

# 盾构滚刀刀圈材料 5Cr5MoWVSi 热处理工艺及性能研究

廖剑平

(中铁建华南建设(广州)高科技产业有限公司, 广东 广州 511466)

**摘要:**为降低盾构施工的换刀频率,提高施工效率,研究了一款新型刀圈材料 5Cr5MoWVSi 钢及其热处理工艺,通过正交试验法,分析 16 组不同工艺试块的金相组织、洛氏硬度、冲击韧性及耐磨性能,得出 5Cr5MoWVSi 钢经 1 030 °C 淬火、540 °C 3 次回火后,综合性能良好,硬度可达 58.9 HRC,韧性可达 32.4 J/cm<sup>2</sup>,该热处理工艺生产的 5Cr5MoWVSi 钢刀圈适用于复杂多变的硬岩或上软下硬地层。

**关键词:**盾构;滚刀刀圈;热处理

**中图分类号:** TG156.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2023)02-0121-06

## 0 引言

盾构是集机、电、液、光及信息等多种要素为一体的高科技工程装备,是当前隧道施工的主要利器,盾构施工法也具有施工速度快、对环境影响小、适应地层广等优点<sup>[1]</sup>。盾构刀具作为盾构机的“牙齿”,在掘进过程中起至关重要的作用,相较其他地质,盾构刀具在硬岩地质中失效概率最高,其中主要指滚刀,失效形式有刀圈过度磨损、刀圈偏磨、刀圈断裂等。因此,滚刀刀圈的综合性能优劣,对盾构机的掘进效率、施工成本、安全可靠具有重大影响。

目前行业内的刀圈材料大多为 H13 钢(4Cr5MoSiV1)或 DC53 钢,只能在硬度或韧性单一指标上具有较好的性能,综合性能还有待提升。陈欢等<sup>[2]</sup>制定了 TBM 刀圈用 DC53 钢的热处理工艺,最终硬度达到 61 HRC,硬度较高,但韧性较低;夏毅敏等<sup>[3]</sup>分别利用数值分析和热处理试验对 H13 钢刀圈材料的性能进行了预测和验证,结果显示平均硬度为 55.9 HRC,与市场平均水平相符;岳喜军等<sup>[4]</sup>结合 AISI4340 钢和 40CrNiMo 钢的成分,设计了一种高韧性的刀圈材料,并制定了合适的热处理方案,试块韧性可达 30 J,但硬度仅有 560 HV。

现以 5Cr5MoWVSi 钢作为新型滚刀刀圈的材料,根据工程应用需求,设计钢材成分,并制定合适的热处理方案,根据试块的金相组织、硬度、韧性、耐磨性等指标,选出试块综合性能最好的热处理工艺。

## 1 5Cr5MoWVSi 钢的成分

5Cr5MoWVSi 是一种铬系热作模具钢,根据 4Cr5MoWVSi(H12 钢)改进而成,目前部分国内特钢厂生产此类产品,多用于轧辊领域,具有良好的热稳定性、抗回火稳定性及高硬度、高温强度、高淬透性<sup>[4]</sup>,现将其应用于盾构刀具领域,在试验的基础上微调 W 和 Cr 的化学成分,提高其硬度和淬透性,并经过电炉精炼+真空脱气+电渣重熔的冶炼方式,形成具有良好耐磨性能及抗冲击性能的 5Cr5MoWVSi 钢,适用于盾构施工中复杂多变的硬岩、上软下硬等地质。

盾构滚刀刀圈用 5Cr5MoWVSi 钢的化学成分设计见表 1。

收稿日期:2022-11-15 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20220345

作者简介:廖剑平(1974—),男,高级工程师,研究方向为盾构施工与设备。E-mail:419505138@qq.com

廖剑平.盾构滚刀刀圈材料 5Cr5MoWVSi 热处理工艺及性能研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(2):121-126.

