

一种轻量集成化结构发动机机体 3D打印铸造工艺研究

王基东, 常振, 陈孝先, 陈思明

共享装备股份有限公司 宁夏银川 750021

摘要: 球墨铸铁发动机机体轻量化、集成化是发动机机体设计生产的主要方向, 发动机机体也是铸造成形难度较大的铸件之一, 其铸造工艺方法也在不断探索和更新。主要通过3D打印铸造工艺技术, 对V型发动机机体工艺进行探索和优化, 利用整芯最大化来减少砂芯数量, 解决复杂结构设计, 提高生产效率, 改善机体铸件尺寸一致性, 减少外观和内部缺陷。生产结果表明: 研发设计的铸造工艺方案, 可以解决铸件复杂结构成形困难的问题, 生产过程更加简便高效, 产品尺寸精度更高, 外观和内部质量大幅度提升。

关键词: 机体; 内腔结构复杂; 整芯; 3D打印; 尺寸精度

Research on 3D printing casting process of lightweight integrated structural engine block

WANG Jidong, CHANG Zhen, CHEN Xiaoxian, CHEN Siming

Kocel Machinery Limited, Yinchuan 750021, Ningxia, China

Abstract: The lightweight and integrated design of nodular cast iron engine body is the main direction of the engine body design and production. The engine body is also one of the castings that is more difficult to cast, and its casting process methods are also constantly explored and updated. This paper mainly explores and optimizes the V-type engine body process through 3D printing casting technology, using the whole core to maximize the reduction of the number of sand cores, solve complex structural design, improve production efficiency, improve the dimensional consistency of the body castings, and reduce appearance and internal defects. The production results show that the casting process solution designed by the research and development can solve the complex structure forming and casting production process more simple and efficient, the product dimensional accuracy is higher, and the appearance and internal quality are greatly improved.

Keywords: engine body; the complex inner cavity structure; whole core; 3D printing; dimensional accuracy

1 序言

随着V型发动机机体市场竞争日益激烈, 机体铸件更加轻量化, 同时对产品高质量、快交付的

需求越来越重视。本文中某厂家机体为V型16缸结构, 其顶面冷水腔和挺杆室腔相互嵌套, 且凸轮轴孔上方布置有通体双层内腔, 且内腔狭窄, 最窄

第一作者: 王基东, 助理工程师, 主要从事铸造工艺技术开发研究工作, E-mail: 348592396@qq.com。

位置20mm，整个内腔长度1580mm，顶面只有8处 $\phi 37\text{mm}$ 铸造工艺孔，内腔结构非常复杂，如果有披缝、粘砂等问题根本无法清理；同时，上述腔道之间壁厚8mm，且内腔本身结构狭小，对砂芯强度要求高，内腔任何小杂物和砂芯变形均会导致铸件尺寸不合格。鉴于轻量化机体结构的特殊性和高质量的要求，本文通过一种轻量化V型发动机机体铸件

