

不锈钢铸件热等静压工艺研究

蔡森, 王晓巍, 焦清洋, 王漪琼, 姜洪淼

(沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁沈阳 110850)

摘要: 将热等静压技术应用于ZG0Cr14Ni5Mo2Cu铸件, 分别测试了铸件经热等静压处理前后的尺寸、室温力学性能及处理前后铸件的X射线检测底片、金相组织和冲击试块断口形貌。试验结果表明: 与未经热等静压处理相比, 该材料经热等静压处理后, 在X射线底片上可显示完全消除了疏松类缺陷, 气孔有部分弥合, 同时细化了晶粒组织, 改善了材料的力学性能。

关键词: 不锈钢铸件; 热等静压; 力学性能

热等静压(HIP)工艺是一种在惰性气体氛围中给元件同时施加压力和加热的工艺, 即将元件(或元件坯料)置于惰性气体氛围的压力炉中加热至高温, 同时施以高温等静压使材料转变到塑性状态并消除材料内部的疏松、缩孔等缺陷。上述缺陷经高温高压粘接在一起形成致密组织使元件或部件更坚固。多数情况下, 类似缺陷的消除不会改变元件的形状和大小^[1]。

自1955年热等静压工艺出现以来, 在粉末金属和铸件致密化方面的应用得到了稳步增长。Howmet公司自1976年首先开始把热等静压技术应用于宇航工业, 并在宇航和工业燃气轮机部件的生产方面获得了确认。目前, 热等静压技术作为一项成熟的改善铸件性能尤其是消除铸件内部疏松等缺陷的生产技术, 被广泛应用于高温合金、钛合金、铝合金等重要铸件的生产应用中。随着热等静压技术的发展, 其应用范围也不断拓展。由于影响铸件内部缺陷的因素是复杂而多方面的, 如铸造合金特性、合金熔体净化处理、浇注系统设计、浇注参数的选择和铸造环境气氛等, 使得某些疏松、缩孔等缺陷不易通过铸造工艺改善来去除。

本研究将热等静压技术应用于ZG0Cr14Ni5Mo2Cu铸件, 分别测试了铸件经热等静压处理前后的尺寸、室温力学性能的变化, 并比较二者的差异; 同时, 对比热等静压处理前后铸件的X射线检测底片、金相组织和断口形貌, 探讨了热等静压处理对ZG0Cr14Ni5Mo2Cu铸件力学性能及内部缺陷的影响。

作者简介:

蔡森(1983-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为铸造工艺研究和技术开发。
电话: 024-86598183, E-mail: 176864318@qq.com.

中图分类号: TG162

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)10-1288-06

收稿日期:

2023-05-04 收到初稿,
2023-07-13 收到修订稿。

1 试验材料、设备及方法

1.1 试验用铸件

选取的铸件应有外形及壁厚差异。根据生产实际, 选取了具有疏松、缩孔、气孔等冶金缺陷的5种铸件, 具体铸件项目及缺陷类型见表1。铸件图片见图1。



(a) 1#铸件

(b) 2#铸件

(c) 3#铸件

(e) 4#铸件

(f) 5#铸件

图1 试验用铸件类型

Fig. 1 Type of the castings for testing

表1 典型铸件选取及缺陷类型
Table 1 Selection of typical castings and defect type

铸件编号	缺陷类型	缺陷处壁厚/mm
1 [#]	疏松	3.5
2 [#]	气孔	3.5
3 [#]	缩孔	6
4 [#]	疏松	8.5
5 [#]	疏松	8.5

1.2 热等静压设备及试验参数设定

热等静压设备型号及参数见表2。理论上，热压温度越高、压力越大，缺陷越容易被消除，但为了不使铸件过烧甚至熔化，我们选择加热温度为 $(1170 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。热压压力、保温保压时间，试验参数设定见表3。热压完毕后泄压，铸件随炉冷却至 200°C 以下出炉。

表2 热等静压设备型号及参数
Table 2 Model and parameters of hot isostatic pressing equipment

设备型号	工作温度/ $^\circ\text{C}$	工作压力/MPa	有效加热加压区/mm
RD500	0~1400	0~200	$\Phi 420 \times 1060$

