

孟买地铁 3 号线 UGC07 标盾构滚刀适应性研究

曹成兵¹ 唐莉梅² 祝磊² 通讯作者

(1 上海城建国际工程有限公司 上海 200232; 2 武汉恒立工程钻具股份有限公司 湖北 武汉 430074)

摘要: 在盾构机隧道施工中,其滚刀的性能对施工效率起决定性作用。结合孟买 UGC07 标盾构机在角砾岩和玄武岩中所使用的多种滚刀及其消耗数量,研究了标准刀圈、重型刀圈、超重型刀圈以及两种镶齿刀圈的材料性能,分析了这五种刀圈在实际应用中的效果,总结了不同性能刀圈的适应性地层,为滚刀的选型配置和使用提供依据,具有一定的实践意义。

关键词: 滚刀; 刀圈性能; 镶齿刀圈; 刀具消耗

1 概述

孟买地铁三号线是印度的经济首都孟买改善现有交通状况的重大工程项目,三号线全程地下线,也是孟买第一条地下轨道交通线。UGC07 标位于三号线的最北端,包括 Marol Naka, MIDC 和 SEEPZ 三个车站及 3.7km 长的区间双线单圆隧道的设计施工工作,采用两台土压平衡盾构机和一台新型土压/TBM 双模单护盾硬岩掘进机。

UGC07 标盾构机采用的滚刀为盘形滚刀。虽然根据不同的需求,滚刀有不同的设计,但其内部结构基本一致,主要由刀圈、刀体、芯轴、端盖、轴承、浮动油封等部件组成,其典型的结构如图 1 所示。

滚刀主要是通过挤压地层来进行破碎。根据刀圈的特点,滚刀可以分为多种类型。目前比较常见

的,按刀圈是否镶嵌合金齿分为模具钢刀圈(光面刀圈)和镶齿刀圈两大类。模具钢刀圈(光面刀圈)根据截面形式的不同,又可分为平顶刀圈、圆弧顶刀圈、楔形顶刀圈等;镶齿刀圈按照镶嵌在刀圈母体中的硬质合金齿形又可以分为球形齿、平头齿、楔形齿等。

岩石的破碎包括三种方式:表面破碎、疲劳破碎以及体积破碎。其中岩石发生体积破碎时,对应的掘进施工效率最高,在滚刀的破岩机理中,刀圈必须挤压切入岩石一定的深度后才能形成有效的体积破碎,在达到有效的体积破岩的同时,还需要兼顾刀圈的耐磨和抗冲击性能。

2 刀圈材料及性能

2.1 刀圈材料

光面刀圈根据材料性能的不同,可以分为普通刀圈、重型刀圈和超重型刀圈。国内外常见的普通光面刀圈,大多采用的是 H13,由于它的强度及硬度相对于其他模具钢均较高,而且它在高温回火后其韧性和耐磨性也相当不错,具有较好的耐冷热疲劳性能和良好的耐磨性。价格也比较适宜,因此 H13 材质的刀圈被广泛应用。

项目中采用的两种材质的刀圈,即 KDCMSV 重型刀圈和 HL8M 超重型刀圈。KDCMSV 刀圈是在 H13 的基础上提高了碳当量,及微量元素 Cr、Mo 的含量,在提高耐磨性的同时,钢材的淬透性、回火脆性也较 H13 有很大的改善。

HL8M 刀圈采用进口的新材料钢材,与 H13 相比较,该钢材在其基础上提高了 V 的含量,新加入了适量的 Nb 等微量元素,以达到细化晶粒、降低钢的过热敏感性及回火脆性,从而使刀圈的耐磨性和抗冲击性得以提升。三种材质刀圈的化学成分如下表所示。

