

环境风速对非能动安全壳冷却系统空气流道流动的影响

Effects of Environment Winds to Flow in Passive Containment System Air Flow Path

李佳 潘新新 宋春景

(上海核工程研究设计院)

摘要: 本文运用 Star-CCM+软件分析环境风速对非能动安全壳冷却系统 (PCS) 空气流道流动的影响, 验证 AP1000 PCS 系统空气冷却流道的风向中立特性。结果表明, 通过入口形式和流道的合理设计, AP1000 的空气流道设计满足系统冷却功能对风向不敏感的要求, 即具备风向中立的特点。系统能在龙卷风风速的条件下能够实现其安全功能。

关键词: AP1000、PCS、龙卷风、风向中立

Abstract: CFD software Star-CCM+ was used to analysis the effects of environment winds to the flow pattern in passive containment system air flow path. The results shows that, the AP1000 air flow path design can meet the PCS requirements that not sensitive to wind direction, namely wind-neutrality. The system safety function can be active at tornado wind speed.

Key words: AP1000、PCS、tornado、wind-neutrality

1 背景

非能动安全壳冷却系统 (PCS) 是第三代大型先进压水堆核电站 AP1000 的非能动安全系统的重要组成部分, 通过非能动设计理念带走安全壳内的热量, 并保证事故后安全壳的完整性。非能动系统设计只利用重力, 自然循环等自然力, 不需要泵, 风机, 柴油机设计, 也不需要交流电源。非能动安全壳冷却系统利用钢制安全壳作为一个传热表面, 事故后产生的蒸汽在安全壳内表面冷凝并加热内表面, 然后通过导热将热量传递到钢壳体。加热的钢壳外表面通过水和空气的对流, 辐射和水蒸发 (沸腾) 等换热机理冷却。热量以显热和水蒸气的形式通过自然对流的空气带出。非能动安全壳冷却系统示意图如图 1 所示。

本文通过 CFD 软件 STAR-CCM+研究屏蔽厂房外流场对 PCS 空气流道内流动的影响。来自环境的空气通过空气流道的百叶窗进入, 经过入口格栅、导流板与屏蔽厂房之间的下降段, 拐过底部 180 度导流叶片, 沿着安全壳外表面和导流板之间的上升段上升, 穿过上环腔扩散区、滤网以及烟囱, 返回到环境中。AP1000 非能动安全壳冷却系统要求在外界环境风速为龙卷风的恶劣条件下也能完成其冷却的功能, 并且对风向不敏感。本文的分析基于 AP1000 的实际 1:1 的冷态模型,

分析风向对空气通道中流动的影响。分析中，同时考虑屏蔽厂房外部结构及空气通道内部结构，研究风向、龙卷风等对 PCS 空气通道的影响，验证 AP1000 的风中立特性。

