基于田口法的离心铸造 TiAl 合金环形件组织调控工艺参数优化

苏聪聪[1]，黄　刚[1]，党　乾[1]，王　晔[2]，刘国怀[1]

（1. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室，辽宁沈阳 110819；
2. 哈尔滨理工大学材料科学与工程学院，黑龙江哈尔滨 150008）

摘要：为了获得TiAl合金环形件离心铸造过程中离心转速、浇注温度、浇注速度和模具预热温度对TiAl合金铸环凝固组织的影响规律，通过数值仿真和田口法，并利用晶粒尺寸和缩孔率的信噪比结果作为衡量铸件质量的指标，从而优化离心铸造工艺参数。试验结果表明：各工艺参数对晶粒尺寸影响因素大小依次为浇注速度、浇注温度、离心转速、铸型预热温度。各工艺参数对缩孔率影响因素大小则依次为浇注速度、离心转速、浇注温度、铸型预热温度。以晶粒细化程度最大、缩孔率最小作为优化目标时，最优工艺参数为离心转速600 r/min、浇注温度1 620 ℃、浇注速度200 mm/s和型壳预热温度150 ℃。试验验证结果表明，该工艺参数制备出晶粒细小、组织致密的优质TiAl合金铸件。

关键词：离心铸造；TiAl合金；田口法；凝固组织；平均晶粒尺寸；缩孔率

TiAl合金因其突出的高温性能在航空航天领域有极大的应用前景。但是由于TiAl合金独特的性质，传统的铸造工艺制备的TiAl合金铸件会出现冷隔、浇不足等问题，从而导致TiAl合金铸件存在后期机械加工困难及生产成本较高等问题[1-2]。因此，为了降低TiAl合金的生产成本，人们越来越关注各种近净成形制造工艺，例如精密铸造、粉末冶金和超塑性成形等。精密铸造技术在工程应用中备受瞩目，其具有简化铸造工艺、提高铸件成形率的特性，在降低制造成本方面展现出了独特优势[3]。

立式离心铸造是一种典型的近净成形工艺[4]。该工艺能够提高金属利用率，减少铸造缺陷。同时，离心力可以加速熔体中杂质的排出，加速熔体散热，调节晶核的生长，获得结构致密、填充均匀、缺陷少的高性能铸件[5]。合适的离心铸造工艺能够改善TiAl合金环形铸件的充型能力，改善铸件凝固组织，提高力学性能[6-7]。但是离心铸造工艺参数对铸件质量及其凝固组织的影响比较复杂，包括离心转速、浇注温度、浇注速度、模具的预热温度等[8-9]。为了获得最佳离心工艺条件，需要考虑多个因素的共同影响。优化工艺参数的方法很多，如人工神经网络法、主成分分析法、田口法等[10-12]。为了达到对多个参数进行优化并且节约算法，可以采用田口法进行分析。该方法根据提供的影响因子，设计正交试验组别验证，利用信噪比等结果以最少试验次数获得的最佳参数组合条件[13]。但在影响因子较多的情况下，通过试制方法仍会耗费大量时间和成本，而数值模拟技术的应用则可以更好地避免这一问题。且该方法目前非常成熟并广泛应用于预测铸造成形过程和优化铸造参数的设计生产中。ProCAST软件是通过有限元（FEM）的技术和综合分析的方法对铸造过程的充型、凝固等过程进行仿真的商业化软件。该软件可以实现离心铸造工艺参数的有效调整，是铸造工艺的有效辅助工具。刘佳斌等人[14]利用ProCAST对轴承座铸件铸造工艺优化，有效地阻止了铸件缺陷的产生。杨亮等人[15]采用ProCAST研究了不同离心转速对叶片充型、凝固过程的影响规律，并确定出了最佳离心转速。

作者简介：
苏聪聪（1999–），女，硕士，主要从事离心铸造TiAl合金仿真模拟及组织性能研究。E-mail：scc15665881651@163.com
通讯作者：
刘国怀，男，副教授，博士，硕士生导师。电话：18640078343，E-mail：liuguohuai007@163.com

