

# ZG0Cr14Ni5Mo2Cu 不锈钢铸件硬点问题分析

王漪琼, 王晓巍

(沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁沈阳 110850)

**摘要:** ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢铸件在加工中出现硬点、硬块现象。采用硬度试验、金相观察等方法分析了预备热处理过程对马氏体沉淀硬化不锈钢组织及硬度的影响, 发现铸件硬点、硬块现象是由冷却过程中铸件堆放导致局部区域冷速过缓, 不利于诱发转变为马氏体组织造成的。通过改进预备热处理过程控制, 提高了铸件质量稳定性。

**关键词:** ZG0Cr14Ni5Mo2Cu; 不锈钢铸件; 硬度

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu为沉淀硬化型马氏体高强度不锈钢, 该钢具有良好的铸造性能、耐腐蚀性和焊接性能, 主要用于飞机上需要耐腐、耐热、形状复杂、强度要求较高的零件<sup>[1]</sup>。通过调整热处理制度(淬火温度、冷却方式、回火温度等), 可以得到不同强度和韧性配合, 从而满足不同需求。

一直以来, 科研工作者主要集中研究其时效析出行为、合金元素对组织和性能的影响以及如何提高强韧性上。本研究侧重研究了预备热处理制度对马氏体沉淀硬化不锈钢组织及硬度的影响, 以期为该钢的热处理工艺提供指导<sup>[2]</sup>。

## 1 铸件技术要求及存在问题

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu属于高强度马氏体不锈钢, 其力学性能及化学成分见表1所示。

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu铸件采用熔模铸造成形, 在预备热处理状态下进行加工, 铸件热处理制定及力学性能见表2所示。

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu部分铸件在加工过程中发现基体局部硬度过高, 局部存在硬点、硬块的现象。铸件加工困难导致加工后机加表面存在“花刀”现象, 局部小尺寸螺纹因基体硬度过高无法加工, 详见图1。

## 2 试验方法

### 2.1 硬度试验

选取生产线上硬度高的铸件进行硬度试验, 铸件代号: B-72, 炉号: DL167-16, 该炉次铸件共26件, 为同一熔炼炉次、同一预备热处理炉次生产, 在预备热处理状态下加工, 其中22件可以正常加工、4件螺纹制不出。选取1件可以正常加工(1<sup>#</sup>)和2件螺纹制不出(2<sup>#</sup>)的铸件进行硬度检测, 取样部位见图2所示。

### 2.2 金相试验

选取生产线上硬度高的铸件进行金相试验, 铸件代号B-7, 炉号DL128-12, 该铸件加工过程中发现无法钻孔, 选取铸件进行金相试验, 取样部位见图3所示。

## 3 试验结果分析

### 3.1 硬度试验结果

选取可以正常加工的1<sup>#</sup>铸件进行硬度检查, 铸件上5个部位的硬度值分别为

作者简介:

王漪琼(1987-), 女, 工程师, 研究方向为铸造工艺研究和技术管理。电话: 024-86598182, E-mail:sars0001@126.com

中图分类号: TG142.71

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)09-1055-05

收稿日期:

2019-03-18 收到初稿,  
2019-05-06 收到修订稿。

HBS 306、319、319、302、306，平均值为HBS 310，小于标准值HBS 321，符合标准要求。取样部位、硬度检测部位及检测数值见图4。

选取螺纹制不出来的2#铸件进行硬度试验，硬度值均高于标注值，不符合标准要求。其中铸件非加工区域5个部位的硬度值分别为HBS 412、401、400、430、421，平均值为HBS 412，高出标准值91；铸件加工区

域5个部位的硬度值分别为HBS 456、465、696、623、615，平均值为HBS 571，高出标准值250。取样部位、硬度检测部位及检测数值见图5。

综上所述，铸件加工过程中出现硬点、硬块现象的原因为铸件预备热处理后整体硬度偏高（高出标准值），在硬度过高的情况下加工，且局部产生了加工硬化，导致加工不动，而表象为存在硬点、硬块<sup>[3]</sup>。

表1 ZG0Cr14Ni5Mo2Cu化学成分  
Table 1 Chemical composition of ZG0Cr14Ni5Mo2Cu

Cr	Ni	Mo	Cu	Si	C	Mn	Nb	S, P	$w_B/\%$
13.0~14.5	4.5~5.5	1.5~2.0	1.2~1.75	≤0.70	≤0.08	≤1.0	≤0.10	≤0.03	

表2 ZG0Cr14Ni5Mo2Cu铸件力学性能  
Table 2 Mechanical properties of ZG0Cr14Ni5Mo2Cu castings