表3 试验参数设定
Table 3 Test parameter setting

温度/ $^\circ\text{C}$	压力/MPa	保温保压时间/min	冷却方式	出炉温度/ $^\circ\text{C}$
1170 ± 5	155 ± 5	270	随炉冷却	< 200

1.3 金相及电子扫描设备

金相组织观察并拍照采用zeiss axio observer金相显微镜，断口形貌观察采用TESCAN MAIA3扫描电子显

微镜设备，腐蚀溶液采用 $\text{HNO}_3 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$ 按1:2:3的比例配制。

1.4 试验方法

分别选取具有3种缺陷的12件铸件进行热等静压前后对比试验，分析热等静压试验前和试验后，铸件经X射线探伤检测底片缺陷及尺寸变化；选取两个炉次拉伸及冲击试样进行热等静压处理前后力学性能、金相组织及扫描电镜扫描结果组织变化情况分析对比。

2 试验结果

2.1 X射线检测结果

分别对经热等静压处理前后铸件缺陷位置进行了X射线探伤检测，检测结果见表4，处理后不同种类典型缺陷的X射线检测结果前后对比见图2-图4。通过对比发现，铸件经过热等静压处理后，除了2[#]铸件气孔缺陷未消除外（图4b），其余零件缺陷均完全消除。

2.2 尺寸检测结果

为了验证热等静压处理对尺寸的影响，采用划线

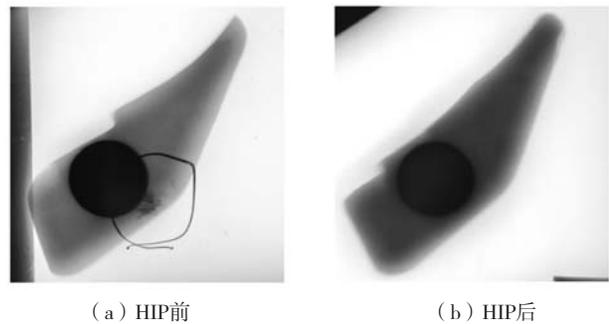
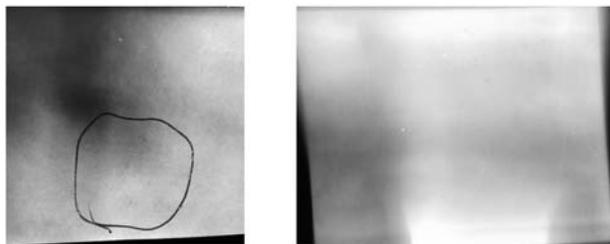


图2 缩孔类缺陷
Fig. 2 Shrinkage defects

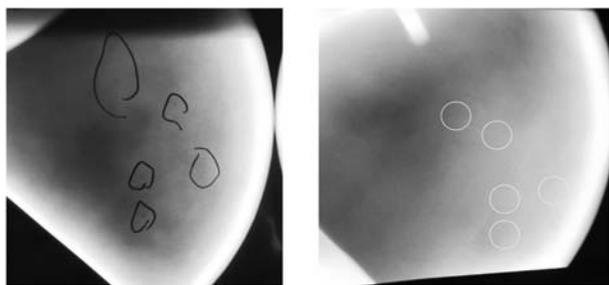
表4 热等静压处理前后X射线检测缺陷对比情况
Table 4 Comparison of the defects detected by X-ray before and after hot isostatic pressing