的生产，研究了轻量化V型机体高效稳定的铸造工艺设计成形方法。

2 产品参数

2.1 基本信息

V型发动机机体产品参数见表1，其三维结构如图1所示。

表1 V型发动机机体产品参数

材质	外形尺寸/mm	质量/kg	最大壁厚/mm	最小壁厚/mm	主体壁厚/mm
QT450-10	1650×800×590	986	62	8	8

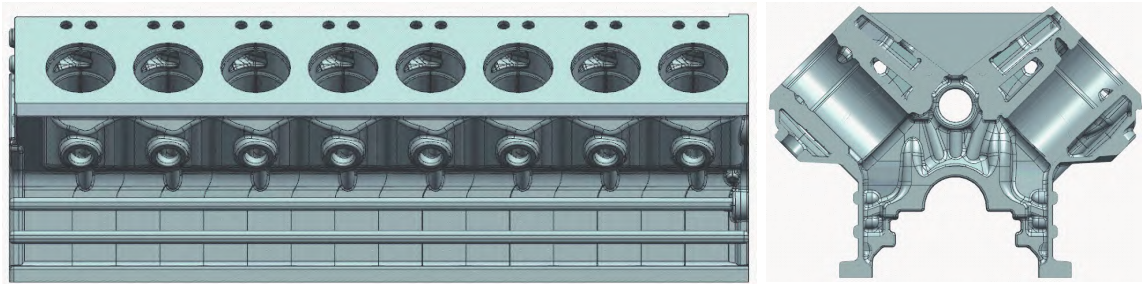


图1 V型发动机机体三维结构

2.2 质量要求

V型发动机机体铸造质量执行标准及技术要求见表2。

表2 铸造质量执行标准及技术要求

材料牌号	QT450-10 (GB/T 5612—2008《铸铁牌号表示方法》)	
尺寸公差	DCTG9级 (GB/T 6414—2017《铸件 尺寸公差、几何公差与机械加工余量》)	
力学性能	抗拉强度/MPa	≥ 450 (GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验 第1部分：室温试验方法》)
	硬度HBW	160~210 (GB/T 231.1—2002《金属布氏硬度试验 第1部分：试验方法》)
金相组织	球化率(%)	≥ 70 (GB/T 9441—2009《球墨铸铁金相检验》)
	铁素体含量(%)	≥ 80 (排气管位置 ≥ 90) (GB/T 9441—2009《球墨铸铁金相检验》)
UT检测	级别/级	I (关键区域) (GB/T 34904—2017《球墨铸铁件 超声检测》)
表面要求	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	≤ 50 (GB/T 6060.1—1997《表面粗糙度 比较样块 铸造表面》)
剖切检查	轴瓦位置、缸孔范围内 $\leq 3\text{mm}$ 逐层铣削，无缺陷	

3 铸造方法

3.1 铸造工艺性分析

机体产品铸造技术难点分析如下。

1) 水套、挺杆室内腔结构相互嵌套分布，内腔砂芯结构复杂，砂芯自身强度低，易变形，尺寸精度控制难度高，凸轮腔侧两层内腔砂芯清砂难度高，砂芯流涂难度高，以及铸件粘砂、披缝等无法清理，需要设计合理的分芯方案，减少砂芯数量，保证内腔结构一体成形。

2) 产品整体壁厚差异大，主体壁厚8mm，厚壁位置均为铸件的关键位置，结构上存在多处铸造热节。关键位置要求UT1级，需要设计合理的补缩系统及熔炼工艺方案，以改善温度场和凝固顺序，满足铸件高致密性要求。

3.2 工艺方案

(1) 砂芯方案设计 砂型3D打印分芯方案相较于传统模具生产方案，具有更为灵活和多样的选择。一般砂芯工艺方案选择是在保证砂芯自身强度、易于清砂施涂的前提下，优先考虑尽量减少砂芯数量，便于组芯过程中尺寸控制，保证产品尺寸的整体性；同时，需要兼顾砂芯上冷铁放置有操作

空间,砂芯吊运符合安全性要求。

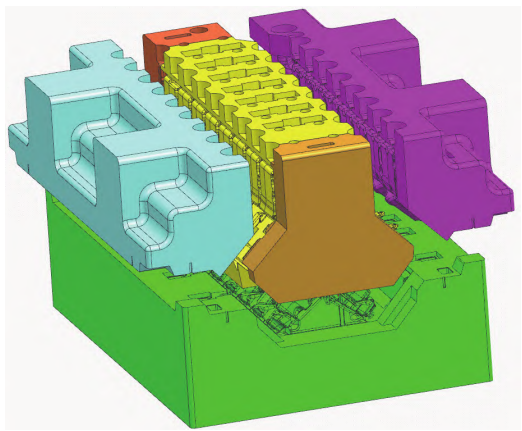
因此,机体产品砂芯采用整体切片的方式,分为外层、内腔两层砂芯,通过底层外层芯将水套腔、挺杆室腔、油道腔及凸轮轴孔等结构相连,保证该部分嵌套布置紧凑的内腔结构成为一整体,避免铸件内腔存在披缝而无法清理;通过内腔芯将缸孔、凸轮轴孔、曲柄腔等结构连接在一起;上层外层芯主要包括机体左右两侧外表面结构、自由端结构和阻尼端结构,保证轴瓦、止推端、自由端、阻尼端位置砂芯结构上易于清砂施涂并具有足够的冷铁放置空间,同时带出两侧水腔结构。综上所述,最终机体产品3D打印砂芯分芯方案如图2所示,共计6块砂芯,砂铁比2.2。

