● 工艺技术 Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5222

ZTA15 钛合金薄壁件铸造工艺优化数值模拟研究

张林嘉[1,2],周 瑜[3],罗 婷[1],李金山[1,3]

(1. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室,陕西 西安 710072;2. 海装广州局驻贵阳地区军事代表室,贵州 贵阳 550081;3. 西北工业大学重庆科创中心,重庆 401135)

摘 要:大尺寸薄壁 ZTA15 钛合金异形铸件在航空发动机复杂喷管部件中具有广阔的应用前景。然而,其铸造过程中由于壁厚差异,易导致充型不均、温度场分布不均以及凝固缺陷等问题。本文采用 ProCAST 软件对 ZTA15 钛合金薄壁铸件的铸造工艺进行了数值模拟与优化研究,系统分析了不同浇注系统对铸件温度场、流动场、凝固行为及微观组织的影响。结果表明,采用传统中心浇道与米字型横浇道系统时,易在铸件内部形成高温热节区,造成凝固不均匀,并使缩孔、缩松缺陷集中分布。相比之下,优化设计的侧边辅助浇道系统通过分流与补缩作用,有效改善了温度场和流速场的均匀性,降低了合金液的冲击力,减少了气孔与夹杂缺陷,并使缩孔缩松缺陷被引导至浇注系统内部。微观组织模拟结果表明,优化后的浇注系统有助于获得更加均匀的显微组织。

关键词:ZTA15 钛合金;薄壁铸件;浇注系统优化;微观组织

中图分类号:TG249.5 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2026)06-0696-08

Numerical Simulation Study on Casting Process Optimization of ZTA15 Titanium Alloy Thin-walled Components

ZHANG Linjia[1,2], ZHOU Yu[3], LUO Ting[1], LI Jinshan[1,3]

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Military Representative Office of Guangzhou Bureau of Naval Equipment Department in Guiyang, Guiyang 550081, China; 3. Innovation Center NPU Chongqing, Chongqing 401135, China)

Abstract: Large-sized, thin-walled ZTA15 titanium alloy castings with variable cross-sections have broad application prospects for complex aeroengine nozzle components. However, owing to variations in wall thickness, the casting process faces challenges such as incomplete filling, nonuniform temperature distribution, and solidification defects. ProCAST software was employed to perform numerical simulations to optimize the casting process of the thin-walled ZTA15 components. The effects of different gating system designs on the temperature field, flow field, solidification behavior, and microstructural evolution were systematically analysed. The results reveal that conventional central and radial cross-runner systems tend to generate high-temperature hot spots, leading to uneven solidification and a concentration of shrinkage cavities and porosity defects. In contrast, the optimized-side auxiliary runner system effectively improves the uniformity of the temperature and flow fields through flow diversion and feeding, reduces molten metal impact, and minimizes gas entrapment and slag inclusion. Consequently, shrinkage and porosity defects are redirected into the gating system. The simulated microstructures indicate that the optimized design promotes a more homogeneous microstructure.

Key words: ZTA15 titanium alloy; thin-walled casting; gating system optimization; microstructure

航空发动机作为现代航空器的核心动力系统,对材料的性能要求极为苛刻,尤其是异形、变截面喷管部件,这些部件需承受极端高温、高压和复杂应力环境[1-2]。钛合金作为一种高性能材料,因其较高的

收稿日期:2025-10-15

基金项目:国家科技重大专项(2024ZD0608100);国家自然科学基金(52401198)

作者简介:张林嘉,1983 年生,硕士生,工程师.研究方向为航空材料先进制造技术.Email: 83273076@qq.com

通信作者:罗 婷,1990 年生,博士,教授.研究方向为钛合金及其成形技术.Email: t.luo@nwpu.edu.cn

引用格式:张林嘉,周瑜,罗婷,李金山.ZTA15 钛合金薄壁件铸造工艺优化数值模拟研究[J].铸造技术,2026,47(6):696-703.

ZHANG L J, ZHOU Y, LUO T, LI J S. Numerical simulation study on casting process optimization of ZTA15 titanium alloy thin-walled components[J]. Foundry Technology, 2026, 47(6): 696-703.

中国知网 https://www.cnki.net

比强度、优异的耐腐蚀性和良好的高温稳定性,成为制造航空发动机关键部件的理想选择[3-4]。薄壁铸件在铸造过程中容易出现缩松、气孔和裂纹等缺陷,直接影响部件的力学性能和服役寿命[5]。因此,优化钛合金薄壁件的铸造工艺已成为当前研究的热点[6]。ZTA15 钛合金是一种近 α 型钛合金,以良好的铸造性能和机械强度在航空领域得到广泛应用[7]。在航空发动机异形、变截面喷管部件中,ZTA15 合金常用于制造薄壁结构件,如中空法兰或复杂曲面喷嘴[8]。这些部件需具备高精度和均匀组织,以确保在高温燃气流中的稳定性。然而,薄壁铸件的壁厚通常小于 5 mm,甚至达到 2~3 mm,这导致铸造过程中热量散失迅速,易造成温度场和速度场不均等问题,进而引发凝固缺陷[9]。

钛合金铸造工艺优化是确保薄壁铸件质量的关键。传统铸造方法如熔模铸造在钛合金应用中面临诸多挑战,包括模具设计、浇注系统和凝固过程控制[10]。熔模铸造工艺能够实现复杂形状钛合金部件的精密成形。然而,由于钛及钛合金在高温下具有极高的化学反应活性,铸造过程必须在真空或惰性气氛条件下进行,以防止熔体与 O_2、N_2 等气体反应,造成氧化和污染[11]。薄壁铸件的缺陷主要源于浇注系统设计不当,浇注系统直接影响熔体的流动行为、温度分布及凝固顺序,其设计合理性对铸件内部质量具有决定性作用。若当浇注系统设计不合理,过高的熔体流速易引发湍流和夹杂物卷入,而温度梯度分布不均则可能导致局部过冷或过热,影响晶粒的生长形貌与微观组织的形成[12-13]。研究表明,通过优化浇注系统结构,如调整冒口和浇道的尺寸及位置,可有效实现定向凝固并显著降低铸造缺陷的发生率[14]。因此,针对浇注系统的数值模拟分析已成为优化钛合金铸造工艺、提升薄壁铸件质量的重要手段。

