

控制棒驱动机构自然循环冷却方式的可行性研究

邹 鹏 王建军 葛增芳 王怡明

(哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室 哈尔滨 150001)

摘要 传统的二代压水反应堆主要是采取鼓风机鼓风的方式对控制棒驱动机构(Control Rod Drive Mechanism, CRDM)进行强制通风冷却,该冷却方式耗能较大且无法保证绝对安全可靠。本文针对于大亚湾核电站中 CRDM 群的布置方式,采用中广核新型的 EMC-B 型控制棒驱动机构的结构及材料物性参数,运用了计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析方法,研究了当采用空气自然循环冷却方式时,CRDM 群及各线圈的温度分布,探索对 CRDM 群采用空气自然循环冷却方式的可行性。模拟分析结果表明:总体来看,处于外围和中心位置处的 CRDM 的线圈温度,要比中间区域的 CRDM 线圈温度高;对于给定计算工况,各线圈的最高温度为 198℃,低于限制温度(200℃),表明对于所研究的 CRDM 群,依靠空气的自然对流,可以对 CRDM 进行有效冷却。计算结果可为新型 CRDM 群分布设计提供参考。

关键词 控制棒驱动机构(Control Rod Drive Mechanism, CRDM), 自然对流, 计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD), 数值模拟

中图分类号 TL421⁺.1, TB65

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.030604

在核反应堆中,控制棒驱动机构(Control Rod Drive Mechanism, CRDM)是一种步进式的提升机构,用来使控制棒组件在堆芯内提起、插入或保持在适当位置,以实现反应性控制功能。在目前的压水核反应堆中,使用最为普遍、技术最为成熟的是磁力提升式控制棒驱动机构,其结构主要由耐压壳组件、钩爪组件、驱动杆组件、线圈组件、棒位探测器组件和上风罩等部分组成^[1]。核反应堆运行经验和有关研究表明,影响控制棒驱动机构寿命及工作性能的主要因素有运行温度、工作压力和工作载荷等^[2]。磁力提升式控制棒驱动机构的线圈在通电过程中将释放出热量,另外 CRDM 与一回路冷却剂接触,也会有一部分热量由冷却剂传给 CRDM,如果缺乏合适的冷却措施,可能导致线圈的温度超过线圈组件中线圈所能承受的最高温度,这将使得线圈组件的功能退化或失效,甚至造成线圈烧毁。目前核电厂中主要通过设置风机,利用空气强迫对流换热,来控制控制棒驱动机构线圈的温度^[3],与采用空气自然循环冷却的方式相比,耗能较大且安全性偏低。随着 AP1000、EPR 为代表的第三代核反应堆技术的提出和发展,对 CRDM 的设计也进行了一些改进,例如在 EPR 设计中,取消了强制通风设

备和通风罩,仅通过自然对流散热来实现控制棒驱动机构、特别是线圈的冷却,并能有效地控制线圈温度维持在合理的范围内^[4]。

目前国内外只有少数文献对 CRDM 群全场进行计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模拟分析,并且这些文献一般都将单根 CRDM 简化成柱状几何结构^[5],更为重要的是,这些文献都是针对于强制通风冷却这种方式进行研究。受此启发,本文在对单根 CRDM 精细建模的基础上,针对于空气自然循环冷却这种方式,首次尝试对压水堆 CRDM 群进行全场的数值模拟,对 CRDM 采用自然循环冷却的可行性进行了研究。

1 几何建模与网格划分

考虑所研究的 CRDM 群在几何上的相似性,本文首先利用 PRO/E 三维实体建模软件^[6],建立计算区域中单根 CRDM 的几何模型,并对几何模型的内部结构进行了适当的保守性简化,所建立的单根 CRDM 几何模型如图 1 所示。

第一作者:邹鹏,男,1989 年出生,2012 年毕业于哈尔滨工程大学,现为该校硕士研究生,核能科学与工程专业

通讯作者:王建军, E-mail: wang-jianjun@hrbeu.edu.cn

收稿日期:2013-09-18, 修回日期:2013-12-02

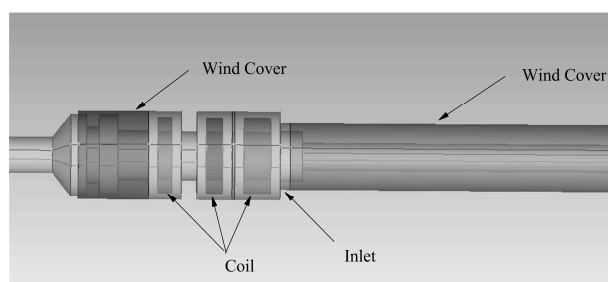


图1 单根 CRDM 几何模型
Fig.1 Geometry model of a single CRDM.

