

文章编号: 1671-6612 (2019) 06-629-06

# GDC 电极冷却流道系统结构优化及适用范围分析

江晟昊 袁艳平 曹晓玲

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 利用数值模拟的方法研究了各区域流道结构尺寸对 GDC 电极冷却流道系统传热效果的影响。分析结果表明减小第一区域冷却流道厚度及宽度, 增大电极体最外壁顶边的倒圆角半径及第二、三、四区域流道管径均可降低 GDC 电极的最大温度及平均温度。综合这些影响因素对冷却流道系统结构进行了优化设计, 在保证足够安全裕量的前提下有效降低了 GDC 电极的最大温度及平均温度。针对优化后的 GDC 电极冷却流道设计, 研究了 GDC 电极在不同工况下所受热负荷及冷却水入口温度大小对电极体各限制参数的影响, 并确定了 GDC 电极冷却流道系统的适用范围。

**【关键词】** GDC 电极; 温度场; 数值模拟; 压降

中图分类号 TL639 文献标识码 A

## Structural Optimization and Application Range Analysis of GDC Electrode Cooling Runner System

Jiang Chenghao Yuan Yanping Cao Xiaoling

(College of Mechanical Engineering, South west Southwest Jiaotong University of china, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** In this paper, the effect of structural size of each channel on the heat transfer effect of GDC electrode cooling runner system is studied by numerical simulation. The analysis results show that reducing the thickness and width of the cooling channel in the first region, increasing the rounding radius of the top edge of the outermost wall of the electrode body and the diameter of the second, third and fourth region flow channels can reduce the maximum temperature and average temperature of the GDC electrode. Based on these influencing factors, the structure of the cooling runner system is optimized, and the maximum temperature and average temperature of the GDC electrode are effectively reduced under the premise of ensuring sufficient safety margin. According to the optimized GDC electrode cooling flow channel design, the effects of the heat load and cooling water inlet temperature on the limiting parameters of the GDC electrode under different working conditions were studied, and the applicable range of the GDC electrode cooling channel system was determined.

**【Keywords】** GDC electrode; Temperature field; Numerical simulation; Pressure drop

## 0 引言

辉光放电 (GDC) 电极作为托卡马克装置项目的子项目, 旨在清除第一壁表面的核燃料粒子和其它杂质粒子, 为高约束性能等离子体提供清洁的 and 低再循环的第一壁<sup>[1]</sup>。GDC 电极运行期间会经历两个时期, 等离子体操作期及烘烤期。在等离子体操作期, GDC 电极最外层壁面会作为托卡马克装置

内壁面的一部分, 并接收到大量的热负荷。

而烘烤期, GDC 电极会伸入托卡马克装置的内腔进行辉光放电清除杂质, 此时接收到的热负荷较小。由于 GDC 电极在运行期间承受了较大的热负荷, 为了保障电极体的稳定运行, 在电极内需要设计冷却流道并通过循环冷却水来达到降温的目的<sup>[2]</sup>。Lijun Cai、Hongbing Xu 等对 GDC 电极进行

作者简介: 江晟昊 (1993-), 男, 硕士研究生, E-mail: chenghaojiang@my.swjtu.edu.cn  
通讯作者: 袁艳平 (1973-), 男, 博士后, 博士生导师, E-mail: ypyuan@home.swjtu.edu.cn  
收稿日期: 2019-05-15

过冷却流道设计与数值计算<sup>[3,4]</sup>，但设计的主要目的是满足托卡马克装置对各设计参数的要求，缺少结构参数对冷却流道系统散热效果影响情况的研究，无法保障 GDC 电极在部分极端工况下的稳定运行。

本文在 GDC 电极传热数值研究的基础上，建立了合适的几何、数学模型，使用 Fluent 软件进行数值模拟。通过对比较大范围冷却水入口流量条件下不同冷却流道结构参数对 GDC 电极最大温度、进出口压降、平均流速等参数的影响，找到最优的设计参数。针对优化后的流道设计，通过增大 GDC 电极在等离子体操作期承受的热负荷，研究冷却流道系统可承受的热负荷范围，进一步保障 GDC 电极在部分极端工况下的稳定性。

