所示。

在热电偶接插件外设计保护套管,其连接采用细牙螺纹进行自锁,并采用O型密封圈密封,与铠装热电偶通过双卡套结构进行密封,用以对热电偶接插件进行固定和保护。保护套管结构如图5所示。

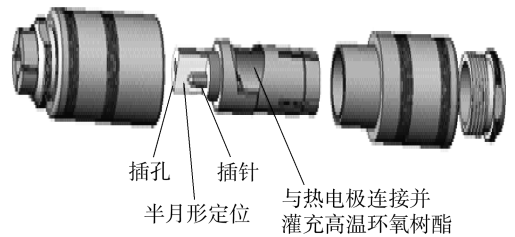


图4 热电偶接插件结构图

Fig. 4 Structure of TC connector

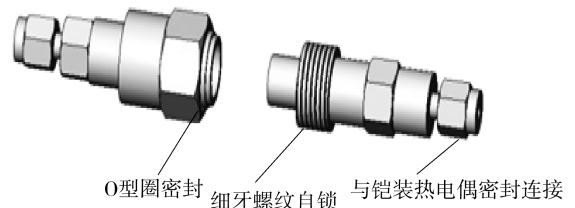


图5 密封卡套结构图

Fig. 5 Structure of seal union

2.4 堆芯热电偶的材料选择

2.4.1 热电极材料

堆芯热电偶为K型热电偶,其热电极的材料分别为镍铬、镍铝,其名义化学成分如表3所示^[5]。

表3 K型热电偶热电极材料名义成分

Tab. 3 Nominal composition of type K TC elements

热电极材料	Ni	Cr	Mo	Co	Si	Al	Mn	Fe	Mg
镍铬 (wt%)	余量	9.5	/	/	0.5	/	/	0.5	/
镍铝 (wt%)	余量	/	/	1.0	0.4	1.6	2.0	/	/

为确保设计要求,由热电极组成的热电偶精度应达到I级精度^[6],即在温度为0~375℃时,精

度为 $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 温度大于 $375\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 精度为 $\pm 0.4\% |t|$, 其中 t 为被测值。

2.4.2 绝缘层材料

设计要求堆芯热电偶的常温绝缘电阻值应大于 $5\times 10^9\ \Omega\text{m}$ 。由于热电偶的绝缘电阻在高温下会呈几何级数降低, 绝缘电阻降低会导致热电偶测温回路电流分流, 甚至产生虚拟端, 进而导致热电偶精度的降低。绝缘层材料的选择直接决定堆芯热电偶绝缘电阻的大小, 此外绝缘材料也对热电偶偶丝起到一定程度上的物理保护作用。选用高纯氧化铝作为绝缘材料。

高纯氧化铝中 Al_2O_3 含量(质量百分比)应 $\geq 99.5\%$, 其他杂质含量应满足表 4 要求^[7]。

表 4 杂质含量表

Tab. 4 Inclusion requirements

杂质类型	B + Cd	S	C	总杂质含量
含量要求	$\leq 30\times 10^{-6}$	$\leq 50\times 10^{-6}$	$\leq 300\times 10^{-6}$	$\leq 500\times 10^{-6}$

2.4.3 外壳材料

外壳材料又称为铠装材料, 其需保证堆芯热电偶能够在高温高压及辐照环境下正常工作, 参考 ASTM E235—2003 要求, 外壳材料选择奥氏体不锈钢管, 牌号为 316L, 且其夹杂物等级应不次于 3 级。