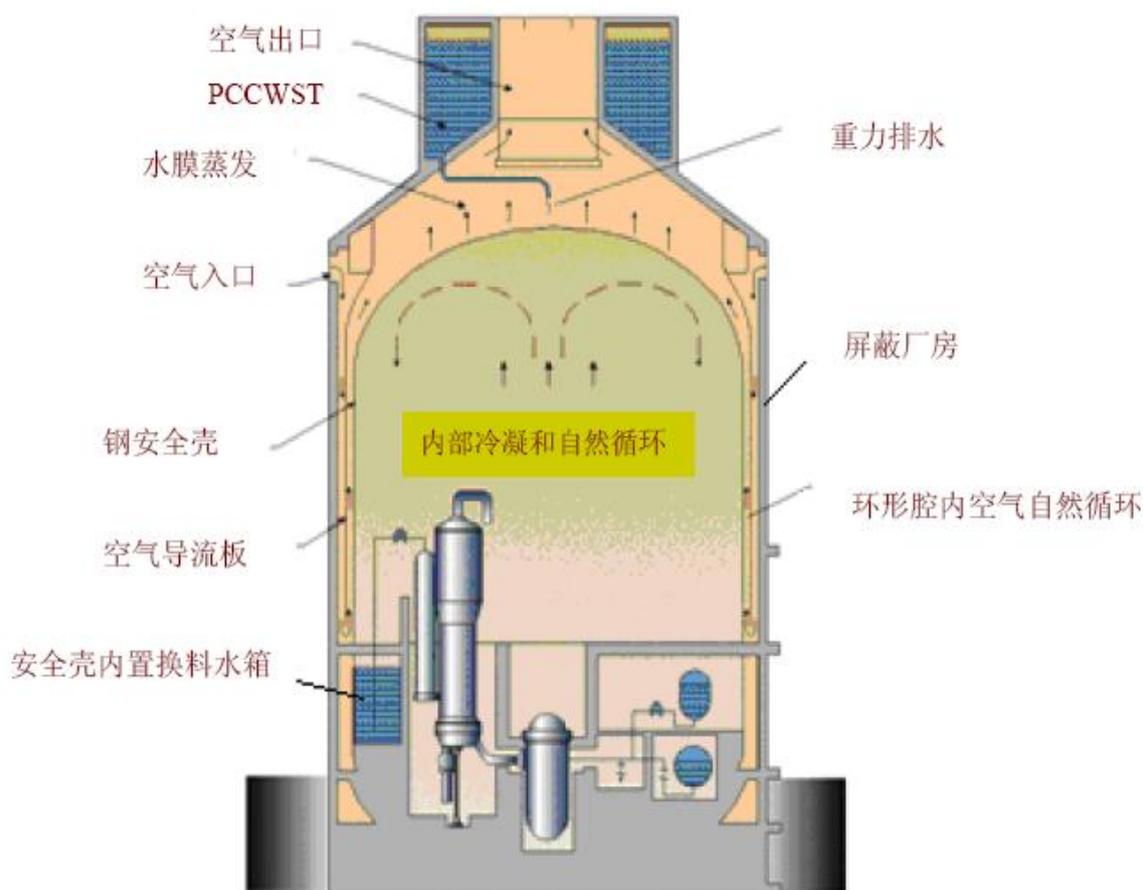


图 1 非能动安全壳冷却系统示意图

2 解析模型

为了分析环境风向对 PCS 空气通道的影响，在模拟空气通道内流场时还需要计算安全壳外侧流场。由于屏蔽厂房和安全壳结构的对称性，本文采取半个圆周方向建模进行计算（图 2），空气通道模型实际包含半圆周计算模型。考虑到屏蔽厂房直径约 42m，高度约 70m，为了在安全壳外侧形成流场充分发展的大气环境，在半圆周安全壳模型的外侧建立长 300m*宽 80m*高 300m 的环境流场计算域，整个外流场计算模型如图 4 所示。安全壳的百叶窗及烟囱出口设置为内部边界，中间剖面设置为对称边界，其他边界设置为壁面。在图 4 中，空气从左侧的空气入口流入，从右侧流出，相对于 PCS 空气通道而言，外侧的空气可通过百叶窗和烟囱自由流进与流出。

图 3 是 AP1000 空气通道各分段示意图，从空气入口到烟囱出口，整个模型依次分为百叶窗、空气进口、进口格栅、下降通道、导向叶片、上升通道、过渡段、排气口入口、排气口出口共 9 个分段。其中百叶窗包含滤网结构，进口格栅、排气口入口和排气口出口包含格栅结构。

