

小孔径三维扭曲弯管高温合金精密铸造工艺研究

姜向东, 高怀胜, 姚 亮

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 发动机上小孔径三维扭曲弯管的机械加工、焊接、弯管机弯曲成型都无法实现, 因此提出采用精密铸造技术研制 K4202 合金小孔径三维扭曲弯管的方法。结果表明, 通过快速成型技术制造蜡模且采用特定的浇注工艺, 浇注出的铸件质量满足设计和使用要求。

关键词: K4202 高温合金; 精密铸造; 快速成型技术; 浇注系统

中图分类号: V463-31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 06-0059-03

Research on precision casting process of 3D distorted superalloy bent pipe with small-aperture

JIANG Xiang-dong, GAO Huai-sheng, YAO Liang

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: Since 3D distorted superalloy bent pipe of rocket engine could not be obtained by machining, welding and bender, the precision casting technology was proposed for development of 3D distorted K4202 bent pipe with small-aperture. The result shows that the quality of castings produced through rapidly prototyped wax mold and specific gating process can meet the requirements of design and application.

Keywords: K4202 superalloy; precision casting; rapid prototyping technology; gating system

0 引言

出口管是某型号发动机上的关键部件, 承受较高的温度、压力和严重的燃气腐蚀, 工作条件非常苛刻。如图 1 所示, 在较小尺寸内空间角度变化复杂, 且管内径小, 只有 $\Phi 12$ mm, 导致无法机械加工, 使用弯管机或焊接也无法成型, 所

以出口管采用整体精密铸造而成, 材料采用高温合金 K4202。由于出口管壁厚为 3 mm, 属于薄壁件, 且管内径小, 空间角度变化又比较复杂, 所以铸造难度很大。主要体现在以下几方面: 首先, 管内径小, 彻底清理蜡模内残余粉料难度较大; 其次, 由于管内径有限, 制壳时管内壁挂浆撒砂操作难度很大, 内壁模壳的层数也很关键, 层数太少, 模壳强度不够, 层数太多, 将管内孔

收稿日期: 2012-08-10; 修回日期: 2012-09-24

作者简介: 姜向东 (1982—), 男, 工程师, 研究领域为铸造技术

堵死，清理模壳时难度很大；最后，出口管属于薄壁件，补缩难度较大，凝固过程易产生缩松、缩孔等缺陷。

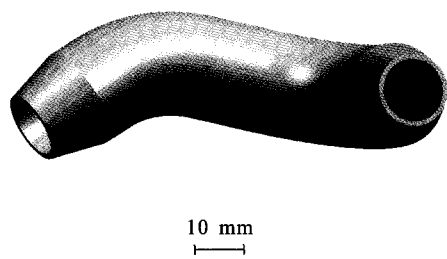


图 1 出口管零件图
Fig. 1 Drawing of outlet pipe

1 试验材料及试验方法

K4202 合金是一种在液氧环境和较高温度条件下均可使用的多用途高温合金，适用于制造航空、航天、航海用整体铸造涡轮部件和涡轮转子等高温部件。合金的化学成分见表 1。

试验采用真空感应炉熔炼浇注铸件和随炉试棒，在 CMT5105 万能拉伸机上进行室温和高温力学性能测试，采用 Spectro Lab M7 光电直读光谱仪分析试棒化学成分。

表 1 K4202 高温合金化学成分
Tab. 1 Chemical composition of K4202 superalloy

							%
元素	C	Cr	Mo	W	Ti	Al	Ni
含量	≤0.04	18	3	2	4	0.5	67.31
元素	Fe	Mn	Si	B	Ce	S	P
含量	≤4.0	≤0.5	≤0.6	≤0.015	≤0.01	≤0.01	≤0.015

2 精铸工艺研究

2.1 蜡模快速成型

采用快速成型技术烧制蜡模，由于金属凝固过程中会发生收缩现象，所以在烧制蜡模之前，需要确定蜡模的收缩率，从铸造手册中查阅得到铸钢的凝固收缩率为 1.3%~2.0%，再参考工厂多年生产高温合金零件累积的经验，发现高温合金凝固收缩率较大，通过测量蜡模尺寸和产品尺寸对比发现，高温合金的凝固收缩率为 2.0%，所以最终确定出口管蜡模的收缩率为 2.0%。

