

大尺寸规格含铜铸钢材料的性能试验研究

张洪生, 付晓虎, 许 诺

(天津重型装备工程研究有限公司, 天津 300457)

摘要: 对三种不同尺寸规格铸造的含铜钢大试块进行了热处理, 并在试块表面、T/4和芯部位置分别取样进行力学性能检测。结果表明, 该含铜铸钢试块经热处理后可满足300 mm及400 mm壁厚构件的性能要求, 但尺寸规格更大的450 mm壁厚试块, 性能检测出现了不合格结果。在一定冷速范围内, 正火冷却速度对该含铜铸钢的强度提升有一定帮助。采用两次正火热处理比一次正火热处理时的综合力学性能要更好, 两次正火热处理后含铜钢的晶粒更细小。

关键词: 含铜铸钢; 力学性能; 热处理

某含铜铸钢具有高强度高塑性的同时, 还具有良好的低温冲击韧性及可焊接性, 近些年被广泛应用于海洋平台或船舶构件的生产制造中^[1-2]。海洋工程构件与新型船舶构件的尺寸在不断向大型化、巨型化发展, 构件的尺寸及壁厚也在不断增大。为了进一步探究屈服强度等级为370 MPa的某含铜铸钢材料的力学性能潜力, 本文用该含铜铸钢铸造了三种不同规格尺寸的试块, 进行了热处理试验和性能测试, 探索用该材质制造更大尺寸及壁厚构件的可行性。

1 成分要求

含铜铸钢具有高强度、高韧性和良好的易焊接性^[3-4], 与该钢种的成分有密切关系。该屈服强度等级为370 MPa含铜铸钢的化学成分要求见表1。

表1 含铜铸钢材料的化学成分
Table 1 Chemical composition of copper containing cast steel materials $w_B/\%$

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V	Cu
0.10~0.13	0.10~0.50	0.40~0.80	≤ 0.020	≤ 0.030	1.30~1.60	≤ 0.30	≤ 0.10	0.50~0.80

C元素在钢中可以起到强烈的间隙固溶强化作用, 对于提高钢铁材料强度来说是经济有效的强化方式。但是C含量的增加会降低钢的韧性, 增加碳当量, 会使焊接变得困难。此外, 较高的C含量会降低钢在大气中的耐腐蚀能力。因此, 该含铜铸钢中C含量控制在0.10%~0.13%。

Si元素在钢中可以起到脱氧和还原的作用。Si能够提高钢的强度, 但Si的增加会降低钢的塑韧性, 因此, Si在钢中的含量不宜过多。

Mn元素在钢中可以提高钢中铁素体和奥氏体的硬度和强度, Mn元素还可以降低临界转变温度, 起到细化珠光体的作用, 间接起到提高珠光体钢强度的作用。因此, Mn的含量建议取中上限。

Cu元素在钢中起到固溶强化、细晶强化和沉淀强化的作用。向钢中加入Cu元素, 通过Cu的析出强化, 来代替传统的碳强化, 保证优良焊接性的同时获得较高的屈服强度。但Cu的熔点温度较低, 为1 084.87 °C, 为了降低热加工时的氧化和热脆情况, Cu元素的含量也不宜过高。

作者简介:

张洪生(1990-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事大型铸件材料及工艺研究。
电话: 13012232588, E-mail: 982608583@qq.com

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)12-1602-05

收稿日期:

2023-03-06 收到初稿,
2023-04-21 收到修订稿。

Ni元素在钢中起强化铁素体并细化珠光体作用,可提高强度而不显著降低韧性和塑性。相关研究表明,Ni可与Fe及Cu结合形成高熔点的固溶体,当镍铜比大于1时可以消除热脆现象^[5]。

钢中加入Cr可以提高钢的强度、硬度、抗氧化性、耐磨性及耐腐蚀性,但同时降低塑性和韧性。

钢中加入V可以细化晶粒,提高钢的强度及低温韧性。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

该含铜铸钢材料用电弧炉熔炼,然后采用LF+VD精炼^[6],将熔炼好的钢液浇注为壁厚300 mm、400 mm和450 mm的试块A、试块B和试块C,各试块的明细见表2。

表2 含铜铸钢试块试验参数
Table 2 Experimental details of copper containing cast steel test blocks

