烧结矿双级冷却工艺及装备技术研发与应用

张 震[1]，温荣耀[1]，廖继勇[1]，谭潇玲[1]，倪桂虎[2]，赵改革[3]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 山东钢铁集团永锋临港有限公司，山东 临沂 276624；3. 湘潭钢铁集团有限公司，湖南 湘潭 411102）

摘要：烧结行业实践应用的余热回收方式主要是环冷机＋余热锅炉与竖式冷却＋余热锅炉，而将原烧结给料溜槽改为一级竖式冷却的双级冷却技术，可显著回收高品质余热。本文在介绍烧结双级冷却技术工艺及原理基础上，通过 FLUENT 流体仿真，对比了烧结双级冷却相对传统环冷机流场和温度场分布，并从冷却提效、余热回收增量、烧结矿增产和除尘增效 4 方面系统阐述了烧结双级冷却技术效果优势。结果表明，该技术可降低环冷机冷却风量约 13%，提高过热蒸汽 50 ℃，降低返矿率 1%。该技术在湘潭钢铁新一烧 360 m^2 烧结机成功应用也表明，余热锅炉蒸汽产量可由吨矿约 34 t/h 增长到约 40 t/h，增加发电量约为 1 200 kW·h 年经济效益约为400 万元。

关键词：烧结双级冷却；流体仿真；环冷机；余热回收
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)04－0101－06
doi：10.13403/j.sjqt.2024.04.064

Research and application of two-stage cooling process and equipment technology for sinter

ZHANG Zhen[1], WEN Rongyao[1], LIAO Jiyong[1], TAN Xiaoling[1], NIN Guihu[2], ZHAO Gaige[3]
(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China; 2. Yongfeng Lingang Co., Ltd., Shandong Iron & Steel Group Co., Ltd., Lingyi 276624, Shandong, China; 3. Xiangtan Iron & Steel Group Co., Ltd., Xiangtan 411102, Hunan, China)

Abstract: The main methods of waste heat recovery applied in the sintering industry are annular cooling machine + waste heat boiler and vertical cooling + waste heat boiler. The two stage cooling technology of changing the original sintering feed chute to a single-stage vertical cooling can significantly recover high-quality waste heat. On the basis of introducing the process and principle of sintering two-stage cooling technology, this article compares the flow field and temperature distribution of sintering two-stage cooling with traditional ring cooling machine through FLUENT fluid simulation. The advantages of sintering two-stage cooling technology are systematically explained from four aspects: cooling efficiency improvement, waste heat recovery increment, sintering ore production increase, and dust removal efficiency improvement. The results show that this technology can reduce the cooling air volume of ring cooling machine by about 13%, increase the superheated steam temperature by 50 ℃, and reduce the return rate by 1%. The successful application of this technology in the 360 m^2 sintering machine of Xiangtan Iron and Steel has shown that the steam production of the waste heat boiler has increased from about 34 t/h to about 40 t/h, increasing the power generation of about 1 200 kW, and the annual economic benefit of about 4 million yuan.

Key words: sintering two-stage cooling; fluid simulation; annular cooler; waste heat recovery

收稿日期：2023－09－27；**修回日期**：2023－10－17
基金项目：中国五矿科技专项计划(2023－WBKY－023)；中冶集团 181 重大研发项目(2023－WBKY－036)
作者简介：张 震(1984—)，男，正高级工程师，从事烧结、球团、节能环保方面的研究。
通信作者：温荣耀(1987—)，男，高级工程师，从事烧结、球团、节能环保数值研究。

烧结工序是钢铁流程中高能耗、高污染集中环节，能耗占钢铁冶金总能耗的 10%，排放的废气量占钢铁工业总废气量的 50%。现有的烧结机卸下的烧结热矿通常通过环冷机进行冷却，存在的缺陷主要有：环冷机冷却风量大，冷却效率低。我国每年需要冷却的烧结矿近 10 亿 t，其携带的显热达 8.4×10^{15} J，折合标煤为 2 800 万 t，余能利用潜力大，但传统环冷机余热回收利用率不足 40%，浪费巨大。目前，依据不同的冷却方式，实践应用的余热回收方式主要是环冷机 + 余热锅炉与竖式冷却 + 余热锅炉。近 20 年来，我国烧结矿冷却及其余热回收技术取得了长足的进步，尤其是液密封环冷机的开发、直联炉罩锅炉和环冷机余热梯级利用技术的应用，使烧结矿显热的利用率从 30% 提升到了 50% 左右。但由于环冷机自身的冷却特点（错流大风量冷却），导致冷却废气热量集中度不够，中低温烟气难以得到有效的利用，尤其低温段废气一般进行无组织排放，环冷机余热回收仍有较大提升空间[1-2]。

