DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.11.011

大型铸钢支架铸造工艺数值模拟与优化设计

聂金成[1],谌黎明[1],叶洁云[1],朱福生[2],李春红[2],杨宇鹏[2],郑强强[3]

(1. 江西理工大学 材料科学与工程学院,江西 赣州 341000; 2. 龙南龙钇重稀土科技股份有限公司,江西 赣州 341000; 3. 南昌航空大学,江西 南昌 330063)

摘　要:利用 ProCAST 软件对大型铸钢支架进行充型和凝固模拟,分析冒口与冷铁的数量和位置对铸件缩松缩孔分布的影响。通过模拟结果优化底注式铸造工艺,逐步使缩松缩孔缺陷从铸件转移到冒口内部,将缩松率降到最低,保证铸件的致密性,得到高质量的铸件。

关键词:ZG270-500;支架;ProCAST;底注式浇注系统;优化设计

中图分类号: TG269　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)11-1178-05

Numerical Simulation and Optimization Design of Casting Process for Large Cast Steel Brackets

NIE Jincheng[1], CHEN Liming[1], YE Jieyun[1], ZHU Fusheng[2], LI Chunhong[2], YANG Yupeng[2], ZHENG Qiangqiang[3]

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Longnan Longyi Earth Polytron Technologies Inc, Ganzhou 341000, China; 3. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: ProCAST software was used to simulate the mold filling and solidification of large cast steel support, and the influence of the number and position of riser and chiller on the distribution of shrinkage cavity and porosity was analyzed. Through the simulation results, the bottom injection casting process is optimized to gradually transfer the shrinkage cavity and porosity defects from the casting to the riser, and finally the shrinkage cavity rate is reduced to the minimum, so as to ensure the compactness of the casting metal and obtain high-quality casting.

Key words: ZG270-500; bracket; ProCAST; bottom gating system; optimization design

ZG270-500 是典型的中碳铸钢，有一定的韧性及塑性,强度和硬度较高,切削性较好,铸造性能比低碳钢差。在铸造生产中,ZG270-500 经常出现魏氏体组织,需要选择合适的加热温度、保温时间和冷却速率。对于大型铸钢件后续热处理工艺,可通过扩散退火和高温回火消除偏析,提高铸钢的综合力学性能[1]。ProCAST 是一款基于有限元(FEM)数值计算和综合求解方法的铸造仿真软件,能够模拟金属铸造过程中的流动过程,精确显示浇不足、冷隔、裹气、冲砂以及残余应力与变形,准确预测出缩孔、缩松位置[2-5]。借助于 ProCAST 软件,对大型铸钢支架件进行速度场和凝固场模拟分析并预测铸件的质量,基于模拟结果调整铸造工艺,从而获得最佳的支架铸造工艺方案。

1　支架特点与工艺

该支架常用于大型压力机械前板的两端，起到承受强压和定位的作用,具有尺寸大、体重、掏空位多、铸孔和挂耳结构多等特点。其轮廓最大尺寸 2 500 mm×2 410 mm×2 150 mm,3 个铸孔直径均为 250 mm,4 个挂耳直径均为 100 mm，最小壁厚 130 mm;外表面多处为加工面,加工精度要求较高;铸件不允许有裂纹、夹渣、缩松、气孔、砂眼等影响力学性能的外观缺陷。本文主要讨论冒口和外冷铁数量和分布对铸件质量的影响。

首先使用 Solidworks 软件建立铸件的三维实体模型,然后根据铸件结构和材质特点,采用新型水玻璃自硬砂,选用砂箱造型,使用中间分型,并设计底注式浇注系统。由于铸件内腔复杂且尺寸较大,可以通过 ProCAST 软件中虚拟砂箱的设置,有效地节约大量的网格量和计算资源[6]。

收稿日期:2019-07-10

作者简介:聂金成(1997-),广东东昌人,本科生.研究方向:材料成型及控制工程.电话:19914725003,E-mail:jinchengnie@gmail.com

通讯作者:叶洁云(1989-),女,江西浮梁人,硕士,讲师.研究方向:钢铁材料的组织性能控制及数值模拟优化.电话:15179089086,E-mail:yejieyun2008@163.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