表 1 5Cr5MoWVSi 钢的化学成分(质量分数%)

| C     | Si    | Mn    | Cr    | Ni    | Mo    | Cu    | V     | W     | P     | S     |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.500 | 1.065 | 0.315 | 5.105 | 0.220 | 1.205 | 0.092 | 0.425 | 1.142 | 0.023 | 0.003 |

使用 A 法对试验试块进行显微组织检验,钢种非金属夹杂物较少,综合评级为:A 类细系 0.5 级,B 类细系 0.5 级,C 类细系 0.5 级,D 类细系 0.5 级;钢中组织均匀、致密,珠光体组织 2 级;无明显碳化物,共晶碳化物的不均匀性为 1 级,球化效果良好,具体见图 1。

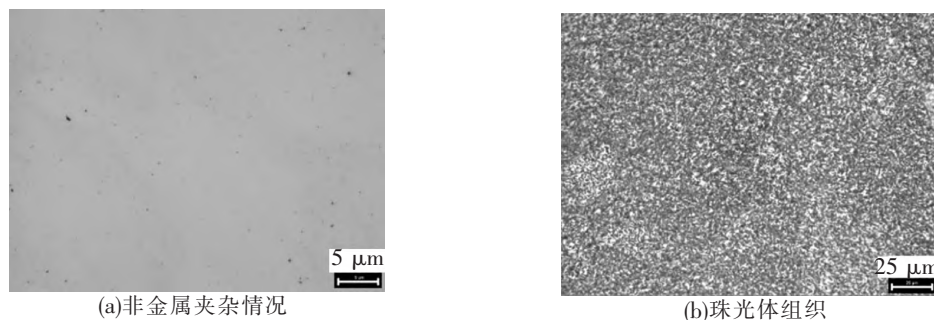


图 1 5Cr5MoWVSi 钢的金相组织

在 4Cr5MoWVSi 钢的基础上,提高 C 含量至 0.5%,既能保证钢在淬火后获得较高的硬度,也能具有良好的淬透性和导热性;加入 5% 的 Cr 可提高钢的淬透性、冲击韧性和耐回火性;Ni 可显著提升钢的强度、韧性和淬透性;加入 1.2% 的 Mo 可进一步细化晶粒,提高其韧性和耐回火性;较高含量的 W 和 V 元素可在 500~600 °C 回火时析出 W<sub>2</sub>C、VC 等碳化物,产生二次硬化,使钢具有良好的耐磨性能和热稳定性。

## 2 热处理方案制定

### 2.1 热处理试样的制取

考虑热处理后需切割若干个冲击试样,结合试验炉的有效空间,将热处理试样尺寸定为 25 mm×25 mm×70 mm。试验前切出若干该尺寸试样,分组进行热处理试验。

### 2.2 热处理工艺的制定

金属的热处理可分为退火、正火、淬火、回火,模具钢的退火和正火是预备热处理工艺,可消除钢的内应力、细化晶粒、改善切削性能等,为下道工序做好组织性能准备。

淬火和回火是热处理工艺中最重要的工序。淬火主要是将加热后钢件中奥氏体转化为马氏体的过程,可显著提升钢的强度和硬度,但此过程中会产生大量组织应力和热应力,需通过回火降低其内部的残余应力,并提升钢的韧性,使钢获得强韧结合的优良综合力学性能。

钢厂冶炼成钢锭后,一般会锻造成圆钢,交货状态为球化退火,根据钢厂经验,5Cr5MoWVSi 钢的球化退火工艺为:850~880 °C 加热保温 2 h,降温到 740~760 °C 保温 4 h,炉内冷却到 500 °C 左右出炉。在刀圈的生产过程中,将圆钢下料并锻造成刀圈形状,经过粗加工后进行刀圈的淬火与回火,5Cr5MoWVSi 钢在市场上产量较少,相关热处理工艺参考较少,因此只能参考 H13 钢等同类模具钢的热处理工艺进行方案设计。陈欢<sup>[5]</sup>通过对淬火试样的金相组织、晶粒度、洛氏硬度、冲击韧性等方面对比分析,得出 H13 钢的最佳热处理工艺为 1 030 °C 淬火、550 °C×2 次回火。张鹏<sup>[6]</sup>开发了 KX6454 钢在盾构滚刀刀圈领域的应用,在 1 150 °C 淬火、550 °C×2 次回火的热处理工艺下,该种钢硬度可达 61 HRC,冲击韧性为 8.3 J/cm<sup>2</sup>。王瑞利等<sup>[7]</sup>对高碳 H13 钢进行了热处理分析,结果表明淬火温度控制在 1 050~1 090 °C 范围,刀圈的耐磨性能最好。

参考 H13 钢等其他模具钢的热处理工艺,制定 5Cr5MoWVSi 钢的正交试验方案,淬火温度选用 970、1 000、1 030、1 060 °C 4 组温度,回火温度选用 460、500、540、580 °C 4 组温度,两两相交,共 16 组热处理试验。淬火采用 Nabertherm 的 N41/H 箱式炉配合快速光亮淬火油进行试验,回火采用

