

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu 不锈钢铸件热校正工艺研究

刘松良¹, 蔡 森², 王漪琼²

(1. 海装沈阳局驻沈阳地区第一军事代表室, 辽宁沈阳 110850; 2. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁沈阳 110850)

摘要: ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件在铸造、热处理及加工等过程中极易产生变形, 且因铸件结构限制、合金强度较高等因素影响, ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件冷态校正难度极大。本试验通过对比ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件在不同高温条件下校正效果及性能变化, 开展不锈钢铸件加热校正工艺研究。研究表明, ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件热校正温度不应低于650 ℃, 且不应高于850 ℃, 在此温度区间进行热校正不影响铸件力学性能。

关键词: ZG0Cr14Ni5Mo2Cu; 加热校正; 变形程度

铸件校正是解决铸造过程、热处理过程中铸件变形的有效手段, 按加热方式不同铸件校正可分为冷态校正和热态校正。冷态校正, 即正常室温下的校正, 适用于校正形状简单、塑性较好的薄壁铸件; 热态校正, 即对铸件进行加热后使铸件处于热塑性状态的校正。

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件为航空工业某型号工程国产化材料, 在相关铸件标准中规定铸件在铸造和热处理后发生翘曲和几何形状有偏差时, 允许进行校正。实际生产过程中, 铸件在冷态下不易变形, 所以校正难度极大, 而铸件在热态下校正缺乏相关工艺参数, 因此对ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件热校正工艺进行研究具有重要意义^[1-2]。

1 铸件技术要求及存在问题

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件热处理标准中规定铸件的主要校正工序应尽可能在淬火状态下进行, 在实际生产中, 由于铸件生产工序较长, 变形更易产生在铸造、预备热处理和机加阶段, 在淬火状态下进行只能针对最终热处理阶段产生的变形, 对于其他阶段的变形在淬火状态无法进行校正操作, 且目前热校正工艺不够明确, 亟待完善、优化。

2 试验方法

2.1 试验件设计

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件校正过程中发现形状复杂、壁厚较厚的铸件校正难度较大。试验件的设计即需要保证易直观测量, 保证试验数据的准确性, 又要结合公司现有不锈钢铸件产品的结构特点。故试验件设计成直角形支臂结构, 支臂壁厚8 mm, 且一侧配有拉筋, 试验件具体结构见图1所示^[3]。

2.2 试验参数设计

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件在实际生产中为预备热处理后进行尺寸检查及无损检测, 最终热处理前进行机械加工(最终热处理后只进行局部精加工), 因此铸

作者简介:

刘松良(1979-), 男, 工程师, 研究方向为材料成形工艺研究及技术管理。
电话: 024-86599298

中图分类号: TG142.71
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2020)07-0756-05

收稿日期:

2020-03-31 收到初稿,
2020-05-06 收到修订稿。

造、预备热处理及加工变形的校正均发生在铸件预备热处理后、最终热处理前阶段。ZG0Cr14Ni5Mo2Cu铸件热处理制定及力学性能见表1。

实际生产过程中利用低温退火或回火过程校正变形，因温度较低造成校正效果不理想，按上述热处理工艺，ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件热校正温度不应

低于高温回火温度，即不低于650℃。

故本课题设计热校正温度为650~900℃，温度间隔为50℃。为保证铸件内外温度均匀，加热后需保温1.5 h，并对预备热处理后冷态下校正、最终热处理淬火后校正情况进行对比，试验件标记为1#~8#，具体对应关系如表2所示^[4-5]。