在图1的几何结构中,为了兼顾考虑计算资源、计算效率和计算目的之间的平衡,本文建立 CRDM 三维几何实体模型时进行了适当的简化处理:

(1) 考虑到 CRDM 为一端封闭的结构形式,且固体结构之间的水隙十分狭窄,因此冷却剂在水隙中几乎处于滞止状态^[7], CRDM 内各固体部分以及 CRDM 与冷却剂之间的热量传递方式主要依靠导热,在几何简化中将水隙中的流体当作固体处理;

(2) 由于金属的热导率远高于冷却剂水,在三维全场几何建模过程中,忽略了 CRDM 耐压壳内部的磁极和拆卸杆等金属结构,认为局部磁极、拆卸杆等位置处均充满冷却剂;

(3) 考虑到 CRDM 内部腔室材料界限明显,且种类较少,没有直接对 CRDM 内部腔室进行几何建模和划分网格,而是通过编写 UDF 程序的手段,直接将对对应几何区域上物质的热物性赋予腔室内的对应物质,从而既简化了几何结构,又充分考虑了不同位置处物质的物性区别。CRDM 内部热导率如图2所示。

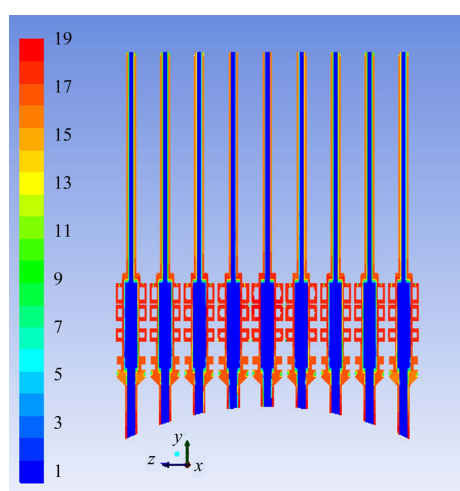


图2 CRDM 内部热导率图
Fig.2 Internal thermal conductivity of the CRDM group.

在单根 CRDM 周围建立四个辅助面,每个辅助面位于相邻 CRDM 的中间位置上,然后利用 ICEM 软件,对该几何划分 block 块。这些辅助面在 FLUENT 中将会被定义成 interior 边界,因此它们不会对计算结果造成影响。

对如图3(a)所示的单根 CRDM 的几何模型及 block 块,进行阵列、拉伸,同时通过适当的布尔运算,如图3(b)所示,建立由 CRDM 群、压力容器顶盖以及附近的空气域组成的计算区域几何模型及 block 块。

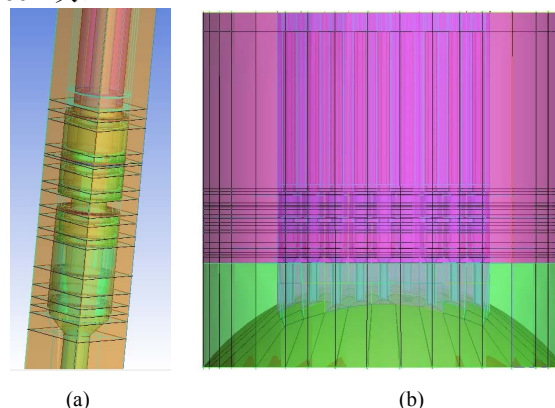


图3 CRDM 单根(a)和整场(b)分块图
Fig.3 Blocks of a single CRDM (a) and the whole computational domain (b).