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

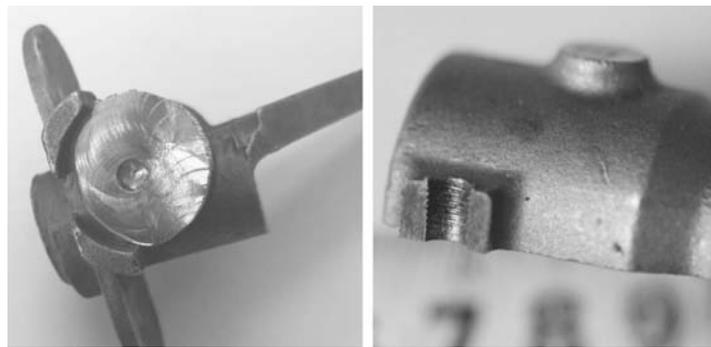


图1 加工过程中出现基体局部硬度值过高现象

Fig. 1 Cutting marks in the machined surface of casting due to higher local hardness in matrix

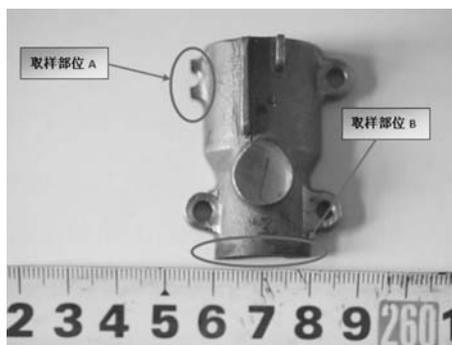


图2 硬度试验取样部位示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling positions for hardness test



图3 金相试验取样部位示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sampling position for metallographic test

### 3.2 金相试验结果

铸件本体硬度值高于标准值部位的金相组织如图6a所示，硬度值低于标准值部位的金相组织如图6b所示。图6a中金相组织中成束的大致平行的铁素体板条在奥氏体晶界的一侧或两侧向晶粒内部长大，呈羽毛状，为典型的上贝氏体组织，此类组织位错密度较高，基体硬度较大。图6b中金相组织为淬火马氏体回火后形成的索氏体组织，主要为针状铁素体和细粒状渗碳体组成的机械混合物。该组织综合力学性能好，基体硬度较低。

### 3.3 原因分析

铸件加工是在预备热处理之后进行，即铸件经过  $1\ 110\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$  均匀化处理并采用风扇或压缩空气方式冷却后再经  $650\ ^\circ\text{C}$  高温回火后进行加工。铸件预备热处理后的组织状态对加工性能影响较大，沉淀硬化不锈钢均匀化处理的目的是使材料组织转变为奥氏体的同时，使沉淀硬化所需的合金元素充分固溶，之后快速冷却，使组织由奥氏体转变成淬火马氏体，为下一步时效做准备<sup>[4]</sup>。淬火形成的淬火马氏体越多，饱和度越高，时效析出的沉淀硬化相越多；而淬火冷却速度过