支架材料为 ZG270-500，根据铸件的结构特点确定其浇注温度为 1 540 ℃。合适的浇注流量能使钢液均匀、迅速、平衡地充满型腔，以获得质量良好的铸钢件，本次工艺初定浇注流量为 120 kg/s。

2　数值模拟与分析

2.1　ProCAST 网格划分

将 SolidWorks 建立好的 3D 模型导入 UG NX 软件中，进行高级仿真划分面、体网格，然后转化为 unv 格式，以便 ProCAST 中的 Mesh 模块识别，在 Mesh 模块中点击保存，unv 格式自动转化为 vdb 通用格式。在 UG NX 软件对铸件进行划分网格，可以最大程度地保证网格的有效性与完整性，提高 ProCAST 前处理通过率。划分网格时，要设置好网格的宽度，宽度越小，精度越高，但计算量也越大。所以合理的网格宽度值，既可以确保模拟的准确性，又减少了工作量[7]。由于网格宽度要小于铸件的最小边的厚度，为保证模拟结果的准确性，本铸件设置网格的宽度为 30 mm。铸件及浇注系统网格划分如图 1 所示，面网格结点数为 145 936 个，体网格共有个 705 475 个。

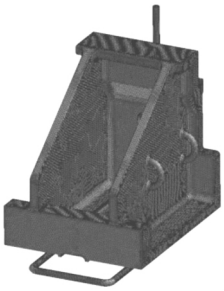


图 1　铸件及浇注系统网格划分

Fig.1　Meshing of the casting and gating system

2.2　热物理参数和铸造工艺参数的确定

在 ProCAST 中的 Cast 模块中设置工艺参数，材料选择 ZG270-500，由于材料热物性数据里没有这种材料，需要自定义添加材料的化学成分，软件可以生成相应的材料属性[7]。主要工艺参数如下：

（1）换热系数：铸件与砂型取 500 W/(m^2·K)，冷铁与砂型取 500 W/(m^2·K)，铸件与冷铁取 2 000 W/(m^2·K)。

（2）边界条件：浇注温度 1 540 ℃，砂型温度 200 ℃，浇注流量为 120 kg/s，冷却方式为空冷，选择重力浇注方式。

（3）运行参数：最大计算步数 NSTOP=50 000，运算停止温度 TSTOP=600 ℃，最大时间步长 DTMAX=50，温度结果输出频率 TFREQ 和速度结果输出频率 VFREQ 均为 20[8]。

2.3　数值模拟结果与分析

2.3.1　充型速度场分析

图 2 为底注式充型速度场与充型时间。整个充型过程平稳缓慢，没有发现金属液的飞溅、卷气现象。由图可知，液态金属经 4.3 s 充满底部的横浇道并进入内浇道，随后液面始终平稳地上升，层速均匀。充型结束后，充型时间图中同种颜色部分几乎呈层状垂直分布，进一步反映出该铸件采用底注式浇注系统充型平稳度好，整个充型过程持续约为 179.1 s。

2.3.2　缺陷分布图分析

图 3 为铸件缺陷分布图。由图 3(a)、(b)、(c)截面图可以看出，铸件顶部并没有出现坍陷，说明底注式浇注系统的直浇道剩余压头设置合理。同时也可以发现铸件的厚大部位和靠近顶部依然存在较大范围的缩孔缩松，说明在凝固过程中，铸件的厚大部位中心位置的温度较周围高，上部液态金属温度低先行凝固，导致温度高的厚部没能及时得到很好地补缩，而靠近顶部的液态金属由于没有多余金属液补充发生自收缩，最后导致缩松[9,10]。

3　工艺优化及数值模拟

3.1　一次优化方案

由铸件的缩松缩孔分布图可以清晰看出，缩松缩孔主要分布在底端厚挡板与侧肋板之间以及各肋板之间的交界位置上，此位置最易出现热节，存在铸造缺陷的可能性。工艺改善可以从两个方面切入：第一是通过开设冒口，消除铸件顶部收缩缺陷；第二是通过设计冷铁控制浇注时铸件在型腔中的凝固顺序，来实现关键部位先行凝固从而得到补缩，消除关键部位的缺陷。具体方案如下。