通过对所建立的 CRDM 进行阵列、拉伸,同时通过适当的几何布尔运算,建立由 CRDM 群、压力容器顶盖以及附近的空气域组成的计算区域几何模型。基于所建立的计算域几何模型,本文利用 ICEM-CFD^[8],对计算区域进行了网格划分。为了确保计算结果的有效性,需要进行网格无关性验证,本文选取三种线圈的平均温度作为评价参数,计算结果如图4所示。

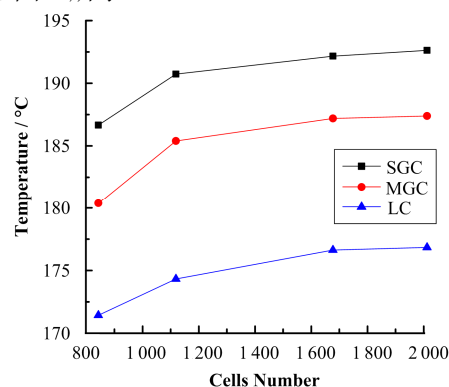


图4 线圈平均温度图
Fig.4 Average temperature of coils.

由图4中的计算结果可知,当网格数约为1677万时,计算结果满足了网格无关性要求,因此在后续计算中本文都采用了该套网格,其网格剖分结构如图5所示。

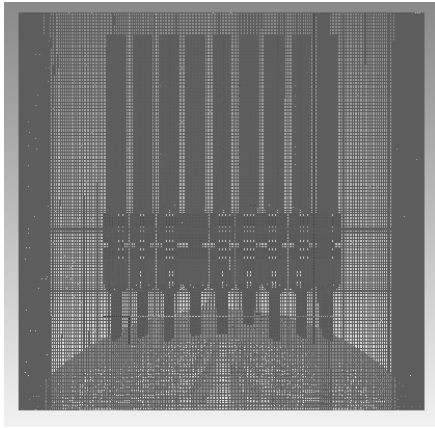


图 5 全场网格图

Fig.5 Mesh structure of the whole computational domain.

2 计算模型

考虑到所计算区域内空气的自然对流流动具有低速、压力变化小等特点,因此在对 CRDM 群附近区域进行三维整体流场计算模拟时,选择基于压力的求解器。空间的离散格式选择二阶迎风格式。选择 Body Forced Weighted 格式作为压力插值方案^[9]。在自然对流流动中,通常采用 Ra 数作为判别层流向湍流转变的依据,初步计算结果表明,本文所关心的流场中 $Ra < 10^8$,因而本文选用层流模型。

如图 3(b)所示,在 CRDM 群径向最外侧即为外部通风罩,通风罩与压力容器之间即为空气的进口,本文将其设置为压力进口;考虑到 CRDM 贯穿压力容器,且其内部与一回路冷却剂直接接触,为保守起见,本文认为 CRDM 与压力容器顶部相交的面为 $315\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温壁面;此外,鉴于压力容器顶部覆盖有保温层,压力容器顶部与空气接触部分的温度设为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。外风罩壁面温度设为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。空气流域顶部设为压力出口。通过编写 UDF 程序的手段,给夹持线圈、移动线圈、提升线圈分别赋予相应的热量值。

在低速的自然对流流动中,流场中压强变化很小,因此空气的密度可以选择为 Boussinesq 模型,空气的粘度则按照 Sutherland 定律进行求解。水、空气、奥氏体不锈钢的导热系数均按照分段线性的方式进行拟合。

在室温环境中,当 CRDM 处于提升、步进、下降这三种状态中的下降状态时,线圈发热量是最大的。为了保守起见,本文将认为所有 CRDM 均长时间处于下降状态下。

3 结果分析

当 CRDM 群处于持续下插状态时,在由 CRDM 群、周围空气流域及压力容器顶盖外壁所构成的计算区域内,选取过压力容器轴线的横截面来研究温度场的分布特性,图 6 给出了该截面上的温度场计算结果云图。

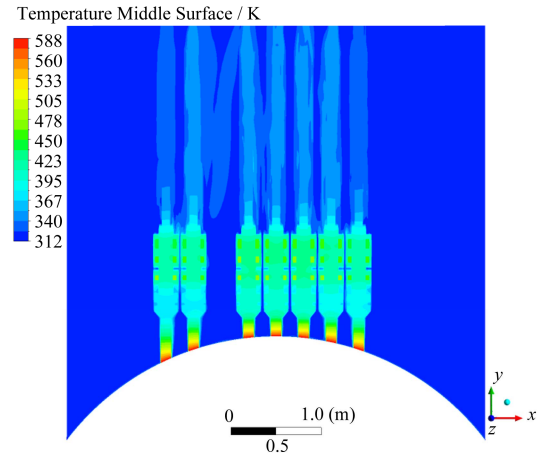


图 6 整体温度场温度截面

Fig.6 Temperature distribution on the computation domain section.