## 1 模型及参数确定

### 1.1 几何模型

GDC 电极冷却流道系统模型如图 1 所示，采用了根据热负荷大小不同冷却流道形式与密度相应变化的多区域流道设计。

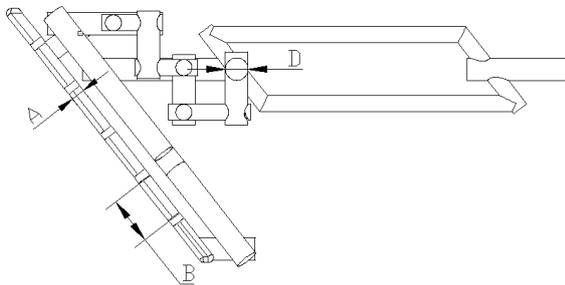


图 1 冷却流道系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of cooling runner system structure

拟变动的结构参数为第一区域流道厚度  $A$  及宽度  $B$ ，电极体最外壁顶边的倒圆角半径  $R$  及第二、三、四区域流道管径  $D$ ，具体取值见表 1 所示。

表 1 冷却流道系统各参数值

Table 1 Parameters of cooling runner system

几何参数	取值
$A/mm$	11, 12, 13, 14
$B/mm$	14, 15, 16, 17
$R/mm$	6, 7, 8, 9
$D/mm$	17, 18, 19, 20

### 1.2 网格及湍流模型

利用 Workbench 中的 Design Modeler 对 GDC 电极冷却流道系统进行模型建立，并利用 Meshing 进行网格划分，采用四面体网格<sup>[5]</sup>，网格总数控制在 450~550 万。

使用 Fluent 模拟计算时，设置进口边界条件为质流量及冷却剂入口温度；出口条件为定压；设置壁面条件为非滑移壁面。湍流模型为  $k-\epsilon$  模型。

### 1.3 运行工况及设计参数

GDC 电极主要会经历两个主要时期，分别是等离子体操作期和 GDC 烘烤期。托卡马克装置文件 Summary of GDC Heat Load<sup>[6]</sup>给出了两个时期 GDC 电极的热负荷参数。

对于等离子体操作期，由于 GDC 电极头等离子体表面面向托卡马克装置内腔，所以会接收到辐射和电荷交换热以及中子热。首先，辐射和电荷交换热为  $0.35MW/m^2$ ，热负荷加载在电极头的等离子体表面上。其次，中子热是延径向的体积热负荷的指数衰减，具体公式如下：

$$p(x) = p_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (1)$$

其中， $p_0=10W/cm^3$ ， $\lambda=12cm$ ， $x$  为与 GDC 电极最外层壁面的垂直距离。

根据托卡马克装置要求<sup>[7]</sup>，为了保证电极体的安全稳定运行，托卡马克装置要求电极体最高温度不能超过  $400^\circ C$ ，冷却液平均流速为  $0.5\sim 5m/s$ 。在等离子体操作期，冷却水进出口压力降小于  $1.35MPa$ ，冷却水进出口温差小于  $126\pm 10^\circ C$ 。在 GDC 烘烤期，出于安全考虑冷却水温度小于  $4.4MPa$  下水的沸腾温度  $250.4^\circ C$ 。两个不同工作时期冷却水运行工况如表 2 所示。

表 2 不同时期冷却液运行工况

Table 2 Coolant operating conditions in different periods

工作时期	冷却水入口压力/MPa	冷却入口水温度/ $^\circ C$
等离子体操作期	4.0 (-0.2/+0.6)	70±5
GDC 烘烤期	4.4 (-0.2/+0.6)	240±5

## 2 结构参数对冷却流道系统性能的影响

为了保证冷却流道系统其余参数均满足托卡马克装置要求并具有足够的安全裕量，取托卡马克装置

对冷却水进出口压降、进出口温差、平均流速等参数限制条件的 80%作为参数上限, 则冷却水进出口压降需不超过 1.08MPa, 平均流速需不超过 4m/s。

### 2.1 第一区域流道厚度

如图 2 所示, 随着第一区域流道厚度减小, 电极体最大温度逐渐降低, 并且下降幅度较为均匀, 流道厚度每减小 1mm 电极体最大温度约平均下降 2℃。这是由于减小流道厚度则减小了流道横截面积, 在流量不变的情况下增大了流道内冷却水流速, 增大了换热系数。为了保证电极体最大温度不超过 400℃, 当流道厚度不小于 13mm 时, 需保证入口流量不小于 0.5kg/s, 当流道厚度小于 13mm 时, 在全入口流量范围内都能满足托卡马克装置要求。