序号	铸件编号	缺陷类型	热等静压前缺陷数量及大小	热等静压后缺陷数量及大小	缺陷变化情况
1	1 [#]	疏松	1处1 mm × 2.5 mm	无	完全消除
2	1 [#]	疏松	1处0.5 mm × 3 mm	无	完全消除
3	2 [#]	气孔	6处0.2~0.6 mm	6处	变小或形状不规则
4	2 [#]	气孔	5处0.3~0.5 mm	5处	变小或形状不规则
5	3 [#]	缩孔	1处0.2 mm × 2.5 mm	无	完全消除
6	3 [#]	缩孔	1处3 mm × 5 mm	无	完全消除
7	3 [#]	缩孔	1处0.8 mm × 1.5 mm	无	完全消除
8	3 [#]	缩孔	1处5 mm × 11 mm	无	完全消除
9	4 [#]	疏松	1处1 mm × 2 mm	无	完全消除
10	4 [#]	疏松	1处0.8 mm × 1.2 mm	无	完全消除
11	5 [#]	疏松	1处2 mm × 7 mm	无	完全消除
12	5 [#]	疏松	1处1 mm × 0.2 mm	无	完全消除



(a) HIP前

(b) HIP后

图3 疏松类缺陷
Fig. 3 Porosity defects

(a) HIP前

(b) HIP后

图4 气孔类缺陷
Fig. 4 Blowhole defects

的方式,对5种实验用铸件各选2件进行了尺寸检查,主要测量数据对比见表5。

通过对划线铸件尺寸检查结果可以看出,经热

等静压处理前后铸件尺寸变化极其微小,统计结果表明:铸件实体尺寸均为负变化,而空间结构尺寸则不规律。

2.3 性能、组织及断口对比

2.3.1 硬度

分别对铸态、预备热处理、最终热处理三种状态的热等静压处理前后的试样进行了硬度检测^[2],检测结果见表6。

试验结果表明,经过热等静压处理前后的硬度压痕直径值基本没有明显变化。

2.3.2 金相组织

对HIP处理前后且经过同样热处理制度处理的试样进行金相组织观察见图5,试验结果表明,经过热等静压处理前后的基体组织均没有明显变化。

2.3.3 力学性能

选取了两个炉次的试样进行热等静压处理前后力学性能试验^[3]对比,试验结果见表7。

2.3.4 扫描电镜下断口形貌结果对比

选取热等静压处理前后的各自经过预备+最终热处理的冲击试样断口进行电镜扫描,图6为上述冲击试样冲击后的断口形貌扫描电镜照片对比。

表5 热等静压处理前后铸件主要尺寸对比
Table 5 Comparison of the main dimensions of the castings before and after hot isostatic pressing

铸件编号	热等静压处理前尺寸/mm				热等静压处理后尺寸/mm							
					测量值	变化率/%	测量值	变化率/%	测量值	变化率/%	测量值	变化率/%
1 [#]	80.36	65.31	104.77	82.48	80.31	-0.06	65.25	-0.09	104.82	+0.05	82.46	-0.02
1 [#]	80.41	65.37	104.6	82.49	80.37	-0.05	65.33	-0.06	104.65	+0.05	82.45	-0.05
2 [#]	Φ80.88	66.63	66.67	Φ92.52	Φ80.86	-0.02	66.69	+0.09	66.72	+0.07	Φ92.71	+0.21
2 [#]	Φ80.94	67.14	66.89	Φ92.27	Φ80.94	0.00	67.08	-0.09	66.93	+0.06	Φ92.2	-0.08
3 [#]	44.07	119.98	170.53	102.5	44.14	+0.16	120.12	+0.12	170.5	-0.02	102.5	0.00
3 [#]	44.56	120.43	170.89	102.5	44.42	-0.31	120.51	+0.07	170.84	-0.03	102.5	0.00
4 [#]	27.06	Φ89.96	Φ119.54	84.32	27.00	-0.22	Φ89.82	-0.16	Φ119.52	-0.02	84.25	-0.08
4 [#]	27.09	Φ89.9	Φ120.32	83.99	26.99	-0.37	Φ89.41	-0.55	Φ120.3	-0.02	83.86	-0.15
5 [#]	Φ104.67	102.1	Φ78.24	83.3	Φ104.62	-0.05	102.1	0.00	Φ78.26	+0.03	83.3	0.00
5 [#]	Φ104.41	102.1	Φ78.17	83.4	Φ104.45	+0.04	102.1	0.00	Φ78.02	-0.19	83.26	-0.17