计算结果表明,当 CRDM 群处于持续下降状态时,CRDM 群外部流域中的空气主流温度变化较小,CRDM 群外部空气主流区域的温度大部分低于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与 CRDM 群外部空气主流区域相比,在上风罩内的空气温度相对高得多。这主要是因为上风罩的设置,构建了空气的流动通道,有利于风罩内的空气与外围主流空气形成自然循环流动,促进了 CRDM 热量的向外传递。图 7 的计算结果表明,在三维全场模拟条件下,线圈的最高温度约为 $198\text{ }^{\circ}\text{C}$,低于线圈的允许温度限制值($200\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[1]。

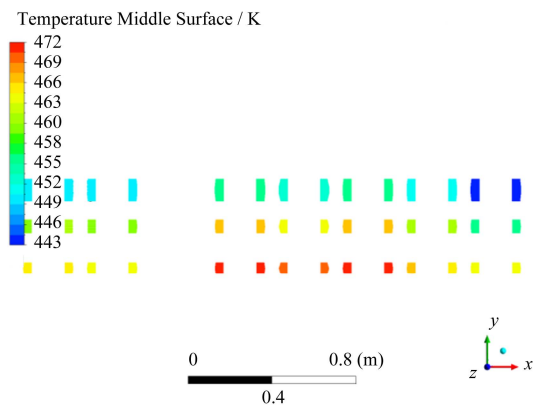


图 7 线圈温度截面

Fig.7 Temperature distribution on the coil.

如前面所述,本文在几何建模过程中,对 CRDM 进行了适当的保守性简化;此外,CRDM 不可能全部都长时间同时处于下降状态。因此,在实

际运行情况中, CRDM 线圈最高温度将不超过 198 °C。

为了进一步确定在计算域内温度最高线圈所在

的 CRDM 位置, 沿 CRDM 高度方向, 在夹持线圈、移动线圈和提升线圈位置处, 分别选取三个水平截面, 图 8 给出了这三个截面上线圈的温度分布特性。

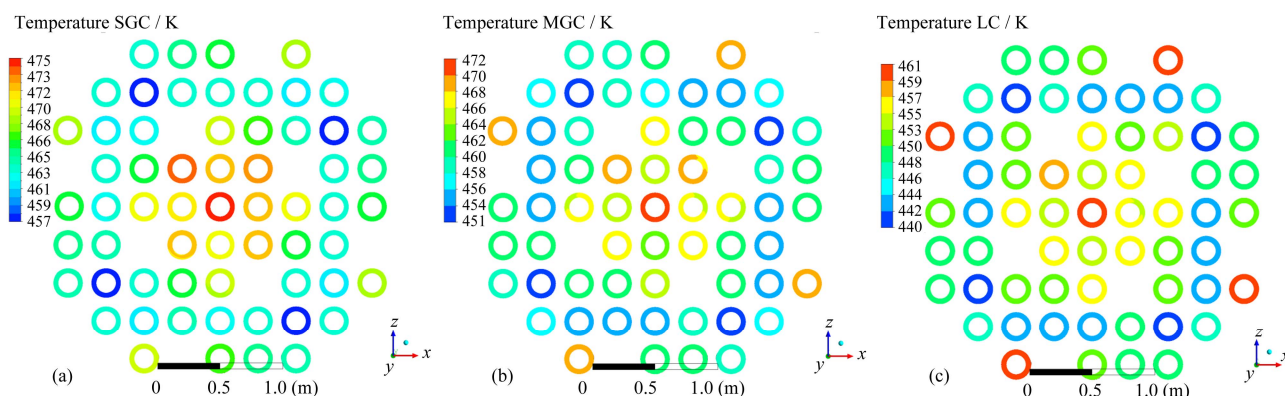


图 8 夹持线圈(a)、移动线圈(b)和提升线圈(c)温度云图
Fig.8 Temperature distribution of the SG (a), MG (b) and LC (c).

