



## 盾构/TBM 滚刀刀圈研制进展

曹玉龙<sup>1,2</sup>, 周霁祁<sup>1</sup>, 唐莉梅<sup>3</sup>, 张中心<sup>3</sup>, 马崇圣<sup>1</sup>

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081; 2 武汉科技大学钢铁冶金新工艺湖北省重点实验室, 武汉 430081; 3 武汉恒立工程钻具股份有限公司, 武汉 430073)

**摘要:** 盘形滚刀是盾构机的核心部件,也是掘进施工过程最易磨损和失效的部件。滚刀刀圈的磨损主要由磨粒磨损、黏着磨损和疲劳磨损三种机制共同组成,其中磨粒磨损和黏着磨损占主要。破岩过程中,强挤压、高冲击作用使得刀圈常发生磨损、偏磨、卷刃、断裂、崩刃、脱落等失效,刀圈损耗成本占总工程的5%~10%,而刀圈失效引起的维护、检修、更换刀具等又大幅降低了工程施工效率。当前常用的刀圈材料为DC53、H13钢,其耐磨性、抗冲击韧性取决于钢中碳化物类型、形貌、尺寸、数量、分布和基体组织特征。为实现滚刀刀圈性能强化提升,国内外学者围绕刀圈材料成分优化设计、刀圈一次成形制备、感应热处理制备梯度性能刀圈、双金属复合刀圈研制等开展了系列研究,为滚刀刀圈性能强化提供了有力支撑。

**关键词:** 盾构刀圈; 磨损失效; 碳化物; 成分优化; 复合刀圈

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00249 中图分类号: TG711; U455.3

## Development Process of Cutter Ring for Shield Machine/ Tunnel Boring Machine (TBM) Hob

Cao Yulong<sup>1,2</sup>, Zhou Peiqi<sup>1</sup>, Tang Limei<sup>3</sup>, Zhang Zhongxin<sup>3</sup>, Ma Chongsheng<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2 Hubei Provincial Key Laboratory for New Processes of Ironmaking and Steelmaking, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 3 Wuhan Hengli Engineering drilling tools Co., Ltd., Wuhan 430073, China)

**Abstract:** The disc cutter is the key component of the shield machine, and it is also the most easily worn and failed component in the tunneling construction process. The wear of the disc cutter ring is mainly composed of three types of abrasive wear, adhesive wear and fatigue wear, among which abrasive wear and adhesive wear are the main wear mechanisms. In the process of rock breaking, strong extrusion and high impact make the cutter ring often wear, eccentric wear, blade fracture, blade collapse, shedding and other failures. The cost of cutter ring loss accounts for 5%-10% of the total project, and the maintenance and replacement of cutters caused by the cutter ring failure greatly reduce the engineering construction efficiency. At present, the commonly available materials for cutter rings are DC53 and H13 steels, and their wear resistance and impact toughness depend on the type, morphology, size, quantity, distribution and matrix structure characteristics of carbides in those steels. In order to improve the performance of the disc cutter ring, domestic and foreign scholars have carried out a series of studies on the optimization of alloy design for the cutter ring, the one-time forming preparation of the cutter ring, the induction heat treatment preparation of the gradient performance cutter ring, and the development of the bimetallic composite cutter ring, which provides a strong support for the performance enhancement of the cutter ring.

**Key Words:** Shield Cutter Ring; Wear Failure; Carbide; Component Optimization; Composite Cutter Ring

全断面隧道掘进机(含TBM和盾构)涉及光、机、电、液、传感、信息等,是集成化极高的掘进施工专用成套装备,仅零部件就有上万个,被誉为“工程机械之王”,具有掘进效率高、自动化程度高、地质适应性强等多个优点,已广泛应用于地下综合管廊、铁路/公路/引水隧道及军事防护工程等国家基础设施建设领域<sup>[1-2]</sup>。

盘形滚刀是盾构机掘进施工的核心部件,正是利用盘形滚刀上的刀圈与岩石之间的冲击和摩擦作用诱发岩石塑性屈服和脆性破坏,进而实现岩石的去除及掘进施工,因而被誉为盾构/TBM的“牙齿”。在滚刀刀圈服役过程中,高强、高硬岩石对其产生的高冲击、强挤压、高磨蚀作用使得滚刀刀圈成为掘进施工过程最易磨损和失效的部件。