中图分类号：TG249.4；TG146.2
文献标识码：A
文章编号：1001-4977（2024）10-1420-09

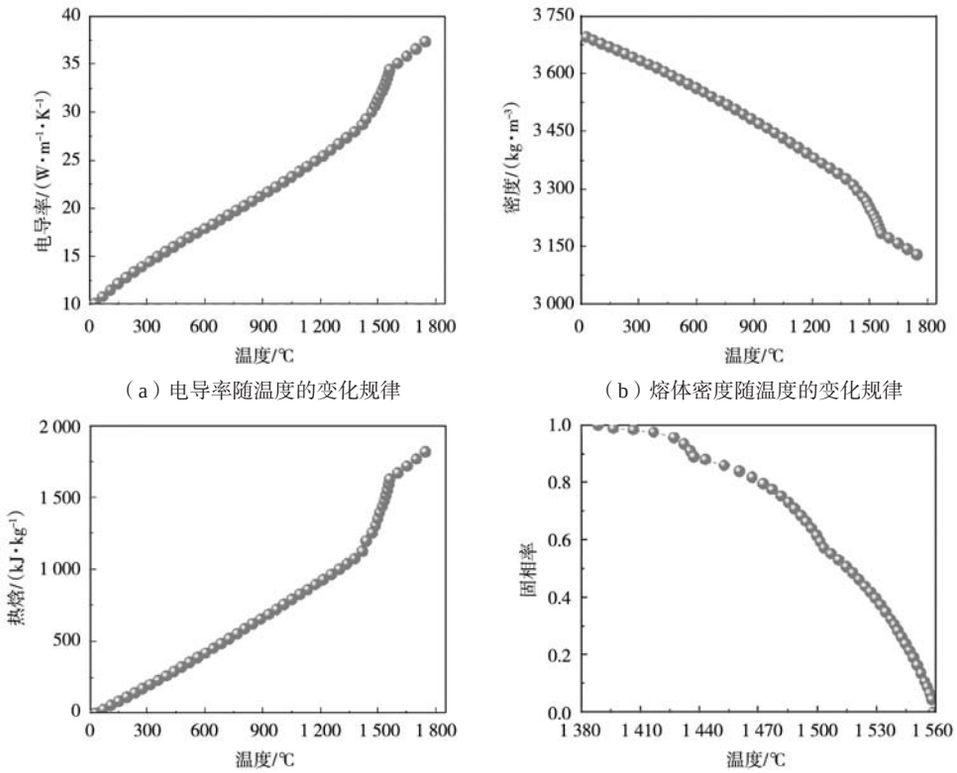
收稿日期：
2023–12–25 收到初稿，
2024–04–08 收到修订稿。

铸件的凝固组织直接决定了铸件质量及力学性能。因此本文通过ProCAST有限元铸造模拟软件对Ti-46Al环形铸件离心铸造过程进行模拟，结合田口法研究离心转速、浇注温度、浇注速度以及模具预热温度对铸件凝固组织包括晶粒尺寸和缩孔、缩松缺陷的影响规律，分析离心铸造各工艺参数对铸件平均晶粒尺寸和缩孔率的影响，确定最佳工艺参数组合，获得质量良好的铸件。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用Ti-46Al合金作为铸件材料、45#钢作为铸型材料通过离心铸造方法制备环形件。由ProCAST数据库中得到Ti-46Al液相线温度为1 558 ℃，固相线温度为1 388 ℃，计算获得Ti-46Al合金的主要热物性参数如图1所示。铸型材料的热物性参数直接选取ProCAST数据库中的45#钢材料。



（a）电导率随温度的变化规律　（b）熔体密度随温度的变化规律

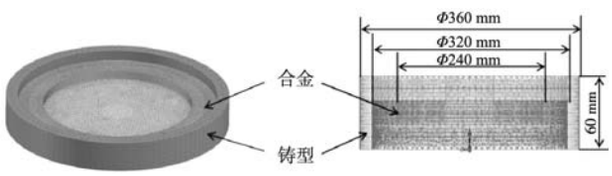
（c）热焓随温度的变化规律　（d）固相率随温度的变化规律

图1 Ti-46Al合金热物性参数

Fig. 1 Thermal properties of the Ti-46Al alloy

1.2 仿真模型的建立和参数设计

使用外径为320 mm、内径为240 mm、高度为20 mm实际环形铸件进行建模。并通过SIEMENS.25公司的Unigraphics NX12.0软件设计了铸件、浇注系统和模具的三维几何模型，文件形式导出为*.x_t文件，通过ProCAST软件中的MeshCAST模块将几何模型转换为*.vdb文件，利用网格剖分模块将模型化分有限元网格，铸件、模具、浇注系统的有限元网格尺寸分别为3 mm、10 mm、5 mm[16]，模拟划分总网格数为约483 157。模型建模结构图如图2所示。



（a）铸件和铸型的三维数模　（b）铸件网格划分结果

图2 Ti-46Al离心铸环的数模和有限元网格

Fig. 2 Numerical modeling and finite element meshing of the Ti-46Al centrifugally cast rings

1.3 仿真试验设计

利用有限元软件ProCAST中的CAST模块对网格划分后的模型进行边界条件设置。采用底注式浇注工艺，计算时铸型沿浇道中心轴线顺时针方向旋转，模具与铸件间的界面为COINC，换热系数设置为1 500 W/（m^2·K）[17]，金属型外表面设置为空冷。为了确定影响立式离心铸

造凝固组织的工艺参数，构建了如图3所示的因果图。并选择离心速度（A）、浇注温度（B）、浇注速度（C）和模具预热温度（D）四个工艺参数作为研究对象，分析各参数对铸造凝固组织的影响。每个参数的研究水平如表1所示。

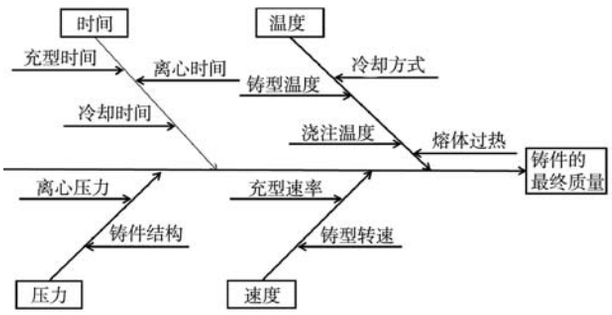


图3 影响立式离心铸件质量的因素

Fig. 3 Factors influencing the quality of the vertical centrifugal castings

表1 离心铸造工艺参数及其水平

Table 1 Parameters and levels of the centrifugal casting process

试验水平	工艺参数			
	离心转速 A/（r·min^{-1}）	浇注温度 B/℃	浇注速度 C/（mm·s^{-1}）	铸型预热温度D/℃
1	200	1 580	100	20
2	400	1 620	150	150
3	600	1 660	200	300
4	800	1 700	250	500
5	1 000	1 740	300	700