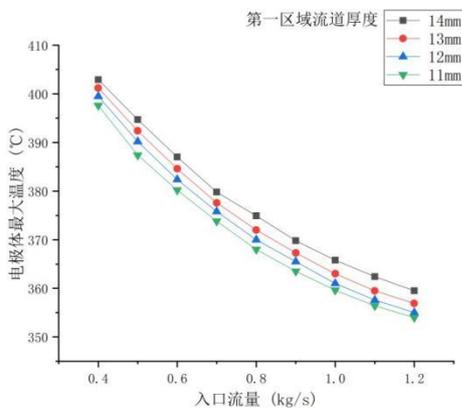


图 2 不同厚度下最大温度随入口流量变化

Fig.2 Variation of maximum temperature with inlet flow rate under different thickness

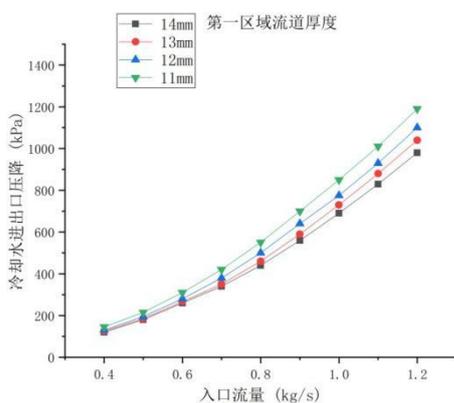


图 3 不同厚度下进出口压降随入口流量的变化

Fig.3 Variation of inlet and outlet pressure drop with inlet flow rate under different thickness

如图 3 所示, 随着第一区域流道厚度减小, 冷却水进出口压降逐渐增大, 流道厚度每减小 1mm 冷却水进出口压降平均上升约 0.1MPa。为了保证

冷却水进出口压降不超过 1.08MPa, 当第一区域流道厚度为 14mm 时, 需保证入口流量不大于 1.2kg/s, 当第一区域流道厚度为 12mm~13mm 时, 需保证入口流量不大于 1.1kg/s, 当第一区域流道厚度为 11mm 时, 需保证入口流量不大于 1.0kg/s。

如图 4 所示, 随着第一区域流道厚度减小, 冷却水平均流速逐渐增大, 流道厚度每减小 1mm 冷却水平均流速增大约 0.1m/s。为了保证冷却水平均流速不超过 4m/s, 当流道厚度为 14mm 时, 需保证入口流量不大于 1kg/s, 当流道厚度为 11mm~13mm 时, 需保证入口流量不大于 0.9kg/s。

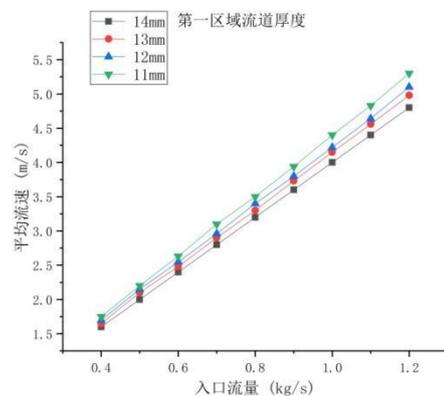


图 4 不同厚度下冷却水平均流速随入口流量变化

Fig.4 Variation of average cooling flow rate with inlet flow rate under different thickness

综合上述分析结果, 在可运行范围内, 第一区域流道厚度为 11mm 时电极体最大温度具有最小值 363.5℃, 该结构参数下冷却流道系统设计具有更好的散热效果。

### 2.2 第一区域流道宽度

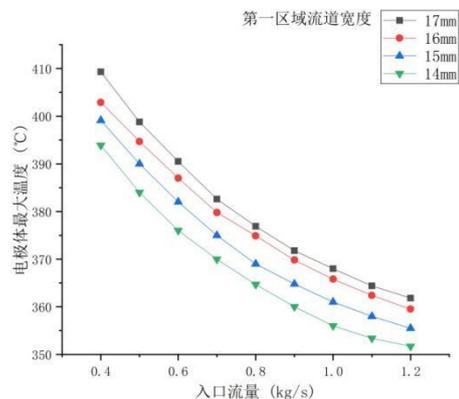


图 5 不同宽度下最大温度随入口流量变化

Fig.5 Variation of maximum temperature with inlet flow rate under different width

如图5所示,随着第一区域流道宽度减小,电极体最大温度逐渐降低,流道宽度由17mm减小至16mm时,温度下降幅度较小,流宽度由16mm减小至14mm时,宽度每减小1mm电极体最大温度下降幅度有所增大。为了保证电极体最大温度不超过400℃,当第一区域流道宽度不小于16mm时,需保证入口流量不小于0.5kg/s,当宽度小于16mm时,在0.4kg/s~1.2kg/s范围内均可满足托卡马克装置要求。

