硬岩掘进盾构机刀圈的热处理

韦家波¹,程晓农¹,张伯承¹²,张 洁¹,李洋城¹,罗 锐¹,袁志钟¹

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013;

2. 镇江市京口区理工热处理科技服务站, 江苏镇江 212012)

摘要:采用电渣重熔、多向锻造和超细化处理对刀圈用 H13 钢的微观组织进行了优化,并对优化后的 H13 钢进行了常规热处理,分析该钢硬度与冲击韧性之间的关系, 据此对 H13 钢刀圈进行弹硬热处理。结果表明: 经弹硬热处理后,刀刃形成回火马氏体组织,硬度提高至 59 HRC; 刀座形成回火托氏体组织,硬度降低为 44 HRC,冲击吸收能量升至 23.5 J 实现了高硬刀刃与高弹刀座的性能配合,进而使刀圈具有收缩回弹的弹性特点,显著提高刀圈的使用寿命与破岩效率。

关键词: H13 钢; 刀圈; 热处理; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG156 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2020) 02-0114-06

Heat treatment of tunnel boring machine cutter ring for hard rock

 $Wei\ Jiabo^1\ \text{, Cheng}\ Xiaonong^1\ \text{, Zhang}\ Bocheng^{1\ 2}\ \text{, Zhang}\ Jie^1\ \text{, Li}\ Yangcheng^1\ \text{, Luo}\ Rui^1\ \text{, Yuan}\ Zhizhong^1$

(1. School of Materials Science and Engineering , Jiangsu University , Zhenjiang Jiangsu 212013 , China;

2. Jingkou Heat Treatment Service Station , Zhenjiang Jiangsu 212012 , China)

Abstract: The microstructure of H13 steel for cutter ring of tunnel boring machine was optimized by electroslag remelting, multi-directional forging and ultra-refining treatment. The optimized H13 steel was first subjected to conventional heat treatment to analyze the relationship between the hardness and impact toughness of the steel. According to this, the H13 steel cutter ring was subjected to the elastic hardening heat treatment. The results show that after the elastic hardening heat treatment, the blade edge forms a tempered martensite microstructure and the hardness is increased to 59 HRC; but the blade seat forms a tempered martensite microstructure , the hardness is reduced to 44 HRC, and the impact absorbed energy is increased to 23.5 J, achieving the combination of the high-hardness blade and the high-elasticity tool holder, which makes the cutter ring have the elastic characteristics of contraction and rebound and significantly improve the service life and rock breaking efficiency of the cutter ring.

Keywords: H13 steel; ring blade; heat treatment; microstructure; mechanical properties

全断面岩石隧洞掘进机(Tunnel boring machine, TBM) 在我国泛称为盾构机,是目前在水利、隧道建 设和地下工程中应用最为广泛的一类大型工程机 械^[16],用 TBM 作业比钻爆法更加快速、经济、优质和 安全。TBM 的最前端是圆盘状掘进工作面,在工作面 上分布着一定数量的盘形滚刀,TBM 是利用滚刀最外 侧刀圈的不断贯入和碾压使岩石破碎剥落^[54]。刀圈 的整体外观如图 1(a)所示,其外径有不同的规格。刀 圈的工作环境极其恶劣,其刀刃在承受剧烈摩擦磨损 的同时 整个刀圈还承受剧烈的冲击。服役一段时间 后,刀圈易产生磨损甚至崩坏,这就对其硬度、韧性和 耐磨性提出了严苛的要求^[3 844]。要实现刀圈高的耐

收稿日期:2019-09-19

基金项目: 江苏省重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术)项目(BE2017127) 作者简介: 韦家波(1994—) 用. 硕士研究生, 主要从事关键零部件和模 具钢的热处理工艺研究, E-mail: 15751004363@163.com。通讯作者: 袁 志钟, 副教授, E-mail: yzzjs@ujs.edu. cn

DOI: 10. 13251/j. issn. 0254-6051. 2020. 02. 022

磨性 需保证刀圈工作面硬度≥57 HRC^[15-46]; 而要防止刀圈崩坏 实现刀圈长寿命,则需满足刀圈韧性 A_{KV} ≥10 J^[16-48]。若刀圈性能差、寿命短,不仅会影响 TBM 设备的破岩能力,严重的还会增加掘进面负荷,损坏 TBM 刀盘,进而制约工程的掘进进度,大幅提高工程 成本^[19]。