利用ProCAST软件中CAFE模块中对铸件的凝固组织进行模拟并统计平均晶粒尺寸，通过试验测得Ti-46Al合金的形核参数如表2所示。其中，DT_m为平均形核过冷度，DT_s为平均面形核过冷度和平均体形核过冷度，G_{max}为最大体积面形核系数，N_{max}为最大体积体形核系数。

表2 Ti-46Al合金形核参数

Table 2 Nucleation parameters for the Ti-46Al alloy

面形核			体形核		
DT_m /℃	DT_s /℃	G_{max} /m^{-2}	DT_m /℃	DT_s /℃	G_{max} /m^{-3}
10	5	1.5×10^8	15	10	1.5×10^9

此外，利用的高级缩孔、缩松模型（APM）计算铸件缩孔率。缩孔率的计算公式可以表示为：

$$y_i(\%)=\frac{V_{porosity}}{V_{casting}}\times100\% \qquad (1)$$

式中：y_i为第i个水平的计算量，i为这个试验组别的数量。$V_{porosity}$为每个工艺水平条件下由高级缩孔、缩松模型（APM）计算得到的铸件缩孔、缩松体积，$V_{casting}$为铸件的总体积。

1.4 田口法试验设计

为了获得最合适的工艺组合，采用田口法建立四个铸造工艺参数对Ti-46Al铸件平均晶粒尺寸和缩孔率的影响，实现对铸件凝固组织的多目标优化。根据表1所列出的工艺参数及其水平，选用L_{25}（5^4）的正交阵列进行分析，正交试验设计结果如表3所示。采用田口法中信噪比（S/N）用于评估质量特性，以进行更好地优化分析。根据特性的类型，有几种S/N比可用，包括“望小特性”（LB）、“望目特性”（NB）和“望大特性”（HB）。根据模拟结果需要获得最小平均晶粒尺寸和最低缩孔率，因此，本文采用望小特性（LB）

表3 正交试验组合表

Table 3 Orthogonal experimental combinations table

试验次数	工艺参数			
	离心转速 A/（r·min^{-1}）	浇注温度 B/℃	浇注速度 C/（mm·s^{-1}）	铸型预热温度D/℃
1	200	1 580	100	20
2	200	1 620	150	150
3	200	1 660	200	300
4	200	1 700	250	500
5	200	1 740	300	700
6	400	1 580	150	300
7	400	1 620	200	500
8	400	1 660	250	700
9	400	1 700	300	20
10	400	1 740	100	150
11	600	1 580	200	700
12	600	1 620	250	20
13	600	1 660	300	150
14	600	1 700	100	300
15	600	1 740	150	500
16	800	1 580	250	150
17	800	1 620	300	300
18	800	1 660	100	500
19	800	1 700	150	700
20	800	1 740	200	20
21	1 000	1 580	300	500
22	1 000	1 620	100	700
23	1 000	1 660	150	20
24	1 000	1 700	200	150
25	1 000	1 740	250	300

的信噪比（S/N）[18]进行分析研究。望小特性信噪比的计算公式如下：

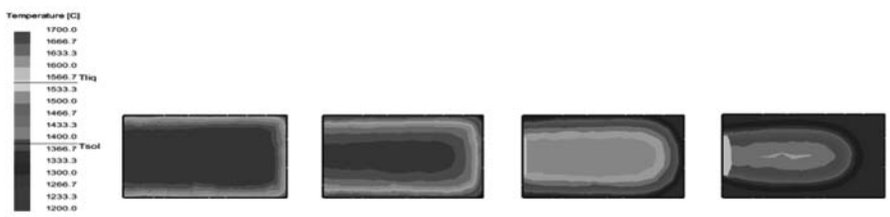
$$S/N=-10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i^2\right) \qquad (2)$$

