DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.12.022

承力支板精密铸造工艺控制及优化

孟凡国,吴剑涛,李　维,李俊涛
(钢铁研究总院 高温材料研究所,北京 100081)

摘　要:某型商用航空发动机用承力支板属于大尺寸的薄壁空腔结构件。采用熔模精密铸造,容易出现疏松、裂纹和轮廓度超差严重等问题,冶金质量和尺寸控制难度较大。通过浇注系统设计、陶瓷型芯定位和浇注工艺的控制及优化,解决了铸件的冶金缺陷和尺寸问题,提高了铸件的成品率。

关键词:熔模铸造;浇注工艺;冶金质量;尺寸控制
中图分类号:TG249.5　　文献标识码:A　　文章编号:1000-8365(2019)12-1320-04

Process Control and Optimization of Investment Casting for Bearing Support Plate

MENG Fanguo, WU Jiantao, LI Wei, LI Juntao
(Institute of High Temperature Materials, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: Bearing strut for a certain type of commercial aeroengine belongs to the large size thin-walled cavity structure. It is easy to have some casting defects such as loose, crack and out of contour when adopting investment casting. It is difficult to control the quality and size of metallurgy. Through the design of casting system, the location of ceramic core and the control and optimization of casting process, the metallurgical defects and size problems of casting were solved and the yield of casting was improved.

Key words: investment casting; casting process; metallurgical quality; size control

航空发动机被誉为现代工业“皇冠上的明珠”,其工作环境大多比较恶劣,对转动和承力的零件要求十分苛刻,许多承力部件采用精密铸造高温合金,对铸件的质量和性能要求较高。承力支板属于重要的承力部件,主要承受着发动机工作时的气动载荷和飞机机动飞行引起的机动载荷[1],是典型的多轴载荷,而在多轴载荷作用下构件上的静强度会随着载荷改变而改变[2,3]。

承力支板是薄壁空腔类铸件,采用熔模精密铸造工艺,铸件薄壁仅 1.5 mm,容易出现疏松和变形,内外形轮廓尺寸控制难度较大,内部为空心结构,容易出现偏芯和开裂,工艺控制和尺寸控制难度很大,精铸件的成品率很低,导致制造成本太高。

本文通过对承力支板铸件的浇注系统、浇注工艺及尺寸控制的优化,提高该铸件成品率,为此类薄壁空腔支板铸件成品率的提高提供指导。

收稿日期:2019-08-28
作者简介:孟凡国(1986-),山东潍坊人,博士,工程师.主要从事铸造高温合金材料与工艺方面的工作.
电话:010-62184623,E-mail:mengfanguo85@163.com

1　试验材料及方法

承力支板精铸件所用材料为镍基等轴晶铸造高温合金 K4169,该合金具有良好的高温强度和持久性能,合金的主要化学成分见表 1。试验所用母合金采用 ZG-0.5 型真空感应熔炼炉进行熔炼,该母合金的化学成分和力学性能均满足母合金技术条件的要求。采用 MPI-55 型压蜡机压制蜡模,蜡料为填充蜡,内部型芯为硅基陶瓷型芯,蜡模压制完进行组合,之后制备型壳,型壳用硅溶胶和煤矸石粉挂涂,挂涂 8 层,型壳充分干燥后进行脱蜡和预焙烧处理。型壳造型焙烧后采用 ZG-0.025 型真空感应熔炼炉重熔合金并浇注。铸件经切割、打磨、脱芯和热处理后,进行表面质量、内部质量和尺寸检验,对铸件的化学成分和力学性能按照标准要求进行检验。

2　铸造工艺对铸件冶金质量和尺寸的影响

2.1　浇注系统设计

该承力支板是典型的薄壁件结构,为商用航空发动机涡轮的关键部件,采用熔模精密铸造整体成型。该铸件轮廓尺寸约为 253 mm×116 mm×39 mm,上下两端 4 个角处为厚大部分,叶身处的壁厚仅有

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 K4169高温合金的主要化学成分 w(%)
Tab.1 Main chemical compositions of superalloy K4169

C	Cr	Ni	Co	Mo	Al	Ti	Nb
0.02~0.08	17~21	50~55	≤1	2.8~3.3	0.3~0.7	0.65~1.15	4.4~5.4
Ta	B	Zr	Si	Mn	P	S	Fe
≤0.1	≤0.006	≤0.05	≤0.35	≤0.35	≤0.015	≤0.015	余量

1.5 mm，薄壁单侧有一椭圆形通气孔，内腔采用陶瓷型芯成型，铸件的前缘和尾缘壁厚分别为 1.5 mm 和 4 mm。薄壁处与端面厚大部位很容易形成热节，尤其是型腔内侧，此外，薄壁处也会出现疏松和裂纹，铸件结构如图 1 所示。