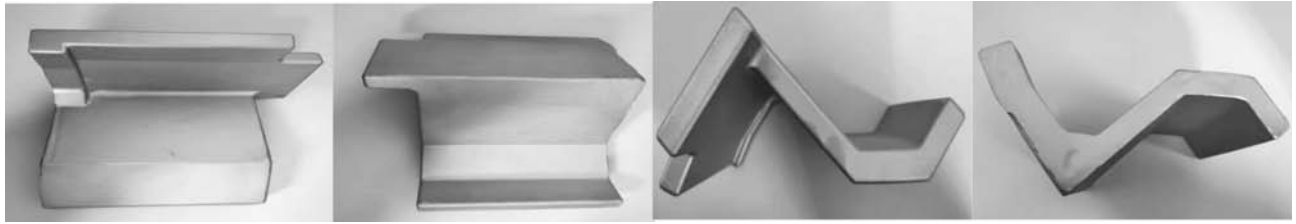


图1 试验件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test piece

表1 ZG0Cr14Ni5Mo2Cu铸件热处理工艺及力学性能
Table 1 Heat treatment procedure and mechanical properties of ZG0Cr14Ni5Mo2Cu casting

热处理制度	R_m /MPa	$R_{0.2}$ /MPa	A_5 /%	Z/%	a_k /(J·cm ⁻²)	布氏硬度HBS (压痕直径/mm)
预备热处理: 均匀化 (1 110 ± 10) °C, 风扇冷却 或压缩空气冷却; 回火 (650 ± 10) °C, 空冷。	-	-	-	-	-	≤321 (≥3.4)
最终热处理: 淬火 (970 ± 10) °C, 风扇冷却或 压缩空气冷却; 回火 (460 ± 10) °C, 空冷。	≥1 225	≥885	≥12	≥35	≥39	341 ~ 444 (3.3 ~ 2.9)

2.3 校正试验

使用压力机对1#~8#ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件进行校正，采用压力为(8 ± 2) MPa。校正前后对试验件变形程度进行测量，校正及测量过程如图2所示。

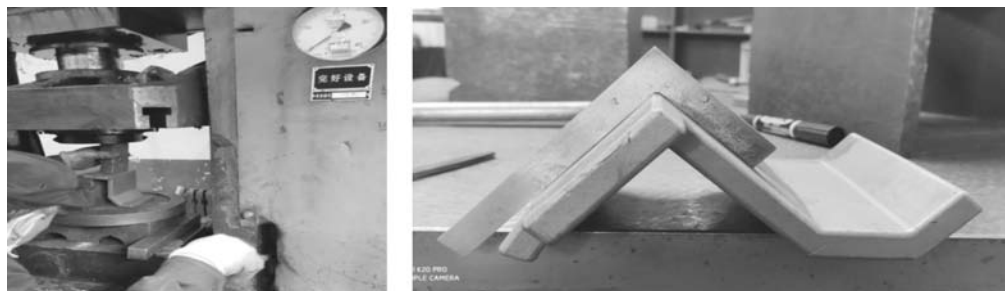
2.4 硬度及性能试验

为验证加热对铸件最终性能影响程度，对1#~6#试验件进行了最终热处理后切取本体试样进行硬度及性能测试，具体测试项目包括硬度、抗拉强度、屈服强度、伸长率、断面收缩率和冲击韧性。

表2 试验件编号

Table 2 Serial number of test pieces

试验件编号	试验件状态	
1#	650 °C, 保温1.5 h	
2#	700 °C, 保温1.5 h	
3#	750 °C, 保温1.5 h	
4#	800 °C, 保温1.5 h	
5#	850 °C, 保温1.5 h	
6#	900 °C, 保温1.5 h	
7#	最终热处理淬火后	室温
8#	最终热处理时效后	室温



(a) 试样校正

(b) 测量

图2 试验件校正及测量

Fig. 2 Test piece correction calibration and measurement

3 试验结果及分析

3.1 校正试验结果

校正后1[#]-8[#]试验件变形量不同,具体数值和变化趋势如表3、图3所示。

3.2 硬度及性能试验结果

试验件冷却至室温后,对1[#]-6[#]试验件进行硬度测量,预备热处理状态下测量结果见表4所示,硬度变化趋势见图4所示。

校正试验后再将试验件冷却至室温后,对最终热处理状态下的7[#]、8[#]试验件硬度进行测量,结果见表5。

对1[#]至6[#]试验件进行了最终热处理后,在试验件上切取本体试样进行力学性能检测,结果见表6。

3.3 校正试验结果分析

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢试样在热校正温度为650℃时,试验件变形量为0.55 mm。随着温度的升高,ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢试样件热塑性提高,校正时变形量逐渐增加。热校正温度为900℃时,ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢试验件变形量达到1.15 mm。这说明ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件热校正过程中变形量随着校正温度增加而增大。