Fig. 1 Real drawing of the cutter ring and schematic diagram of the blade and the holder

刀圈横截面的示意图如图 1(b) 所示,目前,根据 刀刃至刀座的硬度分布特点,常用的刀圈技术有两类: 一类是全硬刀圈^[20-24],即刀刃至刀座硬度均相等的刀 圈;另一类是梯硬刀圈^[21,25-28],即刀刃至刀座硬度呈线 性下降的刀圈。经技术引进与技术创新,我国已初步 掌握全硬刀圈与梯硬刀圈的制备工艺,突破了用于泥 沙与软岩地层的刀圈技术,但是由于国内冶炼水平制 约和国外关键技术封锁,用于硬岩掘进的国产刀圈仍 普遍存在寿命短、可靠性差的问题,导致国内约90% 的硬岩掘进刀圈还需要进口。本文提出了突破硬岩地 层的弹硬刀圈制造技术,此技术是基于热处理工艺,根 据刀圈不同部位的服役特点调控其微观组织,实现高 硬刀刃与高弹刀座性能的合理配合,显著提高了刀圈 寿命,为硬岩刀圈制备的国产化奠定基础,具有重要的 学术价值与工程意义。

1 试验材料与方法

试验用原材料是经 1260 ℃扩散退火 + 880 ℃球 化退火处理的铸态 H13 钢,其化学成分如表 1 所示, 符合国标 GB/T 1299—2014 《工模具钢》的要求。

表 1 H13 钢的化学成分(质量分数,%) Table 1 Chemical composition for H13 steel (mass fraction,%)

С	Cr	Mn	Mo	Si	V	Р	S
0.45	5.08	0.36	1.45	1.04	0.91	≤0.03	≤0.03

1.1 原材料优化

在原始 H13 钢锭中切出两块 160 mm × 260 mm × 300 mm 的钢锭,其中一块采用电渣重熔 + 多向锻造 + 超细化 + 880 ℃球化退火工艺进行原始组织优化,超 细化工艺曲线和球化退火工艺曲线如图 2 所示。并对 优化前后的钢锭进行组织观察,

在优化前后的 H13 钢锭中切取 50 mm × 60 mm × 25 mm 试样,对其进行 1060 ℃淬火 + 550 ℃回火的热处理试验,并对热处理后的试样进行组织观察和硬度、冲击试验。

1.2 常规热处理

在优化后的 H13 钢锭上切取 60 mm × 160 mm × 32 mm 的试样,进行 1060 ℃淬火 + 300 ~ 630 ℃回火 的常规热处理。具体热处理工艺为:采用 SXL-1400 箱 式炉将试样加热至 1060 ℃,保温 40 min 后油淬至室 温,之后在 SXL-1200 箱式炉中进行 300 ~ 630 ℃的回 火处理,回火保温时间为 2 h,回火 2 次。

1.3 弹硬热处理

采用 SXL-1400 箱式炉将刀圈加热至 1060 ℃,保 温 45 min 后立刻放入 130 ℃的盐浴炉中进行淬火,放 置 1 h 后取出空冷至室温,冷却结束后在刀圈上加装



图 2 超细化工艺曲线(a) 和等温球化退火工艺曲线(b) Fig. 2 Superrefining process curve(a) and isothermal spheroidization annealing process curve(b)

特殊工装^[24] 然后放入 530 ℃ 盐浴炉中保温 60 min, 再在多用炉中进行 630 ℃ 整体回火,回火保温时间为 60 min,回火 1 次。

1.4 性能表征

硬度测试试样尺寸为 10 mm ×10 mm ×10 mm, 用 80~800 号砂纸打磨平整后,在 HRS-150 洛氏硬度 计上进行测试,每个试样取 5 个点,每点间距不小于 2 mm。冲击试样为 10 mm ×10 mm ×55 mm 的 V 型缺 口纵向试样,冲击试验按照 GB/T 229—2007《金属材 料 夏比摆锤冲击试验方法》在锤刃为 8 mm 的 NI300 型金属摆锤试验机上进行。硬度测试后的试样依次经 80~2500 号砂纸打磨平整光滑,再在抛光机上用 1 μm的金刚石抛光剂和呢绒抛光布抛光,之后选择 5% 硝酸酒精腐蚀剂进行腐蚀,在 Leica DMISC 金相显 微镜和 FEI NovaNano450 扫描电镜中进行微观组织 观察。