如图6所示,随着第一区域流道宽度减小,冷却水进出口压降逐渐增大。为了保证冷却水进出口压降小于1.08MPa,当流道宽度为14mm时,需保证入口流量不大于1.1kg/s,当流道宽度大于14mm时,在0.4kg/s~1.2kg/s范围内均可满足限制条件。

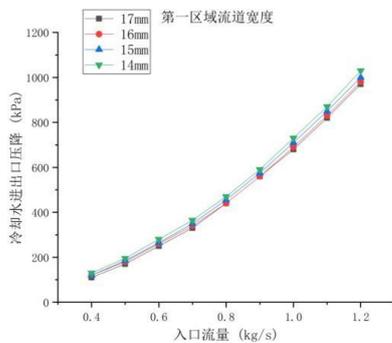


图6 不同宽度下进出口压降随入口流量的变化

Fig.6 Variation of inlet and outlet pressure drop with inlet flow rate under different width

如图7所示,随着第一区域流道宽度减小,冷却水平均流速逐渐增大。为了保证冷却水平均流速不超过4.0m/s,当流道宽度不小于16mm时,需保证入口流量不大于1.0kg/s,当流道宽度小于16mm时,需保证入口流量不大于0.9kg/s。

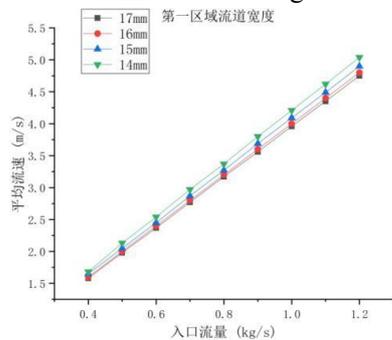


图7 不同宽度下冷却水平均流速随入口流量变化

Fig.7 Variation of average cooling flow rate with inlet flow rate under different width

综合上述分析,在可运行范围内,第一区域流道宽度为14mm时电极体最大温度具有最小值360℃,该结构参数下冷却流道系统设计具有更好的散热效果。

### 2.3 最外层壁面顶边倒角半径

如图8所示,随着电极头最外层壁面顶边倒角半径的增大,电极体最大温度显著降低。倒角半径由6mm增大至7mm时电极体最大温度降低幅度相对较小,半径由7mm增大至9mm时,每增大1mm半径电极体最大温度降低幅度有所增大。为了保证电极体最大温度小于400℃,当倒角半径不大于7mm时,需保证入口流量不小于0.5kg/s,当倒角半径大于7mm时,在0.4kg/s~1.2kg/s流量范围内均可满足要求。

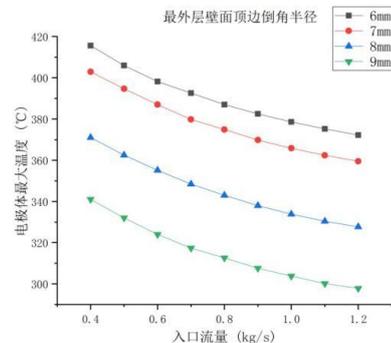


图8 不同半径下最大温度随入口流量的变化

Fig.8 Variation of maximum temperature with inlet flow rate under different radius

综合上述分析,在可运行范围内,当倒角半径为9mm时,电极体最大温度具有最小值302.5℃,该结构参数下冷却流道系统设计具有更好的散热效果。

### 2.4 第二、三、四区域流道管径

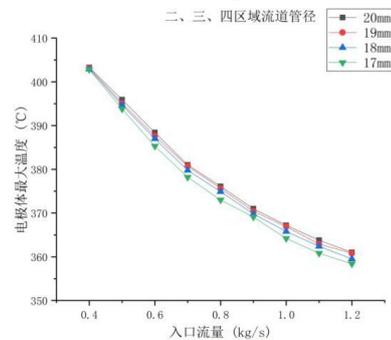


图9 不同管径下最大温度随入口流量的变化

Fig.9 Variation of maximum temperature with inlet flow rate under different diameter

如图 9 所示, 随着第二、三、四区域流道管径减小, 电极体最大温度逐渐减小, 但下降幅度较小, 在 0.4kg/s~1.2kg/s 入口流量范围内, 不同管径的冷却流道间电极体最大温度最大差值仅为 2.2℃。为了保证电极体最大温度小于 400℃, 四种管径下冷却流道系统入口流量需保证不小于 0.5kg/s。