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢为马氏体沉淀硬化不锈钢,该材料Ac₁转变温度为640℃,Ac₃转变温度为750℃。1[#]-3[#]试样试验温度在材料Ac₁~Ac₃转变温度之间,在该区间试样的金相组织如图6所示。650℃时加热温度刚刚超过Ac₁转变温度,奥氏体转变驱动力较小,故组织中残余奥氏体含量较高,残余奥氏体中渗碳体含量较高,表现为白色高亮区域。700℃和750℃的金相组织中残余奥氏体含量减少,部分铁素体转变为奥氏体,此时新生成的奥氏体含碳量较低。为了维持浓度的相对平衡,碳原子要从高浓度的奥氏体和渗碳体相界处向低浓度的奥氏体和铁素体相界处扩散,此时奥氏体的含碳量与钢的成分相同,组织中表现为高亮区域减少。

4[#]-6[#]试样加热温度超过Ac₃温度,此时晶格由体心立方的向面心立方转变,铁素体转变为奥氏体,奥氏体的强度低,塑性较高,故在该温度区间热校正变形量随着温度的升高而增大。

最终热处理状态的试验件,淬火后ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢试验件变形量为0.6 mm,时效后ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢变形量为0.35 mm。从变形量中可以看出,最终热处理后铸件塑性有所提高,淬火状态塑性优于时效状态。

在实际校正过程中发现,冷态下校正,无论铸件处于何种热处理状态,试验件校正后均存在较大的回

表3 1[#]-8[#]试验件校正前后变形程度对比
Table 3 Comparison of deformation degree before and after correction for 1[#]-8[#] test pieces

试验件编号	校正前/mm	校正后/mm	变形程度/mm
1 [#] (650℃)	1.2	0.65	0.55
2 [#] (700℃)	1.3	0.6	0.7
3 [#] (750℃)	1.2	0.45	0.75
4 [#] (800℃)	1.1	0.35	0.75
5 [#] (850℃)	1.1	0.25	0.85
6 [#] (900℃)	1.3	0.15	1.15
7 [#] (淬火)	0.8	0.2	0.6
8 [#] (时效)	0.9	0.55	0.35

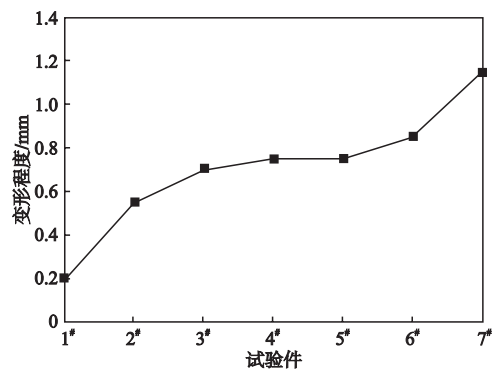


图3 变形趋势图

Fig. 3 Deformation trend diagram

表4 预备热处理状态下1[#]-6[#]试验件硬度
Table 4 Hardness of 1[#]-6[#] test pieces in preliminary heat treatment states

试验件编号	布氏硬度 (压痕直径≥3.4 mm)		
1 [#] (650℃)	3.53	3.51	3.56
2 [#] (700℃)	3.55	3.56	3.58
3 [#] (750℃)	3.58	3.57	3.57
4 [#] (800℃)	3.53	3.535	3.5
5 [#] (850℃)	3.43	3.46	3.4
6 [#] (900℃)	3.38	3.32	3.32