2 试验结果与讨论

2.1 原材料微观组织优化

图 3 是优化前后的 H13 钢组织。如图 3(a) 所示, 未优化的 H13 钢组织中存在成块、成链和成堆分布的 初生共晶碳化物,这类碳化物的存在会严重制约刀圈 的抗热疲劳能力和冲击性能^[8 28-31]。从图 3(b) 可以 看出 將原始 H13 钢坯料进行电渣重熔、多向锻造和 超细化后,一次碳化物与沿晶分布的链状碳化物消失, 细小碳化物均匀分布于基体之中。



图 3 H13 钢优化前(a) 后(b) 的显微组织 Fig. 3 Microstructure of H13 steel before(a) and after(b) optimizing

图 4 是原始组织优化前后的 H13 钢,经 1060 ℃ 淬火 + 550 ℃ 回火后的微观组织图。从图中可以看 出,未优化的 H13 钢热处理后,仍残留较多粗大的一 次碳化物,且组织不均匀,局部富碳,在硝酸酒精腐 蚀下呈现颜色深浅不一的形貌。而图 4(b)则显示, 优化后的 H13 钢热处理后组织均匀,一次碳化物 消失。

图 5 是原始组织优化前后的 H13 钢经 1060 ℃淬 火 + 550 ℃回火后的力学性能。原始组织未优化 H13 钢淬火后,仍存在未溶于基体的一次碳化物,故基体含 碳量低,硬度为 53 HRC,而优化后的 H13 钢无一次碳 化物,淬火后溶入基体的碳化物更多,基体含碳量更 高,硬度升至 55 HRC。一次碳化物的存在以及碳的 不均匀分布还会恶化 H13 钢的韧性,经同一工艺处 理后,未优化 H13 钢的冲击吸收能量仅 4.7 J,而组 织优化后的 H13 钢冲击吸收能量达 8.7 J,提高了近 1 倍。

2.2 H13 钢硬度与韧性的关系

图 6 是优化后 H13 钢在 300 ~ 630 ℃ 回火后的硬 度与冲击吸收能量。如图 6 所示 随回火温度的增加, H13 钢硬度呈现先增加后降低的趋势,硬度峰值出现



图 4 H13 钢热处理后的显微组织 (a) 未优化; (b) 优化后 Fig. 4 Microstructure of H13 steel after heat treatment (a) unoptimized; (b) optimized



Fig. 5 Mechanical properties of the H13 steel after heat treatment

在 510 ℃,为 60.5 HRC; 与其相反,H13 钢的冲击吸收 能量呈先降低后增加的趋势,在硬度达到峰值时冲击 吸收能量最小,最小值为 3.6 J,硬度与冲击吸收能量 大致成反比关系。当硬度≥57 HRC 时,冲击吸收能量 不足 7 J,由此可见,常规全硬刀圈难以满足硬岩掘进 严苛的性能要求。因此,急需改进其热处理工艺,进一 步调控刀圈各部分组织,利用刀圈各部分性能的合理 配合,实现刀圈寿命的最大化。

2.3 弹硬刀圈性能设计

刀圈的刀刃直接与岩石接触参与破岩,在挖掘时 刃部最易产生磨损,使刀圈外圈尺寸变小。在正常情



图 6 优化后 H13 钢在 300 ~ 650 ℃回火时的 硬度与冲击吸收能量

Fig. 6 Hardness and impact absorbed energy of the optimized H13 steel tempered at 300-650 $^\circ C$

况下,当边刀向内磨损 10~15 mm,面刀和中心刀向内 磨损 20~25 mm 时就需更换刀圈^[32-33],否则刀刃变宽 后会增大掘进时的推力和扭矩,因此,要求刀圈由外向 内有 35 mm 左右的深度需均匀淬硬。均匀淬硬的刀 刃部位需具备极高硬度,刀圈才可具备高的抗磨能力。

刀座不会与岩石接触,很少发生磨损,主要功能是 传递运动和动力。因此,刀座不要求具有高的硬度,但 需要具备高的韧性,以保证刀座有高的抗冲击能力、弹 性变形能力和良好的弹性储能,从而防止刀圈掘进时 发生断裂。