基金项目: 湖北省中央引导地方科技发展专项(2023EGA008),湖北省自然科学基金(2023AFB654)

作者简介: 曹玉龙(1990—),男,博士,副教授; E-mail: caoyulong@wust.edu.cn; 收稿日期: 2024-10-15

滚刀刀圈的失效与工作地质状况、掘进工况及参数、刀圈本身材质等密切相关<sup>[3-4]</sup>,而提高刀圈本身综合性能是减少刀圈失效、延长刀圈寿命的前提,冲击韧性较差的刀圈,易造成崩刃或断裂,而较低硬度的刀圈易造成刀刃剧烈磨损及刀刃卷边失效<sup>[5]</sup>。当前,国内外盾构机所使用的滚刀刀圈主要材料为 H13E (5Cr5MoSiV1) 及 DC53 (Cr8Mo2SiV),二者分属热作模具钢及冷作模具钢,其中, H13E 冲击韧性较好,而 DC53 的硬度较高。但对于单一钢种,经淬火+回火热处理后,其硬度、耐磨性与抗冲击韧性不可兼得。

盾构/TBM 滚刀刀圈的磨损失效造成刀圈服役寿命低、换刀成本高、工程施工进度慢等系列不足。基于此,本文围绕滚刀刀圈服役过程磨损失效机理、刀圈微观组织特性、影响刀圈性能的关键因素、刀圈性能强化手段和方法等四个方面进行了系统分析和总结,力求为盾构刀圈的研发、制造及质量控制提供有力参考。

### 1 我国盾构机的快速发展

我国的隧道和地下工程项目跨度大、地形复杂、修建规模大,掘进项目的难度为世界最大<sup>[6]</sup>。为推动盾构机发展,国家“863”、“973”计划多次开展盾构机研究,至 2008 年“中国中铁 1 号”在河南新乡投入使用,标志着我国拥有了自主研发盾构机的能力<sup>[7]</sup>。2008 年以前,盾构机的关键技术严重依赖国外,施工也要依靠外国团队,这种局面给我们造成了资金、工期和沟通等诸多麻烦,而且进口的盾构机很难适应中国复杂变化的地质条件,机械故障频出,有时还会引发地面建筑倒塌、道路坍塌等事故。近 20 年来,经过大规模的盾构工程技术应用和在各种地层中的盾构掘进实践,我国盾构经历了从国外引进到自主制造,再到出口国外的发展过程。时至今日,国产盾构机已占国内市场的 90% 以上,并不

断走向国际市场,占全球市场份额超过三分之二,我国已成为盾构制造大国和盾构隧道大国<sup>[8]</sup>。创新,让我们从跟跑到领跑。

目前,国内已涌现出数十家掘进机制造企业,已经可以自主制造包括土压平衡盾构机(EPB)、泥水平衡盾构机(SPB)、岩石隧道掘进机(TBM)等主力机型,我国的掘进机产品的性能指标也已名列世界前列<sup>[9]</sup>。我国习惯上将掘进机分为盾构和 TBM,其中盾构机指用于软土地层或者水下的掘进机,而 TBM 则指用于坚硬地层的掘进机。目前,不仅我国掘进项目已经被国产掘进机占据主流,国产掘进机也开始进入国际市场<sup>[6]</sup>。TBM 硬岩掘进施工过程及所用单刃滚刀示意图如图 1 所示。

当前,国内外盾构掘进行业的发展多聚焦于土压平衡盾构、泥水平衡盾构和岩石隧道掘进机(TBM)等 3 大主力机型的升级换代及多功能多模式、异形断面掘进机的不断丰富和完善<sup>[6]</sup>,同时,围绕滚刀刀圈磨损检测、刀圈新材料或制备新工艺研发等方面开展了系统研究<sup>[8,10-11]</sup>。在盾构/TBM 掘进机及掘进施工相关技术大力发展、日趋成熟的今天,作为盾构/TBM“牙齿”的滚刀刀圈,俨然成为影响工程掘进施工的关键,系统分析盘形滚刀磨损与失效机制对高性能滚刀刀圈的开发和应用具有重要意义。