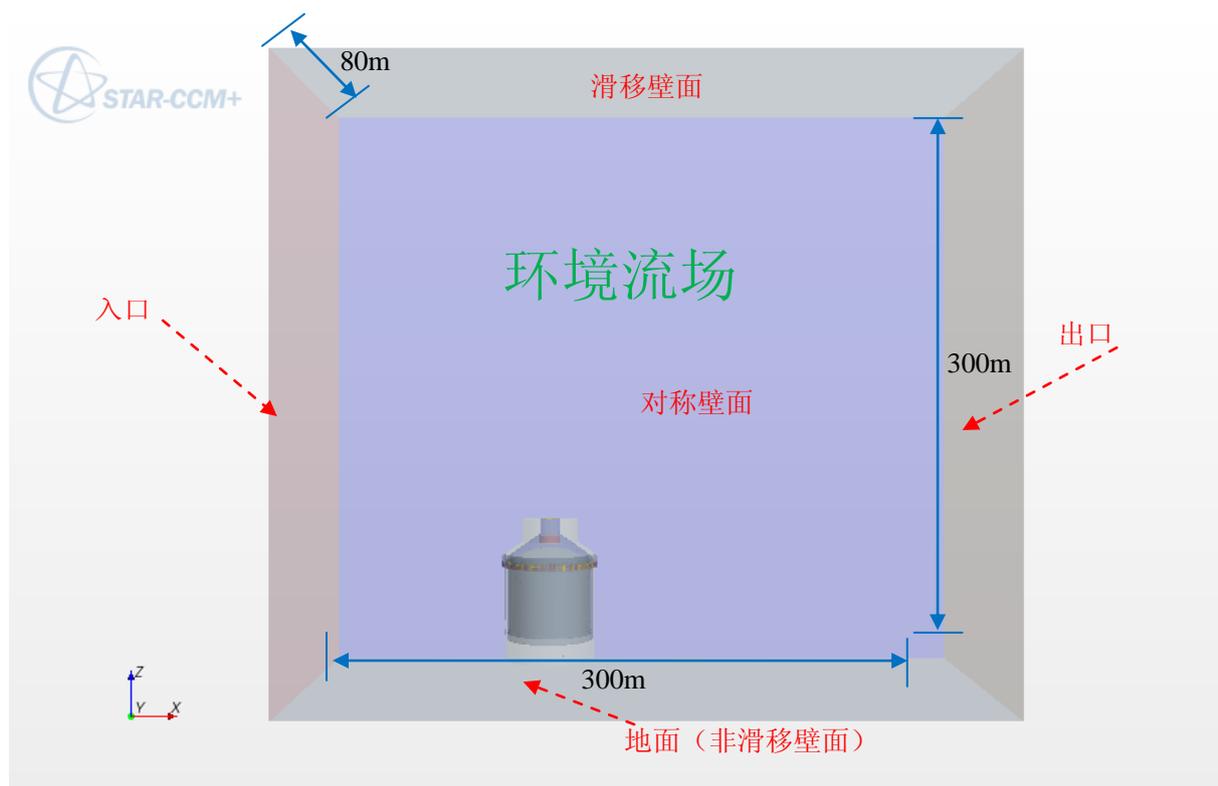


图 2 AP1000 屏蔽厂房外流场计算模型(长 300m*宽 80m*高 300m)

3 计算模型

本文旨在分析空气流道内最终稳定状态下的流场特性，并不关心中间过渡状态下的流场变化，故采用定常计算求解。流场工质是常温常压下的空气，整个流场内的压力变化较小，不考虑空气的可压缩性和密度变化，故选用常密度模型；求解方法有耦合求解和分离式求解两种，前者需要把压力和速度的控制方程联立求解，一般针对可压缩流体求解，且计算量较大，而后者单独求解压力和速度的控制方程，适用于不可压缩流体，计算量较小，本次计算选用后者。

在网格划分方面，AP1000 空气流道模型和外流场外流场采取不同的网格模型划分网格，空气流道模型共划分约 1000 万多面体网格，外流场计算域约划分 330 万剪裁体网格。网格划分尺寸如表 1 所示，网格示意图如图 4 所示。