式中：n为该试验组别的总次数，y_i为第i个水平的缩孔率，i为试验组别的数量。

2 仿真试验结果与分析

2.1 环形铸件凝固组织演变及缩孔、缩松形成机制

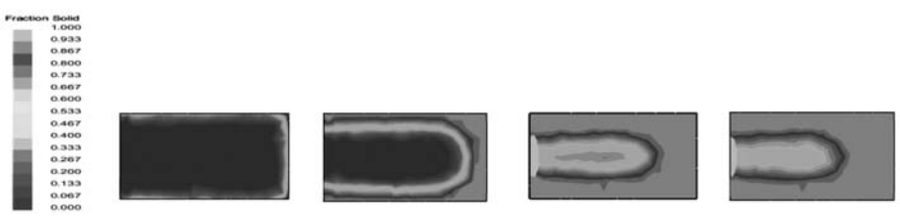
图4和图5分别显示了凝固过程中，铸件温度和固相率的变化情况。从图可以看出，离心铸造凝固过程是通过外向内的逐层顺序凝固方式完成的。铸件凝固过程中金属液不断向凝固位置补缩，使得最终凝固位置位于铸件中心靠近内壁一侧，导致铸件内侧因收缩形成缩孔。由图6显示的铸件凝固组织形成过程可知，离心铸造铸件凝固组织由激冷晶区、柱状晶区以及内部等轴晶区组成。铸型的激冷作用对凝固组织影响很大，金属型铸件提供的激冷作用使得接触模具内壁的液态金属获得较大的过冷度，形成晶粒细小的等轴晶。随后，温度下降，凝固速度降低，形成柱状晶，由于垂直于模具器壁方向上温度梯度最大，柱状晶垂直于模具内壁方向生长。当柱状晶前沿温度下降到一定程度时，内部各方向同时凝固，形成大量形核质点，且不断生长，形成粗大等轴晶。此外，铸件凝固过程中，柱状晶前端相互搭接以及内部等轴晶粒的自由生长，导致熔体流动受到阻碍，形成孤立液相区，最终导致铸件内部缩孔等缺陷的形成。晶粒尺寸的大小以及缩孔的存在会导致环件的力学性能下降，同时会影响后续加工和轧制处理的进行。因此，合理调控离心铸造工艺条件，可以控制熔体流动状态及凝固规律，能实现对离心铸造环件凝固组织的合理调控。



（a）6.2%　（b）18.5%　（c）51.1%　（d）87.9%

图4　铸件温度场的变化

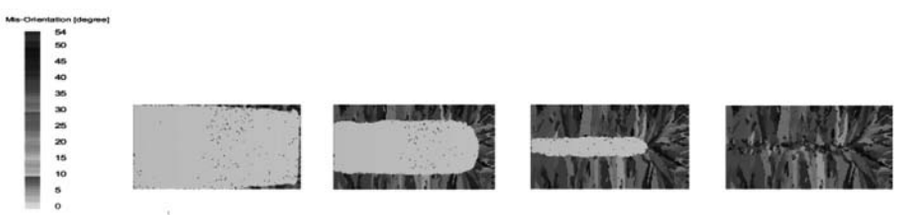
Fig. 4 Changes in the temperature field of the castings



（a）12.0%　（b）27.4%　（c）50.1%　（d）89.1%

图5　铸件固相率的变化

Fig. 5 Changes in the solid fraction of the castings



（a）12.0%　（b）27.4%　（c）89.1%　（d）100%

图6　铸件凝固组织的变化

Fig. 6 Evolution of microstructure of the castings

2.2 基于田口法优化工艺参数分析

为了探究各工艺参数对铸件凝固组织影响程度的大小，并且确定最优工艺参数组合，统计了表3试验条件下仿真获得的平均晶粒尺寸以及缩孔率。并利用望小特性的计算方法获得了不同目标的信噪比。计算结果列于表4。模拟离心铸造工艺参数对平均晶粒尺寸以

表4　正交试验结果及其信噪比
Table 4 Orthogonal experiment results and *S*/*N* ratios

试验序号	A	B	C	D	晶粒平均尺寸/μm	*S*/*N*	缩孔率/%	*S*/*N*
1	1	1	1	1	641.11	−56.138 7	4.356 14	−12.7820
2	1	2	2	2	727.44	−57.235 9	4.166 34	−12.395 1
3	1	3	3	3	849.49	−58.583 2	2.613 16	−8.343 3
4	1	4	4	4	936.83	−59.433 2	3.021 13	−9.603 4
5	1	5	5	5	954.05	−59.591 4	3.372 59	−10.559 3
6	2	1	2	3	690.42	−56.782 3	3.466 31	−10.797 4
7	2	2	3	4	829.110	−58.372 1	3.587 13	−11.0950
8	2	3	4	5	873.62	−58.826 5	2.940 28	−9.367 8
9	2	4	5	1	937.76	−59.441 8	3.273 84	−10.301 1
10	2	5	1	2	757.70	−57.589 9	3.867 07	−11.747 6
11	3	1	3	5	779.56	−57.8370	3.101 50	−9.831 4
12	3	2	4	1	807.12	−58.138 8	2.579 25	−8.229 9
13	3	3	5	2	897.57	−59.061 4	2.647 11	−8.455 4
14	3	4	1	3	714.37	−57.078 5	3.423 13	−10.688 5
15	3	5	2	4	775.31	−57.789 5	3.024 58	−9.613 3
16	4	1	4	2	694.96	−56.839 1	2.751 59	−8.791 7
17	4	2	5	3	789.54	−57.947 4	2.514 08	−8.007 6
18	4	3	1	4	698.56	−56.884 1	3.841 16	−11.689 2
19	4	4	2	5	865.16	−58.741 9	4.166 34	−12.395 1
20	4	5	3	1	921.25	−59.287 6	2.428 77	−7.707 7
21	5	1	5	4	786.06	−57.909 1	3.593 64	−11.110 7
22	5	2	1	5	700.60	−56.909 4	3.816 77	−11.633 9
23	5	3	2	1	656.11	−56.339 5	4.598 90	−13.253 1
24	5	4	3	2	854.96	−58.638 9	2.542 06	−8.103 7
25	5	5	4	3	967.45	−59.712 6	3.949 68	−11.931 2