本世纪初，东北大学蔡九菊教授提出了采用干熄焦原理来冷却烧结矿这个理念，付俊鹏等[3]、毕传光等[4]、祁腾飞等[5]做了大量的试验室研究，得出了采用厚料层逆流冷却烧结矿，可大幅提高烧结矿显热回收率的结论。自此之后的十几年里，国内从高校到行业内企业单位掀起了一股烧结竖式冷却的研究热潮，相继有东北大学、北京科技大学、中南大学、武汉理工大学等高校，以及中冶东方（秦皇岛设计院）、中信重工、中冶长天等投入人力物力进行竖式冷却的研究，不过由于流动死区，气流不均短路等问题，工程应用上尚不成功。

为了解决现有烧结冷却系统问题，本文开发了基于厚料层冷却技术的烧结双级冷却及余热回收系统。该系统把单辊破碎机破碎后的热烧结矿经过预冷却，然后再进入环冷机进行二次冷却，以此形成烧结双级冷却系统。其中预冷却环节采用小风慢冷冷却方式，可有效提高冷却后热风的温度，形成高品质热风（>450 ℃）。本文对该系统的技术原理、模拟仿真结果以及实际应用情况进行了阐述，期望能为同行应用此技术提供借鉴与参考。

1 双级冷却技术原理

烧结双级冷却工艺流程如图 1 所示。由图 1 可知，该工艺由一级冷却系统（烧结预冷却）和二级冷却系统（环冷机冷却）组成。经单辊破碎机破碎后的热烧结矿由烧结预冷却装置顶部进入，热烧结矿经过初步冷却后，由预冷却装置下部排出。预冷却装置采用抽风冷却，冷却风从预冷却装置顶部和底部进入装置，均匀通过料层，对热烧结矿进行冷却，冷却后的热风经预冷却装置中部排出。热风经过高温除尘器除尘，一般可选用耐高