Nabertherm 的 N30/65 空气循环炉进行试验,2 台炉子的最大升温速率均为 10 ℃/min。根据 2 台炉子的性能参数,制定 5Cr5MoWVSi 钢的热处理工艺曲线如图 2 所示。

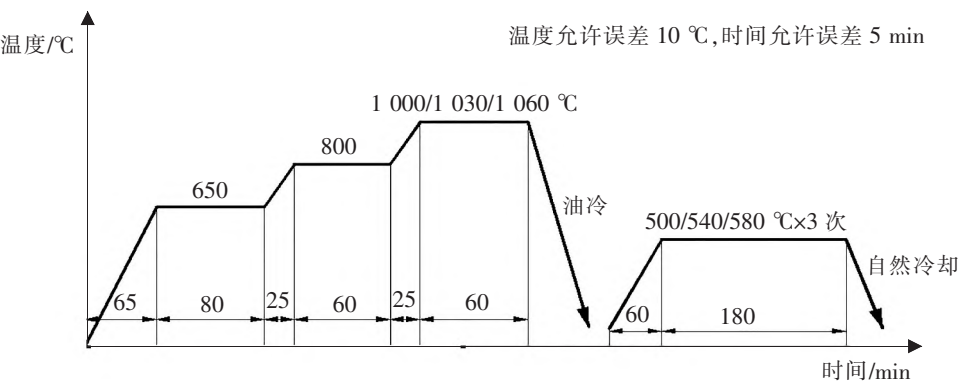


图 2 5Cr5MoWVSi 钢热处理工艺曲线

将 16 组热处理试验的试块命名,见表 2。

表 2 试块名称及其热处理参数

| 回火温度/℃ | 淬火温度/℃ |       |       |       |
|--------|--------|-------|-------|-------|
|        | 970    | 1 000 | 1 030 | 1 060 |
| 460    | S01    | S02   | S03   | S04   |
| 500    | S05    | S06   | S07   | S08   |
| 540    | S09    | S10   | S11   | S12   |
| 580    | S13    | S14   | S15   | S16   |

3 热处理结果分析

3.1 金相组织

为探究不同淬火温度下,5Cr5MoWVSi 钢的金相组织变化,分别在 S09、S10、S11、S12 4 个热处理后试块切割取样,经过镶嵌、磨抛,制成镜面效果的观察试样,参照 JB/T 9986—2013《工具热处理金相试验》的方法,利用 4%硝酸酒精溶液,在室温下侵蚀试样 5~10 s,通过 DMI8 徕卡显微镜观察金相组织,500 倍下图像如图 3 所示。