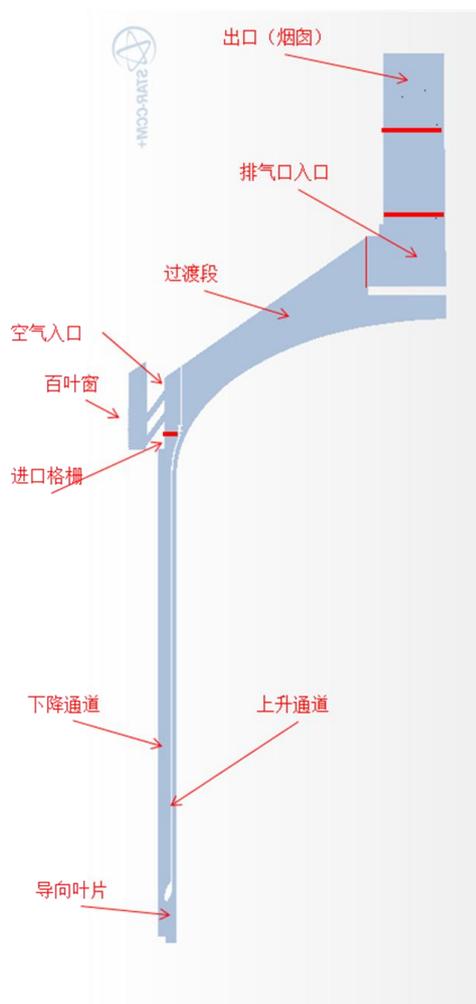


图 3 AP1000 实际模型各分段示意图

表 1 网格划分尺寸

分段名	网格类型	全局尺寸 (m)	最小尺寸 (m)	边界层 层数	边界层 厚度	边界层 增长率
通流段	多面体	0.3	0.04	5	0.04	1.5
其他分段	多面体	0.8	0.05	5	0.04	1.5
外流场框架	剪裁体	5	0.05	3	0.05	1.5

在对称面上的所有面均设置为对称边界；外流场的左侧面设置成流速入口，空气的风速随着高度变化，流入空气的湍流特征量选取湍流强度和湍流尺度，分别设置为 0.05 和 0.006m；外流场的右侧面设置成压力出口，压力设置为 1 个大气压；考虑到地面的摩擦力，外流场的下底面（底面）设置成非滑移边界，而外流场的其他壁面均设置成滑移边界。PCS 空气流道的百叶窗和烟囱出口设置成与外流场的内部边界，其他壁面均设置成非滑移的壁面，不考虑壁面粗糙度。根据实

际厂房所处的自然环境，本文计算 2 个流速工况，即最大风速分别为设计基准风速 65m/s 和龙卷风 134m/s，考虑到地面摩擦和厂房建筑的影响，考虑来流的速度剖面。