方案 1（未优化）：将内浇道的间距缩小，集中地排布在横浇道两端。

方案 2（一次优化）：在铸件顶部对称放置两个小冒口，底端厚部放置一个大冒口，同时在边缘放置两个小冒口；在铸件的后板上部分放置两块竖直的石墨冷铁。

图 4 为方案 1、方案 2 的有限元模型。

图 5 为一次优化后的铸件缺陷分布图。方案 1 的缩松率为 3.43%，方案 2 的缩松率为 1.98%，说明方案 2 中冒口和冷铁的设置对铸件的缩孔缩松有很大的作用，几乎消除了铸件顶部和肋板与前挡板连接处残余的缩孔缩松缺陷。但是冒口补缩作用还未发挥至最好，需要进一步调整冒口的的数量和分布。图 6 为方案 2 前挡板冒口进行凝固场分析，发现热节处由于热量集中凝固时间最长，利用冒口对热节

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

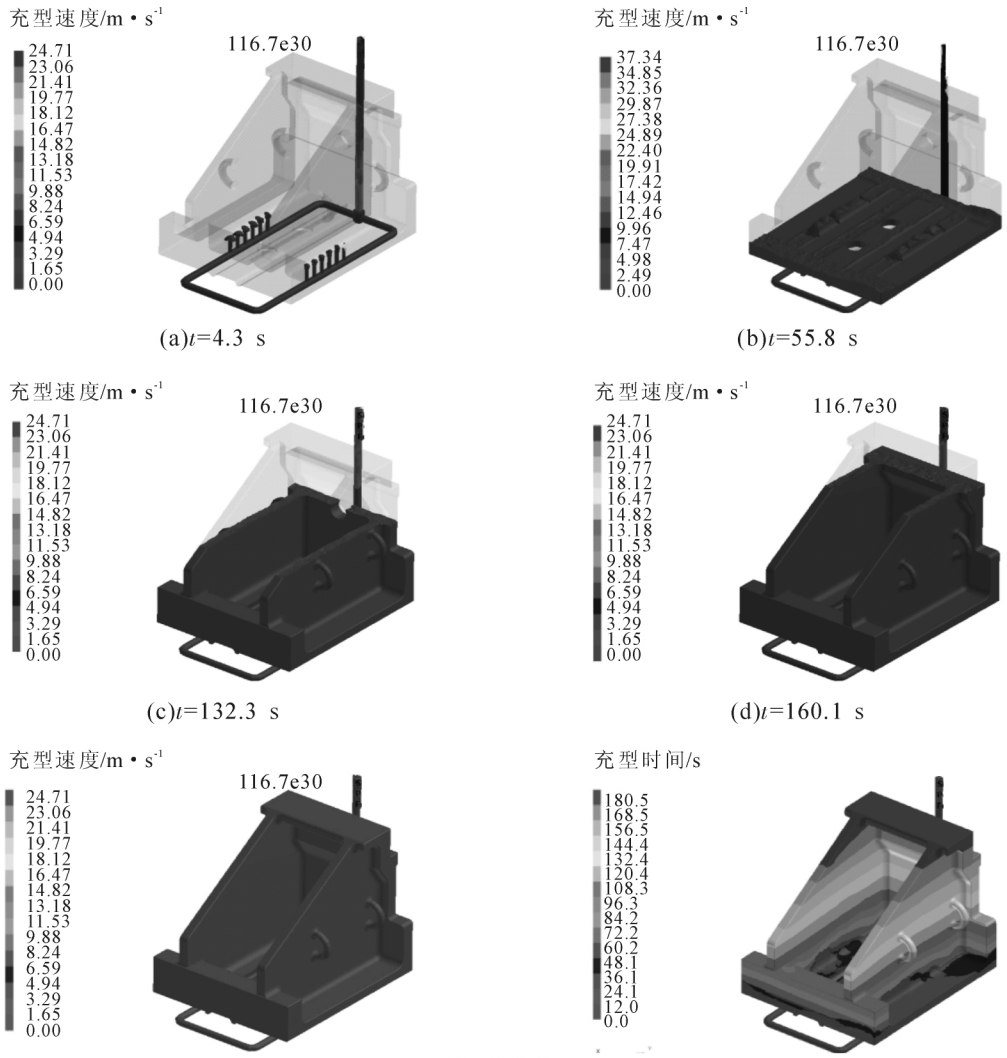