(2) 浇注系统方案设计 浇注系统设计应充分保障金属液连续平稳地充型,避免过度的湍流而造成卷气和较为严重的二次氧化渣产生,同时浇注系统具有挡渣、净化金属液的功能^[1]。此机体产品设计了底侧注的开放式浇注系统,浇注时间 (40 ± 5) s,横浇道靠近铸件底部,浇注前期横浇道快速充满,

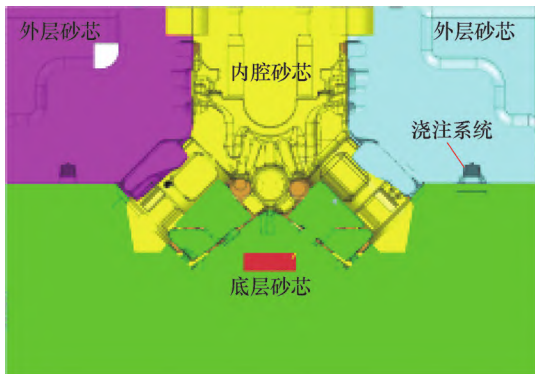
起到浇注系统自身溢渣、挡渣作用。内浇道是最后一道约束金属液充型方向的关卡,因此选择缸孔侧边位置进流,不直冲砂芯,同时增大浇注系统开放比例,最大程度地降低内浇口位置金属液流速。内浇口和横浇道之间布置碳化硅材质的泡沫型过滤网,起到进一步过滤阻挡金属液中渣子进入型腔^[2, 3]。最终浇注系统设计的截面积比为 $\Sigma F_{直} : \Sigma F_{横} : \Sigma F_{内} = 1 : 1.59 : 2.08$,内浇口流速 < 0.9 m/s。

浇注系统整体呈U字形,更好地保证铸件左右方向同时进流,避免金属液在壁厚薄的位置行程过长,充型困难,如图3所示。浇注系统充型流速模拟如图4所示。从模拟结果分析,充型前期金属液优先快速充满横浇道,内浇口位置充型平稳,无明显飞溅、紊流、卷气等现象,充型完成后整体温度场分布均匀。

(3) 补缩方案设计 机体产品有多处热节且位置较为分散,每一处热节位置均会在凝固过程中形成孤岛,最终有可能产生缩松缺陷。根据机体热模数分布,铸件热节主要分为轴瓦及地脚、缸孔及V形中间腔道两部分,如图5所示。其中,轴瓦位置和地脚位置之间有相对较厚的铸件壁厚连接,因此轴瓦对应的地脚顶面设置保温冒口,可以补缩一部分金属液收缩量,同时轴瓦位置设计冷铁,加快凝固