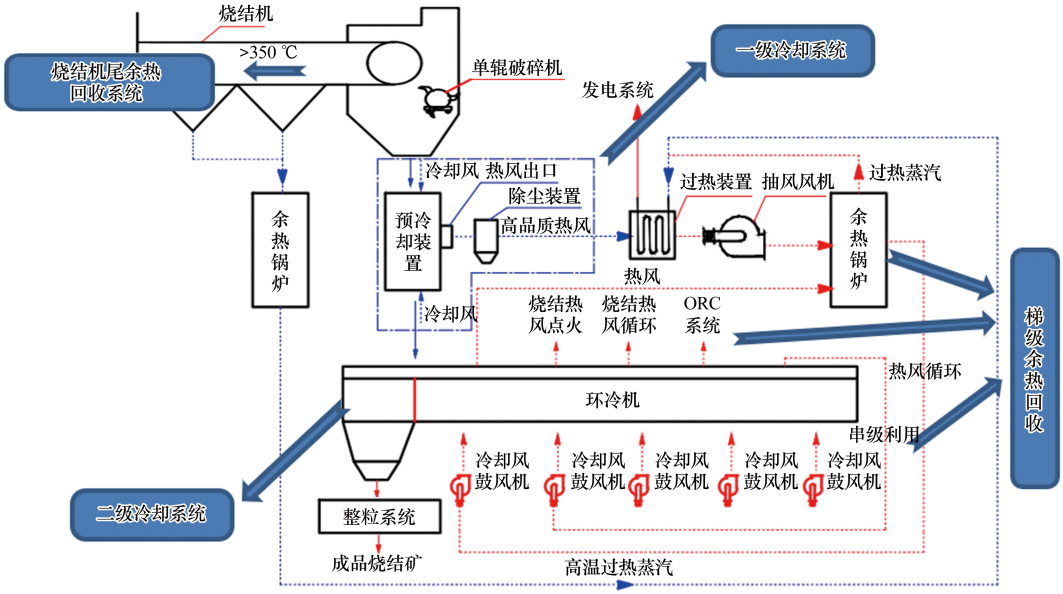


图 1 烧结双级冷却工艺流程

Fig. 1 Process flow of sintering two-stage cooling

温多管除尘器，然后经过二次过热气，对余热锅炉蒸汽进行二次过热，再由风机将过热完成后的 400 ℃的热风送入现有余热锅炉一段入口。

烧结预冷却装置采用厚料层冷却技术，采用小风慢冷冷却方式，可有效提高冷却后热风的温度，形成高品质热风（＞450 ℃），这部分高品质热风可以提高余热锅炉过热蒸汽温度等，其热能效率有所提高。与传统竖式冷却装置相比，该预冷却装置规模小很多，其物料均匀性、气流均匀性易于实现，经过研究开发的预冷却装置，可保证其内部物料的整体流及气流换热的均匀性。经预冷却后的热烧结矿在环冷机内采用低于现有冷却风量的冷却风进行冷却，并且料层厚度更加平整，其余热锅炉取热量增加，两者相结合后，可提高烧结矿显热的整体回收效率。

2　双级冷却仿真模拟

2.1　仿真模型和边界条件

烧结双级冷却流体仿真模型如图 2 所示。其中，预冷却技术相关参数及其主要边界参数分别如表 1 与表 2 所示。

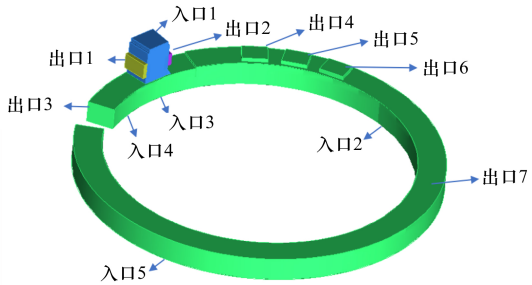


图 2　烧结双级冷却仿真模型

Fig. 2　Simulation model of sintering two-stage cooling

表 1　预冷却技术相关参数

Table 1　Related parameters of sintering precooling technology

参数	数值
环冷机回转半径/m	21
进料仓截面面积/m^2	11. 84
台车料层厚度/m	1. 5
烧结矿平均粒径/m	0. 04
烧结矿孔隙率	0. 35
烧结矿黏性阻力系数	923 833
烧结矿惯性阻力系数	1 327

表 2　预冷却技术主要边界参数

Table 2　Main boundary parameters of precooling technology

边界名称	温度/℃	边界类型	边界数值
入口 1	20	压力入口/Pa	0
入口 2	120	速度入口/($m·s^{-1}$)	1
入口 3	20	压力入口/Pa	0
入口 4	20	压力入口/Pa	0
入口 5	20	速度入口/($m·s^{-1}$)	1
出口 1	20	压力出口/Pa	－4 000
出口 2	20	压力出口/Pa	－4 000
出口 3	20	压力出口/Pa	0
出口 4	20	压力出口/Pa	－100
出口 5	20	压力出口/Pa	－100
出口 6	20	压力出口/Pa	－100
出口 7	20	压力出口/Pa	0

完成图 2 烧结双级冷却仿真模型构建后，进行网格划分，建立其连续性方程、动量方程和能量方程等数学模型[6-9]，并通过离散化、线性迭代的方式进行求解。

2.2　仿真结果

预冷却装置的纵截面流速云图、压强云图如图 3、4 所示，各出入口的流量统计如表 3、4 所示。由图 3、图 4 和表 3、表 4 可知，入口 1 风流均被出口 1 和出口 2 所抽走，入口 2 和入口 5 的风