图 2 底注式充型速度场与充型时间

Fig.2 The filling speed field and filling time of bottom gating system

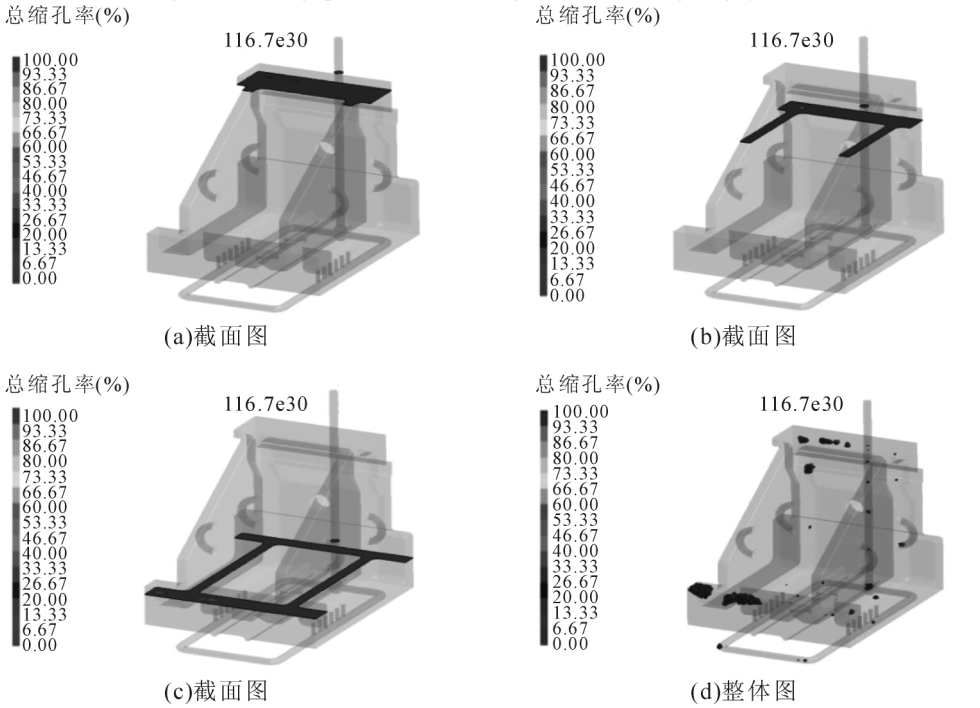
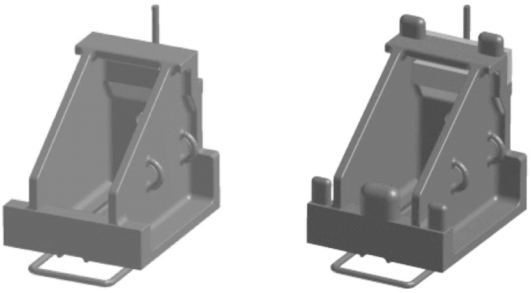


图 3 铸件的缩松缩孔分布图

Fig.3 Shrinkage and porosity distribution of the casting

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)方案1　　(b)方案2

图 4 两种优化方案的有限元模型

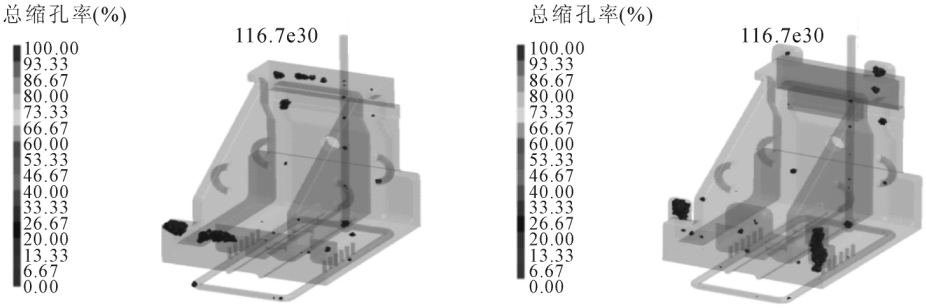
Fig.4 Finite element model of the two optimized schemes

