# 深冷处理对 CREG- Ⅳ钢组织及力学性能的影响

王锴 魏金 尚勇 芦海俊

(中铁工程装备集团隧道设备制造有限公司 河南 新乡 453011)

摘要:本文对 CREG-IV 钢按不同深冷工艺进行处理后,检测其硬度及韧性等力学性能,并用扫描电镜和金相显微镜 观察其断口和微观组织,分析了不同深冷工艺对其性能和微观组织的影响规律。测试结果显示:淬火后直接深冷, CREG-IV钢获得最高硬度 HRC61.1,同时因马氏体孪晶细化,其韧性也提升至 7.2J。一次回火后深冷,因组织中保留 更多残余奥氏体,在马氏体细化和残余奥氏体共同作用下,此时 CREG-IV 钢的冲击韧性最优,为 8.31J。

关键词:微观组织;深冷处理;力学性能;残余奥氏体

# 0 引言

随着铁路、引水工程及城市轨道交通等需开挖 隧道的基建项目增多,盾构法在项目施工过程中的 应用越来越广泛。滚刀作为掘进机破岩的核心部件, 对保证隧道施工效率和成本具有重要影响。在现有 的滚刀制造过程中,主要采用高碳 H13 钢、DC53 钢 进行刀圈的制造<sup>[1-3]</sup>。在实际使用过程中,高碳 H13 钢具有较均衡的性能,但因组织中耐磨相含量较少, 其在高磨蚀性地层的表现不尽如人意;DC53 钢具有 优异的耐磨性能,但组织中存在较多的共晶碳化物, 韧性不足,易出现断裂等非正常失效,适合应用的 地层范围较窄。CREG-IV模具钢材料因碳及合金元 素含量适中,具有均衡的耐磨性能和冲击韧性,可 很好地满足滚刀刀圈材料的使用需求,但目前尚未 有研究者对其性能及热处理工艺进行研究。

深冷处理工艺主要用于热处理含有较多残余奥 氏体的高碳高合金钢,可有效改善其力学和机械性 能,在模具钢、高速钢等材料处理中的应用越来越 广泛<sup>[4-6]</sup>。本文研究了不同深冷热处理工艺对 CREG-IV模具钢性能的影响,为其以后作为新型刀 圈材料的选型及热处理提供参考。

# 1 试样制备及试验方法

#### 1.1 试样制备

试验用钢采用 CREG- IV模具钢,其具体成分见表 1。进行不同热处理工艺前对试样进行锻造及球 化退火,随后用 Nabertherm N11/H 型马弗炉及恒茂 DY-W/0.08-C 型深冷低温箱对试样进行热处理,具

#### 表 1 CREG- Ⅳ 钢化学成分 /wt%

$0.48 \sim 0.54$
0.70 ~ 1.30
0.30 ~ 0.70
7.20 ~ 8.80
1.20 ~ 1.80
0.30 ~ 0.70
≤ 0.020
≤ 0.025
Bal.

#### 表 2 不同热处理工艺

序号	热处理工艺
工艺1	$1060^{\circ}C + 510^{\circ}C + 510^{\circ}C + 500^{\circ}C$
工艺2	1060℃+(-150℃深冷) +(510℃+510℃+500℃)
工艺3	1060℃ +510℃ +(-150℃深冷) +510℃ +500℃

体热处理工艺见表 2。

#### 1.2 试验方法

利用 HR-150A 手动洛氏硬度仪检测磨制后试样 的洛氏硬度。切割制备 U 型缺口冲击试样,试样尺 寸为 10mm×10mm×55mm,开 2mm 深缺口,利用 PTM2000 冲击试验机进行试验,随后用扫描电镜观 察冲击试样缺口。采用 4%硝酸酒精溶液腐蚀金相试 样,然后用金相显微镜及扫描电镜观察其金相组织。 扫描电镜型号为 Quanta 600,金相显微镜型号为 Lecia DM2700。采用 Empyrean X 射线衍射仪对不同 试样的残余奥氏体含量进行检测,管电压为 35KV,



图 1 不同工艺 CREG- Ⅳ 钢的力学性能

管电流为 50mA。

## 2 试验结果与分析

#### 2.1 力学性能分析

检测不同工艺试样的硬度及冲击功,结果如图 1 所示。采用常规热处理的工艺 1 时,CREG- IV钢 的硬度为 HRC59.1,Ku2 冲击功为 6.22J,硬度和冲 击韧性均为最低,综合性能较差。工艺 2 为淬火 +

