DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.02.008

# 一种低温铸钢材料的研制

王高社,王平怀,张亚林,韩永杰,梁肖兵
(宝鸡石油机械有限责任公司 热工分公司,陕西 宝鸡 721002)

**摘　要**:针对 API 8C 对石油钻机提升设备的性能要求,设计了一种含 Cr、Ni、Mo 的低合金低温铸钢。结果表明,通过铸造过程质量控制和不同的热处理工艺措施,得出该钢经 900 ℃淬火及 650 ℃回火热处理后,组织为典型的回火索氏体,-20 ℃冲击功达到了 90 J,-45 ℃冲击功达到了 48 J。在此条件下,该钢表现出优良的室温力学性能和较高的低温冲击韧度,达到石油钻机提升设备要求的材质性能。

**关键词**:石油钻机;低温铸钢;回火索氏体;低温冲击韧度

**中图分类号**:TG269　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)02-0105-03

## Development of a Low Temperature Cast Steel

WANG Gaoshe, WANG Pinghuai, ZHANG Yalin, HAN Yongjie, LIANG Xiaobing
(Hot Working Branch Company, Baoji Petroleum Machinery Co., Ltd., Baoji 721002, China)

**Abstract**: A low alloy and low temperature cast steel containing Cr, Ni and Mo was designed to meet the performance requirements of API 8C for oil rig hoisting equipment. The results show that through the quality control of the casting process and different heat treatment process measures, the structure of the steel after 900 ℃ quenching +650 ℃ tempering heat treatment is typical tempering sorbite, the impact energy of -20 ℃ reaches 90 J, -45 ℃ impact energy reaches 48 J. Under these conditions, the steel shows excellent mechanical properties at room temperature and high impact toughness at low temperature, which meets the material properties required for lifting equipment of oil drilling RIGS.

**Key words**: oil-drilling rig; low temperature cast steel; tempered sorbite; cryogenic impact toughness

近年来石油钻井装备朝着超深、高寒方向发展。大钩作为钻机游吊系统的关键部件,长期以来因为材料得不到解决,已成为我公司钻机生产的“瓶颈”问题。当前国内外铸造低温钢大都采用奥氏体不锈钢和高合金钢,成本相对较高,在实际的生产中存在各种问题。我国实际用于低温条件下的铸钢材料也很少。新设计的低温铸钢不仅要有较高的强度和硬度,而且还要具有良好的塑性、低温冲击韧度和可焊性能。因此低温用高强度铸钢的化学成分设计、铸造工艺和热处理工艺的研究,对我公司钻机提升设备乃至海洋装备材料的生产具有极其重要的意义。

本文作者通过一种低温用铸钢材料的化学成分设计、铸造工艺和热处理工艺的研究,最终成功的满足了对材料高强度、高塑性和低温冲击功的要求。

**收稿日期**:2020-10-13
**基金项目**:2019 年中国石油天然气集团公司资助课题(2019B-4014)
**作者简介**:王高社(1973-),陕西乾县人,工程硕士,高级工程师.主要从事热加工工艺技术及质量管理工作.
电话:0917-3588378,E-mail:wanggaoshe@cnpc.com.cn

## 1　化学成分设计

该低温铸钢材料要求较高强度的同时,又要求有较高的塑韧性,具体力学性能见表 1。

**表1 力学性能要求**
**Tab.1 The mechanical property requirement**

| $R_m$/MPa | $R_{el}$/MPa | $A_4$(%) | $Z$(%) | $KV_8$(-20 ℃)/J | $KV_8$(-45 ℃)/J |
|---|---|---|---|---|---|
| ≥655 | 520 | 17 | 40 | 42 | 27 |

新设计的材料应尽可能节约合金元素,并使铸钢具有优良的综合力学性能。综合考虑铸造工艺性、热处理淬透性和焊接性等要求,低温铸钢的化学成分的设计原则确定为:通过合金元素对钢性能的影响[1],对元素合理搭配,设计一种含 Cr、Ni、Mn、Mo 的低合金钢,添加微量的 B 元素提高钢的淬透性的同时,也较大幅度地提高铸钢的低温冲击韧度[2];添加少量 V 元素细化晶粒,提高韧性[3],经热处理后可获得良好的力学性能。低温铸钢材料化学成分设计配比见表 2。

## 2　热处理工艺设计

有研究表明[4],在强度和硬度相同的条件下,回火索氏体组织的钢的低温冲击韧度最好。为此作者

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 化学成分设计 $w$(%)
Tab.2 The chemical composition design

| 编号 | C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni | P | S | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1# | 0.27 | 0.35 | 0.80 | 0.60 | 0.22 | 1.30 | 0.020 | 0.015 | 余量 |
| 2# | 0.27 | 0.30 | 0.70 | 0.60 | 0.22 | 1.45 | 0.020 | 0.015 | 余量 |
| 3# | 0.27 | 0.25 | 0.60 | 0.60 | 0.22 | 1.60 | 0.020 | 0.015 | 余量 |