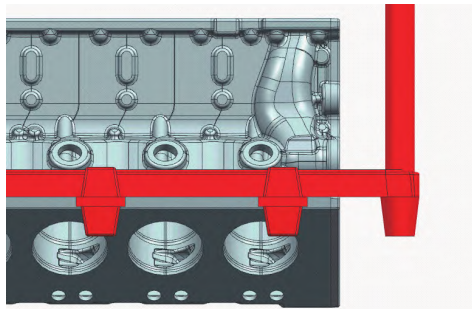


a) 爆炸图

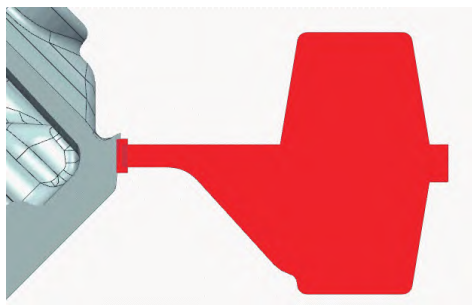


b) 截面

图2 砂芯分芯方案



a) 浇注系统形式



b) 浇注系统截面

图3 浇注系统方案

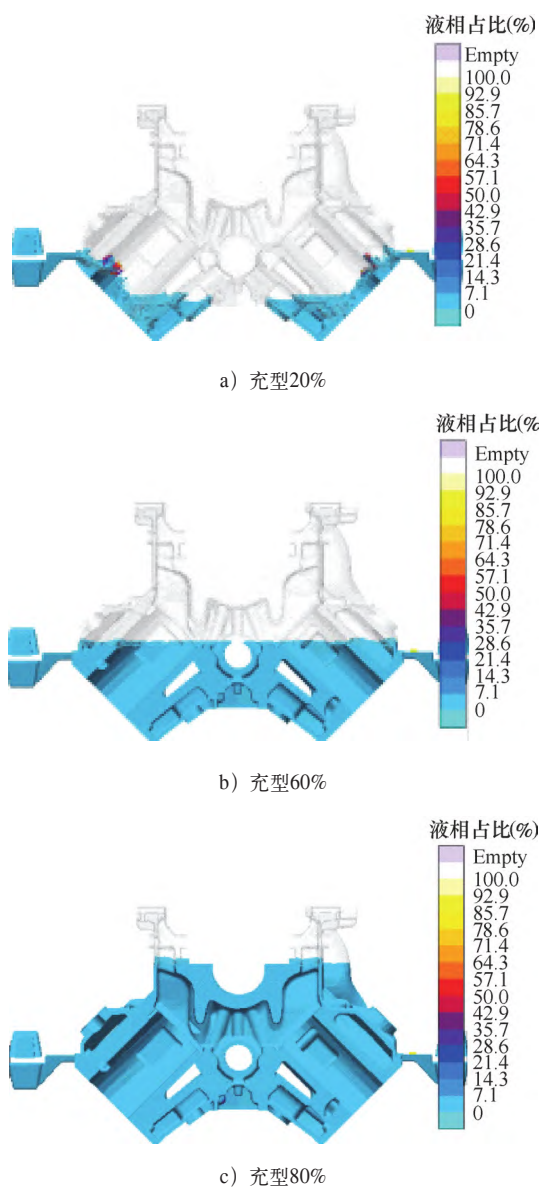


图4 充型流速模拟示意

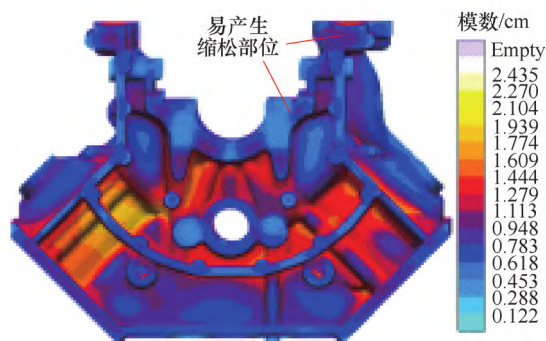


图5 机体模数分布

速度,改善整体的温度场分布;缸孔位于整体铸件下部分,靠近浇注系统,且热节来源主要是由腔道螺包、筋板相互交错位置产生,因此主要通过设计

合适厚度的冷铁来调整此区域的凝固顺序。在实际铸件生产中,通过地脚顶面设计保温补缩冒口,同时配合设计冷铁激冷改变凝固速度和顺序,整体设计方案采用MAGMA模拟后,凝固过程如图6所示。