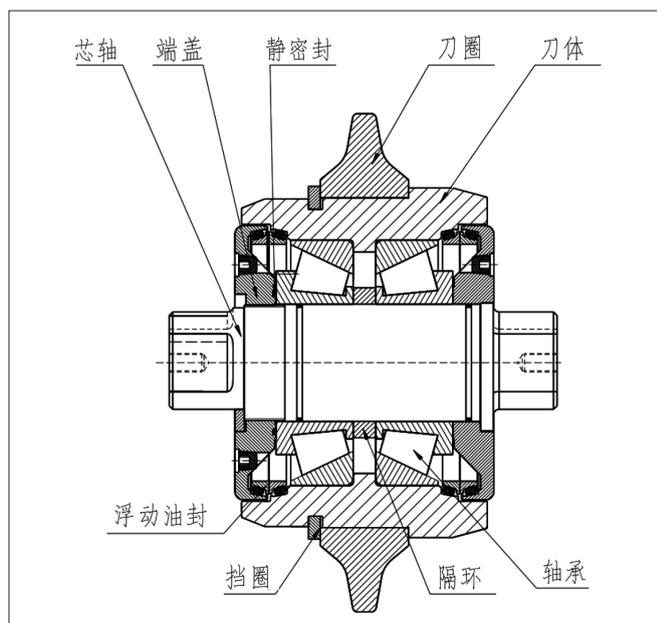


图 1 盘形滚刀结构图

表 刀圈材料微量元素成分表

材料	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Nb	P	S
H13	0.32 ~ 0.45	0.8 ~ 1.2	0.20 ~ 0.50	4.75 ~ 5.50	1.10 ~ 1.75	0.80 ~ 1.20	—	≤ 0.03	≤ 0.03
KDCMSV	0.48 ~ 0.65	0.8 ~ 1.2	0.42 ~ 0.50	5.80 ~ 6.50	1.85 ~ 1.98	0.80 ~ 1.20	—	≤ 0.03	≤ 0.03
HL8M	0.45 ~ 0.50	1.1 ~ 1.2	0.45 ~ 0.50	5.30 ~ 5.50	1.10 ~ 1.75	1.35 ~ 1.42	0.36 ~ 0.53	≤ 0.03	≤ 0.03

2.2 硬度和冲击韧性

硬度是材料抵抗更硬物体压入其表面的能力，也可以说是抵抗局部变形，特别是塑性变形、压痕或划痕的能力，表示了材料的软硬程度。韧性则是反映材料在塑性变形与断裂过程中吸收能量多少的能力或者抵抗裂纹扩展的能力，是材料强度和塑性的综合表现。

刀圈的硬度一般在 HRC52 ~ 62，极端情况可达到 HRC64。对钢材来说，冲击韧性值随着硬度的提高而降低，硬度越高，冲击韧性越低。冲击韧性随硬度的提高呈加速降低的趋势。

刀圈的热处理硬度越高，耐磨性越好，但这两者并不是成线性关系，而是一条曲线的关系。耐磨性随着硬度的提高而提高，当硬度提高到一定程度范围内，对耐磨性的影响越小，而冲击韧性会急剧下降。因此为了保持耐磨性和冲击韧性的平衡，KDCMSV 硬度控制在 HRC55 ~ 60，HL8M 的硬度控制在 HRC60 ~ 64。

2.3 镶齿刀圈

镶齿滚刀刀圈就是在刀圈上镶嵌硬质不同形状的合金球齿，如图 2 所示。在盾构机掘进过程中，滚刀刀圈对掌子面岩土切削的同时，滚刀刀圈也受到岩土的摩擦作用，刀圈会被岩土慢慢地磨蚀掉，尤其在刀圈刃口顶部。为提高刀圈的耐磨性，在刀圈外缘周围镶入齿形硬质合金，使齿顶部露出刀圈母体 5mm，且在刀圈母体两侧堆焊耐磨层，这样刀圈对岩土的切削主要通过硬质合金齿及耐磨层部分来实现。