深 冷 +3 次 回 火, CREG- IV 钢 获得三种工艺处理后的最高硬 度,为 HRC61.1,相比未深冷 工艺硬度增加 2,提升 3.3 %; 其冲击功为 7.21J,相比普通热 处理工艺提升 0.99J。工艺 3 为 淬火 +1 次回火 + 深冷 +2 次回 火,硬度为 HRC60.2,相比工 艺 1 硬度值增加 1.1,但没有 工艺 2 提升幅度大;其冲击功 为 8.31J,相比工艺 1 提高了 2.09J,提升 33.6%,冲击韧性 最优。

## 2.2 残余奥氏体含量分析

检测不同工艺处理试样的残 余奥氏体含量,结果如图2所示。 由检测结果可知,按工艺1热处 理后,CREG-IV钢的残余奥氏体

含量最高,达到13.4%,过多残余 奥氏体的存在不利于提升 CREG- IV 钢的耐磨性能,同时在部件服役过 程中一定含量的残余奥氏体会向马 氏体转变,降低组织的稳定性,进 而影响工件的使用性能。按工艺2 热处理后, CREG- IV钢的残余奥氏 体含量最低,为1.94%,深冷处理 过程促进残余奥氏体向马氏体转变, 因此残余奥氏体含量显著降低。按 工艺3热处理后, CREG-IV钢的残 余奥氏体含量为8.23%,深冷过程 中残余奥氏体也向马氏体转变,残 余奥氏体含量下降,但因深冷前进 行了一次回火, 增加了残余奥氏体 的稳定性,因此其残余奥氏体含量

比淬火后直接深冷的 CREG- IV 钢高。

# 2.3 冲击缺口形貌分析

利用扫描电镜观察不同工艺处理后的 CREG- IV 钢冲击试样断口,结果如图 3 所示。按工艺 1 热处 理后的 CREG- IV钢冲击缺口均为较平整的准解理小 裂面,同时存在数条较长的白色撕裂棱,仅在个别 区域存在小且浅的韧窝,为典型的准解理断裂形貌, 缺口内较长的撕裂棱说明高应力下微裂纹在扩展过



理后, CREG- IV 钢的残余奥氏体 图 2 不同工艺 CREG- IV 钢残余奥氏体含量

2023年 第02期



图 3 不同工艺 CREG- Ⅳ 钢断口形貌

程中受到的阻力较小,行程长,组织韧性较差<sup>[7]</sup>。按 工艺2处理后的 CREG- IV 钢断口仍为准解理断裂, 但断口内无明显撕裂棱, 韧窝数量增多且深度增加, 准解理小裂面面积减少,此时 CREG- IV钢的韧性提高。按工艺 3 处理后的 CREG- IV钢断口内准解理小 裂面数量进一步减小,断口内大且深的韧窝数量增多,因此按工艺 3 处理后的 CREG- IV钢冲击功最高, 韧性最优。

# 2.4 金相组织分析

利用光学显微镜及扫描电镜观察不同工艺处理 后的 CREG- IV 钢金相组织,结果如图 4 所示。由结 果可知,三种工艺的刀圈组织均为回火索氏体组织, 组织中除了弥散分布的圆粒状共晶碳化物,还有均 匀分布的黑色细小的二次碳化物。

相比常规工艺 1, 经工艺 2 与工艺 3 处理后的 CREG- IV钢组织中黑色细小的二次碳化物数量增加。 通过扫描电镜检测结果也可以看出, 深冷处理后的 CREG- IV钢组织中细小颗粒状碳化物数量增多, 其 中按工艺 2 处理后的 CREG- IV 钢组织中细小碳化 物最多。在深冷过程中马氏体基体的晶格体积收缩, 碳原子析出的驱动力增大, 同时组织中的残余奥氏 体在深冷过程中转变为马氏体,增加材料的内应力, 有利于碳化物的析出, 因此深冷处理后 CREG- IV钢 在回火过程中析出的二次碳化物数量增加。因此时 组织中残余奥氏体向马氏体转变最充分, 软相含量 最低, 所以 CREG- IV钢的硬度最高。同时, 因深冷 过程可使马氏体孪晶细化<sup>[8-9]</sup>, 组织中位错密度增加, 因此相比工艺 1, 按工艺 2 处理后 CREG- IV钢的韧 性也有一定程度的提高。

工艺3在深冷前增加一次回火,提高了组织中 残余奥氏体的稳定性,在随后的深冷过程中有更多 的残余奥氏体保留下来,新生成的马氏体数量减 少,进而导致回火时重新析出的二次碳化物数量 减少。相比淬火后直接深冷的工艺2,按工艺3热 处理后 CREG- IV钢组织中残余奥氏体含量升高至 8.23%,所以最终硬度稍低。深冷过程中残余奥氏 体的形态由不稳定的块状转变为稳定性更优的薄膜 状<sup>161</sup>,有效避免了马氏体或碳化物周围的应力集中 及微裂纹萌生,同时因马氏体孪晶细化,共同作用提 高了 CREG- IV钢组织的韧性,按工艺3热处理后的 CREG- IV钢抗冲击性能最优。