表6 硬度对比数据
Table 6 Hardness comparison data

试样状态	铸态硬度		预备热处理后硬度(压痕直径≥3.4 mm)		最终热处理后硬度(压痕直径2.9~3.3 mm)	
热等静压处理前	3.23	3.24	3.63	3.68	3.2	3.14
热等静压处理后	3.20	3.22	3.65	3.69	3.17	3.15

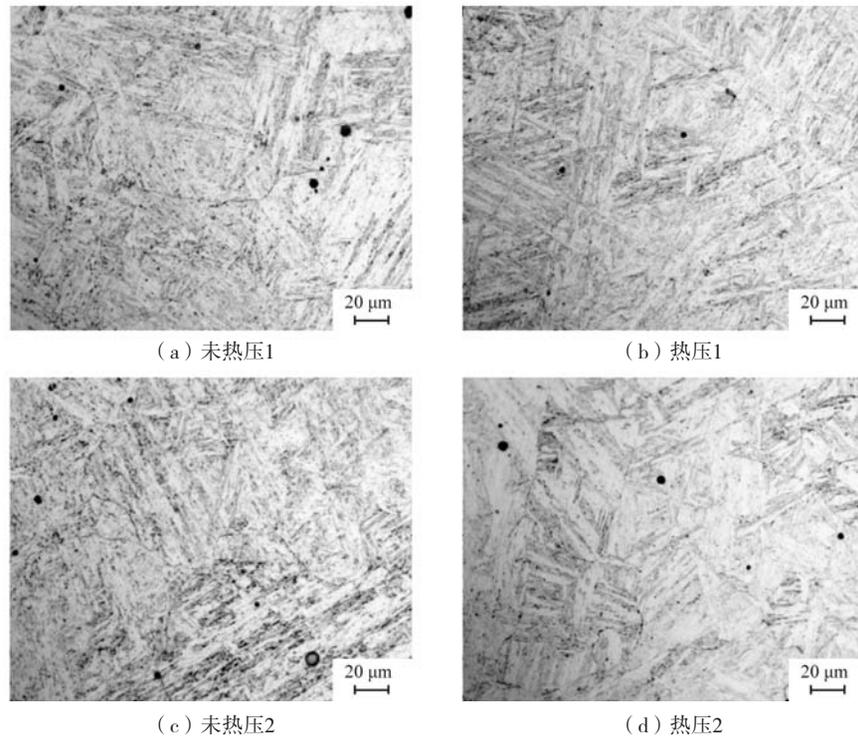


图5 HIP处理前后试样的金相组织

Fig. 5 Microstructures of the specimens before and after HIP treatment

表7 力学性能对比数据

Table 7 Comparative data of the mechanical properties

试棒状态	热处理制度	冲击韧性 $\geq 39 \text{ J/cm}^2$	抗拉强度 $\geq 1\ 225 \text{ MPa}$	屈服强度 $\geq 885 \text{ MPa}$	断后伸长率 $\geq 12\%$	断面收缩率 $\geq 35\%$
未热压1		78.1	1 228	1 042	15	59
未热压1		60.4	1 234	1 052	15.5	58
未热压1		77.6	1 230	1 045	15.5	59
未热压2		41	1 218	1 035	13.5	59
未热压2		74.9	1 240	1 057	15.5	56
未热压2		76.6	1 258	1 084	15.5	58
热压1	预备+最终热处理	86	1 274	1 099	16.5	60
热压1		94.7	1 278	1 092	15.5	60
热压1		85.5	1 280	1 100	16.5	62
热压2		89.2	1 274	1 098	16	60
热压2		81.7	1 284	1 096	16	61
热压2		97.9	1 283	1 098	16.5	58
未热压平均值		68.1	1 235	1 053	15.1	58
热压平均值		89.8	1 279	1 097	16.2	60
热压比未热压提高值		21.7	44	44	1.1	2
热压比未热压提高比率		32%	3.60%	4.10%	7.30%	3.40%