在蜡模制作过程中，清粉过程难度最大，由于管径细小且弯曲，用常规方法清粉，内壁上的粉子不容易清除干净，所以制作了特殊工装在管内来回拉动（见图 2），此工装必须光滑且直径和管内径相当，以此保证清粉过程中不易划伤管内壁，同时能有效清除内壁粉子。



图 2 清粉示意图
Fig. 2 Schematic diagram of purification process

2.2 型壳制备

型壳制备的主要原理是在蜡模表面涂挂浆料，然后进行撒砂，等待第 1 层型壳干燥之后，再使用同样的方法制备第 2 层型壳，直到最后 1 层型壳制备完后进行封浆，然后进行脱蜡和预焙烧处理。

由于出口管的内径较小，所以内壁挂浆撒砂是整个涂料过程的重点和难点。由于内壁空间有限，只能涂到第 3 层，如果继续在管内壁增添涂

层, 模壳将会堵塞出口管, 导致铸件报废。如果只涂 3 层, 模壳强度又达不到要求, 所以涂完第 3 层后用 60 目的干锆英砂填满出口管, 两端用 60 目的锆英砂混合硅溶胶溶液堵实, 清理模壳时, 只需将两端模壳清除掉, 用较细的清理工具清除管内的砂子, 由于管内是干砂子, 很容易清除干净, 然后进行吹砂, 管内壁的模壳将顺利清除干净。实验结果表明, 该措施既能保证模壳强度, 又能保证顺利清理模壳。

2.3 浇注系统设计

浇注系统是金属液充型的通道, 同时还要保证铸型中金属液凝固发生体积收缩后能进行有效的补缩, 因而浇注系统设计对铸件的质量和尺寸精度有直接的影响。出口管尺寸较小, 管壁较薄, 导致充型困难, 为保证铸件充型顺畅和有效的补缩, 浇注系统应保证金属液在极短的时间内平稳的充满铸型。所以在出口管上增加冒口, 冒口的尺寸保证足够的补缩, 采用顶注式浇注, 确保快速充满型腔。同时还要考虑设计用于排气和排渣的结构, 减少由于气孔和夹渣引起的铸件报废。具体浇注系统组合方案见图 3。

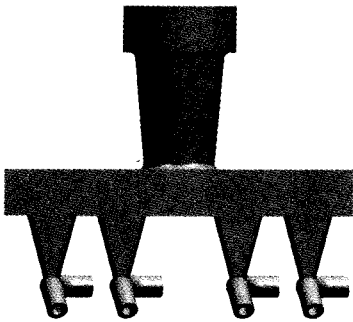


图 3 出口管浇注系统组合方案

Fig. 3 Combination scheme of outlet pipe gating system

2.4 铸造过程

在铸造工艺过程中, 浇注温度和模壳温度对铸件的铸造质量也有至关重要的影响。高温合金铸件通常采用热型铸造, 这样既能保证金属液顺利充型, 又能避免因型壳升温过大而开裂。较高的浇注温度和模壳温度能保证合金液的充型能力, 基本能消除冷隔、浇不足等铸造缺陷; 但浇注温度、模壳温度过高时, 凝固时间增加, 容易产生疏松和热裂; 较低的浇注温度和模壳温度能减少疏松和热裂, 但过低的浇注温度和模壳温度会使薄壁充型困难。

表 2 试验件检验结果

Tab. 2 Inspection results of test sample

技术条件	浇注温度:1 530±5 ℃		浇注温度:1 540±5 ℃	
X 射线探伤标准: HB5430-89A 级	X 射线探伤合格率	86%	X 射线探伤合格率	91%
荧光探伤:不允许有 发纹和裂纹	荧光探伤合格率	100%	荧光探伤合格率	100%
打压标准:试验气压 7 MPa, 保压 5 min,不允许泄漏	打压合格率	91%	打压合格率	100%
尺寸检验标准: GB/T1804M 级	尺寸检验合格率	100%	尺寸检验合格率	100%
力学性能标准参照 GY-99-06: 700 ℃抗拉强度≥500 MPa;	试棒 700 ℃抗拉强度	585 MPa	试棒 700 ℃抗拉强度	600 MPa
力学性能标准参照 GY-99-06: 700 ℃断面收缩率≥10%	试棒 700 ℃断面收缩率	17.6%	试棒 700 ℃断面收缩率	20%