在铸造工艺优化研究中,数值模拟具备不可替代的应用优势。通过计算流体力学仿真工具,可对熔体充型、温度场演化、流动速度分布、凝固过程以及显微组织形成进行预测与分析。ProCAST 软件作为专业的铸造模拟平台,集成了热传导、流体流动及相变等多物理场耦合模型,能够真实反映复杂铸造过程的热流动特征。在铸造工艺优化中,浇注系统结构是决定对铸件温度场分布的核心影响要素。温度场分布直接决定热梯度变化,从而控制凝固前沿的推进速度与方向。对于薄壁铸件而言,冷却速率过快可能导致表面过冷,而内部热量滞留易引发热应力与裂纹缺陷。研究表明,合理优化浇注系统可有效均匀化温度梯度,降低局部热点的形成[15]。针对 ZTA15 合金的模拟结果显示,浇注温度过高会延长凝固时间,促进晶粒粗化;而温度过低则易产生冷隔与欠铸缺陷。除温度场外,速度场的优化同样重要。熔体流动速度直接影响湍流程度与夹杂物迁移行为。过高的浇注速度可能引入气体、形成气孔;而过低的速度则会导致充型不足。通过 ProCAST 模拟可实现速度场的定量分析。例如,在 TiAl 合金壳体铸造研究中,优化浇注系统后,流动速度分布更加平稳,显著减少了充型缺陷与夹杂物[16]。相关研究指出,浇注系统的合理设计不仅可控制冷却速率,还能改善凝固组织的均匀性。

现有文献已围绕钛合金铸造过程的数值模拟开展了较为系统的研究[14,17],但针对 ZTA15 合金薄壁件在航空发动机喷管部件中的应用研究较为匮乏。早期工作主要聚焦于通用钛合金(如 Ti-6Al-4V)的熔模铸造过程,强调模具温度及界面换热系数对凝固组织及性能的影响[5,18]。反重力铸造模拟结果表明,适当提高模具温度可改善充型均匀性并提升铸件力学性能[19-20]。然而,这些研究多集中于几何形状较为简单的试样,对异形、变截面喷管类复杂铸件的流动与凝固行为考虑不足。此外,浇注系统结构对速度场与凝固过程的耦合效应研究多停留在定性分析层面,缺乏系统的量化对比。

基于此,本研究针对 ZTA15 钛合金薄壁件在航空发动机异形、变截面喷管部件中的应用需求,采用 ProCAST 软件开展铸造工艺的数值模拟研究。重点分析不同浇注系统优化设计对铸件温度场、速度场、凝固行为及显微组织分布的影响规律。通过建立三维几何模型,模拟熔体充型与凝固全过程,预测铸造缺陷分布,并提出相应的浇注系统优化方案,以期为薄壁 ZTA15 钛合金复杂铸件的实际生产提供理论依据与技术支持。

1　铸件材料及浇注系统设计

1.1　铸件材料与结构

实验选用 ZTA15 钛合金作为研究对象。利用 3D 打印技术成形 SLA 蜡模,经组树与制壳工艺后实施熔炼浇注,成功获得轮廓尺寸为1 000 mm×500 mm 的椭圆形变截面筒体铸件,其局部壁厚约 4 mm。铸件在 930 ℃,130 MPa 条件下进行热等静压 2 h,以消除缩孔与疏松等缺陷,随后在 730 ℃去应力退火 2 h,以提高铸件的组织稳定性。化学成分分析基于同炉附铸的试棒样品,结果见表 1。

1.2　浇注系统设计

对于大尺寸、薄壁、复杂结构的钛合金精密铸

中国知网　https://www.cnki.net

表1 铸件主元素及杂质化学成分
Tab.1 Chemical composition of the alloying elements and impurities in the cast alloy
(mass fraction/%)

Al	V	Mo	Zr	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
6.60	2.32	1.84	2.36	0.14	0.32	0.008	0.005	0.001	0.11	Bal.

件,通常采用重力浇注工艺,通过分流、减速及反重力反向充型,可有效降低合金液对型壳的冲击力,从而允许适当减薄模壳厚度,提升透气性和热导率,同时延长浇注时间以利于充分排渣和排气。铸件内部温度场主要受热传导影响,流场作用较小,缩孔缩松形成规律稳定,通过迭代优化冒口结构设计,可将缩孔缩松全部引导至浇注系统内。因此,本研究采用重力浇注工艺,配置“中心浇道+米字型横浇道”形式的浇注系统,如图 1a 所示。同时,在“中心浇道+米字型横浇道”浇注系统的两侧增设了辅助浇道,该浇铸系统的斜视图和侧视图如图 1b 所示，该优化设计浇注系统的尺寸参数见表 2。通过增设两侧辅助浇道系统,一方面可分流主浇口的合金,进一步减缓壁面合金液的流动速度;另一方面,可为加强筋厚大区域及筒体长轴两端提供有效的补缩条件,从而实现浇注过程的平稳充型与均匀凝固。

在 ProCAST 有限元软件平台上建立了铸件浇注过程的三维数值仿真模型。该模型以凝固动力学为核心，综合考虑相变潜热释放对温度梯度分布的

表2 增设侧边辅助浇道的优化浇注系统尺寸
Tab.2 Dimensions of the gating system after optimization

Central sprue diameter/mm	Radial cross-runner /mm	Side runner aperture /mm	Auxiliary runner aperture/mm
90	60×40	40	30