设计的热处理工艺为淬火+高温回火(调质)处理,确保得到回火索氏体。设计的淬火回火温度见表3。

表 3 热处理工艺方案
Tab. 3 The heat treatment technology

| 热处理工序 | 淬火温度/℃ | 回火温度/℃ |
|---|---|---|
| 调质处理 | 930 | 650 |
| | 900 | 650 |
| | 870 | 650 |

## 3 试验过程

### 3.1 冶炼过程

本钢种在电弧炉和LF炉内熔炼。由于钢中含有镍易引起“氢脆”现象[5],故对入炉材料特别是镍板等炼钢原料必须干燥,减少水分带入量;加硅铝钡进行终脱氧;加稀土合金进行变质处理,控制夹杂物的形态;铸造砂型烘烤后2小时内浇注。冶炼得到的钢的化学成分结果如表4。

表4 化学成分结果 $w$(%)
Tab.4 The chemical composition results

| 编号 | C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni | P | S | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1# | 0.27 | 0.35 | 0.82 | 0.61 | 0.23 | 1.32 | 0.016 | 0.010 | 余量 |
| 2# | 0.26 | 0.30 | 0.71 | 0.63 | 0.22 | 1.46 | 0.020 | 0.008 | 余量 |
| 3# | 0.27 | 0.26 | 0.59 | 0.60 | 0.23 | 1.61 | 0.017 | 0.010 | 余量 |

### 3.2 力学性能检测

分别按照3种化学成分方案进行试验,每组3个试样。按照ASTM A370标准试样要求,在标准基尔试棒上按照 $\phi$56.25 mm范围内取样,分别检测各个试棒的力学性能。

## 4 结果及分析

不同化学成分的低温铸钢按热处理工艺方案处理后,其性能检测结果见表5。

### 4.1 化学成分的影响

结合表4和表5可以看出,设计的3种钢基尔125试棒都能满足设计的力学性能要求。Mn能提高材料的强度,在0.60～0.80%对强度的贡献不明显。在其它元素偏差不大的情况下,Ni能提高材料的淬透性,对钢的强度、塑性和韧性,特别是低温冲击韧度起着关键性的作用。由于3#钢的镍含量最高,工艺性明显好于1#和2#。3种钢的S、P要求含量较低,冶炼过程严格了控制原材料及冶炼工艺过程,故S、P含量较低,钢液纯净度较高,对低温冲击性能的提升有着相当重要的作用。

### 4.2 热处理工艺的影响

不同热处理方案下低温铸钢的性能如图1～图3所示。

从图1～图3看出,钢的强度随着淬火温度升高而升高,而塑性和韧性均在900℃淬火的条件下最佳。出现这种结果的主要原因是由于淬火温度高,钢奥氏体化充分,碳化物和合金在钢中溶解充分,所以强度高。但随着淬火温度升高,造成晶粒长大和马氏体粗大,对塑性和韧性不利。但淬火温度太低时,奥氏体化不够充分,碳化物和合金在钢中溶解扩散不够充分造成淬火质量不佳,对塑性和韧性不利。

综上分析,3种热处理方案中,900℃淬火+650℃

表5 钢的性能试验结果
Tab.5 The properties of the steel

| 编号 | 淬火温度/℃ | $R_m$/MPa | $R_{eL}$/MPa | $A_4$(%) | $Z$(%) | $KV_8$(-20 ℃)/J | | $KV_8$(-45 ℃)/J | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 试验值 | 均值 | 试验值 | 均值 |
| 1# | 870 | 730 | 560 | 18 | 39 | 43,40,36 | 40 | 25,32,45 | 34 |
| | 900 | 796 | 623 | 22 | 59 | 96,92,106 | 98 | 48,46,52 | 49 |
| | 930 | 831 | 662 | 15 | 37 | 56,55,33 | 48 | 25,26,22 | 24 |
| 2# | 870 | 746 | 570 | 19 | 42 | 52,48,43 | 48 | 41,43,53 | 46 |
| | 900 | 792 | 620 | 21 | 54 | 100,92,106 | 99 | 48,46,52 | 47 |
| | 930 | 825 | 653 | 16 | 39 | 45,51,41 | 45 | 40,37,42 | 40 |
| 3# | 870 | 781 | 580 | 20 | 50 | 60,51,49 | 53 | 45,51,58 | 51 |
| | 900 | 816 | 645 | 24 | 63 | 114,110,120 | 115 | 56,62,68 | 62 |
| | 930 | 850 | 671 | 17 | 43 | 86,42,37 | 55 | 33,29,41 | 36 |