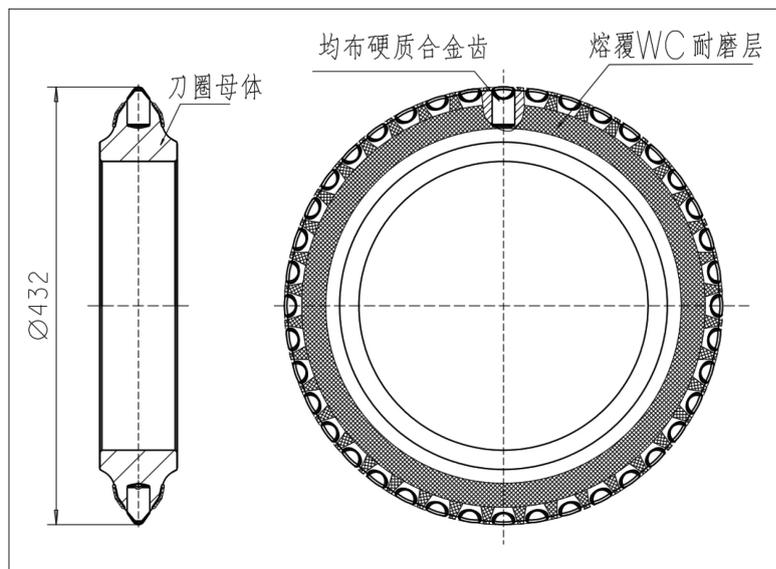


图 2 17 寸镶楔齿滚刀结构图

镶齿刀圈的母体，国内通常采用的钢材是 35/40CrNiMoA。武汉恒立工程钻具股份有限公司（以下简称恒立钻具）生产的镶齿刀圈采用的则是性能更高的三牙轮钻头上的牙轮刚材。牙轮钢比 35/40CrNiMoA 其冲击韧性更高，机械性能更优。在牙轮钢刀圈母体上钻铰齿孔后，然后齿孔内依靠过盈的方式镶入硬质合金齿后，齿孔不再向周边延伸更多的缺陷，对材料的缺陷不敏感性，包容缺陷的性能更好。其中镶嵌的硬质合金齿采用三牙轮钻头中同材质的 JZ16C，其主要成分是碳化钨，含钴 16%，密度为 13.90 ~ 14.35g/cm³，硬度 HRA86 ~ 89，抗折强度 2850N/mm²。

3 滚刀的适应性分析

3.1 工程概况及地质情况

孟买地铁三号线 UGC-07 标段，整个标段分为四个区间。中间井至 CSIA 区间，以及 RAMP 至 SEEPZ 区间，上下行线分别使用的是土压平衡盾构（TBM1 和 TBM2），配置的为 17 寸滚刀以及配置 19 寸滚刀的土压/TBM 双模盾构（TBM3），这两个区间地层稳定单一，滚刀更换次数和刀具种类的应用及消耗较少，因此本文不做过多分析。

本文主要分析地层较为复杂，刀具消耗量较大的中间始发井到 SEEPZ 车站间各种刀具的使用及适应性。

中间始发井到 SEEPZ 区间，中间设置有一个 MIDC 过站井，中间始发井到 MIDC 区间上行线长约 693m，下行线长约 700m。上下行线地层类似，以 II 类角砾岩为主，掘进初期有约有 50 ~ 70m 的 II 类玄武岩。

MIDC 至 SEEPZ 区间，上行线长约 1000m，下行线长约 970m，地质情况更为复杂，以 II 类角砾岩和 III 类玄武岩为主，起始阶段有 90m 左右的 I 类角砾岩。

3.2 工程中的重难点

结合本项目的地质及周边的环境，该区间在施工中存在以下几个难点：

(1) 中间始发井到 SEEPZ 区间，出洞段覆土深度仅约 2.5m，远小于 1 倍盾构直径，易造成地面沉降，甚至发生坍塌，对推进中的施工参数的控制要求较高。

(2) 区间中存在多处小曲率半径段，最小半径为 R208，而且穿越段地表建筑物、构筑物较

复杂,多为2~4层民房及商铺,部分为高层办公楼,在掘进过程中要重视在小曲率半径曲线的硬岩地层纠偏的过程中,容易造成边缘刀具受力不均匀,而出现刀具轴承过载。

(3)地层中岩石强度较高,势必会造成刀具磨损过快,同时部分区段中的地层软硬不一,存在上软下硬的情况,对刀具的抗冲击性能及装配质量要求较高。

3.3 刀盘刀具配置情况

盾构机采用了隧道股份上海隧道机械制造分公司生产的两台性能和配置相同的土压平衡盾构机,滚刀采用17寸盘形滚刀,中心双刃滚刀4把和37把单刃滚刀。根据滚刀的露高,在孟买项目全断面硬岩中保证足够的开挖直径和开挖效率,并保证正面滚刀相邻刃差不超过10mm,过度滚刀和周边滚刀的相邻刃差不超过5mm,制定了滚刀的推进换刀标准。