试块名称	尺寸规格	数量	编号
试块A	300 mm × 300 mm × 500 mm	4	A ₁ -A ₄
试块B	400 mm × 400 mm × 650 mm	3	B ₁ -B ₃
试块C	450 mm × 450 mm × 650 mm	3	C ₁ -C ₃

2.2 试验方法

该含铜铸钢材料的热处理过程为:预备热处理→正火热处理→回火热处理。其中,预备热处理的目的是降低氢含量,避免材料塑性和冲击不合格^[7];采用正火热处理细化组织晶粒,获得所需的金相组织;最后经过适宜温度的回火热处理使材料的力学性能结果满足使用要求。

根据试块壁厚及尺寸规格,将试块分组进行热处理,各热处理工序的工艺参数选用工艺规程中推荐的参数。同时根据试验目的不同,预备热处理采用电炉去氢和燃气炉去氢两种方式做对比,试块正火后的冷却方式也采用鼓风和空冷进行对比。试块A、试块B和试块C的热处理工艺方案见表3-表5。

表3 300 mm壁厚试块A的热处理工艺方案
Table 3 Heat treatment process plan of the 300 mm wall thickness test block A

编号	预备热处理	正火热处理	回火热处理
A ₁	660 °C × 216 h电炉	920 °C × 7 h空冷	620 °C × 10 h
A ₂	660 °C × 216 h电炉	920 °C × 7 h风冷	620 °C × 10 h
A ₃	660 °C × 216 h燃气炉	920 °C × 7 h空冷	620 °C × 10 h
A ₄	660 °C × 216 h燃气炉	920 °C × 7 h风冷	620 °C × 10 h

表4 400 mm壁厚试块B的热处理工艺方案
Table 4 Heat treatment process plan of the 400 mm wall thickness test block B

编号	预备热处理	正火热处理	回火热处理
B1	660 °C × 324 h电炉	920 °C × 9 h空冷	620 °C × 13 h
B2	660 °C × 324 h电炉	920 °C × 9 h风冷	620 °C × 13 h
B3	660 °C × 324 h燃气炉	920 °C × 9 h风冷	620 °C × 13 h

表5 450 mm壁厚试块C的热处理工艺方案
Table 5 Heat treatment process plan of the 450 mm wall thickness test block C

编号	预备热处理	正火热处理	回火热处理
C ₁	660 °C × 324 h电炉	920 °C × 10 h风冷	620 °C × 15 h
C ₂	660 °C × 324 h电炉	920 °C × 10 h空冷	620 °C × 15 h
C ₃	660 °C × 324 h燃气炉	920 °C × 10 h风冷	620 °C × 15 h

热处理结束后,在每个试块的外部、T/4壁厚位置和芯部位置分别取样,每个位置取1个Φ10 mm的标准拉伸试样和一组标准夏比V型冲击试样,所有拉伸试验按GB/T 228执行,所有冲击试验按GB/T 229执行,含铜铸钢材料的试验结果应满足表6。

表6 含铜铸钢材料的力学性能要求
Table 6 Requirements of mechanical properties for copper containing cast steel test blocks

屈服强度	抗拉强度	断后伸长率	断面收缩率	-40 °C冲击
R _{eL} /MPa	R _m /MPa	A/%	Z/%	吸收功K _{V2} /J
≥370	≥490	≥20	≥40	≥27

3 试验结果及分析

3.1 300 mm 壁厚试块 A

300 mm壁厚的试块A分4组进行正交试验,其中编号A₁和A₂试块采用电炉去氢,A₃和A₄试块采用燃气炉去氢;A₁和A₃试块正火后采用空冷,A₂和A₄试块正火后采用鼓风冷。300 mm壁厚试块外部、T/4和芯部位置取样检测结果见表7。

根据表7试验数据,对比A₁和A₃、A₂和A₄试块的冲击值、断后伸长率和断面收缩率可以发现,在预处理、正回火工艺参数相同的条件下,采用燃气炉去氢后的塑性和韧性值与电炉去氢效果不分伯仲,证明燃气炉中较高的[H]氛围并不会影响去氢效果,含铜钢采用燃气炉去氢可以达到电炉去氢相同的效果。对比A₁和A₂、A₃和A₄试块的屈服强度和抗拉强度值可以发现,在一定冷速范围内,正火冷却速度对含铜钢材质强度提升有一定帮助,但改善提高不明显。对比试块外部、T/4和芯部位置的试验结果,发现随着取样深