为解决 H13 钢刀圈硬度与韧性的矛盾,本文提出 了弹硬刀圈技术路线。弹硬刀圈是一类通过组织控 制,使刀圈刀刃和刀座具备不同力学性能,利用高硬刀 刃与高弹刀座相互配合从而实现高寿命的刀圈。图7 是刀圈经弹硬热处理后,刀刃与刀座的硬度和冲击吸 收能量。经弹硬热处理后,刀刃硬度为59 HRC,冲击 吸收能量为5.9 J,高硬的刀刃提高了刀圈的耐磨性, 同时刀刃还具备一定抗冲能力,防止了刀刃在掘进时 直接崩坏;刀座硬度降至44 HRC,冲击吸收能量高达 23.5 J,高韧的刀座提高了刀圈整体的抗冲击能力,同 时还使刀圈在受冲击时具备收缩与回弹特性。

图 8 是刀圈、刀刃部位的微观组织照片,从图中可 以看出,刀刃部位为回火马氏体,回火后马氏体基体中 沉淀出与基体共格的二次碳化物,产生沉淀强化效果, 使刀刃硬度达到 59 HRC,高硬的刀刃使刀圈具有较高 的耐磨性。

刀座的弹性可以通过改变刀座显微组织来实现。 图9是刀座的微观组织图,从图9可以看出,最终热处 理后,刀座组织为回火屈氏体,组织中位向相同或相近 的马氏体板条发生了合并,且马氏体基体及相界处有 碳化物析出。板条的合并与碳化物的析出使 H13 钢



图 7 H13 钢刀圈不同位置处的硬度与冲击吸收能量 Fig. 7 Hardness and impact absorbed energy of different positions of the H13 steel cutter ring



图 8 H13 钢刀圈刀刃的光学显微组织(a) 和 扫描电镜图像(b)

Fig. 8 Optical microstructure(a) and SEM image(b) of the blade of H13 steel cutter ring

硬度下降的同时也提高了刀座的韧性,其冲击吸收能 量增加至23.5 J。高韧的刀座具有一定的弹性变形能 力,使刀圈在受高冲击时具有一定收缩回弹特性,从而 实现刀圈弹性效果。

弹性刀座要求在不发生塑性变形的情况下,能产 生较大的弹性变形并积储较大的变形能。刀座材料与 单位体积可积储的最大变形能,可用下式估算^[34]:

$$U = \frac{\sigma_{\rm e}^2}{2E} \text{ if } U = \frac{\tau_{\rm e}^2}{2G}$$

其中: U 为弹性积储能; σ_e 为拉伸弹性极限; τ_e 为剪切 弹性极限; E 为弹性模量; G 为切变模量。



图 9 H13 钢刀圈刀座的光学显微组织(a)和 扫描电镜图像(b)

Fig. 9 Optical microstructure(a) and SEM image(b) of the holder of H13 steel cutter ring

从公式中看出,要提高刀座的变形积储能,材料应 有较高的弹性极限。含有 Cr、Si、Mo、V 等合金元素的 H13 钢材料,适当增加碳含量,就相当于一个品质优良 的合金弹簧钢,可通过热处理使刀刃获得高硬度的回 火马氏体,刀座获得较高弹性极限和屈强比的回火托 氏体。

综上所述,可以用图 10 的示意图来比较全硬、梯 度和弹硬刀圈。全硬刀圈整体淬硬,受冶炼水平限制, 硬度高韧性差;梯度刀圈硬度呈梯度分布,增加了抗冲 性能,但由于不具备弹性储能与延时释放的特性,破岩 效率较低;而弹硬刀圈的刀刃硬度高于前两者,且高韧 刀座具备一定的弹性,高硬刀刃与弹性刀座的性能配 合,提高了刀圈寿命与破岩效率,是目前国产刀圈的优 选发展方向。





3 结论

 经电渣重熔、多向锻造和超细化处理后,H13 钢组织得到优化后,一次碳化物与沿晶分布的链状碳 化物消失,细小碳化物均匀分布于基体之中。硬度与 韧性均显著提升,硬度提高了2 HRC,冲击吸收能量提 升了近一倍。

2) 在 300 ~ 630 ℃ 回火,随回火温度增加,H13 钢硬度先增加后降低,冲击吸收能量先降低后增加, 两者呈反比关系,且当硬度≥57 HRC 时,冲击吸收 能量不超过7 J,可见,H13 钢刀圈仅通过普通整体热 处理工艺,难以实现刀圈高硬度与高韧性的掘进性 能要求。