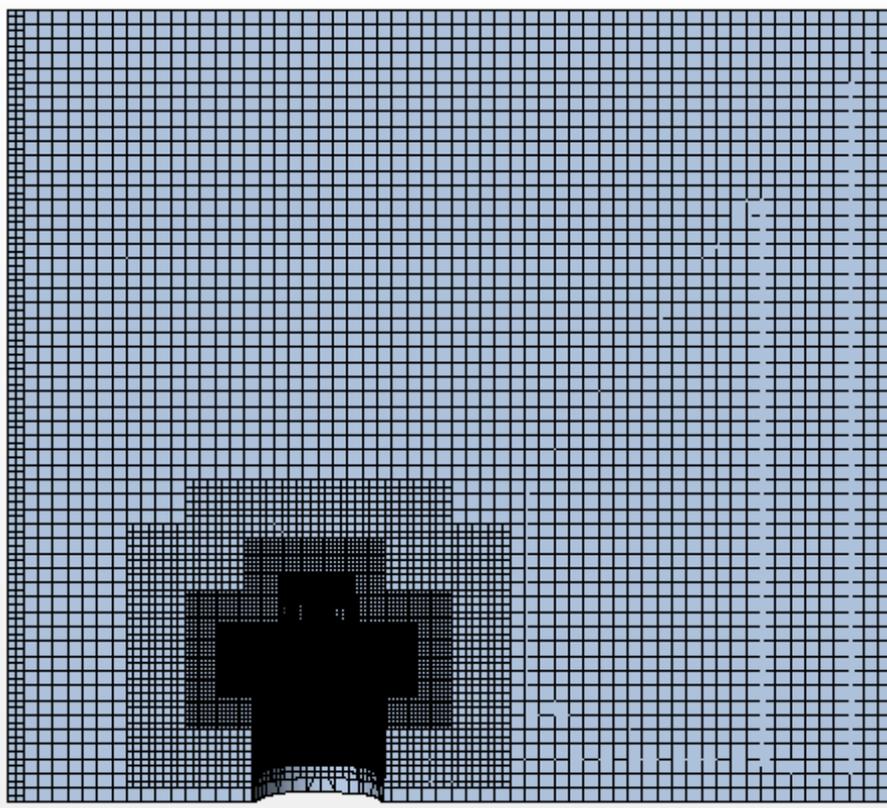


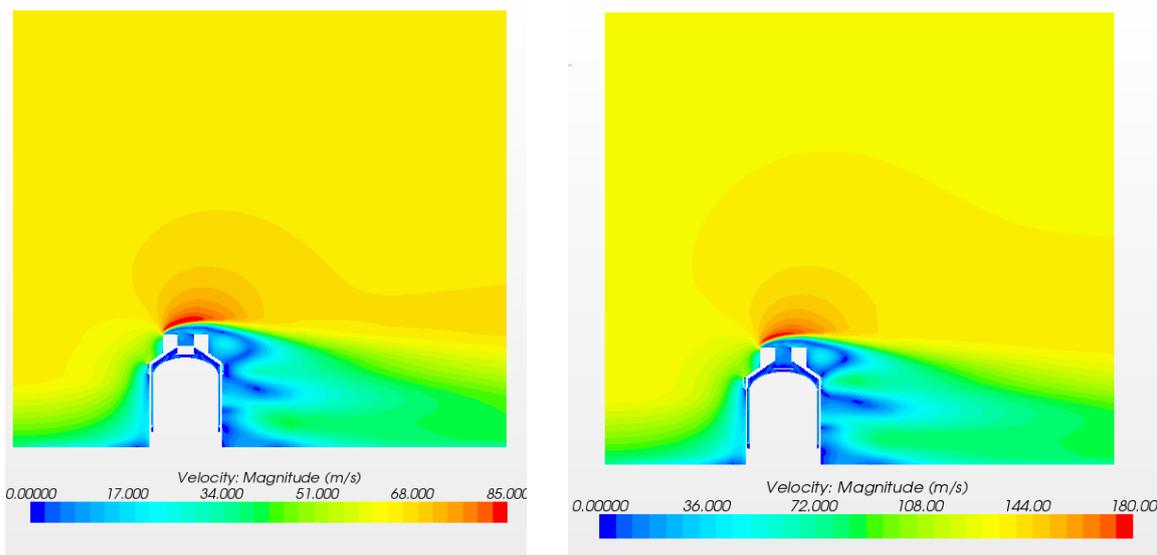
图 4 网格划分示意图

4 计算结果

本文旨在分析环境风向对 PCS 空气流道流场特性的影响，从计算的结果得到速度分布，可以反映整个模型的流场情况，分析环境风向变化引起的空气流道流场变化。

图 5 分别中剖面两个工况下的速度分布，从该图可以观察到，在环境流场中，核岛屏蔽厂房形成了类似圆柱绕流的特征，在厂房上方区域形成一个高速区，在屏蔽厂房后形成低速区。正是由于这种绕流作用，屏蔽厂房一周的流动呈非对称分布的形态。两个风速工况下，速度分布规律类似