如图 10 所示, 随着第二、三、四区域流道管径减小, 冷却水进出口压降逐渐增大。为了保证冷却水进出口压降小于 1.08MPa, 当管径为 17mm 时, 需保证入口流量不超过 1.0kg/s, 当管径大于 17mm 时, 在 0.4kg/s~1.2kg/s 范围内均可满足要求。

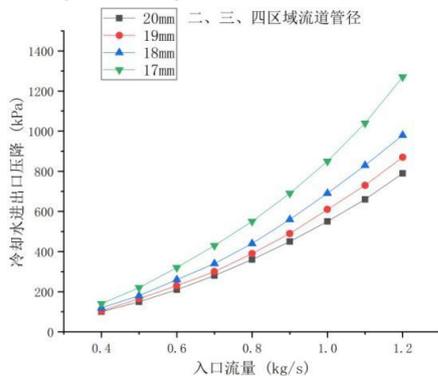


图 10 不同管径下进出口压降随入口流量的变化

Fig.10 Variation of inlet and outlet pressure drop with inlet flow rate under different diameter

如图 11 所示, 随着第二、三、四区域流道管径减小, 冷却水平均流速逐渐增大。为了保证冷却水平均流速小于 4m/s, 当管径为 20mm 时, 需保证入口流量不大于 1.1kg/s, 当管径为 18mm~19mm 时, 需保证入口流速不大于 1.0kg/s, 当管径为 17mm 时, 需保证入口流速不大于 0.9kg/s。

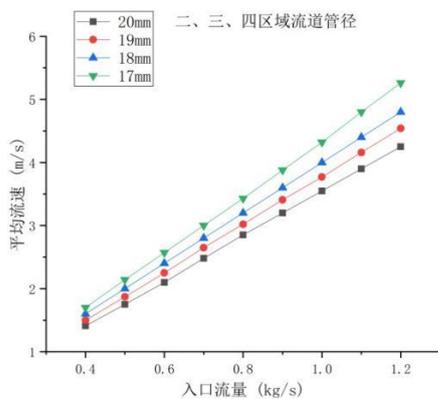


图 11 不同管径冷却水平均流速随入口流量变化

Fig.11 Variation of average cooling flow rate with inlet flow rate under different diameter

综合上述分析, 在可运行范围内, 当倒第二、三、四排流道管径为 20mm 时, 电极体最大温度具有最小值 363.8℃。该结构参数下冷却流道系统设计具有更好的散热效果。

### 2.5 优化设计

通过前文的影响因素分析可知, 减小第一区域流道厚度、宽度, 第二、三、四区域流道管径, 增大电极体最外层壁面顶边倒圆角半径均可改善电极体最大温度及平均温度。根据前文的分析结果, 选取第一区域流道厚度为 11mm, 宽度为 14mm, 倒角半径为 9mm, 第二、三、四区域流道管径为 18mm, 对冷却流道系统结构进行优化。在可运行范围内, 取入口流量为 0.9kg/s 时, 在满足所有设计参数要求的前提下 GDC 电极最大温度具有最小值 299℃。

## 3 适用范围分析

### 3.1 中子热对冷却流道系统的影响

图 12 所示为不同大小的中子热影响下, GDC 电极最大温度的变化情况。随着热负荷的增大, GDC 电极的最大温度在热流密度增大到 12MW/m<sup>3</sup> 前增长较缓, 每增大 1MW/m<sup>3</sup> 热流密度 GDC 电极最大温度仅升高约 3℃, 在热流密度超过 12MW/m<sup>3</sup> 以后, 电极体最大温度的升高幅度增加, 每增大 1MW/m<sup>3</sup> 热流密度 GDC 电极最大温度升高约 19℃。当热流密度超过 12MW/m<sup>3</sup> 时电极杆区域的 GDC 电极最大温度便超过了最外层壁面, 最终当热流密度达到 17MW/m<sup>3</sup> 时达到 398.8℃, 非常接近托卡马克装置对于电极体最大温度不超过 400℃ 的要求。