影响,并基于完整的 Navier-Stokes 方程开展流动与传热的耦合计算,从而构建多物理场控制方程体系。在形核模型中，采用 Rappaz 和 Gandin 提出的基于高斯分布的连续形核理论，其晶粒密度与过冷度之间的关系如公式(1)所示。该模型忽略了由枝晶断裂及液相表面氧化所导致的额外形核核心，同时未考虑液相流动对形核行为的影响[21]:

$$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}(\Delta T)}=\frac{N_{\max}}{\sqrt{2\pi}\,\Delta T_{\sigma}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta T-\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\sigma}}\right)^{2}\right] \quad (1)$$

式中,n 为晶粒密度;ΔT 为过冷度;$N_{\max}$ 为最大形核密度;ΔT_{σ} 为标准偏差;$\Delta T_{\max}$ 为最大形核过冷度。本文为了揭示不同浇道设计下晶粒形态的相对变化规律,连续形核模型中所采用的主要形核参数如表 3 所示。

在某一过冷度下晶粒密度可通过下式计算:

$$n(\Delta T)=\int_{0}^{\Delta T}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}(\Delta T)}\mathrm{d}(\Delta T) \quad (2)$$

金属液相在凝固过程中晶体生长速率与热力学及动力学因素之间的关系,可通过 Kirkaldy-Glicksman-Tiller(KGT)模型[22-23]进行定量描述。对于钛合

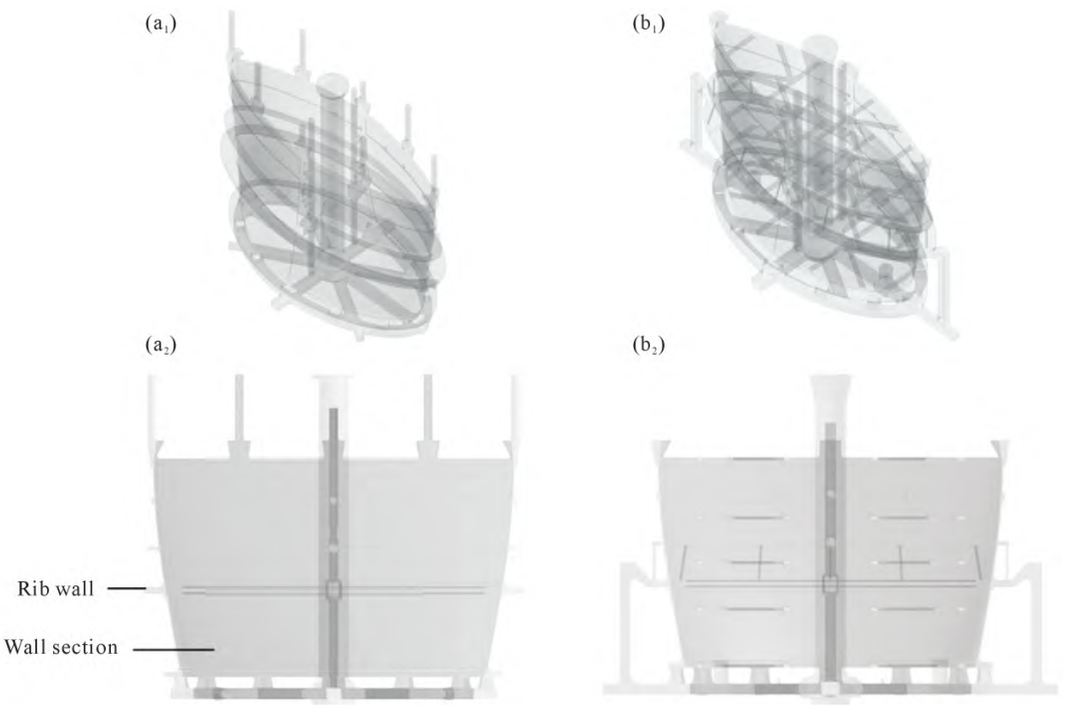

图 1 两种浇注系统的对比:(a_1, a_2) “中心浇道+米字型横浇道”系统的斜视图和侧视图;(b_1, b_2) 增设侧边辅助浇道后的优化系统的斜视图和侧视图

Fig.1 Comparison of the two gating systems: (a_1, a_2) oblique view and side view of the central and radial cross-runner system, respectively; (b_1, b_2) oblique view and side view of the optimized side auxiliary runner system, respectively

中国知网 https://www.cnki.net

表 3 连续形核模型所采用的主要形核参数
Tab.3 The main nucleation parameters adopted in the continuous nucleation model

Nucleation parameters	ΔT_{max}/K	ΔT_{σ}/K	N_{max}
Planar nucleation	1	0.1	1.0×10^{8}
Bulk nucleation density	50	2.0	9.0×10^{13}

金体系,在一定的过冷度条件下,晶体尖端的生长速率与过冷度之间的简化关系可表示为:

$$v(\Delta T)=\alpha_2\Delta T^2+\alpha_3\Delta T^3 \quad (3)$$

式中,$v(\Delta T)$为晶体尖端的生长速率;α_2 和 α_3 为生长动力学系数,与合金特性相关。对于 ZTA15 合金,上式可变为:

$$v(\Delta T)=4.039\times10^{-8}\Delta T^2+1.091\times10^{-8}\Delta T^2 \quad (4)$$

基于铸件的三维几何模型,结合实际陶瓷型壳的厚度及热导率参数,建立了陶瓷型壳有限元模型。对铸件及型壳模型进行网格划分,确保铸件在模拟过程中被陶瓷型壳完全包覆。随后,在不同浇注系统条件下,对模拟获得的温度场、速度场、凝固过程以及缩孔与缩松缺陷的形成概率进行分析,进一步探讨浇注系统优化设计对凝固组织演化的影响。模拟过程中所用参数如表 4 所示。