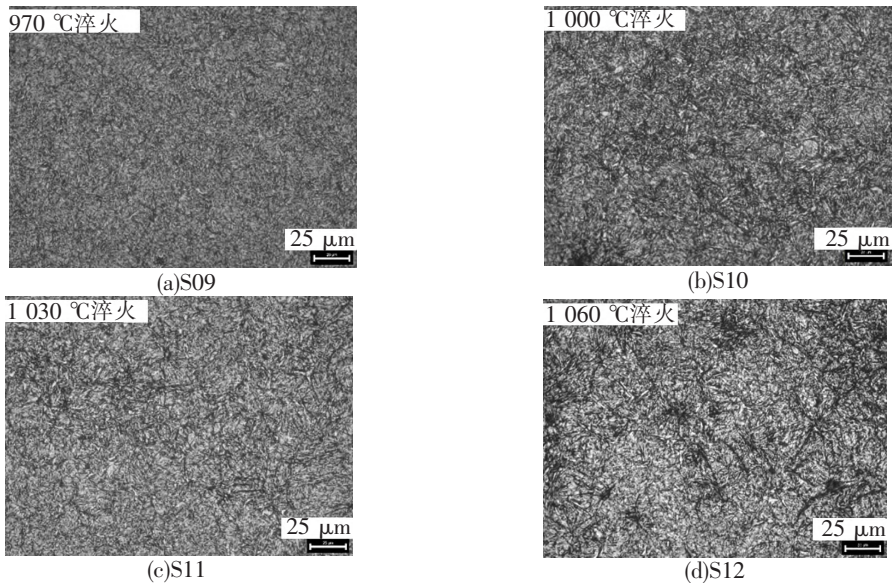


图 3 不同淬火温度下的金相组织

由图 3 可看出,随着淬火温度的升高,马氏体的长度逐渐增大。970 ℃ 淬火下主要形成细针状马氏体及少量残余奥氏体,马氏体针叶长度在 8  $\mu\text{m}$  左右,具有较高的冲击韧性,但会导致工件硬度偏低;1 060 ℃ 淬火下形成了粗大针叶马氏体和少量残余奥氏体,最大针叶长度可达 50  $\mu\text{m}$  左右,属于过烧组织,增加了钢的脆性同时增大淬火开裂的风险;1 000 ℃ 和 1 030 ℃ 形成了中等针状马氏体,针叶长度在 15  $\mu\text{m}$  左右,可同时满足钢件具有较高的硬度和良好的冲击韧性。

### 3.2 硬度及冲击韧性

硬度检测按照国标 GB/T 230.1—2018《金属材料洛氏硬度试验》的试验方法开展,为了减小测量误差,每组试块测量 10 个点,取其平均值。韧性检测通常采用 10 mm×10 mm×55 mm 的 U 型缺口标准,但试块硬度较高,接近 60 HRC,难以用缺口拉床拉出 U 型或 V 型缺口,因此为保证试验的精准性,试验按照 GB 24594—2009 中的无缺口试样的冲击方法开展,试样大小为 10 mm×7 mm×55 mm。S1~S16 试块的硬度与韧性结果如图 4 所示,图 4 右侧纵坐标为冲击能量,与横截面积 0.7 cm<sup>2</sup> 的商为冲击韧性。