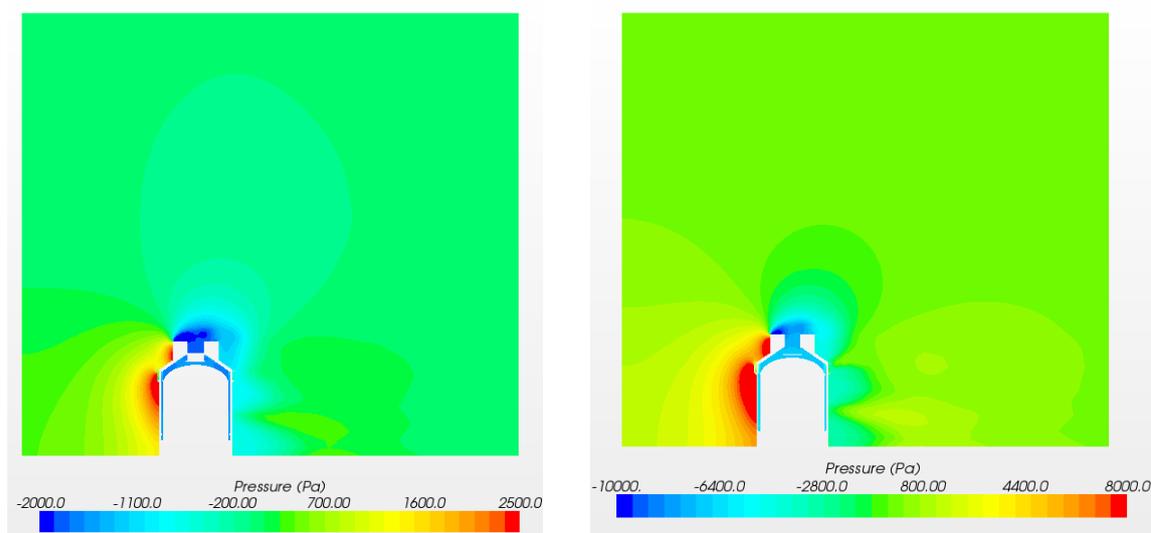
图 6 是在中剖面的压力分布，迎风面由于来流滞止产生高压，而背风面由于流动分离产生低压，因而造成空气流道在迎风面和背风面的入口压力会有较大的不同。在 65m/s 设计基准风速时，两侧的形成了约 3000Pa 的压差，而在 134m/s 龙卷风风速时，两侧形成了约 10000Pa 的压差。这种压差对空气流道内的流动产生了不利的因素，有可能会造成迎风面和背风面流动的非对称分布。