及缩孔率影响的分析结果如表5、表6以及图7、图8所示。

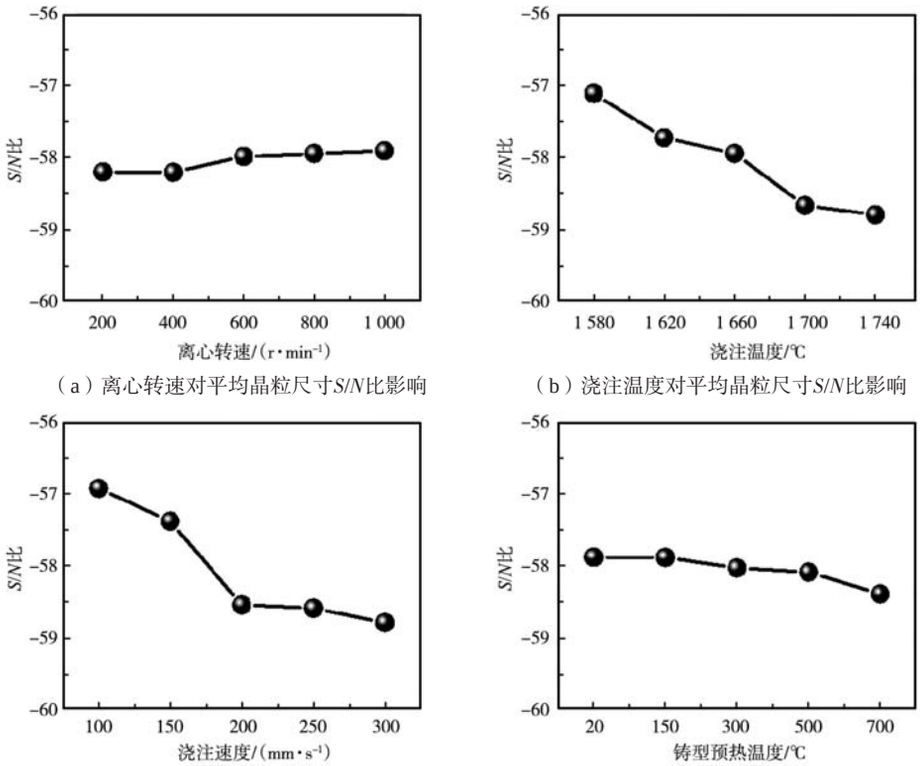
由图7可以看出，对晶粒尺寸影响最大的工艺参数是浇注速度和浇注温度，其次是铸型的预热温度，影响最小的是离心转速。浇注速度为 100 mm/s时，晶粒平均尺寸最小，随着浇注速度的提高，单位时间浇注的液态金属体积增多，温度梯度增大，有利于柱状晶的生长并导致平均晶粒尺寸增大；浇注温度从1 580 ℃升高至 1 740 ℃时，凝固时间增长，柱状晶生长时间充分，晶粒尺寸增大；离心转速提高，铸件的散热速度加快，冷却速度提高，晶粒细化；提高铸型预热温

表5　平均晶粒尺寸信噪比的均值响应表
Table 5 Mean response table for *S*/*N* ratios of the mean grain size

水平	A	B	C	D
1	−58.196 5	−57.101 2	−56.920 1	−57.869 3
2	−58.202 5	−57.720 7	−57.377 8	−57.873 1
3	−57.981 0	−57.938 9	−58.543 7	−58.020 8
4	−57.940 0	−58.666 9	−58.590 0	−58.077 6
5	−57.901 9	−58.794 2	−58.790 2	−58.381 2
误差	0.300 6	1.693 0	1.870 1	0.512 0
等级	4	2	1	3

表6　缩孔率信噪比的均值响应表
Table 6 Mean response table for *S*/*N* ratios of the porosity

水平	A	B	C	D
1	−10.736 6	−10.662 6	−11.708 3	−10.454 8
2	−10.661 8	−10.272 3	−11.690 8	−9.898 7
3	−9.363 7	−10.221 8	−9.016 2	−9.953 6
4	−9.718 3	−10.218 4	−9.584 8	−10.622 3
5	−11.206 5	−10.311 8	−9.686 8	−10.757 5
误差	1.842 8	0.444 3	2.692 0	0.858 8
等级	2	4	1	3