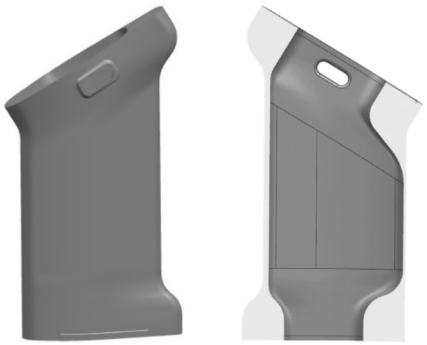


图 1 承力支板铸件的结构图
Fig.1 Structural diagram of bearing support plate castings

浇注系统的设计需保证金属液体平稳均匀和连续地充满型腔、控制铸件的凝固顺序[4-6]，厚大部位应该增加浇口进行补缩，如果在承力支板厚大部位的型面上增加浇口，采用侧注不利于厚大部位的补缩，可能会出现疏松，而且会影响铸件的轮廓度，因此尽量在厚大部位的端面增加浇口，浇口大小应该合适，与内腔的陶瓷型芯匹配好，端面的浇口与陶瓷型芯接触部位最好不要有间隙，有利于后期料浆的涂挂，含通气孔一侧尽量朝浇口的外侧，这样有利于金属液的凝固和散热，由于承力支板的尾缘比前缘厚，同时，铸件的长度方向较大，需要增加浇口，有利于金属液的补缩，因此在铸件长度方向上在靠近尾缘侧增加浇口，如图 2 左图所示。经过后期的工艺验证，此浇注系统在尾缘存在不同程度的疏松，改进后的浇注系统在前尾缘处各增加一个浇口，加强金属液的补缩，同时铸件采用顶注底注和侧注的浇注方式，采用大的浇冒口，浇冒口的中心位置下方采用细长的方形浇口，方形长浇口的上下两端采用矩形板状浇口。承力支板优化前后的浇注系统如图 2。

2.2 陶瓷型芯结构与蜡模制备

承力支板的内部空腔采用陶瓷型芯整体成型，陶瓷型芯的外型面来保证铸件的内侧空腔形状和尺寸精度，陶瓷型芯一般采用端面芯头与型壳粘结



(a)优化前　　(b)优化后

图 2 承力支板优化前后浇注系统图
Fig.2 Casting system diagram before and after optimization of bearing support plate

在一起进行固定，承力支板的陶瓷型芯如图 3。由于薄壁厚度仅为 1.5 mm，要求陶瓷型芯与铸件蜡模定位准确，不能发生偏移，从而保证壁厚的均匀性。由于陶瓷型芯与铸型型壳的高温热膨胀系数不同，陶瓷型芯除了定位端外，还需要将一端设为自由端，自由端与型壳保留一定的间隙，允许自由端能前后左右的微移动，又允许端部纵向自由伸长或收缩[7,8]。承力支板陶瓷型芯较大端设为定位端，较小端为自由端，为了保证壁厚的均匀性，在模具制作时，采用上下前后左右的固定方式，每次压制一定数量的蜡件，需要解剖检测蜡件的壁厚，尤其是型腔薄壁的厚度，确保每批次的蜡件壁厚均匀稳定。蜡模放置一定时间后，需要进行检验与修整，观察蜡件表面有无裂纹、气泡、鼓泡等缺陷，对变形、翘曲较严重或者芯蜡分离的蜡件应报废处理。为检验蜡件中的陶瓷型芯是否有断裂，需要对蜡件进行透视检查。



图 3 承力支板陶瓷型芯
Fig.3 Ceramic core of bearing support plate

2.3 造型工艺优化

在承力支板工艺验证开始，造型工艺是将型壳的浇冒口和上端板状浇口裹一层保温棉，放入砂箱并进行焙烧，熔炼浇注完成后通气孔侧薄壁处存在不同程度的裂纹，可能是薄壁散热过快，加上铸件的

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

长度和尺寸较大，铸件凝固冷却不均匀导致。为了解决裂纹问题，在浇注工艺和其他造型工艺不变的情况下，试验采用在通气孔侧薄壁处裹一层保温棉和半层保温棉，试验结果显示，裹一层保温棉的铸件未出现裂纹，但是疏松较多，而裹半层保温棉的铸件裂纹和疏松几乎没有，因此在通气孔侧薄壁处裹半层保温棉，通气孔对侧薄壁处不裹保温棉，半层保温棉的长度与薄壁的长度相同，如图 4 所示。砂箱底部填满一定厚度的石英砂，将造型完的型壳放入砂箱的中心位置填满并捣实型砂，禁止敲打砂箱，避免陶瓷型芯开裂和偏移。