a) 65m/s 风速

b) 134m/s 风速

图 5 中剖面的速度分布

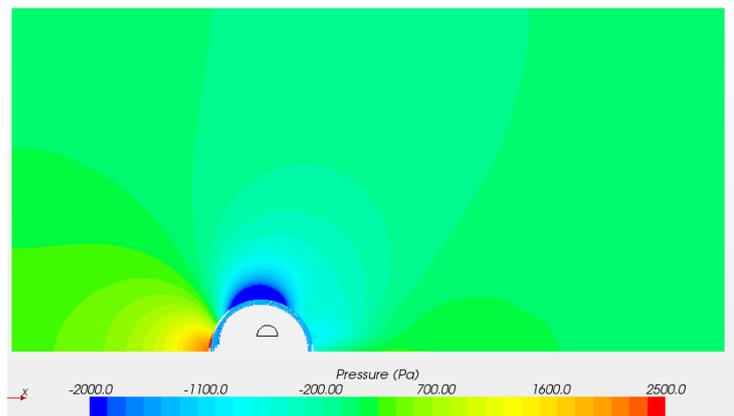


a) 65m/s 风速

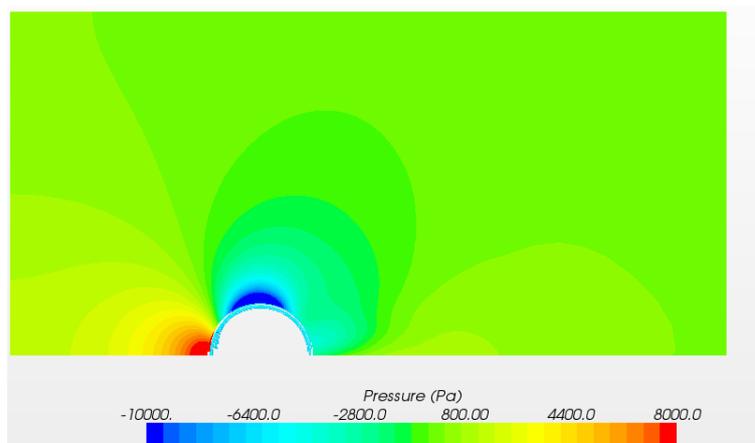
b) 134m/s 风速

图 6 中剖面的压力分布

图 7 分别是两个工况下，百叶窗高度截面速度分布；空气在安全壳前侧通过百叶窗流入空气流道，而流经安全壳旁侧时形成圆柱绕流，安全壳侧面空气流速加快而压力降低，安全壳后方由于侧面的速度分离而形成漩涡，压力大幅降低，空气从后面的百叶窗倒灌进入 PCS 空气流道内。



a) 65m/s 风速



b) 134m/s 风速

图 7 空气流道入口高度截面的压力分布

由图 8 可知，气流从空气入口进行厂房内的环腔中，在环腔中形成流动，然后从厂房顶部的烟囱排出。龙卷风工况下上升通道内的空气平均流速为 26m/s，设计基准风速工况下上升通道内的空气平均流速为 13.2m/s。设计基准风速下经过百叶窗流入空气流道内的空气流量和经过烟囱出口流出的空气流量，两者数值上保持一致，即流量平衡，分别为 332 kg/s 和 650 kg/s。在龙卷风工况下，PCS 空气流道及外流场的速度和压力分布趋势与设计基准风速工况下保持一致，上升通道内的空气平均流速大致为设计基准风速工况下的 2 倍。空气流道的迎风面和被风面的环腔通道内的速度基本保持一致，考虑到安全壳结构的对称性，可以认为环境风向对 PCS 空气流道内的流动特性并无明显影响，即风向中立。产生这种现象的原因主要是由于空气进口的结构形势，在通过离散的圆孔后，有一个环形的圆腔结构可以平衡迎风面和被风面的压力，从而保证环腔在周向上的对称性。

图 9 是环腔内周向流速分布图，从该图可以观察到，环腔内周向流速小于 1.5m/s，相对于环腔内的竖直方向的流动速度，可以不用考虑。这也证明了在环腔内各方向上的对称性，能够满足系统关于风向中立特性的要求。