2.4.4 密封卡套及热电偶连接器的材料

密封卡套接头体、卡套材料选用奥氏体不锈钢。

热电偶连接器的外壳材料选用黄铜镀铬, 绝缘材料选用 PEEK(聚醚醚酮), 针芯材料和热电极材料成分保持一致, 分别为镍铬、镍铝。

热电偶连接器外保护套管材料选用奥氏体不锈钢, 牌号为 316L, 密封垫圈选用耐辐照且密封效果好的三元乙丙橡胶 EPDM。

2.5 堆芯热电偶的制作

常规铠装热电偶的制作工艺流程如图 6 所示, 而为满足堆芯热电偶的高精度、高稳定性、长寿命的综合设计要求, 在常规工艺的基础上对其进行了改进。

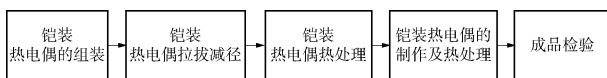


图 6 铠装热电偶制作工艺流程图

Fig. 6 Fabrication flow chart of sheathed TC

2.5.1 组装环境改进

组装环境的不适可能将杂质引入热电偶, 从而影响其性能。此外氧化铝材料较易受潮, 湿度控制

不当将会导致热电偶成品绝缘电阻不符合要求。将热电偶组装车间改进为洁净室, 并经过反复实践, 确定出符合要求的环境温湿度及洁净度。

2.5.2 热处理工艺的改进

铠装热电偶拉拔减径后需在保护气氛中进行退火处理, 本次研发在常规退火热处理工艺的基础上, 对退火温度进行了更精确的控制, 调节保护气氛的流量处于最优值, 以保证热电偶的均质和力学性能。

根据研究, NiCr_{10} 长期处于 $246\sim 468\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度区间时, 其内部晶格结构会由无序状态变为短程有序, 从而导致热电偶测温不均匀, 所导致的温度误差最高可达 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[8]。而通过稳定化热处理工艺, 可以有效消除 NiCr_{10} 晶格间结构短程有序所带来的精度影响。

2.6 试验验证

为检验所研制的堆芯热电偶的性能指标, 需通过一系列试验进行验证。试验包括常规性能试验和 1E 级鉴定试验。

2.6.1 常规性能试验

按前述结构、材料及工艺, 制作 3 支编号分别为 S_1 、 S_2 和 S_3 的样件, 并对其进行常规性能试验。

2.6.1.1 精度

分别在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $375\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下对 3 支样件进行标定, 测量其精度, 结果如图 7 所示, 样件在 $0\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 满足设计精度的要求。

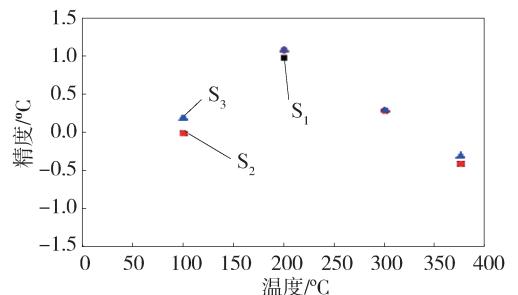


图 7 样件精度数据

Fig. 7 Accuracy data of samples

2.6.1.2 绝缘电阻和热响应时间

分别测量 3 支样件在室温 ($17\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下的绝缘电阻值及热响应时间, 结果如表 5 所示。绝缘电阻值均远高于设计要求 ($5\times 10^9\ \Omega$), 热响应时间也均满足小于 1 s 的设计要求。

表5 样件绝缘电阻值及响应时间

Tab. 5 Responsible time and IR of samples

样件编号	绝缘电阻值/($10^{22}\Omega$)	热响应时间/s
S_1	2.58	0.323
S_2	2.54	0.290
S_3	2.62	0.291

2.6.1.3 长期稳定性试验

为验证堆芯热电偶是否能满足稳定测温的要求,将3支样件置于350℃环境下持续30d,每天测量一次数据,结果如图8所示,不难看出,3支样件测温值均在精度范围内,且最大偏差值不超过0.2℃。