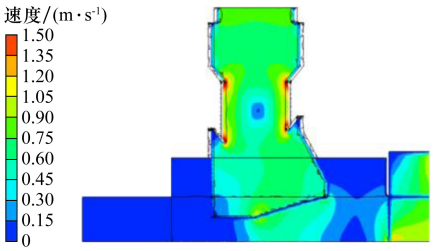


图 3　烧结预冷却流速云图

Fig. 3　Velocity cloud diagram of sintering precooling

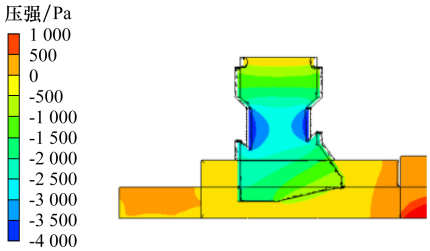


图 4　烧结预冷却压强云图

Fig. 4　Pressure cloud diagram of sintering precooling

表 3 仿真各主要入口流量

Table 3 Main inlets flowmeter of simulation

相对压强/Pa	入口 1/(10^4 $m^3 \cdot h^{-1}$)	入口 2/(10^4 $m^3 \cdot h^{-1}$)	入口 3/(10^4 $m^3 \cdot h^{-1}$)	入口 4/(10^4 $m^3 \cdot h^{-1}$)	入口 5/(10^4 $m^3 \cdot h^{-1}$)
-4 000	2.88	73.3	1.5	0.056	72.8

表 4 仿真各主要出口流量表

Table 4 Main outlets flowmeter of simulation

相对压强/Pa	流量/(10^4 $m^3 \cdot h^{-1}$)						
	出口 1	出口 2	出口 3	出口 4	出口 5	出口 6	出口 7
-4 000	-2.9	-2.59	-0.02	-25.5	20.3	22.4	-76.9

流均从台车上方流出，入口 3 风流均被出口 1、出口 2 抽走，可见预冷却装置和环冷机之间不存在明显的串风问题。

2.3 双级冷却和单独环冷机温度场仿真结果

烧结双级冷却展开切面固相温度场、气相温度场分别如图 5、6 所示。同样条件下，单独环冷机展开切面固相温度场、气相温度场分别如图 7、8 所示。由图 5 ~ 8 可知，单独环冷机烧结矿出口温度为 396 K，而烧结双级冷却烧结矿出口温度为 383 K，相比降低 13 K，有利于烧结矿冷却。烧结预冷却两个抽风口烟气温度为820 K。环冷机展开

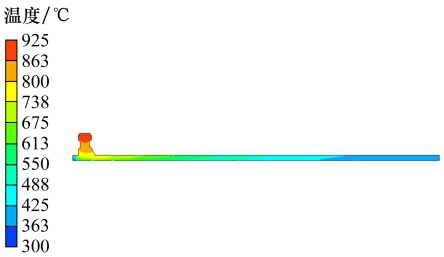


图 5 烧结双级冷却展开切面固相温度云图

Fig. 5 Cloud image of solid phase temperature on the expanded section of sintering two-stage cooling

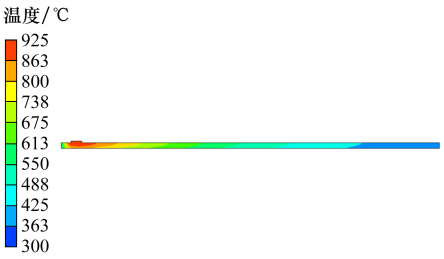


图 6 单独环冷机展开切面固相温度云图

Fig. 6 Cloud image of solid phase temperature on the expanded section of single ring cooler

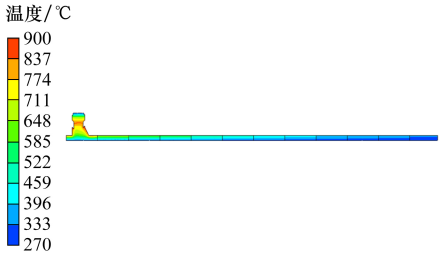


图 7 烧结双级冷却展开切面气相温度云图

Fig. 7 Cloud image of gas phase temperature on the expanded section of sintering two-stage cooling

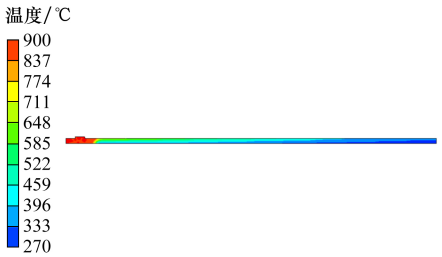


图 8 单独环冷机展开切面气相温度云图

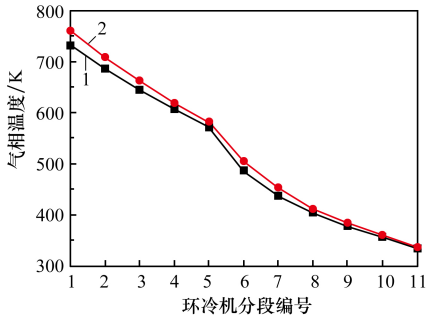
Fig. 8 Cloud image of gas phase temperature on the expanded section of single ring cooler