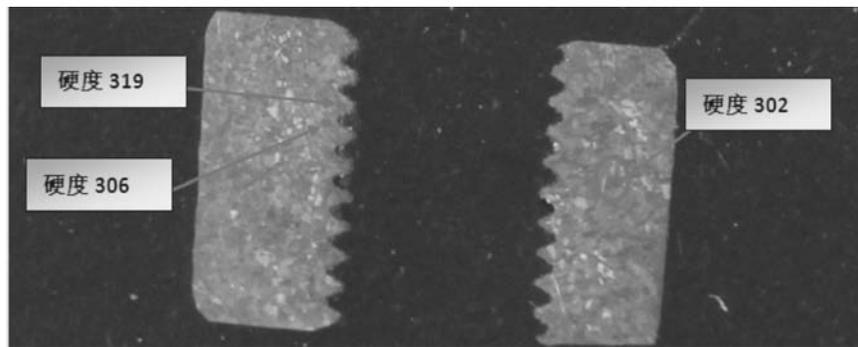


图4 1#铸件硬度检测部位及检测数值  
Fig. 4 Hardness test locations and test values of sample 1#

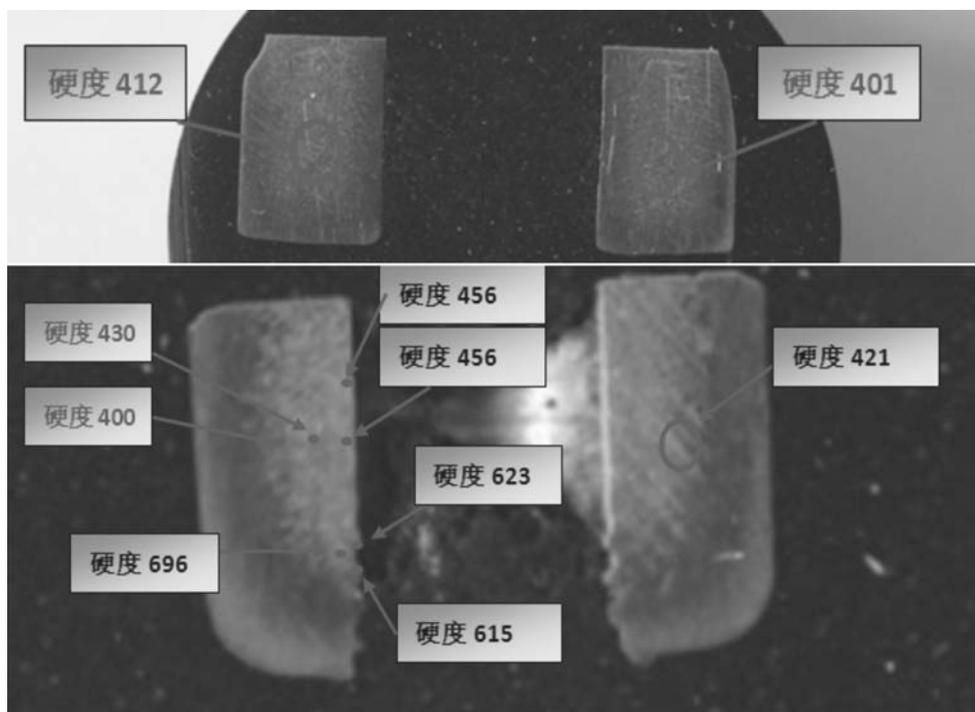
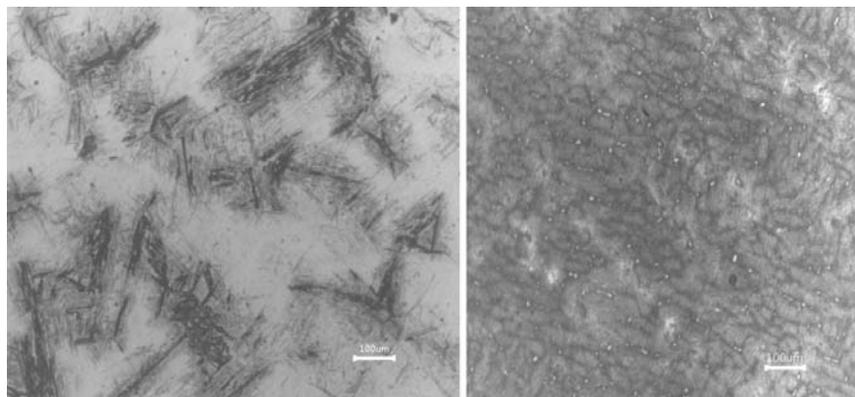


图5 2#硬度检测部位及检测数值  
Fig. 5 Hardness test locations and test values of sample 2#



(a) 上贝氏体

(b) 索氏体

图6 硬度值不同位置的金相组织

Fig. 6 Metallographic structures at locations with different hardness values

慢,会降低组织中板条马氏体的含量及过饱和度,影响时效析出相的数量及形态<sup>[5]</sup>。

冷却速度将影响最终形成的组织。实际生产过程中部分铸件预备热处理的加热和冷却过程中出现了堆放现象,堆放铸件的中心区域与外缘的传热方式存在不同,处在外缘的零件以对流、辐射为主,中心区域的零件以传导、辐射为主且温度较高,导致处在外缘区域的零件冷却速度较快,处在中心区域的零件冷速较缓。铸件冷却速度对组织的影响可参考ZG0Cr14Ni5Mo2Cu不锈钢连续冷却转变曲线,见图7所示。

冷速较慢且中温区停留时间过长,组织中易产生贝氏体组织。贝氏体组织中碳化物呈棒状,平行分布在片条内,贝氏体相变进行时铁素体并不富碳,在整个相变过程中,铁素体中的碳含量始终处于热力学准平衡状态,因此贝氏体碳化物长大后,其周围奥氏体的碳含量急剧下降,导致析出碳化物的驱动力急剧下降,贝氏体铁素体相变驱动力急剧上升。上述过程不断重复进行,促进了贝氏体铁素体继续长大。由于铁素体的长大速度远高于碳化物,铁素体将贝氏体碳化物进一步包围,而实质上并非是由贝氏体铁素体析出碳化物<sup>[6-9]</sup>。且均匀化处理后再经650℃高温回火,因产生贝氏体中温转变,马氏体组织含量极低,影响高温回火使金属间化合物在马氏体基体上的析出,因此影响沉淀强化效果。