2 铸件浇注过程系统优化模拟结果分析

2.1 浇注过程温度场分析

不同浇注系统对铸件的温度分布的影响显著。如图 $2a_1$~a_4 所示,在采用"中心浇道+米字型横浇道"系统时(图 2),合金液主要通过中心浇道进入,并经米字型横浇道分流向铸件各部位扩散。浇注初期,中心区域温度超过 1 600 ℃,形成明显的热中心;而薄壁边缘部位温度梯度较大,局部温度降至 1 400 ℃以下,导致凝固不均匀,易在厚大区域(如加强筋部位)形成热节并诱发缩孔、缩松等缺陷。温度场呈由中心向外围辐射状分布,且流体冲击力较强,可能引起模壳局部过热。

表 4 ProCAST 浇铸过程有限元模拟参数
Tab.4. Simulation parameters used in the finite element simulation of the casting process with ProCAST

Pouring temperature /℃	Initial mold temperature /℃	Heat transfer coefficient /(W·m²·K⁻¹)	Solidus temperature /℃	Liquidus temperature /℃
1 725	300	750	1 443	1 684

图 $2b_1$~b_4 为增设两侧辅助浇道后的优化系统下的温度分布,该系统通过辅助浇道分流合金液,通过分流作用有效降低了壁面处的合金液流速,并为长轴两端及厚大部位提供了补缩通道。模拟结果表明,该系统显著改善了温度场的均匀性,中心热区温度降低至约 1 550 ℃,边缘温度梯度减小,整体温度分布稳定在 1 400~1 500 ℃范围内。优化后的系统不仅延长了合金液的充型时间,促进了夹渣与气体的排出,也提升了凝固过程的稳定性,减小了内部温度梯度波动。

2.2 浇注过程速度场分析

不同浇注系统对铸件浇注过程中合金液流速场分布具有显著影响。图 $3a_1$~a_4 为"中心浇道+米字型横浇道"系统的流速场分布图。浇注初期,合金液经中心浇道高速进入型腔,中心区域流速最高,最高可达 3.0 m/s 以上。随着熔体沿米字型横浇道向外扩散,流速逐渐降低至 1.0 m/s 以下。然而,由于中心流速较高,流体冲击力明显,特别是在厚大部位(如加强筋区域)易产生局部流速波动,从而对型壳壁面造

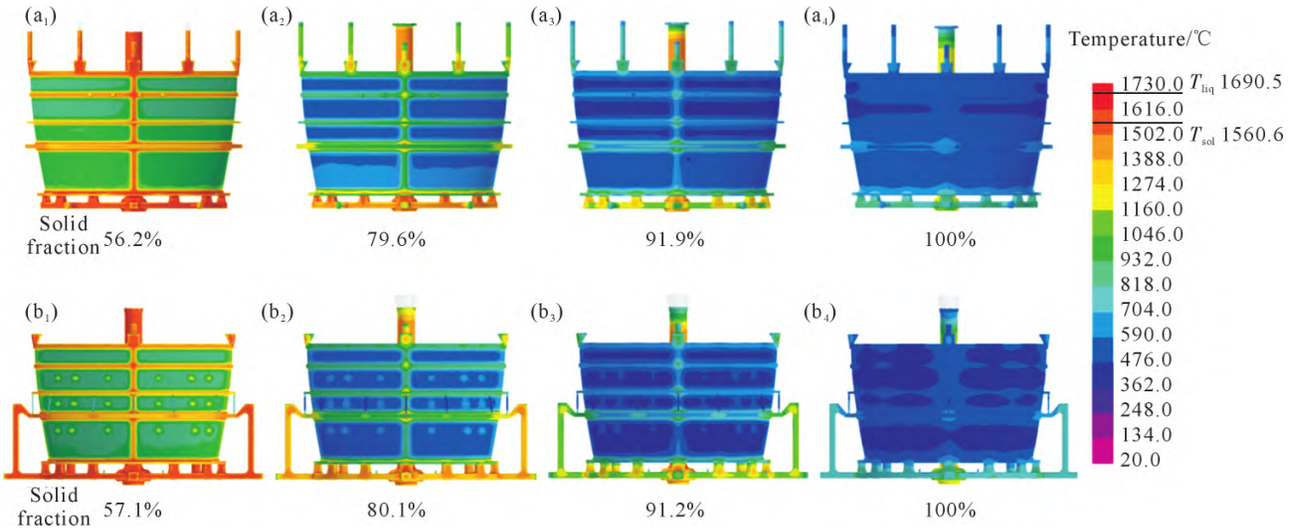

图 2 不同浇注系统下铸件浇注过程的温度分布:(a_1~a_4)"中心浇道+米字型横浇道"系统;(b_1~b_4)增设侧边辅助浇道的优化系统
Fig.2 Temperature field evolution during the filling process for different gating systems: (a_1~a_4) central and radial cross-runner system; (b_1~b_4) optimized side auxiliary runner system