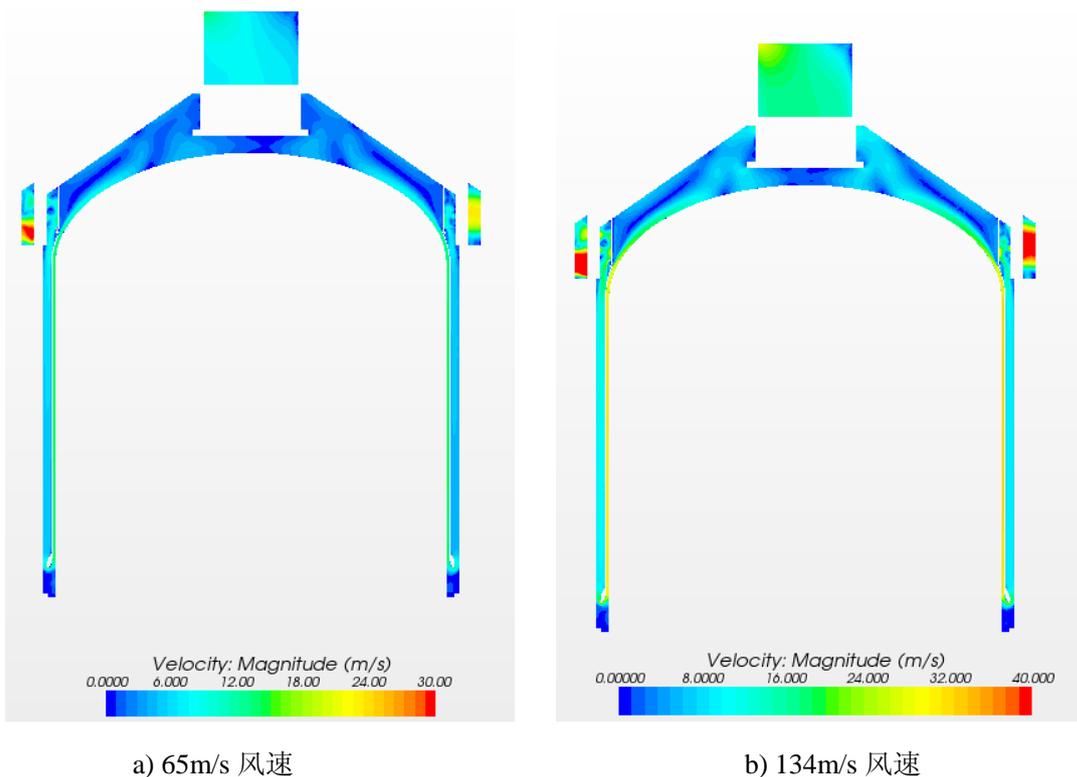


图 8 PCS 空气流道的速度分布

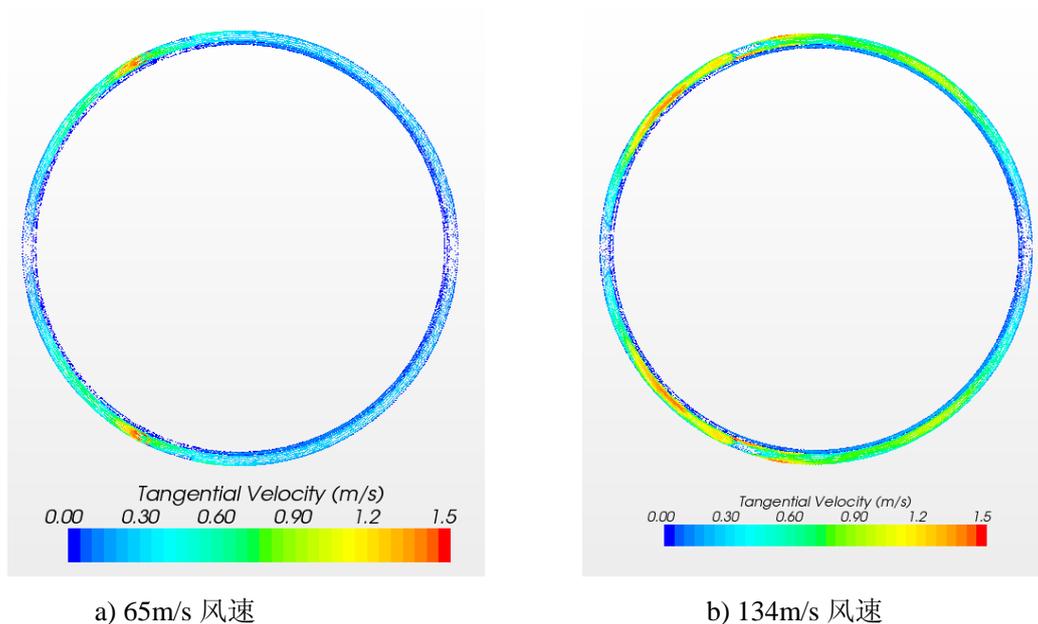


图 9 环腔内周向流速

5 结论

本文使用 CFD 软件 STAR-CCM+ 对 AP1000PCS 空气流道及外流场进行耦合仿真分析，根据自然环境风速不同，计算设计基准风速工况和龙卷风工况两个流速工况。根据计算结果的压力分

布和速度分布分析环境风向对 PCS 空气流道的影响。分析结果证明，环境风向对 PCS 空气流道内的流动特性并无明显影响，即空气冷却流道有风中立特性。设计基准风速工况下上升通道内的空气平均流速为 13.2m/s，龙卷风工况下上升通道内的空气平均流速为 26m/s。空气流道内迎风侧和被风侧的通道内压力和速度基本保持一致。空气流道内的周向流速小于 1.5m/s，可以不用考虑。

6 参考文献

- [1] 非能动安全壳冷却系统说明书
- [2] 核岛厂房建筑图