(下转第 69 页)

仅可以应用于常规和液氧/煤油发动机的故障检测与诊断, 而且还有望推广应用于重型运载系统、运载火箭飞行、飞船飞行及空间站运行等在线故障检测与诊断之中。

参考文献:

- [1] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [2] 张贤达. 信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [3] 闫俊伏, 谭兴昀. 振动测量参数在故障诊断中的分析[J]. 山西电力, 2008 (2): 32-33.

- [4] 朱恒伟. 液体推进剂火箭发动机地面试车故障检测与诊断研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
- [5] 申弢, 黄树红. 振动故障信号奇异性指数的统计特征研究[J]. 振动工程学报, 2003, 16(4): 476-479.
- [6] OPPENHEIM A V, SCHAFER R W. 离散时间信号处理[M]. 刘树棠, 黄建国, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 575-586.
- [7] 王洪杰. 齿轮泵的振动信号研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1996, 28(4): 17-21.
- [8] 郝鹏, 马建仓. 基于 DSP 测量的捷联惯导系统设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(24): 120-122.
- [9] 崔岩岩, 霍亮生, 李响. 基于 VC++ 的发动机 ECU 测试系统的研究与设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(10): 28-30.

(编辑: 马 杰)

(上接第 61 页)

根据以往经验, K4202 高温合金浇注温度不超过 $1\ 545\ ^\circ\text{C}$, 所以 2 批试验件的浇注温度分别选取 $1\ 530\pm 5\ ^\circ\text{C}$ 和 $1\ 540\pm 5\ ^\circ\text{C}$ 。根据 2 批试验件的实验结果发现, 浇注温度为 $1\ 540\pm 5\ ^\circ\text{C}$ 时铸件质量最佳。

通过综合考虑以上因素, 采用以上浇注系统和浇注温度试制出 K4202 高温合金出口管精密铸件。铸件分别经 X 射线探伤、荧光探伤、打压、尺寸检验和力学性能 5 个检验工序, 具体检验结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, 各项检验结果都达到了技术条件所规定的要求。

精密铸造的方法生产, 为以后复杂内壁、小孔径等其他加工方法难以成型的零件生产研制奠定了坚实的技术基础。

参考文献:

- [1] 王建明, 邵冲, 赵明汉, 等. K4202 镍基铸造高温合金的组织研究[J]. 现代制造工程, 2007 (9): 91-93.
- [2] 佟天夫, 陈冰, 姜不居. 熔模铸造工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [3] 姜不居. 熔模精密铸造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [4] 林柏年. 特种铸造[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2004.
- [5] 李俊涛, 陈兴福, 吴剑涛, 等. K423A 机匣部件精铸工艺研究[J]. 铸造, 2006, 55(3): 249-251.
- [6] 汤鑫. 高温合金整体叶轮铸造技术的研究进展[J]. 航空材料学报, 2005, 25(3): 56-62.
- [7] 安阁英. 铸件形成理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [8] 黄乾尧, 李汉康. 高温合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [9] 熊玉华, 李培杰. 铸造工艺参数和细化剂对 K4169 高温合金铸态组织的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(5): 529-538.

(编辑: 陈红霞)

3 结论

1) 通过 3 种出口管铸件的工艺试验, 发现 K4202 高温合金适合铸造一些尺寸较小的零件, 铸件基本没有内部疏松、气孔等缺陷。

2) 通过分析和试验确定的出口管精密铸造工艺方案是可行的, 铸件经过检验符合技术要求, 通过了发动机的试车考核。

3) 小孔径三维扭曲弯管可以应用真空熔模