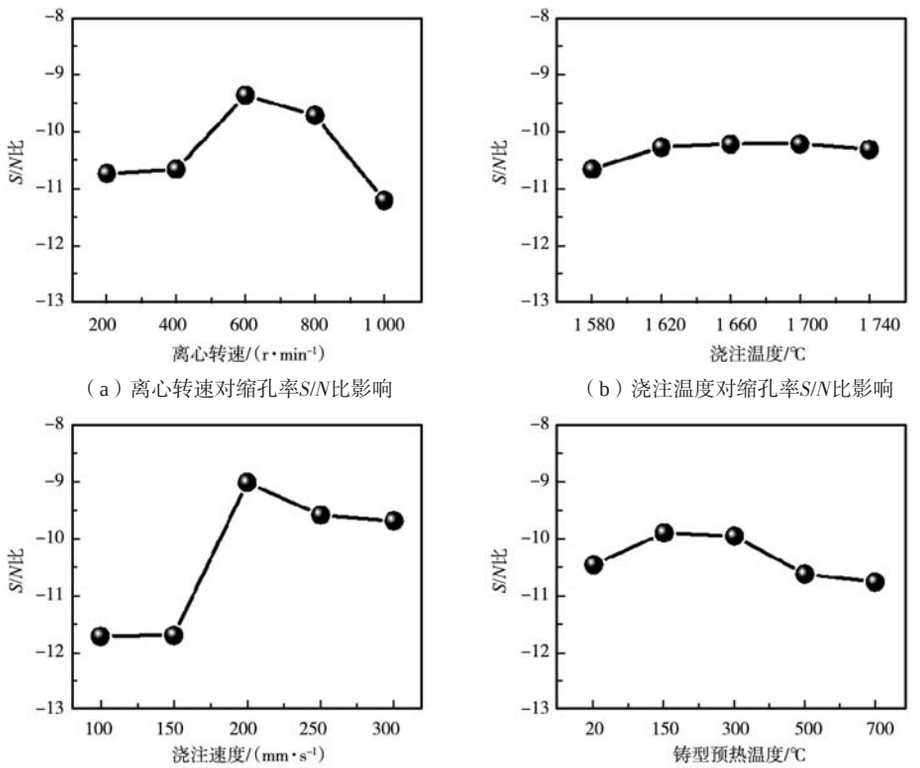


（a）离心转速对平均晶粒尺寸*S/N*比影响　（b）浇注温度对平均晶粒尺寸*S/N*比影响

（c）浇注速度对平均晶粒尺寸*S/N*比影响　（d）铸型预热温度对平均晶粒尺寸*S/N*比影响

图7　平均晶粒尺寸S/N比响应曲线

Fig. 7 Response curves of S/N Ratios for the mean grain size



（a）离心转速对缩孔率*S/N*比影响　（b）浇注温度对缩孔率*S/N*比影响

（c）浇注速度对缩孔率*S/N*比影响　（d）铸型预热温度对缩孔率*S/N*比影响

图8　缩孔率*S/N*比响应曲线

Fig. 8 Response curves of *S/N* Ratios for the porosity

度减小了铸型与液体金属间温度差，导致凝固速度减慢，晶粒尺寸增大。

综合以上四个因素对晶粒尺寸影响可知，以细化晶粒尺寸为目标时，应选择的最佳工艺参数组合为A5B1C1D1，其对应值为离心转速1 000 r/min、浇注温度1 580 ℃、浇注速度100 mm/s和型壳预热温度20 ℃。

由图8可以看出，影响离心铸造Ti-46Al铸环缩孔率的最主要的工艺参数是浇注速度，其次是离心转速，铸型预热温度、浇注温度的影响相对较小。根据田口法，各工艺参数的信噪比越大，则计算结果在目标值附近的方差越小，对缩孔率的影响越大。浇注速度较低时，金属液在离心力的作用下在型腔内飞溅，充填稳定性低，且充填时间过长，不利于充型。过高的浇注速度会引起合金液剧烈的湍流，在浇注过程中容易卷气，导致铸件缩孔缺陷增加；而离心转速提高，熔体受到的离心力越大，有利于铸件充型，同时熔体的补缩压力提高，有利于减少缩孔的产生。离心转速从600 r/min升高至1 000 r/min时，*S*/*N*值减小，说明转速提高过多仍会使铸件缩孔率增大，这主要是由于转速过高会导致已充型的熔体产生剧烈对流，导致铸件缺陷增多。浇注温度升高，金属液的流动性加强，补缩效果提高，缺陷减少。但浇注温度过高，熔体过热度过大，会导致凝固时间延长，顺序凝固作用减弱，增加缺陷形成概率。此外，由于环形件内外环的收缩比不同，较大的残余应力可能导致铸件内部出现热裂，因此浇注时应适当降低过热度。此外，模具温度升高，会使得铸件凝固时间过长，使铸件内补缩距离变长，导致铸件的收缩倾向越严重。

综上所述，以孔隙率为目标值时的最佳工艺参数组合为A3B3C3D2，即为离心转速600 r/min、浇注温度1 700 ℃、浇注速度200 mm/s和型壳预热温度150 ℃。

铸件凝固组织的优化应共同考虑晶粒组织的细化和缩孔率的减少两个方面。离心转速从600 r/min提高至1 000 r/min对晶粒的细化影响较小，对缩孔率的影响相差较大，因此转速应选择为600 r/min；适当提高浇注温度能够改善铸件充型能力，浇注温度为1 620 ℃时，晶粒细化效果较好，且温度1 620 ℃至1 700 ℃时对缩孔率影响较小，因此可以选择浇注温度1 620 ℃；浇注速度为100 mm/s时，缩孔率明显高于其他试验组，在细化晶粒的同时导致铸件缺陷严重，铸件力学性能下降，因此，应适当提高浇注速度，选择200 mm/s为最佳；铸型预热温度为150 ℃时能够降低铸件缩孔率。因此，综合考虑两个目标值时的最优工艺参数应该为离心转速600 r/min、浇注温度1 620 ℃、浇注速度200 mm/s和型壳预热温度 150 ℃。