2.4 结果分析

2.4.1 热等静压对缺陷的影响

试验结果表明,铸件经适宜的热等静压处理,对内部非气孔类封闭缺陷有明显愈合消除作用(图4),

此类缺陷由于在高温高压下金属发生塑性变形,缺陷坍塌而被愈合^[4-6]。而2#铸件气孔缺陷未被消除,这是因为气孔内部的空气即使经过高温高压仍然聚集在原来气孔内部而无法排除,高温高压只能使气孔尺寸一

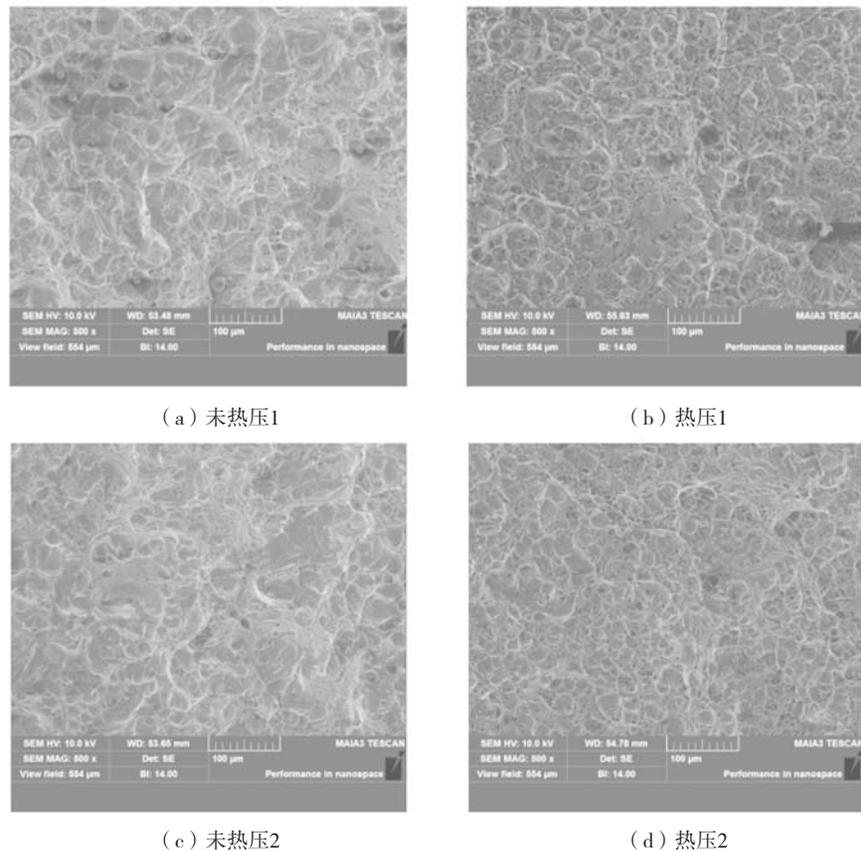


图6 经过热处理后的冲击试块断口扫描电镜下形貌对比

Fig. 6 Comparison of the fracture morphologies of the impact test specimens after heat treatment by SEM

一定程度上变小及改变形状^[7]，小一些的气孔在高温高压下由于变得更小或者变形致使在经过热等静压处理后的X射线检测中无法分辨出而显示不出来，而尺寸略大的气孔则仍有显示（图4b）。

2.4.2 热等静压对尺寸的影响

热等静压状态下，作用于铸件外表面的压力合力为零，铸件实体尺寸均为负变化，但这种变化极其微小，可忽略。而空间结构尺寸则不规则，这种不规则主要取决于铸件的结构形状，尺寸的变化只受摆放方式及高温作用的影响，在高温状态下，金属材料发生软化，受自身重力影响而产生各种弯曲，变形的的方式取决于摆放方式及零件结构而变的复杂。

2.4.3 热等静压对硬度、组织及力学性能的影响

金属材料经过热等静压处理，在高温高压下组织会变得致密。试验结果表明，热等静压处理不仅可以消除部分甚至全部封闭性疏松、孔洞类等缺陷，本质上也是一种高压下的成分均匀化过程。金属材料在被加热重新奥氏体化过程中，枝晶及晶粒会变得粗大，随着加热温度的提高、保温时间延长，这种趋势会变得严重。高温使材料进入塑性变形区，在高压的作用