3.4 刀具使用情况分析

为了对比上文中提到的5种刀圈的使用效果,在中间始发井到SEEPZ区间的上行线TBM1和下行线TBM2中分别装了不同种类的刀圈进行对比使用,具体的使用结果如下。

(1)在II类玄武岩中,在推进参数接近的情况下,采用H13的标准刀圈,平均每次换刀5.8把,而采用KDCMSV重型刀圈,平均每次开仓只换1把刀,消耗明显大幅降低,重型刀圈使用效果更佳。

(2)在中间井至MIDC车站区间,上行线盾构机TBM1全程采用重型刀圈,下行线TBM2在采用重型刀圈的基础上使用了26把镶齿刀圈。在同一区间的类似地层中,刀圈消耗下降了45%左右,开仓次数减少60%,大大的降低了施工成本,提高了施工进度。镶齿刀的使用,刀盘每个区域的上每把刀的平均里程也有不同程度的增加,最边缘的G41-45刀位掘进里程增加了60%。镶齿刀圈现场失效主要表现为刀圈母体磨损后,硬质合金齿暴露太高而发生崩断。

(3)HL8M刀具的使用:下行线TBM2中G32和G33刀位上装的两把HL8M的刀圈,在实际掘进中共掘进了301m,其中133m为II类角砾岩,168m为III类玄武岩,较上行线TBM1中该刀位的重型刀圈平均

掘进距离231m,提高了30%。

(4)镶大楔齿刀圈的使用:重型镶大楔齿刀圈,硬质合金齿直径比镶楔齿刀圈合金齿加大20%,母体硬度由HRC38~42提高至HRC48~52。安装在MIDC-SEEPZ下行线,6把重型镶大楔齿刀圈,在刀盘上使用至贯通,平均掘进262.5m,最大的掘进距离为365.4m,最小的掘进距离为224m,出洞后刀具状况良好,母体磨损较小,无断齿现象,可继续使用。

4 结语

通过滚刀刀圈的材料性能分析和滚刀在实际项目中的应用效果对比,根据地层的不同选择不同性能的滚刀可以有效提高推进效率和减少滚刀消耗。

(1)在孟买UGC07标,III类和IV类角砾岩地层中,重型光面刀圈其性价比较高;HL8M的超重型刀圈,其寿命比重型光面刀圈可以提高30%,但价格较高,在一些特定的场合可以选择性使用。

(2)在I类/II类角砾岩、玄武岩中,镶楔齿刀圈的消耗量及开仓次数较重型光面刀圈大幅降低,有利于施工成本和工期的控制。

(3)由于镶齿刀圈母体和硬质合金齿的耐磨性相差很大,因此镶齿刀圈主要的失效形式是刀圈母体先磨损后,硬质合金齿露出母体太高而发生崩断,如何进一步加强母体的保护,实现母体和硬质合金的耐磨性相当,还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 宋克志,潘爱国.盾构切削刀具的工作原理分析[J].建筑机械,2007,27(3):74-76.
- [2] 段隆臣,潘秉锁,方小红.金刚石工具的设计与制造[M].武汉:中国地质大学出版社,2012:85-87.
- [3] 李仕宏,吕志峰,刘富来,等.盾构机用滚刀刀圈材料的分析[J].凿岩机械气动工具,2013,39(4):34-41.

作者简介:曹成兵(1987-),男,汉族,硕士研究生,工程师,研究方向:城市地铁盾构机及其相关后备套设备的施工技术和管理。