中国知网 https://www.cnki.net

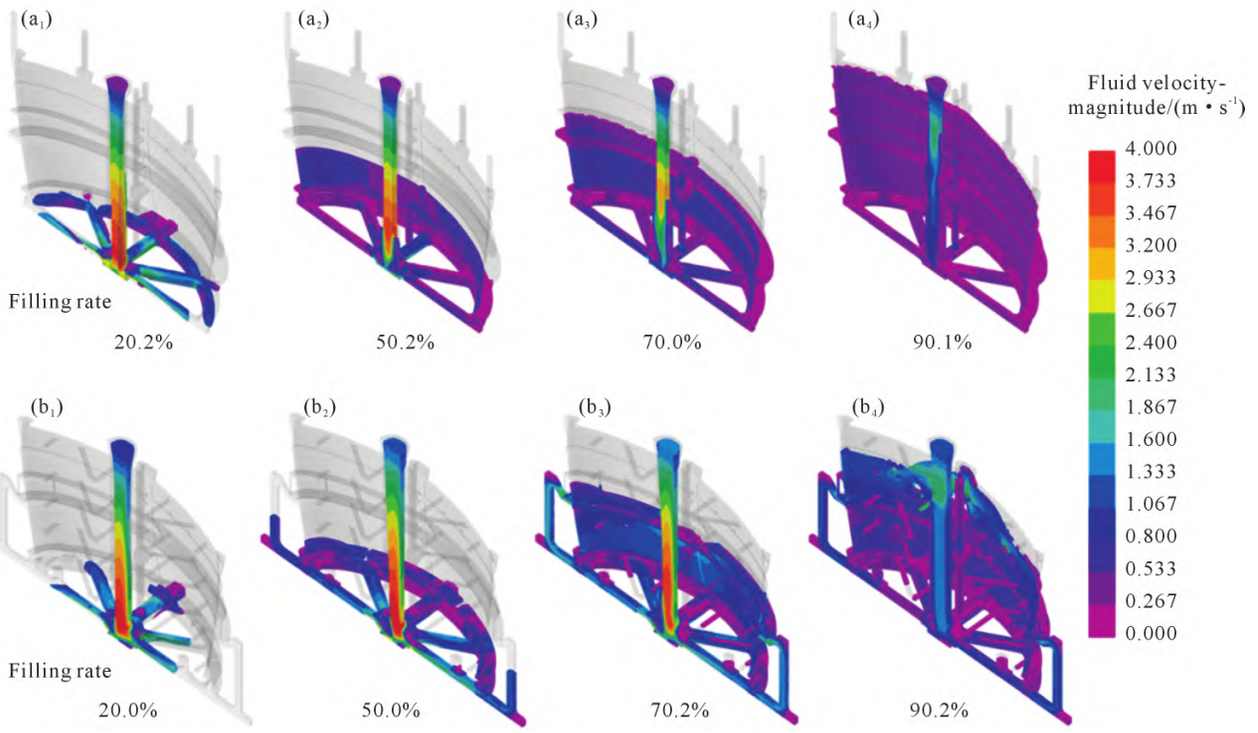

图 3 不同浇注系统铸件浇注过程的流速场:(a_1~a_4) “中心浇道+米字型横浇道”系统;(b_1~b_4) 增设侧边辅助浇道的优化系统

Fig.3 Flow velocity field during the filling process for different gating systems: (a_1~a_4) central and radial cross-runner system; (b_1~b_4) optimized side auxiliary runner system

成较大冲击,增加气孔与夹渣等缺陷的形成风险。与此同时,边缘薄壁区域的流速偏低,易出现充型不足或冷隔等问题。

图 $3b_1$~b_4 为采用侧边辅助浇道的优化系统的流速场分布。辅助浇道的引入有效分担了中心浇道的合金液流量,降低了型腔入口处的流速峰值,使铸件内部的流速分布更加均匀,整体控制在 0.2~0.8 m/s 范围内。该设计有效减缓了合金液对型壳的冲击,改善了流动稳定性。尤其是在铸件长轴两端及厚大部位的充型过程中,流速波动显著减小。模拟结果表明,优化后的流速场有助于抑制湍流与涡流的产生,从而降低气孔和夹渣等缺陷的形成概率,为获得高质量铸件提供了良好的工艺保障。

2.3 凝固过程与缺陷分析

不同浇注系统下铸件的凝固过程及缩孔分布分别如图 4 和 5 所示。在采用中心浇道与米字型横浇道系统时,铸件中心区域由于高温合金液集中输入,凝固时间较长,热节区域明显。凝固前沿由铸件边缘薄壁逐步向中心厚大部位推进。这种凝固顺序易导致缩孔和缩松等缺陷集中分布于中心厚大区域。如图 $5a_1$ 和 a_2 所示,在该浇注系统下,缩孔分布较为集中,缺陷体积较大,局部区域还伴随细小的疏松缺陷。

在采用侧边辅助浇道系统时,优化后的浇注系统通过有效的分流与补缩作用,使凝固前沿分布更加均匀,整体凝固时间明显缩短(图 $4b_1$~b_4)。辅助浇道为铸件长轴两端及厚大部位提供了额外的合金液补给,显著降低了热节区域的温度梯度。如图 $5b_1$ 和 b_2 所示,缩孔缺陷分布显著减少,主要集中于辅助浇道区域,铸件本体内的缩孔体积明显减小,疏松缺陷几乎被完全消除。

3 浇注系统优化前后模拟组织分析

图 6 为采用“中心浇道+米字型横浇道”浇注系统下的铸件微观组织模拟结果。该系统下铸件的晶粒尺寸较大,尤其在中心区域局部出现粗大的柱状晶。其主要原因在于高温合金液从中心浇道集中输入,导致凝固前沿温度梯度较低、冷却速率不足,从而延长了晶粒生长时间。此外,厚大部位的组织分布不均匀,易引起性能各向异性,对铸件整体力学性能产生不利影响。

铸件的微观组织模拟结果如图 7 所示,在侧边增设辅助浇道系统后,显示出等轴晶率有所降低,铸件壁内外组织分布均匀性有所改善的趋势。辅助浇道的分流作用有效降低了合金液的过热程度,加快了冷却速率,并改善了凝固前沿的温度梯度与流场稳定性,从而促进等轴晶率降低。模拟结果还显示,优化系统下铸件内部未发现明显微孔缺陷,晶界分布更为均匀,组织致密性显著提高。该仿真结果与