3 试验验证

根据最优工艺参数组合进行模拟和实际浇注。在实际进行离心铸造时，选用氧化钇坩埚进行Ti-46Al合金的真空熔炼制备，按照Ti和Al按54∶46的原子比配制，另外加入20 g的Al用于补偿元素烧损，一并置于坩埚内。合金原料随后在真空感应炉中熔化。考虑到Ti的高温亲氧性，在熔化之前先抽真空，将炉内压力降至0.01 Pa以下。将原料在感应炉中加热至1 620 ℃后，并在此温度下保持10 min以确保完全熔化。随后进行真空离心铸造。实际离心铸造过程中，对四个工艺参数进行调整：离心转速为离心机旋转速度，通过离心机调节大小；金属液的初始浇注温度和模具的预热温度利用装置中的热电偶确定；浇注速度为金属液的初始浇注速度，通过模拟计算所得金属液所需浇注时间进行控制。实际真空离心铸造工艺装置示意图以及铸件如图9所示。

选择离心转速600 r/min、浇注温度1 620 ℃、浇注速度200 mm/s和型壳预热温度150 ℃为条件。通过模拟统计铸件的平均晶粒尺寸为791.33 μm，缩孔率为

（a）真空离心铸造工艺装置示意图　（b）铸型实物图　（c）铸件实物图

图9　真空离心铸造工艺装置示意图及实物图

Fig. 9 Schematic diagram of the vacuum centrifugal casting process device and physical picture

2.402 387%。铸件的平均晶粒尺寸与缩孔率都得到了很好的优化结果。对最优工艺参数下的实际浇注铸件进行分析，从图10可以看出，铸件的凝固组织生长规律与模拟结果一致：铸件外侧为细小等轴晶，中间部位为柱状晶，内部为粗大等轴晶组织。铸件纵截面缺陷如图11所示。从模拟结果可以看出，铸件内部最终形成孔隙缺陷位置减少，在铸件内环侧有热节的形成，同时在实际铸件中铸环内侧观察到形成较小的缩孔。在优化后的工艺条件下，铸件整体充型致密，晶粒细小，内侧缺陷较小，铸件成形品质较好，验证了模拟结果的准确性。

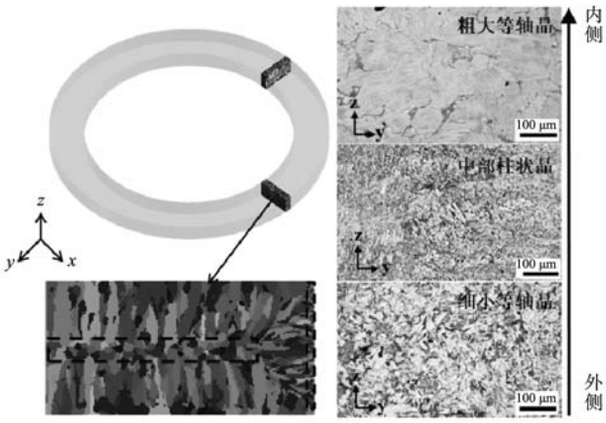


图10　最优工艺条件下铸件凝固组织模拟云图与金相组织对照图

Fig. 10 Comparison of simulation cloud map of the casting solidification microstructure and metallographic microstructure under optimal process conditions

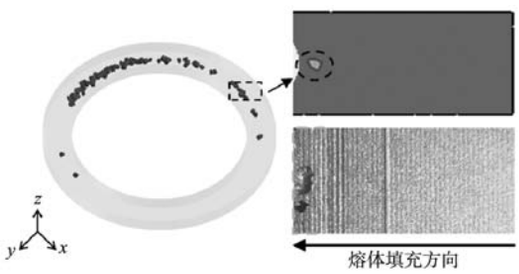


图11　最优工艺条件下铸件缺陷分布图

Fig. 11 Distribution of the casting defects under optimal process conditions

4　结论

（1）不同工艺参数均对离心铸造凝固组织有不同程度的影响。离心转速提高，铸件晶粒尺寸减小，缩孔率先增大后减小。浇注温度升高，铸件晶粒尺寸增大，缩孔率减小。浇注速度升高，铸件晶粒尺寸增大，缩孔率减小。铸型预热温度升高，铸件晶粒尺寸增大，缩孔率先减小后增大。

（2）各工艺参数对晶粒尺寸影响因素大小依次为浇注速度、浇注温度、离心转速、型壳预热温度，利用田口法分析获得了离心铸造细化晶粒组织最佳工艺参数组合A5B1C1D1，即为离心转速1 000 r/min、浇注温度1 620 ℃、浇注速度100 mm/s和型壳预热温度20 ℃。

（3）各工艺参数对缩孔率影响因素大小依次为浇注速度、离心转速、浇注温度、型壳预热温度，最佳工艺参数组合为A3B3C3D1，其对应参数为离心转速600 r/min、浇注温度1 700 ℃、浇注速度200 mm/s和型壳预热温度150 ℃。

（4）综合考虑细化晶粒程度和缩孔率时，最优工艺参数可设置为离心转速600 r/min、浇注温度1 620 ℃、浇注速度200 mm/s和型壳预热温度150 ℃。利用该工艺方案进行实际浇注获得的铸件组织得到了明显的改善。

参考文献：

[1] 朱春雷，朱小平，白晓青，等. 铸造用TiAl母合金制备技术研究进展 [J]. 精密成形工程，2023，15（8）：72–80.