图 8 中的计算结果显示, 从 CRDM 群径向位置看, 夹持线圈、移动线圈的温度最高值都出现在 CRDM 群分布区域的中心位置; 提升线圈的温度最高值出现在中心与边角处; 在三组线圈中, 线圈温度的最低值均出现在中心和外围区域之间的位置。计算结果同样表明, 处于分布区域中间位置的 CRDM 线圈, 其线圈温度反而比外围线圈的温度要低一些, 其原因主要有三点:

(1) 处于 CRDM 群分布区域内部的空气受周围 CRDM 线圈加热, 其温度相对较高, 其密度也相对低一些, 在基本不变的主流空气温度作用下, 形成的空气自然对流相对比较强烈, 其对流换热能力略强; 如图 9(a)所示, 处于分布区域中心位置的空气速度最高, 超过 $0.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 在分布区域的中间位置, 空气速度超过 $0.49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 在 CRDM 群外围附近, 空气主流的速度介于 $0.12\text{--}0.49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 在 CRDM 群最外围处, 空气的温度甚至低于 $0.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由于 CRDM 群外围的空气流速较低, 空气自然对流也相对较弱, 因此位于分布区域最外围的 CRDM, 其线圈温度偏高。

(2) 另一个原因在于 CRDM 的排列方式是中间有部分通流区域, 这为空气提供了上升通道, 促进了对流, 这也是位于分布区域中间位置的 CRDM 线圈温度较低的一个重要原因。

(3) 由于压力容器顶部接近球形, 不同位置处的 CRDM, 其线圈与压力容器顶盖的距离也会不同。与位于中心位置处的 CRDM 相比较, 外围处的 CRDM 线圈距离压力容器顶部距离较远, 冷却剂通过导热传向线圈的热量较少, 从而影响线圈温度。位于中心位置处的 CRDM, 冷却剂通过导热传向线圈的热量较高, 所以在图 8 中, 中心位置的线圈温度是最高的。

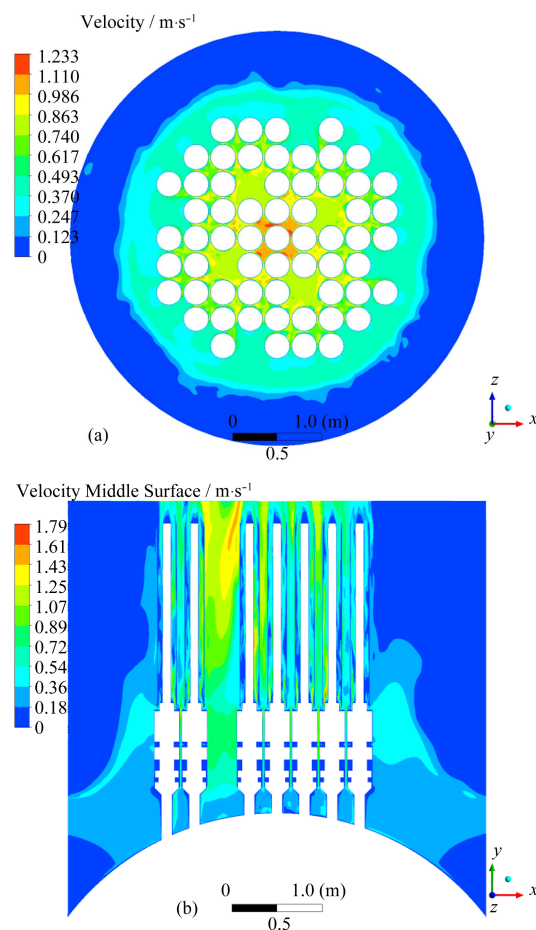


图 9 横截面(a)和纵截面(b)速度分布云图
Fig.9 Velocity distribution on the cross section (a) and vertical section (b).