中国知网 https://www.cnki.net

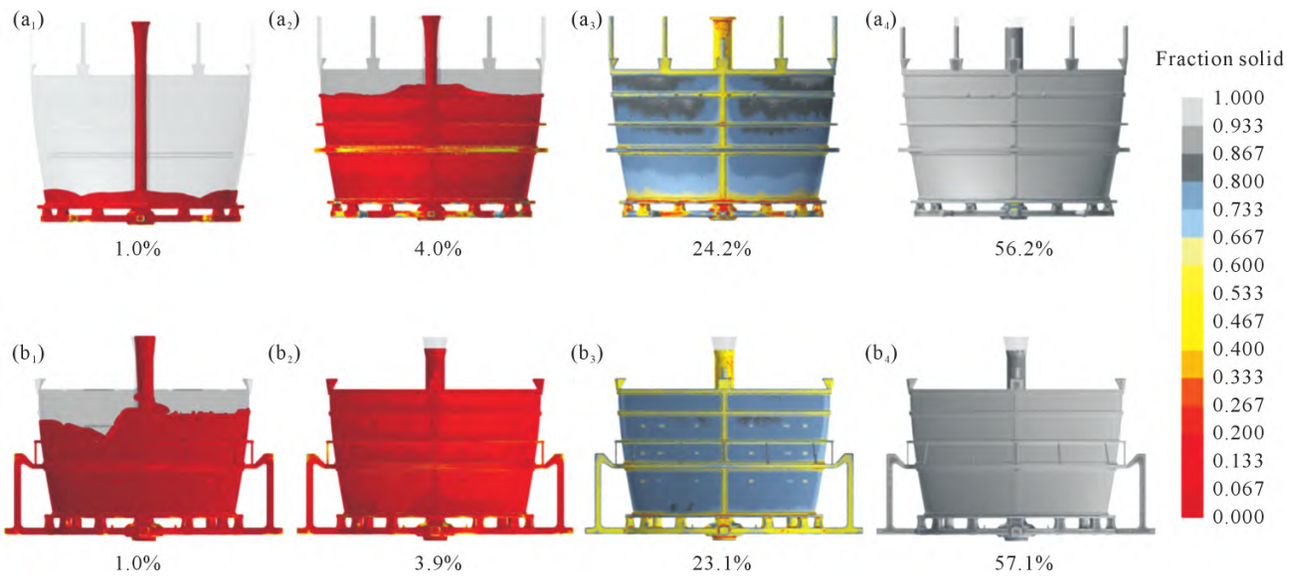

图 4　不同浇注系统铸件的凝固过程:(a_1~a_4) “中心浇道+米字型横浇道”系统;(b_1~b_4) 增设侧边辅助浇道的优化系统

Fig.4　Solidification process during the filling process for different gating systems: (a_1~a_4) central and radial cross-runner system; (b_1~b_4) optimized side auxiliary runner system

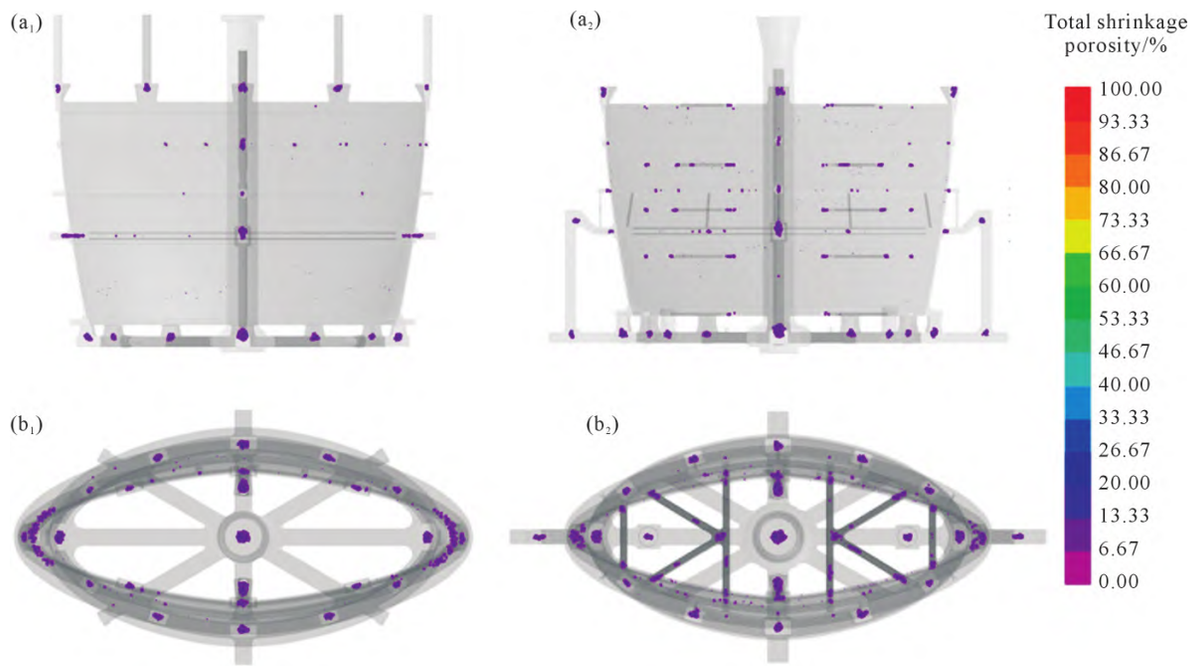

图 5　不同浇注系统铸件的缩孔分布:(a_1, a_2) “中心浇道+米字型横浇道”系统;(b_1, b_2) 增设侧边辅助浇道的优化系统

Fig.5　Distribution of shrinkage porosity in castings under different gating systems: (a_1, a_2) central and radial cross-runner system; (b_1, b_2) optimized side auxiliary runner system

温度场和流速场的演化规律保持一致，证实侧边辅助浇道结构可显著优化铸件微观组织，通过模拟明析了不同浇道设计下晶粒形态的演变差异，为改善ZTA15 钛合金薄壁铸件的力学性能和抗疲劳性能提供理论基础。

4　结论

(1)中心浇道与米字型横浇道系统在浇注过程中易形成高温热中心和较大温度梯度，导致流速波动明显,凝固不均匀,缩孔和疏松缺陷集中于厚大部位,晶粒尺寸较大且组织分布不均。

(2)优化后的侧边辅助浇道系统通过分流与补缩作用,显著改善温度场和流速场的均匀性,降低合金液对型壳的冲击,减少气孔和夹渣缺陷,同时使凝固过程更加平稳，缩孔和疏松缺陷被有效引导至浇注系统内部。