处的补缩十分重要；从凝固率来看，右边缘冒口下方形成了封闭区，封闭区周围被固相包围但封闭区内部仍然存在残余液相，残余液相在最后凝固中体积缩小，得不到上方冒口的补缩，最终形成了缩松缩孔。

3.2 二次优化方案

针对方案 2 中出现的问题，在方案 3（二次优化）中，取消底端边缘的两个小冒口，在上顶板中部位置增设一个小冒口；将外侧冷铁的形状贴合肋板的交界位置，而内侧冷铁移置在下边较厚热节部位。

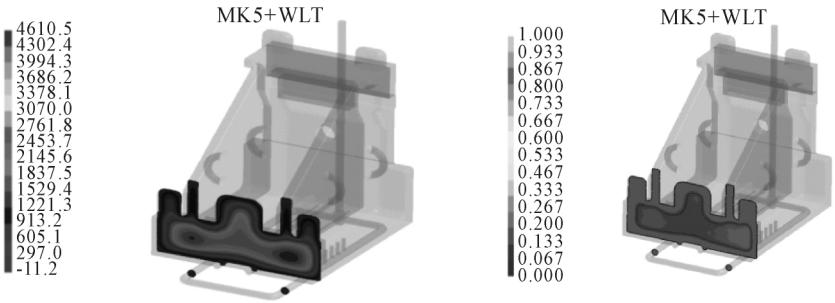
图 7 为方案 3 的铸件缩孔缩松分布图。方案 3



(a)方案1　　(b)方案2

图 5 两种方案的铸件缩孔缩松分布图

Fig.5 The distribution diagram of shrinkage cavity and porosity of casting in two schemes



(a)凝固时间/s　　(b)凝固率

图 6 方案 2 冒口凝固场

Fig.6 The solidification field with risers of scheme 2

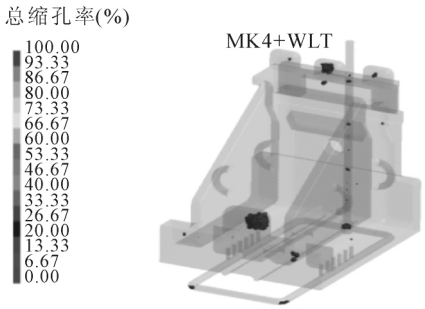


图 7 方案 3 的铸件缩孔缩松分布图

Fig.7 The distribution diagram of shrinkage cavity and porosity of casting in schemes 3

的缩松率仅为 0.42%，补缩效果明显优于方案 1 和方案 2，且方案 3 的缩松缩孔缺陷从铸件内部几乎转移到冒口内部，保证了铸件的致密性，说明方案 3 的冒口和冷铁的数量和位置设计更合理[11]。

4 结语

采用底注式浇注系统，在整个充型过程中，液面始终平稳地上升，且流速较慢，没有发现金属液的飞溅、卷气现象。方案 3 通过冒口与冷铁的优化设计，使铸件整体按照自下而上的凝固顺序，逐步将缩松缩孔缺陷从铸件转移到冒口内部，保证了铸件致密性，成功实现铸件的整体性能最优化。

参考文献：

[1] 王晓虹，许林敏，江利. ZG270-500 铸钢吊具断裂分析[J]. 金属热处理, 2009, 34(9):96-98.