4 结语

本文利用 FLUENT 软件, 对 CRDM 群及其附近空气区域的流场和温度场分布进行了三维全场模拟, 通过分析得到以下结论:

(1) 整体而言, 位于中心位置处的 CRDM 的线圈温度最高, 位于最外围位置处的 CRDM 的线圈温度其次, 而位于中心和外围区域之间的 CRDM 线圈温度最低。影响线圈温度分布的因素主要包括空气自然循环能力、一回路水温以及结构特点等。

(2) 在 CRDM 群分布区域中预留相应的空气上升通道, 能有效促进空气的自然对流, 并对通道附近的 CRDM 进行有效冷却。

(3) 计算结果表明各 CRDM 群线圈的最高温度不超过 198 °C, 低于限制温度(200 °C), 对所研究的 CRDM 群采用全自然循环冷却方式是可行的。本文分析结果可为新型 CRDM 群分布设计提供参考。

参考文献

- 1 苏林森, 杨辉玉, 王复生, 等. 900 MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京: 原子能出版社, 2004: 70–72
SU Linsen, YANG Huiyu, WANG Fusheng, *et al.* The system and equipment of the 900 MW pressurized water reactor nuclear power plant[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2004: 70–72
- 2 郑海峰, 钟艳敏, 王源, 等. 先进堆长寿命控制棒驱动机构热态寿命考验[J]. 核动力工程, 2002, **23**(2): 70–73
ZHENG Haifeng, ZHONG Yanmin, WANG Yuan, *et al.* Longeval control rod drive mechanism hot life test for advance pressurized water reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2002, **23**(2): 70–73
- 3 彭航, 许厚明, 李红鹰, 等. 600 MW 核电站控制棒驱动机构原理样机风冷试验[J]. 核动力工程, 2000, **21**(3): 193–196
PENG Hang, XU Houming, LI Hongying, *et al.* Air cooling test of control rod drive mechanism principle sample on 600 MW NPP[J]. Nuclear Power Engineering, 2000, **21**(3): 193–196
- 4 兰银辉, 熊少阳, 尤磊, 等. 压水堆核电站控制棒驱动机构金属材料设计[J]. 热处理技术与装备, 2011, **32**(6): 24–28
LAN Yinhui, XIONG Shaoyang, YOU Lei, *et al.* The metallic material design of pressurized water reactor control rod drive mechanism[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2011, **32**(6): 24–28
- 5 于浩, 翁羽, 冯少东, 等. CAP1000 一体化堆顶组件风冷系统流场分析[J]. 核技术, 2013, **36**(4): 040624
YU Hao, WENG Yu, FENG Shaodong, *et al.* CAP1000 integrated head package airflow system fluid field analysis[J]. Nuclear Techniques, 2013, **36**(4): 040624
- 6 张瑞萍. Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 中文版标准教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 252–284
ZHANG Ruiping. Pro/ENGINEER Wildfire version 5.0 standard tutorial[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 252–284
- 7 Brian Paul Coombs. An investigation of alternative cooling methods for a control rod drive mechanism coil stack assembly[D]. Rensselaer Polytechnic Institute, 2009
- 8 ANSYS INC. Introduction to ANSYS ICEM CFD[CP]. Pennsylvania USA, 2010, 12
- 9 ANSYS INC. ANSYS 14.0 FLUENT User's Guide[CP]. Pennsylvania USA, 2011, **10**: 813–818

Feasibility research of CRDM natural circulation cooling

ZOU Peng WANG Jianjun GE Zengfang WANG Yiming

(Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract Background: In the second generation pressurized water reactor, the Control Rod Drive Mechanism (CRDM) is mainly cooled by the blast blower, which consumes more energy and is of lower security. Based on the layout of the CRDM group in the Daya Bay nuclear power plant, the EMC-B type of CRDM is taken as research object. **Purpose:** The temperature distribution of the CRDM group was simulated to verify the feasibility of natural circulation cooling of air. **Methods:** Several Computational Fluid Dynamics (CFD) based programs were employed for this research. Firstly, Pro/ENGINEER was applied to establish the 3D model of the CRDM group; then the geometrical model was meshed with ICEM; finally, the flow field and temperature distribution were solved by using FLUENT. **Results:** The temperature field of the CRDM can be divided into three regions, and the temperature of the middle CRDM was highest, while the temperature of the region between the middle and outside regions was lowest due to the relative weak convection. The highest coil temperature is 198 °C, below the limit value of 200 °C. **Conclusion:** The CRDM and the coils may be cooled effectively by natural convection of air under given conditions.

Key words Control Rod Drive Mechanism (CRDM), Natural convection, Computational Fluid Dynamics (CFD), Numerical simulation

CLC TL421⁺.1, TB65