(3)采用辅助浇道的铸件微观组织更加均匀,微孔缺陷减少,组织致密性提高,通过模拟揭示了不同

中国知网　https://www.cnki.net

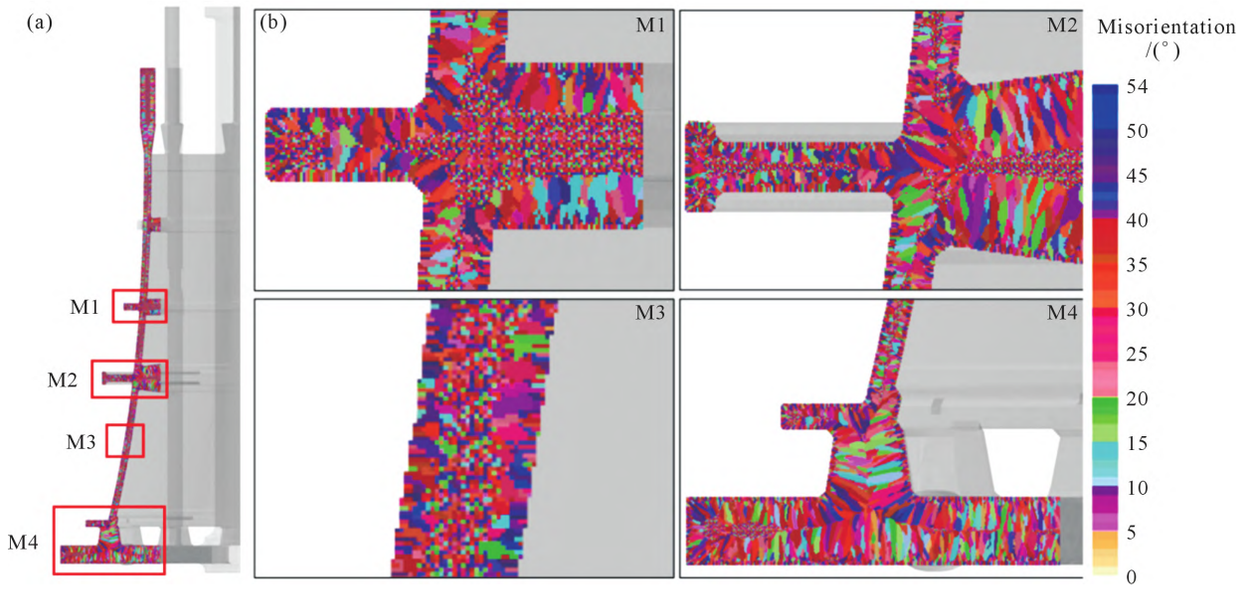

图 6 “中心浇道+米字型横浇道”浇注系统下铸件的微观组织模拟结果：(a) 整体铸件壁面的微观组织；(b) M1-M4 区域内的局部微观组织

Fig.6 Simulated microstructures of the casting produced with the central and radial cross-runner system: (a) microstructure along the casting wall; (b) local microstructures in regions M1-M4

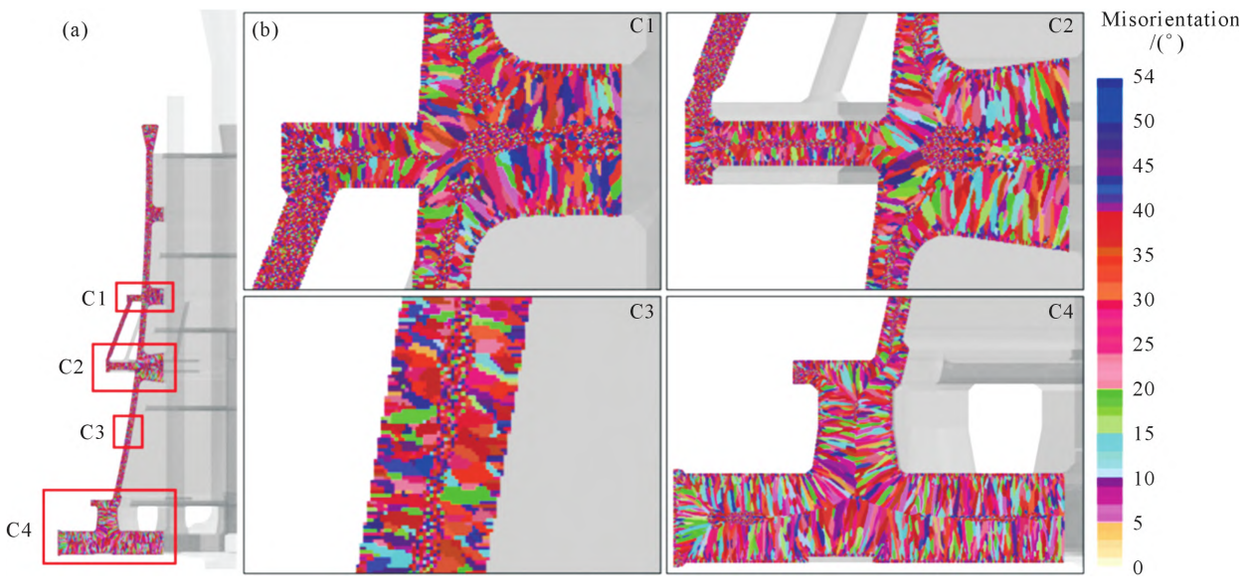

图 7 侧边辅助浇道优化系统下铸件的微观组织模拟结果：(a) 整体铸件壁面的微观组织；(b) C1-C4 区域内的局部微观组织

Fig.7 Simulated microstructures of the casting produced with the optimized side auxiliary runner system: (a) microstructure along the casting wall; (b) local microstructures in regions C1-C4

浇道设计下晶粒形态的相对变化规律，为提升铸件力学性能及抗疲劳性能提供保障。该优化方案为大尺寸、薄壁、复杂结构钛合金精密铸件的生产提供了重要的工艺参考。

参考文献：

[1] 张龙飞，郭钊，谭诗薪，蒋明. 航空发动机异形构件精密铸造技术[J]. 航空动力，2022(3): 75-78.
ZHANG L F, GUO Z, TAN S X, JIANG M. Investment casting technology of irregularly-shaped structural components in aero engine[J]. Aerospace Power, 2022(3): 75-78.