长度共 110 m，将环冷机展开后沿长度分成 11 段。烧结双级冷却和单独环冷机气相温度对比如图 9 所示。由图 9 可知，相对单独环冷机，烧结双级冷却前 5 段余热回收段烟气温度平均降低 17 K，但同时新增了烟气温度为 810 K 的高品质热风，经过统计，烧结双级冷却进入余热回收系统的热量增加，可提高过热蒸汽 50 ℃，提高发电效率 5%。

3 双级冷却优势分析

3.1 冷却增效

通过双级冷却，环冷机料层加厚，换热效率提高，在烧结饼出环冷机温度一致的前提下，可减



1—烧结两级冷却气相温度；2—环冷机冷却气相温度。

图 9　烧结双级冷却和单独环冷机气相温度对比

Fig. 9　Comparison of gas phase temperature between sintering two-stage cooling and single ring cooler

少环冷机冷却风量 10% 以上，或冷却面积减少，可实现烧结冷却系统零排放。以 360 m^2 烧结机为例，预冷却冷却风量为 45 000 Nm^3/h，冷却后热风温度一般大于 450 ℃，甚至大于 500 ℃，设定烧结饼入环冷机的温度为 650 ℃，烧结饼出环冷机的温度为 150 ℃，冷却系统节能计算结果如表 5 所示。

表 5　冷却系统节能计算结果

Table 5　Energy saving calculation results of cooling system

总冷却风量/（$Nm^3 \cdot h^{-1}$）	预冷却冷却热量/（$kJ \cdot h^{-1}$）	预冷却冷却热量占比/%	环冷机冷却风量减少/（$Nm^3 \cdot h^{-1}$）	环冷机节省能耗/kW
1 120 000	41 650 000	12.85	143 930	350

3.2　余热回收

预冷却装置由于采用厚料层冷却技术，产生的高品质热风对余热锅炉蒸汽进行二次过热，与现有余热锅炉形成三级余热回收系统，可提高过热蒸汽 50 ℃，提高发电效率 5%。锅炉产气能力计算结果如表 6 所示。

表 6　锅炉产气能力计算结果

Table 6　Calculation results of boiler gas production capacity

一段原取风温/℃	预冷却集热风温/℃	一段取风量/（$m^3 \cdot h^{-1}$）	预冷却集热风量/（$m^3 \cdot h^{-1}$）	系统发电能力增加/kW
400	450	300 000	90 000	527

3.3　烧结矿增产

预冷却装置内充满物料，消除了现有给料装置的摔损高度约为 4 ~ 5 m，经试验研究，可降低返矿率 1% 以上。同时，可保证环冷机内外圈布料均匀；降低冷却风速，减少急冷。

3.4　除尘增效

如上所述，烧结预冷却装置的上部冷却风由烧结机尾卸矿斗引过来，下部冷却风由环冷机给料点和排料点除尘罩引入，这两部分风可增加机尾卸矿斗和环冷机给料的除尘效果，并且可减少甚至取消原除尘点的除尘风，起到除尘增效的效果。双级冷却工艺竖式冷却过程中，小粉尘颗粒在抽风机的作用下进入高温热风管道，并经多管除尘作用后从卸灰阀排出，此过程相当于风力分选过程，其除尘量大小与除尘口风速和颗粒的悬浮速度相关。根据公式(1)计算，竖式冷却段冷却过程中直径小于 0.42 mm 的粉尘颗粒将在风机作用下进入高温风管道。

$$u_x = 1.15\sqrt{\frac{(\rho_s - \rho)gd_\varphi}{C\rho}} \tag{1}$$

式中：u_x 为颗粒悬浮速度，m/s；ρ_s 为颗粒密度，kg/m^3；ρ 为空气密度，kg/m^3；g 为重力加速度，m/s^2；d_φ 为当量球直径，m；C 为当量球的阻力系数。