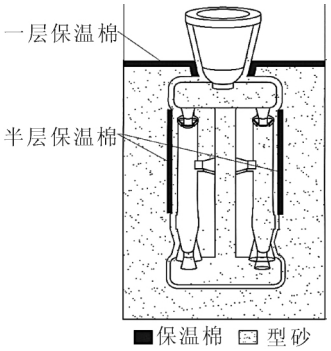


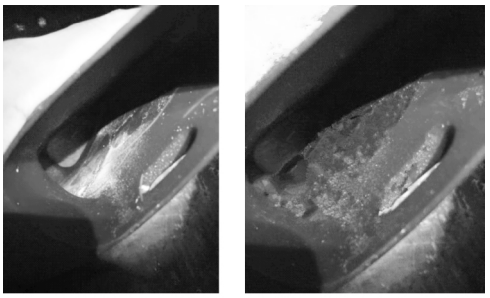
图 4 承力支板造型示意图
Fig.4 Schematic drawing of bearing support plate

2.4 浇注工艺的优化

浇注工艺主要包括浇注温度、型壳焙烧温度、浇注速度等，K4169 合金的熔点为 1 243～1 359 ℃[9]，合金的浇注温度范围一般在 1 460 ℃左右，按照以往承力支板的浇注工艺，选取了浇注温度为 1 430 ℃，型壳焙烧温度为 1 000 ℃，浇注速度适中，冶炼浇注完成后发现型腔薄壁有疏松，尤其是型腔内壁以及型腔内壁与厚大部位交接处疏松较多，可能原因是铸件的散热条件较差，金属液来不及散热就凝固了。考虑到铸件是尺寸较大的薄壁空腔结构，为了增加金属液的流动性，将浇注温度提高到 1 450 ℃，型壳焙烧温度不变仍为 1 000 ℃，浇注速度不变，浇注完成后发现薄壁处的疏松数量有所减少，但仍不理想。为此将型壳焙烧温度由 1 000 ℃降低为 900 ℃，浇注温度仍为 1 450 ℃，浇注完成后发现，薄壁处的疏松基本消除，尤其是型腔内侧的疏松大大减少，如图 5。因此，该结构特点的承力支板优化后的浇注工艺是：浇注温度为 1 450 ℃，型壳焙烧温度为 9 00 ℃，浇注速度适中，可以浇注出冶金质量较好的精铸件。

2.5 尺寸控制工艺优化

承力支板的尺寸要求非常高，壁厚 1.50±0.25 mm，线轮廓度±0.15 mm，尺寸控制难度非常大，线轮廓



(a)优化前　(b)优化后

图 5 承力支板浇注工艺优化前后荧光结果
Fig.5 Fluorescence results before and after optimization of casting process of bearing support plate

度的测定采用六点定位法，保证铸件的尺寸精确度和加工精度，研制初期承力支板的冶金问题解决了，但是尺寸要求很高，控制难度大，导致精铸件因为尺寸原因报废较多，造成精铸件的成品率较低。承力支板蜡件厚大部位的收缩比较大，导致轮廓度超差（负偏差）较多，为了解决这一问题，在蜡件厚大部位对称两侧通过加冷蜡块和修补蜡来保证蜡件的轮廓度，如图 6，待蜡模收缩完成后用三坐标进行轮廓尺寸检验，保证蜡模轮廓度在标准要求范围内，同时可以采用收缩系数比较小的填充蜡，来减少由于蜡模收缩造成的尺寸变化，保证浇注完后铸件的轮廓度精度。图 7 和表 2 为加冷蜡块和修补蜡前后不同检测截面的线轮廓度变化。由表 2 可知，修补蜡后的轮廓度基本满足技术要求。铸件的壁厚精度主要通过陶瓷型芯的定位来保证，不能出现偏芯和断芯的情形。另外，技术标准对内腔流道的最大宽度也有要求，由于内腔采用陶瓷型芯成型，因此陶瓷型芯的外



图 6 承力支板补蜡位置示意图
Fig.6 Schematic diagram of wax filling position of bearing support plate

表2 承力支板补蜡前后轮廓度
Tab.2 Profile of bearing support plate before and after wax repairing

检测截面	理论轮廓度 /mm	补蜡前实测轮廓度 /mm	补蜡后实测轮廓度 /mm
S4	(-0.15,0.15)	(-0.053,0.172)	(-0.089,0.143)
S7	(-0.15,0.15)	(-0.116,0.203)	(-0.135,0.171)
S9	(-0.15,0.15)	(-0.613,0.181)	(-0.124,0.164)
S11	(-0.15,0.15)	(-0.918,0.259)	(-0.108,0.147)
S13	(-0.15,0.15)	(-0.712,0.277)	(-0.122,0.158)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