[2] 赖道辉，丁博，刘军，薛刊，甘国荣. 某航空发动机高硬度薄壁异形环形件加工技术[J]. 金属加工，2023(10): 10-14.

[3] GOMEZ-GALLEGOS A, MANDAL P, GONZALEZ D, ZUELLI N, BLACKWELL P. Studies on titanium alloys for aerospace application[J]. Defect and Diffusion Forum, 2018, 385: 419-423.

[4] WILLIAMS J C, BOYER R R. Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components[J]. Metals, 2020, 10(6): 705.

[5] TAO P, SHAO H, JI Z J, NAN H, XU Q Y. Numerical simulation for the investment casting process of a large-size titanium alloy thin-wall casing[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28(4): 520-528.

[6] CHEN Y Y, ZHAO E T, KONG F T, XIAO S L. Fabrication of thin-walled high temperature titanium alloy component by invest-

中国知网 https://www.cnki.net

ment casting [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28 (4-6): 605-609.

[7] 孙冰,王易山,孙宏喆,乔海滨,李渤渤,王非. ZTA15 钛合金小型复杂厚壁类铸件的缩孔分析及工艺改进[J]. 特种铸造及有色合金,2023, 43(1): 102-105.
SUN B, WANG Y S, SUN H Z, QIAO H B, LI B B, WANG F. Shrinkage cavity analysis and process improvement of small and complex thick-wall ZTA15 titanium alloy castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1): 102-105.

[8] 侯亚娟,董礼,王维暄,张彦明,赵桂庆. ZTA15 钛合金薄壁壳体加工工艺试验研究[J]. 工具技术,2020, 54(9): 65-68.
HOU Y J, DONG L, WANG W X, ZHANG Y M, ZHAO G Q. Experimental study on processing technology of ZTA15 titanium alloy thin-walled shell[J]. Tool Engineering, 2020, 54(9): 65-68.

[9] 刘天翼,李重阳,于仓瑞,刘时兵,史昆,曲赫威. 氧含量对ZTA15 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2025, 45 (2): 66-72.
LIU T Y, LI C Y, YU C R, LIU S B, SHI K, QU H W. Effect of oxygen content on microstructure and mechanical properties of ZTA15 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(2): 66-72.

[10] UWANYUZE R S, KANYO J E, MYRICK S F, SCHAFFÖNER S. A review on alpha case formation and modeling of mass transfer during investment casting of titanium alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 865: 158558.

[11] NDUKWE A I. Review of recent findings on investment casting of titanium alloys[J]. Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2022, 20(2): 99-108.

[12] 刘高扬,赵文侠,王曦. ZTA15 钛合金铸件异常组织形成及对拉伸行为的影响[J]. 航空材料学报,2020, 40(4): 45-51.
LIU G Y, ZHAO W X, WANG X. Formation of abnormal structure in ZTA15 titanium alloy casting and its impact mechanism on tensile behavior[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(4): 45-51.

[13] HAN S L, LUO H L, LI S P, HAN G W. Optimization of casting process parameters for solidification structures in complex superalloy castings[J]. Materials, 2025, 18(17): 4205.

[14] ZHU X P, ZHU C L, LIN B S, WANG Z D. Research on optimization design of cast process for TiAl case casting [J]. Metals, 2022, 12(11): 1954.

[15] LIAO Q GE P, LU G X, SONG Y, YE W H, GAO J P, LUO X. Simulation study on the investment casting process of a low-cost titanium alloy gearbox based on ProCAST[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, 2022(1): 4484762.

[16] DONG J, JIANG J F, WANG Y, QIN T X, HUANG M J, CUI J B, ZHANG X D, KONG L B, CHEN J L. Research on numerical simulation and integrated die casting process of large complex thin-walled aluminum alloy automobile rear floor[J]. Results in Engineering, 2025, 26: 105399.

[17] GAŠPÁR Š, CORANIČ T, MAJERNÍK J, HUSÁR J, KNAČÍKOVÁ L, GOJDAN D, PAŠKO J. Influence of gating system parameters of die-cast molds on properties of Al-Si castings[J]. Materials, 2021, 14(13): 3755.

[18] 邵珩,李岩,南海,许庆彦. 熔模铸造条件下 Ti6Al4V 合金铸件与陶瓷型壳间界面换热系数研究[J]. 金属学报,2015, 51: 976-984.
SHAO H, LI Y, NAN H, XU Q Y. Research on the interfacial heat transfer coeffecient between casting and ceramic shell in investment casting process of Ti6Al4V alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51: 976-984.

[19] ZHANG S Y, LI J S, KOU H C, YANG J R, YANG G, WAN J. Effect of mold temperature and casting dimension on microstructure and tensile properties of counter-gravity casting Ti-6Al-4V alloys [J]. China Foundry, 2016, 13: 9-14.

[20] ZHANG S Y, LI J S, KOU H C, YANG J R, YANG G, WANG J. Numerical modeling and experiment of counter-gravity casting for titanium alloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85: 1877-1885.

[21] RAPPAZ M, GANDIN C A. Probabilistic modelling of microstructure formation in solidification processes[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1993, 41(2): 345-360.

[22] FLOOD S C, HUNT J D. Columnar and equiaxed growth: I. A model of a columnar front with a temperature dependent velocity [J]. Journal of Crystal Growth, 1987, 82(3): 543-551.

[23] ZHU M F, HONG C P. A modified cellular automaton model for the simulation of dendritic growth in solidification of alloys[J]. ISIJ International, 2001, 41(5): 436-445.

(责任编辑:宫文婧)

中国知网 https://www.cnki.net