表7 300 mm壁厚试块A的力学性能
Table 7 Results of mechanical properties of the 300 mm wall thickness test block A

试验编号	取样位置	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$	$-40\text{ }^\circ\text{C } K_{V2}/\text{J}$
A ₁	外部	392	518	30.0	76	63
	T/4	393	516	31.0	74	86
	芯部	391	511	30.5	74	89
A ₂	外部	395	521	32.5	73	69
	T/4	394	517	31.5	73	71
	芯部	393	514	31.5	72	86
A ₃	外部	392	515	31.5	74	73
	T/4	388	509	32.0	72	79
	芯部	389	510	31.5	74	85
A ₄	外部	398	521	31.5	75	73
	T/4	392	515	33.0	74	82
	芯部	391	515	32.5	73	82

度的增加，含铜钢材质的强度略有下降，韧性略有提升；300 mm壁厚4个试块三个取样位置的性能结果均可满足技术条件要求。

3.2 400 mm 壁厚试块 B

400 mm壁厚的试块B分3组进行试验，其中编号B₁和B₂试块采用电炉去氢，B₃试块采用燃气炉去氢；B₁试块执行两次正回火，第一次正火采用空冷，第二次正火采用鼓风冷，而B₂和B₃试块为一次正回火，正火采用鼓风冷。400 mm壁厚试块外部、T/4和芯部位置取样检测结果见表8。

表8 400 mm壁厚试块B的力学性能
Table 8 Results of mechanical properties of the 400 mm wall thickness test block B

试验编号	取样位置	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$	$-40\text{ }^\circ\text{C } K_{V2}/\text{J}$
B ₁	外部	397	518	33.5	76	71
	T/4	384	501	33.5	75	86
	芯部	378	498	33.5	76	100
B ₂	外部	390	513	33.0	77	68
	T/4	377	496	33.0	75	81
	芯部	375	493	32.5	76	83
B ₃	外部	388	512	32.5	76	69
	T/4	376	495	33.5	76	78
	芯部	370	491	33.0	76	84

根据表8试验数据，对比B₂和B₃试块的冲击值、断后伸长率和断面收缩率可以发现，在预处理、正回火工艺参数相同的条件下，采用燃气炉去氢后的塑性和韧性值与电炉去氢后的塑性和韧性值十分接近，进

一步证明含铜钢采用燃气炉去氢可以达到电炉去氢相同的效果，燃气炉中较高的[H]氛围并不会影响去氢效果；经过两次正火热处理的B₁试块性能比只经过一次正火热处理的B₂和B₃试块性能要高，屈服强度提高7~9 MPa，抗拉强度提高5~7 MPa，冲击韧性也更好。对比400 mm壁厚试块外部、T/4和芯部位置的试验结果，可以发现强度呈现由外向内逐渐降低的趋势；400 mm壁厚试块三个取样位置的性能满足技术条件要求，但强度相比于300 mm壁厚试块取样位置的结果要低一些，推测强度降低与试块壁厚增加有关。

3.3 450 mm 壁厚试块 C

450 mm壁厚的试块C分3组进行试验，其中编号C₁和C₂试块采用电炉去氢，C₃试块采用燃气炉去氢；C₁和C₃试块正火后采用鼓风冷，C₂试块正火后采用空冷。450 mm壁厚试块外部、T/4和芯部位置取样检测结果见表9。

表9 450 mm壁厚试块C的力学性能
Table 9 Results of mechanical properties of the 450 mm wall thickness test block C

试验编号	取样位置	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$	$-40\text{ }^\circ\text{C } K_{V2}/\text{J}$
C ₁	外部	382	499	34.0	76	69
	T/4	368	488	34.5	76	70
	芯部	367	487	35.0	74	86
C ₂	外部	368	492	34.0	76	70
	T/4	359	483	33.5	76	79
	芯部	358	480	34.5	75	82
C ₃	外部	375	496	34.0	74	70
	T/4	365	484	33.5	75	78
	芯部	364	483	34.5	74	79