### 3 结语

(1)相比常规热处理工艺,淬火+深冷+3次回 火处理的 CREG- IV 钢硬度最高,为 HRC61.1,同



#### 图 4 不同工艺 CREG- Ⅳ 钢金相组织

时冲击功提升至 7.2J; 淬火 +1 次回火 + 深冷 +2 次 回火处理的 CREG- IV钢获得最优的冲击韧性,冲击 功为 8.31J,同时硬度相比常规热处理工艺也提高至 HRC60.2。

(2) 深冷处理后 CREG- IV 钢性能提升主要是深冷 过程促使残余奥氏体转变为马氏体,减少组织中软相 的存在,因此硬度升高。同时因深冷处理马氏体孪晶 细化,因此CREG-IV钢的韧性也有一定程度提高。

(3)相比淬火后直接深冷处理,在一次回火后进 行深冷处理可使 CREG- IV钢组织中保留更多的薄膜 状残余奥氏体,在马氏体细化和残余奥氏体的共同 作用下,CREG- IV钢的韧性最优。

### 5 结语

综上所述,本文对基于 ACFM 技术的金属表面和 近表面裂纹智能化检测需求,以及 ACFM 裂纹尺寸量 化模型作了全面分析,设计了工件表面裂纹的尺寸量 化反演计算方法,并根据实际检测要求对算法进行了 修正。经实验验证,该算法对裂纹的长度反演和裂纹 深度反演的精确度可达 90% 以上。该算法提高了裂纹 尺寸检测结果的准确度,对 ACFM 检测技术的实际应 用提供了有力支持。

# 参考文献:

[1] 袁新安,李伟,李文艳,等.交流电磁场裂纹实时判定与评估方法 [J]. 无损检测,2019,41(04):7-11+57.

[2] 王景林,任尚坤,张丹,等.基于 ACFM 检测技术的表面裂 纹特征评价方法研究 [J].中国测试,2019,45(01):40-46.

[3] 苏令锌.基于漏磁空间变化率和交变电场检测的无损检测新 方法研究 [D]. 厦门:厦门大学,2017.

[4] 李伟.基于交流电磁场的缺陷智能可视化检测技术的研究 [D].青岛:中国石油大学(华东).2007.

[5] 郑玲慧,任尚坤,王景林.ACFM技术的表面裂纹识别和尺寸 反演算法研究[J].测控技术,2020,39(05):80-85+116.

[6] 王慷.双通道十字结构激励平面旋转场涡流传感器裂纹检测 机理研究 [D]. 兰州:兰州理工大学,2021.

**作者简介**:刘志刚(1982.01-),男,汉族,山东东营人,硕士 研究生,高级工程师,研究方向:海洋石油设备检测检验、安 全评估。

## (上接第42页)

基金项目:中铁工程装备集团有限公司科研项目(装备研合2022-037);中铁工程装备集团隧道设备制造有限公司科研项目(设备研合2022-09)。

# 参考文献:

[1] 陈磊.TBM 滚刀刀圈用 5Cr5MoSiV1 钢的热处理特性研究 [D]. 南昌:南昌大学, 2012.

[2] 王锴,王琴.回火温度对 CREG-1 钢组织和力学性能的影响 [J].金属热处理,2018,43(10):155-158.

[3] 陈欢,张银霞,郜伟,等.TBM 滚刀刀圈用 DC53 钢淬火工 艺的研究 [J]. 热加工工艺,2017,46(20):208-210+213.

[4] 陈鹰,陈再枝,董瀚,等. 经深冷处理的 4Cr5MoSiV1 钢的
回火组织和力学性能 [J]. 钢铁研究学报,2006,18(05):29-32.
[5] 邓黎辉,汪宏斌,李绍宏,等. 高强韧冷作模具钢深冷处

理性能及组织 [J]. 材料热处理学报, 2011, 32(04): 76-81.

[6] 谢尘. 高碳高合金钢深冷处理微观结构演化及相变机理研 究 [D]. 上海:上海大学,2016.

[7] 孙尧卿. 基体钢 65Cr4W3Mo2VNb 的断口形貌分析 [J]. 钢铁, 1981, 16(04):12-18.

[8] 李雄,李士燕,张鸿冰,等.6W-5Mo-4Cr-2V高速 钢深冷处理微观组织结构的分析[J].上海交通大学学报,2002,36(07):905-907+910.

[9] 葛艳辉. 深冷处理对 GCr15 轴承钢组织及力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2013, 27 (Z2): 334-335+338.

**作者简介:**王锴(1977.03-),男,汉族,河南信阳人,硕 士研究生,高级工程师,研究方向:机械制造及自动化、材料 性能改进等。