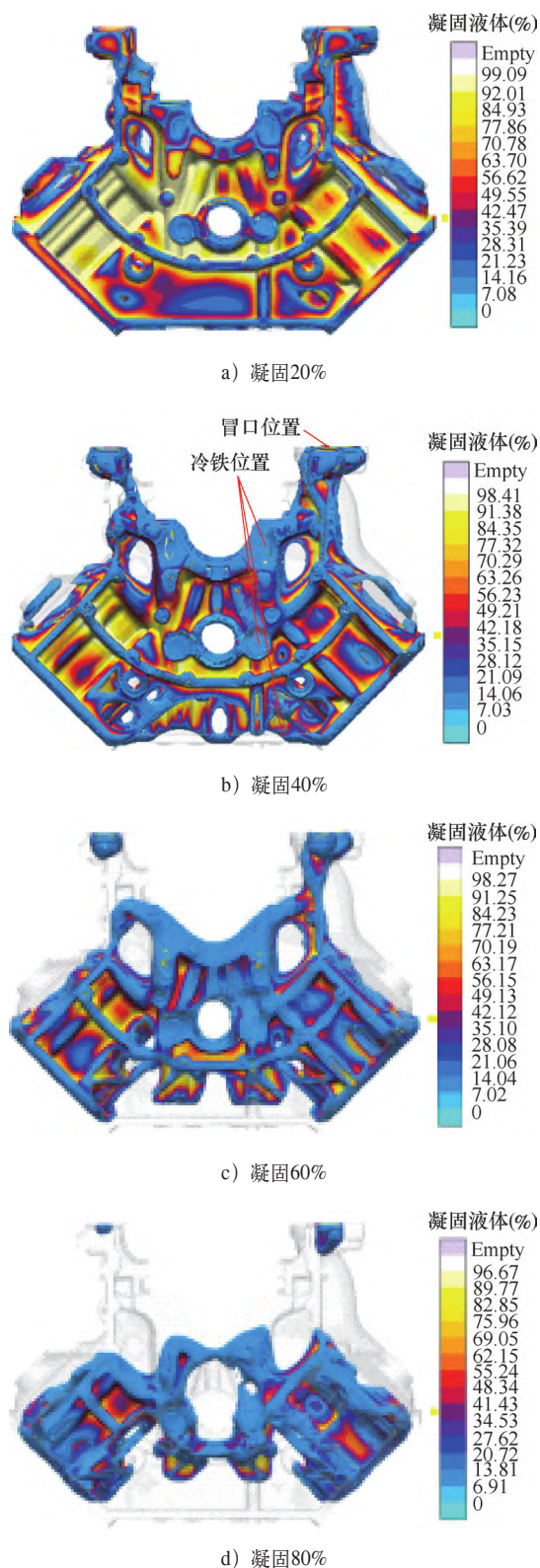


图6 工艺方案凝固过程示意

4 熔炼工艺

球墨铸铁铸造要求较高，若铸造过程控制不当，则可能导致球墨铸铁内部结构发生变化，出现孔洞、凹陷级表面粗糙等缺陷，还可能出现杂质较多、裂纹、变形等问题，因此需要一种最佳的配比和过程控制方案，才能满足产品性能要求，同时实现稳定化生产。

4.1 成分选择和分析

客户要求进行实体轴承座套料检测，单铸试棒与实体套料结果都要保证，添加合金在保证单铸试块性能前提下又不能因增加过冷度而造成实体性能不合格，故选择合金铜作为强化合金，且由于铸件整体壁薄结构复杂，很难通过冒口实现补缩，因此需要提高铸件碳当量，实现凝固自补缩，其内控化

学成分见表3。

4.2 原材料配比选择

原辅材料的配比，必须避免S与其他微量杂质元素对材质成分的影响，本文选择Q10生铁50%~70%，回炉料15%~25%，废钢15%~25%。根据计算，炉前 $w_s=0.025\% \sim 0.080\%$ ，可有效避免因S含量高和不稳定而引起球化率偏差问题。Q10生铁选用控制化学成分见表4。

4.3 工艺控制

采用喂线工艺控制球化，稳定可靠，使用的球化线、孕育线成分见表5。设置合适的喂线量与喂线速度，通过镁线的搅拌使铁液完全均匀化。

浇注时为了保证材料实体性能，增加了0.1%~0.2%硫氧孕育剂瞬时孕育。

表3 机架内控化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg
3.55~3.95	2.15~2.75	≤0.5	≤0.045	0.010~0.018	0.45~0.8	0.02~0.05

表4 Q10生铁选用控制化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	P	S	Mg
3.5~4.0	≤0.4	≤0.1	≤0.035	≤0.035	≤0.010

表5 喂线成分

Mg15线成分						
成分	质量分数 (%)				最小含量/ (g/m)	0.1~2.5mm粒度含量 (质量分数, %)
	Mg	Si	Ca	MgO		
含量	14~16	42~46	1.5~2.5	≤1	≥265	≥95

孕育线成分				
成分	质量分数 (%)		最小含量/ (g/m)	0.1~2.5mm粒度含量 (质量分数, %)
	Si	Al		
含量	73~77	≤1	≥235	≥95