根据表9试验数据，对比C₁和C₃试块的冲击值、断后伸长率和断面收缩率可以发现，在预处理、正回火工艺参数相同的条件下，采用燃气炉去氢后的塑性和韧性值与电炉去氢后的塑性和韧性值十分接近，再次证明含铜钢采用燃气炉去氢可以达到电炉去氢相同的效果；对比C₁和C₂试块的屈服强度和抗拉强度值可以发现，在一定冷速范围内，正火冷却速度对含铜钢材质强度提升有一定帮助，但改善提高不是很明显。对比450 mm壁厚试块外部、T/4和芯部不同取样位置的试验结果，可以发现对于更大壁厚的含铜钢试块，试块三个位置的强度呈现由外向内逐渐降低的趋势更明显，外部取样能满足技术条件要求，但T/4和芯部取样位置的结果已低于技术条件要求值。对比300 mm壁厚试块和400 mm壁厚试块的性能，在热处理工艺参数的选择被限定后，随着试块壁厚的进一步增加，含铜钢试块

的强度指标不断降低。如何使更大壁厚含铜钢铸件达到310 mm壁厚试块的力学性能指标,有待从优化材质成分或铸造性能方面进行探究。

4 金相检测

力学性能试验后,用300mm、400mm及450mm壁厚试块外部、T/4和心部三个位置的冲击残样进行了组织检验,并进行了晶粒度评级。三种不同尺寸规格试块外部、T/4和心部位置的金相组织检验及晶粒度评级结果见表10-12。部分试块的金相显微组织照片见图1所示。

三种不同尺寸规格的试块经热处理后的组织均为铁素体+珠光体组织,外部、T/4和心部三个位置的晶粒度等级无较大差别,晶粒度等级多为6.5-7级,两次正火热处理的B₁试块的晶粒更细小一些,为7.5级。

对比正火风冷后300 mm、400 mm及450 mm壁厚

表10 300 mm壁厚试块A三个取样位置的组织检验及晶粒度评级结果

Table 10 Results of microstructure inspection and grain size rating of the 300 mm wall thickness test block A at three sampling positions

试验编号	取样位置	金相组织	晶粒度
A ₁	外部	铁素体+珠光体	7
	T/4	铁素体+珠光体	7
	芯部	铁素体+珠光体	7
A ₂	外部	铁素体+珠光体	7
	T/4	铁素体+珠光体	7
	芯部	铁素体+珠光体	6.5
A ₃	外部	铁素体+珠光体	7
	T/4	铁素体+珠光体	7
	芯部	铁素体+珠光体	7
A ₄	外部	铁素体+珠光体	7
	T/4	铁素体+珠光体	6.5
	芯部	铁素体+珠光体	6.5

表11 400 mm壁厚试块B三个取样位置的组织检验及晶粒度评级结果

Table 11 Results of microstructure inspection and grain size rating of the 400 mm wall thickness test block B at three sampling positions

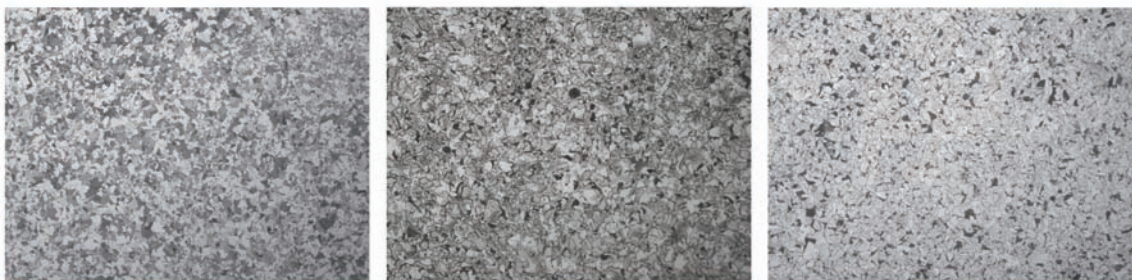
试验编号	取样位置	金相组织	晶粒度
B ₁	外部	铁素体+珠光体	7.5
	T/4	铁素体+珠光体	7.5
	芯部	铁素体+珠光体	7.5
B ₂	外部	铁素体+珠光体	7
	T/4	铁素体+珠光体	6.5
	芯部	铁素体+珠光体	6.5
B ₃	外部	铁素体+珠光体	7
	T/4	铁素体+珠光体	6.5
	芯部	铁素体+珠光体	6.5