3) 经弹硬热处理后,刀刃形成回火马氏体组织, 提高硬度至59 HRC;刀座形成回火托氏体组织,硬度 降低为44 HRC,冲击吸收能量升至23.5 J,实现了高 硬刀刃与高弹刀座的性能配合,进而使刀圈具有收缩 回弹的弹性特点,显著提高刀圈的使用寿命与破岩 效率。

参考文献:

- Zhihuan Z , Longhua M. Attitude correction system and cooperative control of tunnel boring machine [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence , 2018 , 18(59): 1-18.
- [2] Gertsch R , Gertsch L , Rostami J. Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences , 2007 , 44 (2): 238-246.
- [3] 沈熙智. 全断面隧道掘进机刀具国产化开发前景展望[J]. 建筑机 械化,2000,21(5): 28-29.
 Shen Xizhi. Prospect of home-made IBM cutters [J]. Construction Mechanization,2000,21(5): 28-29.
- [4]杨 明,熊 计,郭智兴,等. 国内外盾构机刀盘和刀具研究现状概况[J]. 工具技术,2013,47(4):8-11.
 Yang Ming, Xiong Ji, Guo Zhixing, et al. Research status of cutterhead and cutter in shield machine at home and abroad [J]. Tool Engineering,2013,47(4):8-11.
- [5] 姬广彬. 盾构刀盘的设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [6] 赵正阳. 高品质 TBM 用盘形滚刀刀圈研制 [D]. 秦皇岛: 燕山大 学,2016.
- [7]陈 磊,闫 洪,胡 志,等. 国内盾构机滚刀磨损的研究概况
 [J]. 热处理技术与装备,2011,32(3):52-56.
 Chen Lei, Yan Hong, Hu Zhi, et al. A surver on abrasion of disc cutters in the domestic shield machines [J]. Heat Treatment Technology and Equipment,2011,32(3):52-56.
- [8] Usama U. High speed turning of H13 tool steel using ceramics and PCBN[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 21(9): 1857–1861.

[9] 袁 超. 盾构机盘形滚刀刀圈与地层适应性分析[J]. 隧道建设,

2009(s1): 9-11.

Yuan Chao. An analysis on the adaptability of the cutter head of disc cutter of shield machine to the strata [J]. Tunnel Construction , 2009 (s1): 9-11.

[10] 王镇春. TB880E 型掘进机刀具失效分析 [J]. 建筑机械, 2000 (7): 36-37.

Wang Zhenchun. Analysis of cutter failure type and its cause for TB880E tunnel machine [J]. Construction Machinery, 2000 (7): 36-37.

[11] 朱锦艳, 王 霞. 掘进机主轴断裂失效分析 [J]. 金属热处理, 2007, 32(S1): 295-298.

Zhu Jingyan , Wang Xia. The main shaft of enter-driving machine tested analyze for the break [J]. Heat Treatment of Metals , 2007 , 32 (S1): 295-298.

[12] 胡 怡. 热处理工艺对 TBM 刀圈材料耐磨性的影响[J]. 物理测 试,2001(3):14-18.

Hu Yi. Effect of heat treatment of wear ability of disc hobbling materials of TBM [J]. Physics Examination and Testing , 2001 (3): 14-18

- [13] 《热处理手册》编委会. 热处理手册 [M]. 3 版. 北京: 机械工业 出版社,2001.
- [14] 徐祖耀. 相变与热处理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.
- [15] 胡 怡,张国利. TBM 盘形滚刀的失效分析[J]. 金属热处理, 2002,27(1):55-56. Hu Yi , Zhang Guoli. Failure analysis of disc hobbing for TBM [J]. Heat Treatment of Metals , 2002 , 27(1): 55-56.
- [16] 张占普,杜文华,朱长清,等. 盾构滚刀的失效分析及H13E 刀圈 坯新材料[J]. 河北冶金, 2011(10): 16-19. Zhang Zhanpu , Du Wenhua , Zhu Changqing , et al. Failure analysis of hobs of shield tunneller and new material h13e for hob ring blank [J]. Hebei Metallurgy , 2011(10): 16-19.
- [17] 聂 灿. H13 钢刀圈刀圈磨损行为及磨损量预测方法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [18] 夏毅敏,毛晴松,朱宗铭,等. TBM 滚刀刀圈硬度与岩石匹配性 能试验[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(3): 304-309. Xia Yimin , Mao Qingsong , Zhu Zongming , et al. Matching behavior of hardness of TBM cutter ring and rock [J]. Tribology, 2016, 36 (3): 304-309.
- [19] 张厚美. 盾构盘形滚刀损坏机理的力学分析与应用[J]. 现代隧 道技术,2011,48(1):61-65. Zhang Houmei. Discussion on present situation and development of model test of shield tunneling [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011,48(1):61-65.
- [20] 李凤远,韩伟峰. 建设盾构 TBM 工程大数据云平台创新引领行业 技术发展[J]. 工程机械与维修, 2018(2): 113-115. Li Fengyuan , Han Weifeng. Construction of shield TBM project big data cloud platform innovation leads the industry technology development [J]. Construction Machinery & Maintenance , 2018(2): 113-115.
- [21]于兰英. 全断面掘进机刀具技术的探讨[J]. 建筑机械, 1998 (10): 21-24.