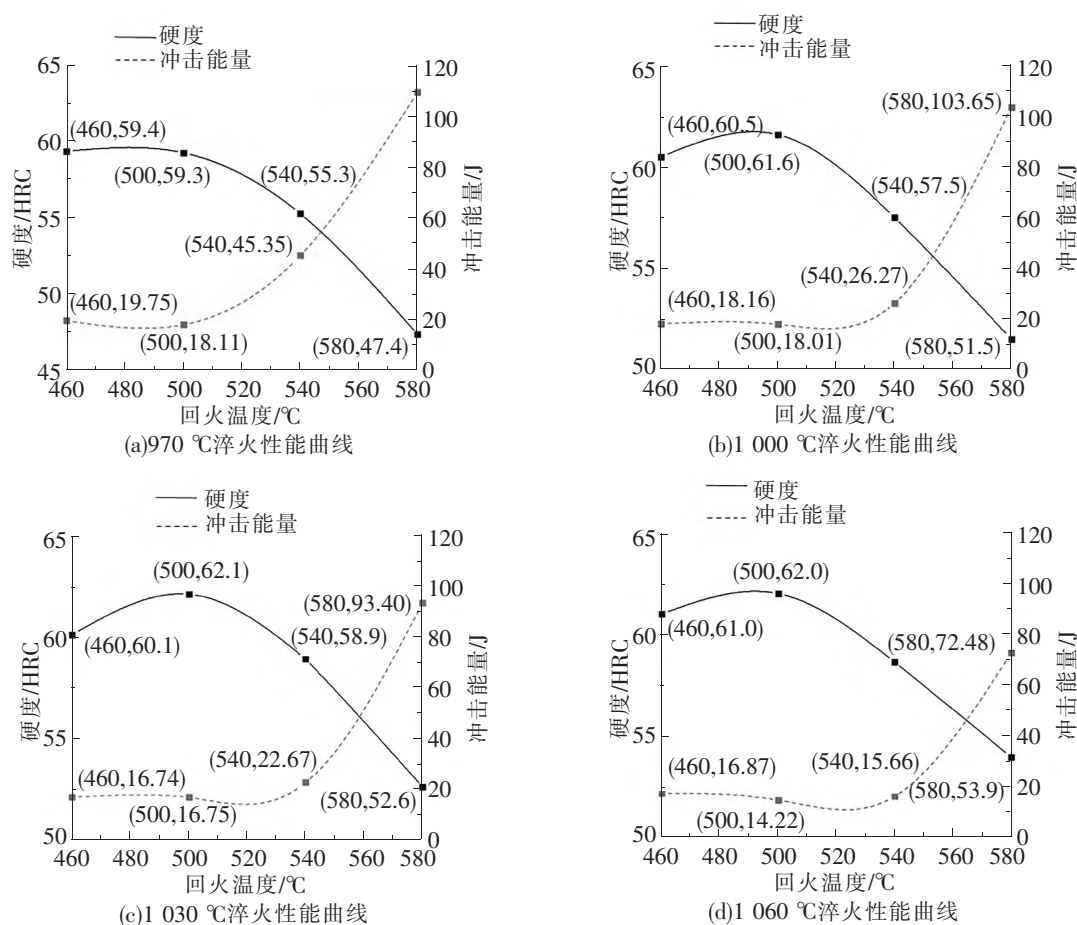


图 4 5Cr5MoWVS i 钢的热处理性能曲线

由图 4 可知,不同淬火温度下,试块的硬度均会随着回火温度的升高先增大后减小,大约在 500 ℃,达到硬度峰值,520 ℃ 后急剧下降;试块的韧性随着回火温度的升高,先在小范围内波动,在 540 ℃ 后快速升高。同时,试块的硬度均值随着淬火温度的升高逐渐升高,试块的韧性均值随着淬火温度的升高逐渐降低。将硬度和韧性结果与图 3 中的金相组织结合分析,S9~S12 试块的淬火温度不断提升,碳化物颗粒大量溶解,此过程最先从奥氏体晶界处发生,然后随着保温时间的增加,不断向晶内扩展,使淬火后的隐针状马氏体区域显著减少,在富碳、富铬区获得粗大针状马氏体,从而导致试块变得硬而脆,同时增加了开裂风险。

掘进机破岩过程中,不仅会遇到单轴抗压强度超高的岩石,还会遇到复杂多变的上软下硬地层,盾构刀圈在保证高硬度的前提下,还需具有良好的抗冲击性能。经初步筛选,试块 S6、S7、S10、S11 在硬度或

韧性方面具有出色的表现,其对应的热处理工艺较为优异。

### 3.3 耐磨性

滚刀随着盾构机刀盘公转的同时,也进行自转,在岩面相互作用的同时,避免不了剧烈摩擦,当刀圈磨损较为严重时,刀刃与岩面的接触面积变大,逐渐失去破岩能力。因此盾构刀圈的耐磨性能对盾构滚刀的寿命有直接影响。

滚刀与岩石摩擦产生的磨损属于磨料磨损,根据磨料磨损的作用机理,按照 GB/T 34501—2017《硬质合金耐磨实验方法》进行耐磨性试验。其中,旋转轮选用 20# 退火钢,磨料选用更靠近滚刀实际工况的机制砂,粒径选择 0.32~0.63 mm,载荷为 20 kg 砝码,试块规格(长×宽×厚)为 40 mm×20 mm×6 mm,试验时间为 10 min,根据金相组织分析及硬度、韧性检测,对 S6、S7、S10、S11 4 块试样开展耐磨性试验,结果如表 3 所示,磨损后宏观状态和微观状态分别如图 5、图 6 所示。

表 3 热处理试块磨损量统计表

| 编号  | 硬度/HRC | 韧性/(J·cm <sup>-2</sup> ) | 初始质量/g   | 最终质量/g   | 变化量/g   | 变化百分比/% |
|-----|--------|--------------------------|----------|----------|---------|---------|
| S6  | 61.6   | 25.7                     | 27.558 8 | 25.836 5 | 1.722 3 | 6.25    |
| S7  | 57.5   | 37.5                     | 27.586 8 | 25.219 9 | 2.366 9 | 8.58    |
| S10 | 62.1   | 23.9                     | 27.543 9 | 25.953 4 | 1.590 5 | 5.77    |
| S11 | 58.9   | 32.4                     | 27.565 5 | 25.462 3 | 2.103 2 | 7.63    |



图 5 试块磨损后状态

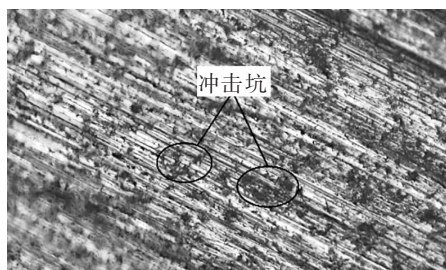


图 6 100 倍磨损表面状态

根据图 5,试块表面存在大量的沿磨料运动方向分布的犁沟以及塑性变形产生的褶皱,同时由图 6 可以看到线性磨损间夹杂着许多冲击坑,主要是由于钢轮转动过程中产生震动导致砂粒与试块间产生冲击。根据磨损表面状态可认定磨损机理主要为磨粒磨损,同时伴随着一些震动产生,与盾构滚刀实际磨损状况相近。仔细观察 S6、S7、S10、S11 的表面磨损状态,发现 S10 的犁沟最浅,S7 的犁沟最深,最深约为 0.5 mm,其余 2 个试块的犁沟深度位于中间水平,结合各自硬度,可得出试块表面的犁沟深度与试块本身的硬度有关,在磨料硬度一定的前提下,试块硬度越高,其表面的犁沟深度越浅,整体更加趋于平滑,耐磨性能更好。