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

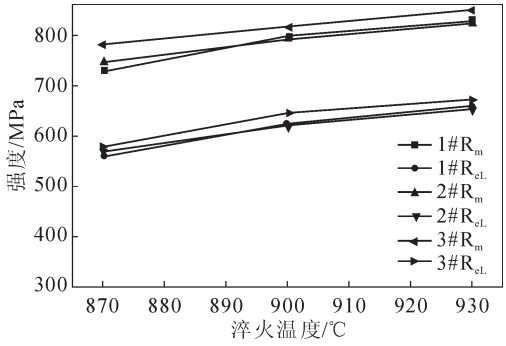



图 1 不同淬火方案下低温铸钢的强度性能

Fig.1 Tensile strength of the low temperature steel under different quenching treatment scheme

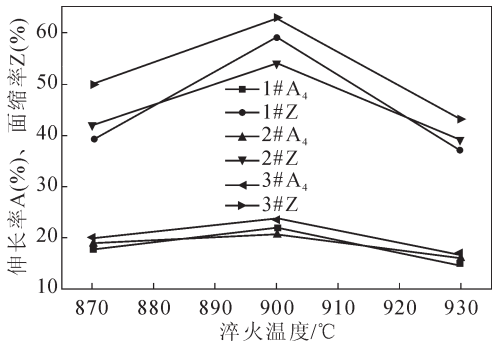



图 2 不同淬火方案下低温铸钢的塑性指标

Fig.2 Plasticity index of low temperature cast steel under different quenching schemes

回火效果最好，3# 钢的力学性能最佳，工艺性较好，

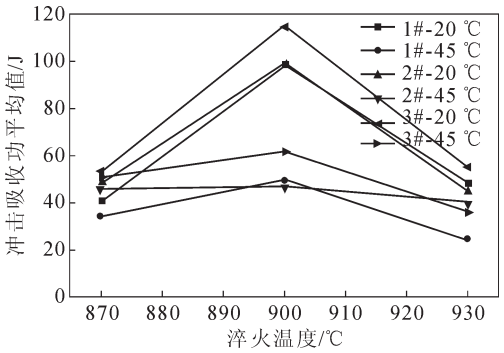



图 3 不同淬火方案下低温铸钢的低温冲击性能

Fig.3 Low temperature impact toughness of the steel under different quenching treatment scheme

有望应用在较大截面的工件上。

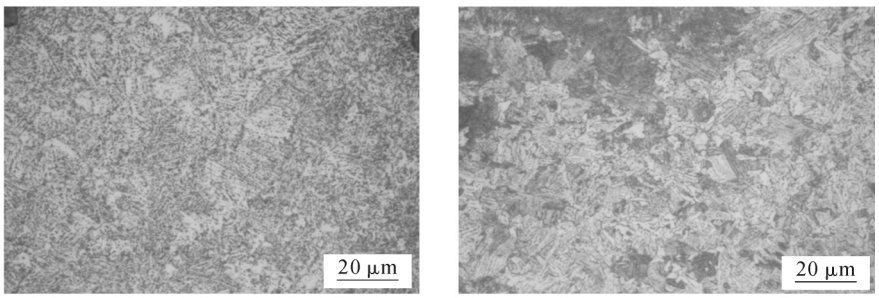
### 4.3 低温铸钢的组织

由以上结果可知，3# 钢的工艺性和力学性能均较好，其 Er125 等效基尔试棒在 900 ℃淬火 +650 ℃回火热处理后的组织如图 4 所示，由回火索氏体+上贝氏体组成，基体晶粒尺寸在 20 μm 左右。

## 5 结论

(1)研制的含 Cr、Ni、Mo 元素的低合金低温铸钢的铸造和热处理工艺性能良好。

(2)铸钢经在 900 ℃淬火 +650 ℃回火处理后，具




(a)黑白金相　　(b)彩色金相

图 4 3# 钢 Er125 试棒调质组织

Fig.4 Microstructure of Er125 sample of the normalized steel

有良好的室温性能和 -20～-45 ℃低温冲击韧度，满足了产品的设计指标。

(3)铸钢大截面试棒具有良好的性能，可用于等效基尔试棒 200 以上的铸钢产品。

**参考文献：**

[1] 路迪民. 金属材料及热处理 [M]. 西安：陕西科学技术出版社，1994.

[2] 牛继承. 微量 B 对大厚度 17Ni4.5CrMoV 铸钢低温冲击韧度的影响[J]. 热加工工艺，2008, 37(11)：13-16.

[3] 娄延春. 铸造手册(铸钢). 第 3 版. 北京：机械工业出版社，2011.

[4] 贺组武，胡小鹏. 讨论低温钢低温韧性的改善[J].洪都科技，2004(3):33-35.

[5] 冯捷，张文红. 炼钢基础知识[M]. 北京：冶金工业出版社，2005.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2021 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号：52-64　国外发行号：M855　国内定价：25 元/本　海外定价：25 美元/本

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net