Yu Lanying. Study of cutting tool technique of full cross section tunnelle [J]. Construction Machinery , 1998(10): 21-24.

- [22] Cho J W , Jeon S , Yu S H , et al. Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the tree-dimensional dynamic fracturing method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2010 , 25(3): 230-244.
- [23] 张忠健, 谢浩, 林国标, 等. 盾构机盘型滚刀刀圈关键材料设 计与试制[J]. 硬质合金, 2013, 30(6): 326-331. Zhang Zhongjian , Xie Hao , Ling Guobiao , et al. Design and trial production of disc cutter ring for tunnel boring machine [J]. Cemented Carbide , 2013 , 30(6) : 326-331.
- [24] 张伯承,张 励. 一种用于盾构机硬质岩掘进的弹硬刀圈及其热 处理方法: CN201710903630.3 [P]. 2017-09-29.
- [25] 白小波. 具有硬度梯度的刀圈材料的热处理工艺研究[D]. 南 昌: 南昌大学,2012.
- [26] 陈 馈. 盾构刀具关键技术及其最新发展[J]. 隧道建设, 2015, 35(3): 197-203.

Chen Kui. Key technologies for cutting tools of shield and their latest development [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(3): 197-203.

- [27] 张 凌, 于永生, 张爱武, 等. 隧道掘进机用刀具刀体硬度测定 方法的讨论[J]. 凿岩机械气动工具, 2017(2): 44-47. Zhang Ling , Yu Yongsheng , Zhang Aiwu , et al. Discussion on the method for measuring the hardness of the cutter body of tunnel boring machine [J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools , 2017(2): 44-47
- [28] 潘晓华,朱祖昌. H13 热作模具钢的化学成分及其改进和发展的 研究[J]. 模具制造,2006,6(4):78-85. Pan Xiaohua , Zhu Zuchang. The study of the chemical composition and improvement and development for the H13 hot work die & mold steel [J]. Die & Mould Manufacture , 2006 , 6(4): 78-85.
- [29] 张金祥. 喷射成形新型热作模具钢的组织与性能研究 [D]. 北 京:北京科技大学,2015.
- [30] Åsberg M , Fredriksson G , Hatami S , et al. Influence of post treatment on microstructure, porosity and mechanical properties of additive manufactured H13 tool steel [J]. Materials Science and Engineering: A , 2018: S0921509318311171.
- [31] Chen C J, Kai Y, Qin L, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser additively manufactured AISI H13 tool steel [J]. Journal of Materials Engineering & Performance , 2017 , 26(11) : 1-13.
- [32] 王存山, 韩立影, 韩程旭, 等. 一种对盾构隧道掘进机滚刀刀圈 进行表面激光合金化处理的方法: CN106929844A [P]. 2017-07 - 07
- [33] 刘利辉, 和大波. 追求过硬 掘进无限——株洲硬质合金集团有限 公司盾构刀具产业化纪实[J]. 中国有色金属, 2013(12): 58-59. Liu Lihui , He Dabo. Pursuit of excellent drivage unlimited-zhuzhou cemented carbide group Co. , Ltd. shield tool industrialization documentary [J]. China Nonferrous Metals , 2013(12): 58-59.
- [34] 黄建洪. 剪毛机刀片的硬度设计与热处理工艺[J]. 热处理,2005 (1): 32-38.

Huan Jianhong. Hardness design and heat treatment process of the shearing machine blade [J]. Heat Treatment , 2005(1): 32-38.

119