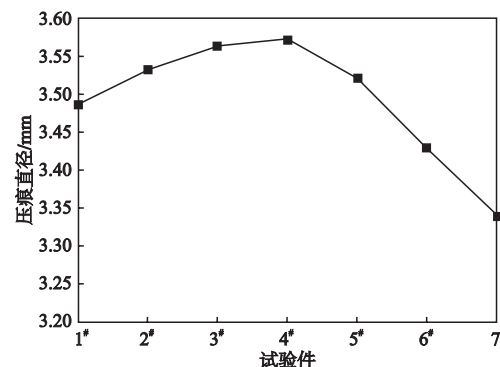


图4 预备热处理状态下1[#]-6[#]试验件硬度变化趋势图

Fig. 4 Hardness change of 1[#]-6[#] test pieces in preliminary heat treatment states

弹, 不易保证校正尺寸; 而热状态下校正, 铸件回弹较小, 校正位置准确, 且随着温度的升高, 回弹逐步减小, 校正位置准确度增加^[7]。

3.4 性能试验结果分析

试验结果中可以看出, ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件随着热校正温度升高, 本体硬度逐渐降低, 在热校正温度为750 °C时硬度值达到最低点, 热校正温度超过750 °C后, 铸件本体硬度随着热校正温度的升高而升高, 在850 °C时铸件本体硬度趋于标准临界值, 在热校正温度为900 °C时, 铸件本体硬度进一步提高且超过标准值。最终热处理状态下, 时效后铸件本体硬度大于淬火后铸件本体硬度, 且硬度值均在标准范围内。

表5 最终预备热处理状态下7[#]、8[#]试验件硬度
Table 5 Hardness of 7[#]~8[#] test pieces in final preliminary heat treatment states

试验件编号	布氏硬度 (压痕直径3.2~2.9 mm)		
7 [#] (淬火)	3.19	3.17	3.22
8 [#] (时效)	3.12	3.1	3.16

体心立方的铁素体向面心立方的奥氏体晶格转变因同为长方体晶格, 故相转变体积变化量不大, 但对渗碳体和合金元素的溶解度影响较大, 奥氏体的面心立方结构间隙半径较大, 对碳原子和合金元素的溶解度较大, 故超过一定温度会造成铜元素的富集, 使基体硬度显著升高。

表6 1[#]-6[#]试验件本体力学性能
Table 6 Mechanical properties of 1[#]-6[#] test pieces

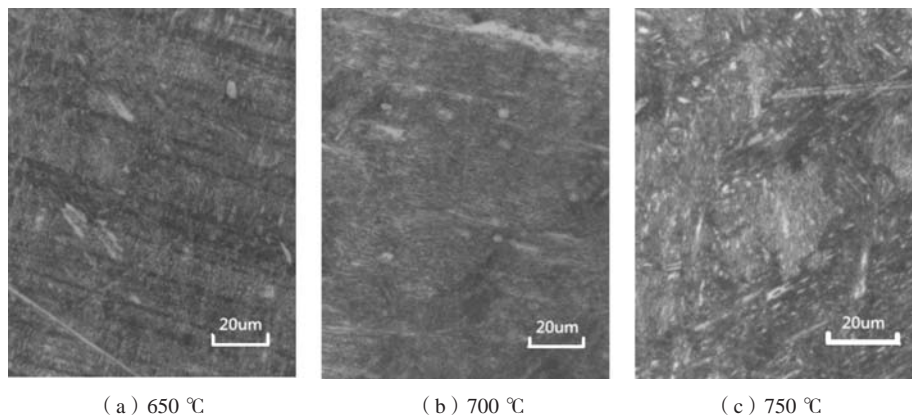
试验件编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%	冲击值/(J·cm ⁻²)
要求值	≥1225	≥885	≥12	≥35	≥39
1 [#] (650 °C)	1 274/1 278/1 281	1 103/1 097/1 105	14.0/15.5/16.0	52/59/63	83.4/88.2/84.3
2 [#] (700 °C)	1 278/1 272/1 259	1 098/1 095/1 093	17.5/16.5/3.5	62/64/18 ^a	89.7/84.7/92.8
3 [#] (750 °C)	1 278/1 271/708 ^a	1 105/1 098/704 ^a	15.5/15.0/2.5	61/61/17 ^a	30.5 ^a /99.4/82.8
4 [#] (800 °C)	1 276/1 274/1 274	1 098/1 095/1 092	16.5/11.5 ^a /17.5	60/33 ^a /55	81.4/91.5/47.6
5 [#] (850 °C)	1 273/1 285/1 088 ^a	1 100/1 111/994 ^a	17.0/15.5/3.5 ^a	59/58/22 ^a	97.1/75.9/88.7
6 [#] (900 °C)	1 284/1 277/1 273	1 117/1 101/1 098	16.0/13.0/16.5	61/41/65	94.8/82.1/87.3