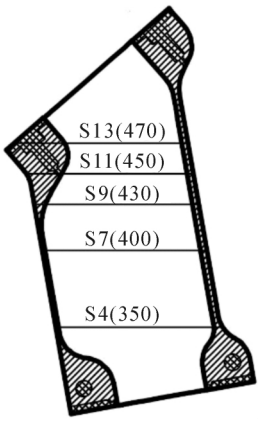


图 7 承力支板轮廓度检测截面

Fig.7 Profile detection section of bearing support plate

流道最大宽度要准确，每批次的陶瓷型芯需要复验确保陶瓷型芯外流道最大宽度的精确性。

3 结论

（1）根据承力支板的结构特点其浇注系统采用顶底注加侧注的浇注方式，保证金属液充型平稳、顺序凝固和有效补缩。

（2）采用浇冒口裹一层保温棉，通气孔侧薄壁裹半层保温棉的造型方式和浇注温度为 1 450 ℃，型壳焙烧温度为 900 ℃的浇注工艺，可获得较好的冶金质量。

（3）采用收缩系数较小的填充蜡以及厚大部位加冷蜡芯和修补蜡的方式来提高铸件的尺寸精度，进而提高铸件的成品率。

参考文献：

[1] 马艳红，曹冲，李鑫，等. 涡轴发动机涡轮级间支承结构设计关键技术[J]. 航空发动机，2014，40(4)：34-40.

[2] 刘光熠. 多轴载荷下发动机中介机匣强度与寿命研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2005.

[3] 刘光熠，宋迎东，杨艳红. 多轴非比例载荷引起的塑性循环 // 中国航空学会动力分会发动机结构强度与振动专业委员会第十二界学术会论文集[C]. 四川青城山，2004：325-329.

[4] 李弘英，赵成志. 铸造工艺设计 [M]. 北京：机械工业出版社，2005.

[5] 王峰，班云峰，徐林清. 浇注系统的设计[J]. 现代铸造，2017(2)：60-65.

[6] 王正光，韩丽萍. 浅谈浇注系统的设计 [J]. 特种铸造及有色合金，1992(3)：35-36.

[7] 赵效忠. 陶瓷型芯的制备与使用[M]. 北京：科学出版社，2013.

[8] 顾国红，曹腊梅. 熔模铸造空心叶片用陶瓷型芯的发展[J]. 铸造技术，2002，23(2)：80-85.

[9] 中国金属学会高温合金材料分会. 中国高温合金手册（下卷）[M]. 北京：中国标准出版社，2012.

（上接第 1311 页）

顺向连接，即使金属液由纸质浇道管的粗口端流向细口端。

（5）纸质浇道管连接时，承插口必须插到底，并手动检查连接是否牢固，不牢固的，使用高温胶密封接口或放弃使用，最后，在纸质浇道管连接处缠上胶带。

（6）造型或者制芯时，纸质浇道管周围树脂砂应充分紧实。

（7）纸质浇道管连接完成后最大弯曲角度不能超过 5°，超过 5°的，使用直钢棒与纸浇道固定。

（8）纸浇道做直浇道时，必须完全埋藏于砂型之中，不能高于砂型上表面，与浇口盆对接部位应用陶瓷纤维布等耐火材料包裹加固。

4 结语

节能、绿色、环保的新技术、新材料的纸质浇道管具有诸多优势，纸质浇道管系列产品在铸造领域的应用是必然趋势，具有良好的发展前景。提高废旧物资在纸质浇道管中的应用，降低生产成本，并近一步的提高其耐高温冲刷性能，是纸质浇道管知道生产企业攻克的难关。希望该产品在铸造行业的应用实践中不断总结、不断提升，为装备制造工业的发展发挥自己的价值。

参考文献：

[1] 张新平，张红潮，袁东洲. 铸造用纸质浇道管的研制与应用[J]. 锻造与铸造，2018(4)：80-81.

[2] 马斌悍，惠国栋，许翔，等. 纸质浇道管在铸造工艺中应用[J]. 铸造技术，2017(4)：957-959.

[3] 朱劲松. 树脂砂铸铁件浇注系统设计研究 [J]. 宁夏机械，2006(4)：81-82.

[4] 袁东洲. 纸质浇道及其在消失模铸造上应用之优点 [J]. 铸造技术，2019(9)：2295-2297.

[5] 袁东洲，张新平，牟行辉. 纸质浇道管用于树脂砂实型铸造机床铸件的实践[J]. 铸造，2018(2):88-89.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net