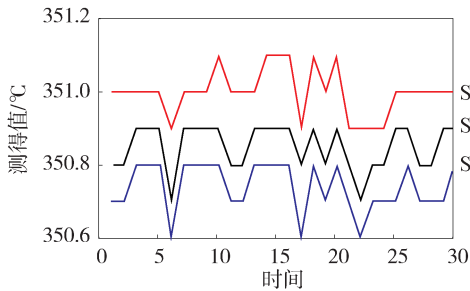


图8 样件长期稳定性数据

Fig. 8 Long term stability test data of samples

2.6.1.4 水压试验

由前述结构可知,堆芯热电偶通过密封卡套与堆内构件测温装置引出管连接,为验证其密封性,需进行水压试验,选用样件 S_1 与模拟引出管连接进行水压试验。试验结果表明,绝缘电阻值依然满足设计要求,卡套连接密封性能良好。

2.6.2 1E级鉴定试验

按前述结构、材料及工艺,制作3支编号分别为 S_4 、 S_5 、 S_6 的样件进行1E级鉴定试验。1E级鉴定试验委托具有资质的单位进行,需进行辐照老化试验、热老化试验、振动试验、抗震试验、LOCA/MSLB试验。试验前后分别对3支样件的精度、室温绝缘电阻进行了检查,试验结果分别如图9和表6所示。在经过鉴定试验后,3支样件性能保持完好,并未劣化。

表6 试验前后样件绝缘电阻值对比

Tab. 6 IR data comparison of the samples $10^{22}\Omega$

试样编号	试验前绝缘电阻值	试验后绝缘电阻值
S_4	2.36	6.20
S_5	2.19	1.26
S_6	2.24	3.55

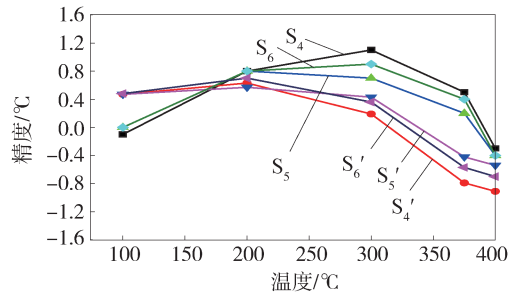


图9 试验前后样件精度对比

Fig. 9 Accuracy data comparison of samples

2.6.3 产品的安装与调试

热电偶样件通过1E级鉴定试验后,于2015年9月完成批量生产(单台机组36支,共72支),巴基斯坦恰西玛核电站3号机组堆芯热电偶于2015年12月完成全部安装与调试,所有热电偶测量回路连续,各项数据正常,符合设计要求。

3 结论

通过试验验证以及在实际工程上的应用反馈,堆芯热电偶的国产化取得了阶段性的成功。由于堆芯热电偶的使用是一个长期的过程(40年的使用寿命),我们也将持续关注堆芯热电偶在巴基斯坦恰西玛核电站3号、4号机组的使用反馈情况,积极改进与创新,期待使国产化堆芯热电偶将具有更广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 吕崇德. 热工参数测量与处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [2] 欧阳予. 秦山核电工程 [M]. 北京: 原子能出版社, 2000.
- [3] ASTM. Standard specification for thermocouples, sheathed, type K and type N, for nuclear or for other high-reliability applications; ASTM E235-03 [S]. U. S. A.: ASTM, 1996.
- [4] 雷雄. 卡套式管接头与双卡套式管接头的密封性能对比 [J]. 液压气动与密封, 2002(2): 43-45.
- [5] 张祖力. K型和N型热电偶的性能对比 [J]. 功能材料, 2004(35): 1718-1721.
- [6] 国家技术监督局. 热电偶第2部分 允差: GB/T 16839.2—1997 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [7] ASTM. Standard specification for magnesium oxide and aluminum oxide powder and crushable insulators used in the manufacture of base metal thermocouples, metal-sheathed platinum resistance thermometers, and noble metal thermocouples; ASTM E1652-03 [S]. U. S. A.: ASTM, 2016.
- [8] KOLLIE T G. Temperature measurement errors with type K (Chromel vs Alumel) thermocouples due to short-ranged ordering in Chromel [M]. Tennessee: ORNL, 1975.

(责任编辑 郑文棠)