[2] 赵健. 基于 ProCAST 的船用铸钢件的铸造工艺分析及优化[J]. 热加工工艺, 2010, 39(15):68-70.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[3] 杨智强,起华荣,郭红星,等. 国内铸造工艺数值模拟研究及应用现状[J]. 铸造技术, 2017(9):2072-2075.
[4] 孙治国. ProCAST 软件在铸造模拟中的应用 [J]. 计算机光盘软件与应用, 2014(20): 77-77.
[5] Pang Y , Dong X , Liu D , et al. Influence of cooling conditions in casting Cu-Ni alloy based on numerical simulation [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2010, 25(1): 68-72.
[6] 李日. 铸造工艺仿真 ProCAST 从入门到精通 [M]. 中国水利水电出版社, 2010.
[7] 张敏华,屈银虎,梁涛. ProCAST 在水龙头罩铸造模拟过程中的应用[J]. 铸造技术, 2015,36(4):1055-1057.
[8] Lu S L , Xiao F R , Zhang S J , et al. Simulation study on the centrifugal casting wet-type cylinder liner based on ProCAST [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1):512-521.
[9] Liu H , Fu P , Kang X , et al. Formation mechanism of shrinkage and large inclusions of a 70 t 12Cr2Mo1 heavy steel ingot[J]. China foundry, 2014, 11(1):46-51.
[10] Zhang L, Rietow B, Thomas B G, et al. Large inclusions in plain-carbon steel ingots cast by bottom teeming [J]. ISIJ International, 2006, 46(5): 670-679.
[11] 杨敬伟. 大型铸钢件冒口补浇的数值模拟 [J]. 铸造技术, 2018, 39(10): 2262-2264.

(上接第 1177 页)

状和椭圆状两种形态，其中枝晶状孔洞为缩松,椭圆状孔洞为氮气孔。

(2)缩松形成机制符合过共晶球墨铸铁中缩松的形成机制,心部位置温度梯度较低,糊状凝固严重使得该处易形成缩松缺陷。建议设置冷铁加速心部区域的冷速从而消除缩松。

(3)氮气孔是含氮量高的型芯高温分解产生的氮渗入铁液引起,建议于型芯表面包覆高温致密涂层阻碍氮的扩散。

参考文献:

[1] 郭力,李东超. 国内外曲轴磨削加工工艺发展趋势[J]. 精密制造与自动化,2013(1):48-51.
[2] 李海国，路俊峰. 发动机曲轴材料及其发展 [J]. 汽车工艺与材料,2012(9):45-47.
[3] 侯超,任为,宋佳健,等. 显微缩松对铁素体球墨铸铁低温韧性的影响[J]. 铸造,2019,68(2):123-127.
[4] 卢彬彬,许景峰,李永刚. 球墨铸铁缩松浅析[J]. 中国铸造装备与技术,2017(1):46-48.
[5] 杨明月,叶小龙,麻先银. 球墨铸铁金相组织缺陷原因及防止方法概述[J]. 现代铸铁,2017(3):65-70.
[6] 赵娅. 发动机曲轴铸造缺陷的原因分析与优化[J]. 热加工工艺,2016,45(8):247-249,252.
[7] 王树宝,郭文申,姜霄云. 球墨铸铁典型缩松缺陷的解决[J]. 铸造,2017,66(23):56-58.
[8] 谢高峰,王晓靖. 控制球墨铸铁件缩孔缩松缺陷的新方法[J]. 铸造工程,2016(6):34-36.
[9] 衣社新,洪美琴. 球墨铸铁轴箱铸件的铸造工艺设计[J]. 铸造,2014,63(8):852-855.
[10] 汪丽红. 球墨铸铁常见质量缺陷及防止措施探讨 [J]. 科技经济导刊,2016(33):65.
[11] 张蕾,赵红蕾,朱鸣芳. 球墨铸铁凝固显微组织的元胞自动机模拟[J]. 金属学报,2015(2):148-158.
[12] 徐锦锋,翟秋亚,袁森,等. 过共晶球铁凝固过程中奥氏体的生长方式与形貌特征[J]. 金属学报,2003(2):136-139.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书由西安理工大学魏兵教授编著。共8章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页。

特快专递邮购价：226元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071　　技术咨询：13609155628

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net