5 生产结果

铸件生产的金相检测结果如图7所示。从图7a可

看出，按ISO 945-1：2019《铸铁的显微组织 通过目视分析对石墨进行分类》要求，石墨形态为V级 +

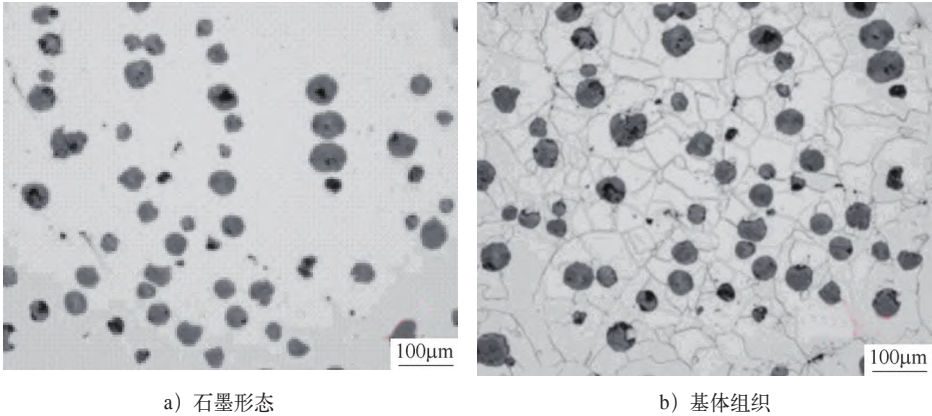


图7 金相检测结果

VI级；从图7b可看出，按GB/T 9441—2009要求，铁素体 $\geq 90\%$ ，碳化物含量 $\leq 1\%$ 。力学性能和金相组织检测结果见表6。

采用上述工艺方案生产的球墨铸铁机体（见图

8），按照技术要求的标准进行了外观、尺寸、无损检测、金相组织及力学性能等检测，所有的检测结果均为合格，铸件质量满足技术要求，铸件实现一次性设计、研发并试制成功，当前已开始稳定生产。

表6 附铸试块力学性能和金相组织检测结果

力学性能				金相组织	
抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率(%)	硬度HBW	球化率(%)	珠光体(%)
567	350	13.5	179	84	45



图8 铸件实体

6 结束语

研究和实践结果表明，通过合理的砂芯分芯、浇注系统、补缩系统等3D铸造工艺及熔炼工艺的分

析制定，利用MAGMA模拟有效规避风险，成功研发并生产了各项指标均满足技术质量要求的轻量化发动机机体。

参考文献：

- [1] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册（第5卷）：铸造工艺[M]. 北京：机械工业出版社，2003.
- [2] 郝石坚. 现代铸铁学[M]. 北京：冶金工业出版社，2009.
- [3] 魏兵，袁森，张卫华. 铸件均衡凝固技术及其应用[M]. 北京：机械工业出版社，1998.

MW 20241030

（上接第127页）

时效处理有助于改善室温塑性，室温屈服强度和抗拉强度分别达到746MPa、1027MPa，显示出良好的强韧性，满足电厂使用要求。

2) A286合金中的主要析出相为TiC和 γ' 相。720℃下17h时效处理有利于 γ' 相均匀地弥散分布在基体上，数量最多、尺寸较为合适，从而增加了材料的综合性能。

参考文献：

- [1] 齐跃，万志慧，余传魁，等. 紧固件用A286高温合金AMS标准解读与应用[J]. 金属加工（热加工），2021（9）：32-34.
- [2] 李吉东，王岩，谷宇，等. 固溶处理对A286合金组织与硬度的影响[J]. 金属热处理，2023，48（2）：223-227.
- [3] 代礼斌，杨章程，邓雄，等. 固溶温度对A286合金低温力学性能的影响[J]. 金属热处理，2023，48（3）：96-99.
- [4] 金万军，程定宇，王建宏，等. 热处理对A286合金力

学性能的影响[J]. 热加工工艺，2018，47（24）：236-237.

- [5] 姚志浩，阮雅婷，董建新，等. 固溶时效热处理对A286合金组织演变规律的影响[J]. 材料热处理学报，2016，37（7）：40-47.
- [6] 张胜全，王玉慧. Inconel 600合金元素偏聚及对组织影响的研究[J]. 热加工工艺，2015，44（12）：167-169.
- [7] 米大为. 固溶温度对GH5605高温合金组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理，2018，43（12）：191-194.
- [8] 柳思成，许彦伟，殷小健. 形变量及时效制度对A286高温合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理，2019，44（5）：167-171.
- [9] 陈琪，陈雅文，孔凡亚. 热处理对超大变形量GH2132合金力学性能的影响[J]. 热加工工艺，2012，41（20）：184-188.

MW 20241030