通过表 3 可知,5Cr5MoWVSi 钢的硬度和耐磨性能具有一定的正比关系。4 组 5Cr5MoWVSi 钢试样的统计结果中,S10 的耐磨性最好,质量仅减少了 5.77%,但其韧性最差,S7 的耐磨性最差,变化量百分比为 8.58%,但其韧性最好。为了选取综合性能优良的热处理试块,排除 S7 与 S10,将 S6 与 S11 比较分析,分别进行耐磨性和韧性对比,计算见式(1)与式(2)。

S6 比 S11 耐磨性提高百分比为

$$A = \frac{M_{11} - M_6}{M_{11}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $M_6$  为 S6 试块的质量变化百分比; $M_{11}$  为 S11 试块的质量变化百分比。

S11 比 S6 韧性提高百分比为

$$B = \frac{R_{11} - R_6}{R_6} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $R_6$  为 S6 试块的韧性; $R_{11}$  为 S11 试块的韧性。

S6 与 S11 相比,耐磨性相对提高了 18.08%,但其韧性相对 S11 降低了 26.07%。综合比较,S11 试块兼具良好的耐磨性能与抗冲击性能,更适合复杂多变的地层,对应的热处理工艺:淬火温度为 1 030 ℃,回火温度为 540 ℃。

## 4 结论

(1)5Cr5MoWVSi 钢与 H13 钢相比,热处理后硬度有大幅提升,具有良好的耐磨性能和抗冲击性能,可作为新型盾构刀圈材料,广泛应用于盾构施工领域。

(2)5Cr5MoWVSi 钢经 1 030 ℃淬火,540 ℃×3 次回火后,硬度可到 58.9 HRC,冲击韧性可达 32.4 J/cm<sup>2</sup>,综合性能良好,为该刀圈材料在复杂多变硬岩地层的应用提供了技术支撑。

(3)磨料与金属试块产生磨粒磨损,金属试块的硬度越高,其表面产生的犁沟越浅,整体更加光滑、平整,质量损失越少,耐磨性越好。

## 参 考 文 献

- [1]刘建东,郭京波,王旭东.基于盾构掘进参数的孤石地层识别方法研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(7):1132-1140.
- [2]陈欢,张银霞,邵伟,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.
- [3]夏毅敏,张睿,丛国强,等.盘形滚刀刀圈热处理工艺及其性能预测[J].热加工工艺,2016,45(22):160-162.
- [4]岳喜军,刘英武,徐咏梅.4Cr5MoWVSi 剪刀钢的生产试制[J].大型铸锻件,2008(1):16-17.
- [5]陈欢. TBM 盘形滚刀刀圈材料热处理工艺研究[D]. 郑州:郑州大学,2017.
- [6]张鹏. 盾构机盘形滚刀刀圈用 KX6454 钢的热处理工艺及性能研究[D].北京:中国矿业大学,2022.
- [7]王瑞利,肖娜.淬火温度对 H13 钢性能及残余应力的影响[J].热加工工艺,2022,51(16):131-134.

## Study on Heat Treatment Process and Properties of New Shield Hob Ring Material

Liao Jianping

(Hi-Tech Industry Co. Ltd., China Railway Construction South China  
Construction (Guangzhou) Co. Ltd., Guangzhou 511466, China)

**Abstract:** In order to reduce the tool change frequency and improve the construction efficiency of shield tunneling, a new tool ring material 5Cr5MoWVSi steel and its heat treatment process were studied. Through orthogonal experiment, the metallographic structure, Rockwell hardness, impact toughness and wear resistance of 16 groups of test blocks with different processes were analyzed. It was concluded that 5Cr5MoWVSi steel had good comprehensive properties after 1 030 ℃ quenching and 540 ℃ three times of tempering, with hardness up to 58.9 HRC and toughness up to 32.4 J/cm<sup>2</sup>. The 5Cr5MoWVSi steel tool ring produced by this heat treatment process is applicable to complex and changeable hard rocks or upper soft and lower hard formations.

**Key words:** shield; hob ring; heat treatment