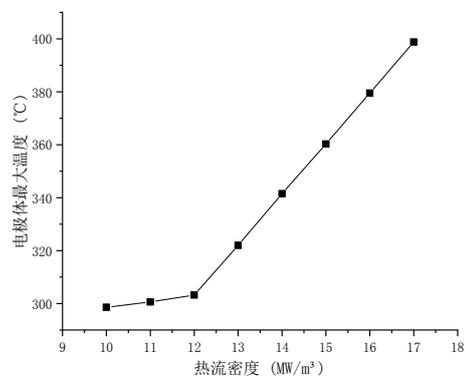


图 12 不同大小中子热对 GDC 电极最大温度影响

Fig.12 Effect of Neutron Heat on the Maximum Temperature of GDC Electrode

### 3.2 辐射和电荷交换热对冷却流道系统的影响

图 13 所示为不同大小的辐射和电荷交换热影响下, GDC 电极最大温度的变化情况。随着辐射和电荷交换热的增大, GDC 电极最大温度呈线性增大, 热流密度每增加  $0.035\text{MW/m}^2$ , 电极体最大温度增加约  $21^\circ\text{C}$ 。当辐射和电荷交换热的热流密度达到  $0.525\text{MW/m}^2$  时, GDC 电极最大温度达到  $406^\circ\text{C}$ , 超过托卡马克装置对于电极体最大温度的要求。

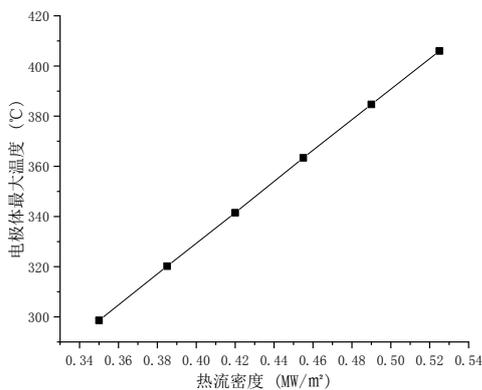


图 13 不同大小的辐射和电荷交换热对 GDC 电极最大温度的影响

Fig.13 Effect of Radiation and Charge Exchange Heat on the Maximum Temperature of GDC Electrode

## 4 结论

(1) 通过改变 GDC 电极冷却流道结构参数, 对 GDC 电极进行模拟分析发现, 减小第一区域冷却流道厚度及宽度, 增大电极体最外壁顶边的倒圆角半径, 第二、三、四区域流道管径均可降低 GDC 电极的最大温度及平均温度。减小第一区域冷却流道厚度、宽度及后排区域管径会增大冷却液进出口压力降及平均流速。而增大电极体最外壁顶边倒圆角半径对这几类参数影响均很小。以对 GDC 电极最大温度的改善效果为评价指标, 选取第一区域流

道厚度为  $11\text{mm}$ , 宽度为  $14\text{mm}$ , 顶边倒角半径为  $9\text{mm}$ , 后排流道管径为  $18\text{mm}$  作为研究范围内的最优流道结构尺寸。优化后冷却流道设计具有更好的冷却效果, 在可运行范围内取入口流量为  $0.9\text{kg/s}$ , 电极体最大温度为  $299^\circ\text{C}$ 。

(2) 通过增大等离子体操作期 GDC 电极承受的热负荷, 对优化后的 GDC 电极进行模拟分析发现, 在保持辐射和电荷交换热的热负荷大小不变的情况下, GDC 电极冷却流道系统最大可承受中子热的热流密度为  $17\text{MW/m}^3$ , 电极体最大温而在保持中子热热负荷大小不变的情况下, GDC 电极冷却流道系统最大可承受辐射和电荷交换热的热流密度为  $0.525\text{MW/m}^2$ 。

### 参考文献:

- [1] 毕海林, 胡建生, 余耀伟, 等. HT-7托卡马克全金属壁及锂化条件下辉光放电清洗的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(7): 731-736.
- [2] 曾建尔, 邹桂清, 冉红. ITER辉光放电电极的冷却计算[J]. 核聚变与等离子体物理, 2007, (3): 203-207.
- [3] Lijun Cai, Tao Lin, Yingqiao Wang, et al. Preliminary fluid channel design and thermal-hydraulic analysis of glow discharge cleaning permanent electrode[J]. Fusion Engineering and Design, 2016: 109-111.
- [4] Hongbing Xu, Yinglong Yuan, Yong Lu, et al. The preliminary design of cooling channel for ITER GDC[J]. Fusion Engineering and Design, 2017: 121.
- [5] 张秀杰, 谌继明, 康伟山, 等. ITER屏蔽包层屏蔽块热工水力分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2010, 30(3): 267-271.
- [6] Y Yang. Heat load of GDC electrode during different phases and operation states[M]. ITER, 2016.
- [7] V Udintsev. System Design Description Document (DDD) Diagnostic First Wall DFW[R]. ITER IDM Report, 2014.