马氏体沉淀硬化不锈钢均匀化处理后如经850℃的中间处理后,组织中含铜相和NbC以及M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>析出物,这些析出相会使板条内部的位错密度有所提高,致使基体组织硬度升高。而经650℃高温回火,不足以使含铜相析出,在马氏体基体上会析出一系列金属间化合物,因此产生沉淀强化效果。

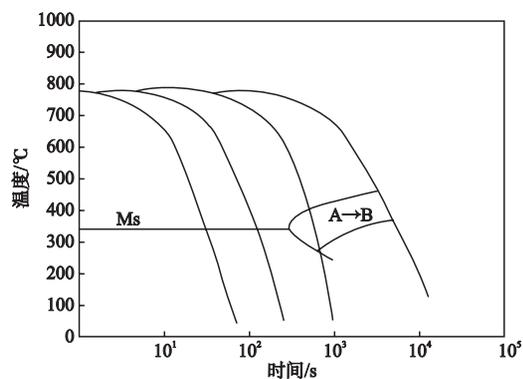


图7 连续冷却转变曲线示意图

Fig. 7 Continuous cooling transformation curves of ZG0Cr14Ni5Mo2Cu steel

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu的铸件因在冷却过程中堆放,使得局部区域产生贝氏体组织,该组织中铁素体板条内位错密度较大,基体硬度偏高,且贝氏体组织中铁素体不含过饱和碳,在后续回火过程中无法从铁素体中析出碳化物,不能降低基体硬度。

## 4 结论

(1) ZG0Cr14Ni5Mo2Cu铸件如硬度值大于标准值HBS 321,则易出现因基体硬度偏大导致加工硬点、硬块现象。

(2) ZG0Cr14Ni5Mo2Cu铸件局部硬度值偏高部位组织为贝氏体组织,且贝氏体组织中铁素体板条中不含过饱和碳。

(3) ZG0Cr14Ni5Mo2Cu铸件硬点、硬块现象是由冷却过程中铸件堆放导致局部区域冷速过缓,不利于诱发转变为马氏体组织造成的。

**参考文献:**

- [1] 李茹, 杨刚, 王剑星, 等. 调整处理对0Cr17Ni4Cu4Nb不锈钢组织与力学性能的影响 [J]. 特钢技术, 2011, 69 (4): 18.
- [2] 李驹, 杜巧连, 王小祥. 00Cr12Ni9M04Cu2马氏体时效不锈钢的时效硬化行为及其影响因素 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 33 (3): 273-274.
- [3] 杨帆, 徐锦锋, 朱爱, 等. Nb对耐热不锈钢组织与硬度的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 33 (3): 273-274.
- [4] 刘敬福, 李荣德, 孙鑫志, 等. 挤压温度对喷射成形Zn-Al-Mn-Cu-Mg合金组织与力学性能的影响 [J]. 铸造, 2010, 59 (9): 943-946.
- [5] 方鸿生, 杨志刚, 杨金波, 等. 钢中贝氏体相变机制的研究 [J]. 金属学报, 2005, 41 (5): 449-457.
- [6] 王剑星, 杨钢, 张忠模, 等. 热处理工艺对0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢组织和力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2012, 37 (12): 90-92.
- [7] 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.
- [8] 杨雪春. 热处理对耐热马氏体不锈钢0Cr17Ni4Cu4Nb性能的影响 [J]. 长沙大学学报, 2006, 20 (5): 32-34.
- [9] MIRZADEH H, NAJAZADEH A. Aging kinetics of 174 PH stainless steel [J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 116 (1): 119-124.
- [10] 王晓莉, 王旭明, 高超, 等. 热处理对耐磨铸钢ZG30Mn2SiCr组织及性能的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (11): 1216-1219.
- [11] 马玉喜, 荣凡, 朗宇平, 等. 热处理工艺对1Cr22Mn15N不锈钢析出行为的影响 [J]. 铸造, 2007 (2): 177-180.

---

## Analysis of Hard Point Problems in ZG0Cr14Ni5Mo2Cu Stainless Steel Casting

WANG Yi-qiong, WANG Xiao-wei  
(AVIC Shenyang Aircraft Company Limited, Shenyang 110850, Liaoning, China)

**Abstract:**

During machining ZG0Cr14Ni5Mo2Cu stainless steel castings, some castings had "hard point and hard block" structure. Aiming at this problem, the hardness test and metallographic observation were carried out to analyze the influence of the preliminary heat treatment process on the microstructure and hardness of the martensitic precipitation hardening stainless steel castings. It was found that the "hard point and hard block" structure was caused by the pile-up of castings during preliminary heat treatment, which resulted in a slow cooling of castings at the center region and then bainite appearance in the microstructure. Through the improvement of preliminary heat treatment process, the quality stability of castings is improved.

**Key words:**

ZG0Cr14Ni5Mo2Cu; stainless steel castings; hardness