4　工程应用

烧结双级冷却技术于 2022 年在湘潭钢铁 360 m^2烧结机投入使用，现场情况如图 10 所示。根据现场反应情况，装置运行稳定，使用后环冷机布料正常、运转正常、烧结机尾溜槽运转正常；预冷却装置内磨损情况较轻，相比普通给料溜槽，使用寿命更长；预冷却装置屯料后，环冷机料位布料平整，内外圈及运行方向上无波动及偏析；此外，余热锅炉蒸汽产量由吨矿 34 t/h 左右增加到了 40 t/h 左右，增加发电量约 1 200 kW·h，年经济效益约 400 万元。

5　结　论

（1）“预冷却 + 环冷机冷却 + 梯级余热回收”的烧结矿双级冷却系统具有全面回收烧结矿显热的功能，可实现系统零排放。

（2）流体仿真结果表明，烧结双级冷却的烧结矿相比单独环冷机，出口温度低 13 K，环冷机余热回收段平均风温低17 K，而烧结预冷却取风



（a_1）、（a_2）烧结预冷却系统现场；（b）预冷却系统安装前料面；（c）预冷却系统安装后料面

图 10 现场设备和应用前后料面对比

Fig. 10 Material face ratio before and after field equipment and application

口风温达 810 K。单独环冷机冷却时，环冷机后段风温高于双级冷却，即双级冷却时进入余热回收系统的热量增加，整体系统余热回收效率增加。

（3）以 360 m^2 烧结机为例，烧结双级冷却技术可减少环冷机冷却风量 10% 以上，提高发电效率约为 5%，整体余热发电可增加 1 400 kW·h，降低烧结返矿率 1% 以上，并可提高机尾环境除尘能力。

参考文献：

[1] 李圭文，雷建伏，可开智，等. 韶钢烧结环冷余热回收效率提升实践[J]. 烧结球团，2017，42(4)：58－61.
LI Guiwen, LEI Jianfu, KE Kaizhi, et al. Practice on improving efficiency of waste heat recovery by sinter circular cooler of Shao-steel[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(4): 58－61.

[2] 马洛文，何志军. 宝钢三烧结环冷机余热锅炉热工效率测试研究[J]. 烧结球团，2013，38(5)：57－59.
MA Luowen, HE Zhijun. Test and research on waste heat boiler thermal efficiency for circular cooler of baosteel No. 3 sinter machine[J]. Sintering and Pelletizing, 2013, 38(5): 57－59.

[3] 付俊鹏，蔡九菊. 竖式烧结矿冷却装置内气固热交换的数值研究[J]. 冶金能源，2019，38(2)：3－7.
FU Junpeng, CAI Jiuju. Simulation research on gas-solid heat transfer in vertical sinter cooling furnace[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2019, 38(2): 3－7.

[4] 毕传光，孙俊杰. 竖式冷却回收烧结矿显热工艺在梅钢的应用[J]. 烧结球团，2018，43(4)：69－72.
BI Chuanguang, SUN Junjie. Application of process to recycle sensible heat of sinter using vertical cooling furnace in Meisteel[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(4): 69－72.

[5] 祁腾飞，黄军，张永杰. 烧结矿竖式冷却工艺应用难点及机制研究进展[J]. 钢铁研究学报，2021，33(7)：557－565.
QI Tengfei, HUANG Jun, ZHANG Yongjie. Application difficulties and mechanism research progress of sinter vertical cooling process[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(7): 557－565.

[6] 辛文彤，李志尊，胡仁喜，等. ANSYS 13.0 热力学有限元分析从入门到精通[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，2011.
XIN Wentong, LI Zhizun, HU Renxi. ANSYS 13.0 thermodynamic finite element analysis from introduction to proficiency[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2011.

[7] 王福军. 计算流体动力学分析：CFD 软件原理与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2004.
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis: Principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[8] 韩占忠，王敬，兰小平 FLUENT：流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京：北京理工大学出版社，2004.
HAN Zhanzhong, WANG Jing, LAN Xiaoping. FLUENT: fluid engineering simulation calculation example and application[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2004.

[9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安：西安交通大学出版社，2001.
TAO Wenquan. Numerical heat transfer[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.