注: a为不合格数据, 通过查看试样, 出现不合格数据的试样均存在明显缺陷, 缺陷如图5所示^[6]。



图5 缺陷试样

Fig. 5 The defective samples



(a) 650 °C

(b) 700 °C

(c) 750 °C

图6 不同校正温度下试样的金相组织图

Fig. 6 Metallographic structure of samples at different correction temperatures

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件力学性能标准值均为单铸试棒性能指标,按照标准要求,从铸件上切取本体试样测定的塑性指标(伸长率,断面收缩率,冲击韧性)应不小于标准值的80%。ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢本体试样性能测试结果可以看出,试验件性能均符合标准要求,说明热校正工艺不会降低铸件本体性能。

4 结论

(1) ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件热校正温度需超过650℃。

(2) 在650~900℃之间,ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件热校正变形量随着温度升高而增加;铸件本体硬度呈现先降低后增加的趋势,750℃为铸件本体硬度最低点,850℃时铸件本体硬度达到标准要求的最高临界值,900℃时铸件本体硬度超过标准要求。

(3) 在650~900℃之间进行热校正工艺不会降低ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件性能。

(4) ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件热校正温度应选取在650~850℃范围内。

参考文献:

- [1] 王文清,沈其文.铸造生产技术禁忌手册[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [2] 《中国航空材料手册》编辑委员会.中国航空材料手册[M].北京:中国标准出版社,2001.
- [3] 徐兴卫,毛进学.铸件结构设计对铸件质量的影响[J].现代铸铁,2017(4):70-74.
- [4] 王漪琼,王晓巍.ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件硬点问题分析[J].铸造,2019,68(9):1055-1059.
- [5] 王晓巍,崔晓淼.异形复杂ZG0Cr14Ni5Mn2Cu不锈钢支座铸造工艺改进[J].铸造,2017,66(1):20-24.
- [6] 李海川,汪殿龙,史学海,等.304不锈钢焊接接头火焰矫形后的晶间腐蚀分析[J].热加工工艺,2018(7):233.
- [7] 任颂赞,叶俭,陈德华.金相分析原理及技术[M].上海:上海科学技术文献出版社,2013.

Hot Correction Technique for ZG0Cr14Ni5Mo2Cu Stainless Steel Castings

LIU Song-liang¹, CAI Sen², WANG Yi-qiong²

(1. The First Military Representative Office in Dalian Area of Shenyang Bureau of the Navy Armament, Shenyang 110850, Liaoning, China; 2. AVIC Shenyang Aircraft Company Limited, Shenyang 110850, Liaoning, China)

Abstract:

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu stainless steel casting deformation easily occurs during casting, heat treatment and machining. Cold correction of ZG0Cr14Ni5Mo2Cu stainless steel castings is extremely difficult. By comparing the correction effect and performance change of stainless steel castings under different high temperature conditions, the heating correction technique of ZG0Cr14Ni5Mo2Cu stainless steel castings was studied. The results show that the thermal correction temperature of ZG0Cr14Ni5Mo2Cu stainless steel castings is at the temperature range between 650℃ and 850℃, which will ensure that the mechanical properties of the castings are not affected.

Key words:

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu; heating correction; deformation degree