下，枝晶及晶粒的长大得以抑制甚至变小，这取决于温度及压力参数的设定。在随后的预备热处理（均匀化处理）及调质过程中，成分被进一步均匀化，晶粒进一步细化，故而材料的各项力学性能指标均得到提升。由于硬度只与成分和组织有关，在热处理制度一定的情况下，热等静压不改变化学成分与基体组织，因此经过热等静压处理后的硬度值及基体组织也基本没有变化，表6及图5也证明了这一结论。由于铸件经过高温高压，以及随后的均匀化（经过热等静压处理的铸件相当于经过两次均匀化）+调质处理，金属基体化学成分均匀化程度更高，高压又使得组织致密、晶粒细化，因此力学性能均得到不同程度提高。观察图6冲击试样冲击后的断口扫描电镜形貌照片对比看出，经过热等静压处理后的冲击试样断口形貌均呈现明显的延性断裂特征，即韧窝断裂形貌。按照断裂力学的相关理论，韧窝的大小对应组织晶粒的大小^[8]。经过热等静压处理的冲击试样断口的韧窝尺寸明显小于未经过热等静压处理的韧窝尺寸，未经过热等静压处理的断口形貌呈现了一定的解理断裂特征，尤其图6d显示的解理面与未经过热等静压处理的图6c对比，效果非常明显。

3 结论

(1) 铸件采用热等静压处理可以有效减少甚至完全消除ZG0Cr14Ni5Mo2Cu铸件内部封闭式缩松及孔洞类缺陷,不能消除气孔类缺陷。

(2) 排除铸件摆放及结构因素影响,热等静压处理对铸件尺寸的影响可忽略不计。

(3) ZG0Cr14Ni5Mo2Cu铸件经HIP处理并通过

热处理后,力学性能均有所提升,在本试验条件下,冲击韧性提升最为明显,平均值由68.1 J/cm²提高到89.8 J/cm²,提升比率达到32%。

(4) 通过冲击试样断口观察,ZG0Cr14Ni5Mo2Cu铸件经HIP处理并通过均匀化及调质处理后,晶粒得到进一步细化,基体组织则无明显变化。

参考文献:

- [1] CHARLES Barre. Hot isostatic pressing [J]. Advanced Materials & Processes, 1999, 155 (3): 47-48.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T231.1—2018. 金属布氏硬度试验 第1部分: 试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T228.1—2021. 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [4] 杜旭初, 洪润洲, 杨守杰, 等. 热等静压对铝合金铸件组织和性能的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2016 (6): 55-59.
- [5] 丁剑, 李亚辉. 热等静压在铝合金铸件中的应用 [J]. 铸造, 2021 (7): 850-854.
- [6] 呼和, 汪武祥. 镍基铸造高温合金的热等静压处理 [J]. 金属学报, 2002 (11): 1199-1202.
- [7] 曲银辉, 王书晗, 胡大川, 等. 热等静压对铸造铝合金气孔缺陷的影响 [J]. 铸造, 2021 (10): 1228-1232.
- [8] 马力深, 钟约先, 马庆贤, 等. δ 铁素体对12%Cr超超临界转子钢冲击性能的影响 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48 (11): 1711-1714.

Research on Hot Isostatic Pressing Process for Stainless Steel Castings

CAI Sen, WANG Xiao-wei, JIAO Qing-yang, WANG Yi-qiong, JIANG Hong-miao
(Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Shenyang 110850, Liaoning, China)

Abstract:

Hot isostatic pressing technology was applied to ZG0Cr14Ni5Mo2Cu castings. The size and mechanical properties of the castings before and after hot isostatic pressing treatment, as well as the X-ray detection film, metallographic microstructure and impact test block fracture morphology were respectively tested. The test results showed that compared with the material without hot isostatic pressing treatment, the material with hot isostatic pressing treatment completely eliminated the porosity defects on the X-ray film, and the gas holes were partially closed. At the same time, the grain microstructure was refined, and the mechanical properties of the material were improved.

Key words:

stainless steel casting; hot isostatic pressing; mechanical properties