[2] YANG C，HUAI GL，YE W，et al. Solidification microstructure of Ti-43Al alloy by twin-roll strip casting [J]. China Foundry，2023，20（2）：99–107.

[3] 谢华生，刘时兵，赵军，等. TiAl合金精密成形技术发展现状及展望 [J]. 精密成形工程，2022，14（1）：44–54.

[4] 王欢，王红红，周建新，等. 复杂钛合金铸件立式离心铸造过程的数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金，2015，35（2）：178–181.

[5] XIN M L，WANG Z D，LU B，et al. Effects of different process parameters on microstructure evolution and mechanical properties of 2060 Al-Li alloy during vacuum centrifugal casting [J]. Journal of Materials Research and Technology，2022，21：54–68.

[6] 胡海涛，张熹雯，朱春雷，等. 工艺参数对离心铸造TiAl合金杆形件缩孔缺陷影响的数值模拟 [J]. 铸造，2018，67（9）：799–804.

[7] 严世同，杨志刚. 离心铸造工艺参数对汽车气阀性能的影响 [J]. 热加工工艺，2018，19：115–119.

[8] 贾志宏，李晨阳，鲁远勇，等. 不同铸造方法对Cu-12Sn-2Ni合金微观组织及性能的影响 [J]. 铸造，2023，72（08）：998–1003.

[9] XU Q，WANG X，GUO Y，et al. Filling mode and regularity of vertical centrifugal casting process of titanium alloy in thin-walled cylinder cavity [J]. China Foundry，2019，16（2）：105–109.

[10] OZERDEM M S，KOLUKISA S. Artificial neural network approach to predict the mechanical properties of Cu-Sn-Pb-Zn-Ni cast alloys [J]. Materials & Design，2009，30（3）：764–769.

[11] LI C J，WANG M，LIU H，et al. Near-optimal stochastic approximation for online principal component estimation [J]. Mathematical Programming，2018，167（1）：75–97.
[12] ERKOÇAK Y，KAYIR Y. Analyzing the impacts of cutting parameters on cutting forces in the taguchi method for boring high-alloy white cast irons with CBN inserts [J]. Arabian Journal for Science and Engineering，2023，48（9）：1–17.
[13] ZHANG P，LIU GH，WANG Y，et al. Optimization of investment casting parameters for reduction of shrinkage porosity in nickel-based superalloy castings by Taguchi method [J]. International Journal of Modern Physics B，2021，35（10）：2150136.
[14] 刘佳斌，叶高盛，汪志刚，等. 基于ProCAST轴承座零件的铸造工艺设计及优化 [J]. 现代铸铁，2021，41（5）：33–39.
[15] 杨亮，姚谦，张来启，等. 基于Procast的高Nb-TiAl低压涡轮叶片离心铸造数值模拟 [J]. 铸造技术，2014，35（12）：2945–2947.
[16] WANG D C，LIAO M L，WANG Y，et al. Optimization of centrifugal casting process parameters by Taguchi method to reduce shrinkage porosity ratio of K417 superalloy [J]. Modern Physics Letters B，2022：2250165.
[17] 胡海涛，左家斌，黄东，等. 不同离心浇注方式对TiAl合金涡轮成形的影响 [J]. 特种铸造及有色合金，2022，42（7）：797–804.
[18] 钟发勇，张继祥，董安平，等. 基于数值模拟和田口实验的K4169高温合金精密铸造工艺优化 [J]. 热加工工艺，2023，52（3）：62–67.

Optimization of Centrifugally Casting Process Parameters for Microstructure Control in TiAl Alloy Ring Parts by Taguchi Method

SU Cong-cong[1], HUANG Gang[1], DANG Qian[1], WANG Ye[2], LIU Guo-huai[1]
(1. The State Key Laboratory of Rolling Technology and Continuous Rolling Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. School of Material Science and Chemical Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150008, Heilongjiang, China)

Abstract:
In order to obtain the influence of centrifugal speed, pouring temperature, pouring speed, and mold preheating temperature on the solidification microstructure of TiAl alloy ring castings during centrifugal casting, the centrifugal casting process parameters were optimized by numerical simulation and Taguchi method, and the signal-to-noise ratio results of grain size and shrinkage porosity were used as indicators to measure the quality of castings. The experimental results showed that the influencing factors of each process parameter on grain sizewere, in decreasing order, pouring speed, pouring temperature, centrifugal speed, and mold preheating temperature. The influence factors of the process parameters on the shrinkage porosity were pouring speed, centrifugal speed, pouring temperature, and mold preheating temperature, respectivly. With maximum grain refinement and minimum shrinkage as the optimization objectives, the optimal process parameters were centrifugal speed of 600 r/min, pouring temperature of 1 620 ℃ , pouring speed of 200 mm/s, and mold shell preheating temperature of 150 ℃ . The experimental results showed that using these process parameters produced high-quality TiAl alloy castings with fine grains size and a dense microstructure.

Key words:
centrifugal casting; TiAl alloy; Taguchi method; solidification microstructure; average grain size; shrinkage porosity

（编辑：张允华，zyh@foundryworld.com）