表12 450 mm壁厚试块C三个取样位置的组织检验及晶粒度评级结果

Table 12 Results of microstructure inspection and grain size rating of the 450 mm wall thickness test block C at three sampling positions

试验编号	取样位置	金相组织	晶粒度
C ₁	外部	铁素体+珠光体	6.5
	T/4	铁素体+珠光体	6.5
	芯部	铁素体+珠光体	6.5
C ₂	外部	铁素体+珠光体	6.5
	T/4	铁素体+珠光体	6.5
	芯部	铁素体+珠光体	6.5
C ₃	外部	铁素体+珠光体	6.5
	T/4	铁素体+珠光体	6.5
	芯部	铁素体+珠光体	6.5

试块T/4位置的显微组织照片可以发现,300 mm壁厚试块金相组织中的珠光体含量较多,450 mm壁厚试块金相组织中的珠光体含量较少,珠光体含量的多少影响了试块强度的高低。



(a) A₂试块T/4位置组织 100×

(b) B₂试块T/4位置组织 100×

(c) C₁试块T/4位置组织 100×

图1 三种不同尺寸规格试块的显微组织

Fig. 1 Optical microstructures of three different sizes of test blocks

5 结论

(1) 在预处理、正回火工艺参数相同的条件下, 含铜钢材料采用燃气炉去氢与电炉去氢后的塑性和韧性相差不大, 证明燃气炉中较高的氢氛围并不会影响去氢效果, 含铜钢采用燃气炉去氢可以达到电炉去氢相同的效果。

(2) 在一定冷速范围内, 正火冷却速度对含铜钢材质的强度提升有一定帮助, 但改善不明显。

(3) 含铜钢经过两次正火热处理的综合力学性能

比只经过一次正火热处理的性能要更好一些, 通过金相检测发现两次正火热处理后的晶粒更细小一些。

(4) 同一试块, 由表面到芯部, 随着取样深度的增加, 强度呈下降趋势, 冲韧性呈上升趋势。

(5) 随着试块壁厚的增加, 试块热处理后的性能结果逐渐降低。试块壁厚超过450 mm后, 仅外部取样能满足技术条件要求, T/4和芯部取样位置的结果不再满足技术条件要求。

参考文献:

- [1] 周杨, 张苏星, 李家驹, 等. 含铜铸钢热处理工艺研究 [J]. 大型铸锻件, 2016 (2): 38-40.
- [2] 辛宇. 大壁厚船用铸钢件材料性能分析 [J]. 机械工程师, 2016 (9): 197-198.
- [3] 李娜. 铜在钢中的作用综述 [J]. 辽宁科技大学学报, 2011, 34 (2): 157-162.
- [4] 李闯, 王学敏, 尚成嘉, 等. 组织对含铜钢中析出行为的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2011, 19 (4): 6-10.
- [5] 李丽, 苏航, 杨才福, 等. 含铜钢表面热氧化缺陷及解决办法 [C]//2005年全国计算材料、模拟与图像分析学术会议论文集, 中国金属学会, 2005: 182-187.
- [6] 黄飞, 朱伟伟, 杨海石, 等. ZG10MnNiCu钢的试制 [J]. 钢铁研究, 2017, 45 (3): 14-39.
- [7] 崔立, 曲占元, 杨澍. 高强度厚壁ZG10MnNiCu铸钢的去氢工艺研究 [J]. 材料开发与应用, 2011, 26 (3): 12-18.

Experimental Study on Properties of Large Size Copper Containing Cast Steel

ZHANG Hong-sheng, FU Xiao-hu, XU Nuo

(CFHI Tianjin Heavy Equipment Engineering Research Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract:

Heat treatment was performed on three kinds of copper containing cast steel large test blocks with different sizes and specifications, and the mechanical properties were tested by sampling on the surface, T/4 and core positions of the test blocks. The results showed that the copper containing cast steel test block could meet the performance requirements of 300 mm and 400 mm wall thickness components after heat treatment, but the 450 mm wall thickness test block with larger size specifications showed unqualified results in performance testing. Within a certain cooling rate range, the normalizing cooling rate was helpful to improve the strength of the copper containing cast steel. The comprehensive mechanical properties with twice normalizing heat treatments were better than those of once normalizing heat treatment, and the grain size of the copper containing steel was finer after twice normalizing heat treatments.

Key words:

copper containing cast steel; mechanical properties; heat treatment