### 2 盘形滚刀的磨损与失效机制

滚刀刀圈的失效问题是掘进施工面临的最主要难题之一。刀圈磨损过大或断裂失效严重影响施工效率,而开仓换刀则可能会导致掘进工程出现坍塌等事故。在复杂地质条件下,比如穿江越海盾构隧道工程中,刀圈磨损及失效问题会更为突出<sup>[12]</sup>。在掘进工程中,刀具的损耗通常占工程总花费的 5%~10%,而维护、检修、更换刀具的耗时更是能占到工程总耗时的 30% 以上<sup>[13]</sup>,因此,提高刀圈

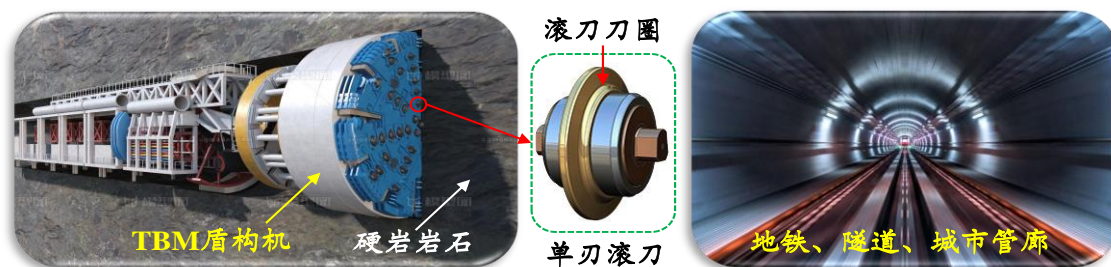


图1 TBM 掘进施工过程及所用单刃滚刀示意图

Fig. 1 The construction process of TBM tunneling and the schematic diagram of single-edge disc cutter

性能、减少其磨损与失效对于减少换刀次数、节省施工耗时、降低工程花费至关重要。为此,需要充分认识滚刀刀圈的结构、破岩原理、磨损及失效机制等,为刀圈性能提升提供有力支撑。

### 2.1 盘形滚刀几何结构

盘形滚刀作为TBM上直接接触岩壁的组件,是TBM进行掘进工程的关键,其内部结构如图2所示<sup>[5]</sup>。

根据刀圈刀刃的几何特征,滚刀刀圈可分为光面刀圈和镶齿刀圈,如图3所示。在掘进工程中,会根据不同的地质条件选用不同几何形状的刀圈<sup>[5]</sup>。光面刀圈根据刃宽不同又分为标准刀圈、宽刃刀圈和重型刀圈,如图3(a-c)所示;镶齿刀圈根据镶嵌的合金齿不同又分为平齿刀圈、球齿刀圈、楔齿刀圈,如图3(d-f)所示。

从破岩的角度而言,刀圈的洛氏硬度需要达到57~60 HRC,同时刃口不能过宽,才能保证对岩石的有效贯入与破碎。然而,在受到地质分界面的冲击作用时,这种硬度的刀圈容易发生崩裂。从防止刀圈断裂的角度考虑,滚刀刀圈的洛氏硬度降到55~56 HRC时,刀圈韧性较好,同时适当加宽刃口以

提升整体抗裂性能,但这种设计不利于刀圈贯入岩石,破岩效果相对较差。在上软下硬的复合地层中,需要在确保刀圈具备破岩能力的同时,尽量避免出现崩块、断裂等异常损坏<sup>[14]</sup>。

### 2.2 盘形滚刀破岩原理

盾构机转动时,其刀盘上的盘形滚刀被紧压于岩面,盘形滚刀在绕自身轴线自转的同时也绕刀盘中心轴线进行公转。在盾构机移动及滚刀旋转作用下,滚刀在接触岩面上形成沟壑。当滚刀刀圈对岩石的压力达到一定阈值,刀圈刀刃压住的岩石会破碎,岩壁上会产生放射状裂纹;随盾构机继续推进,相邻滚刀间的裂纹不断增长并相互贯通,岩石碎片开始从岩面上脱落。如此反复,盾构机不断在岩壁中向前掘进<sup>[15-16]</sup>,整个过程如图4所示。当前,主要从滚刀刀圈材料改性、结构优化、外加物理场辅助等三个角度来促进滚刀刀圈破岩<sup>[17]</sup>。例如,中铁工程装备集团的“龙岩号”TBM利用高压水射流技术实现对岩石的切割破碎作用,解决了在极硬岩地层中的掘进问题<sup>[6]</sup>。

### 2.3 盘形滚刀磨损机制

磨损与腐蚀、疲劳并称为金属零件材料失效的

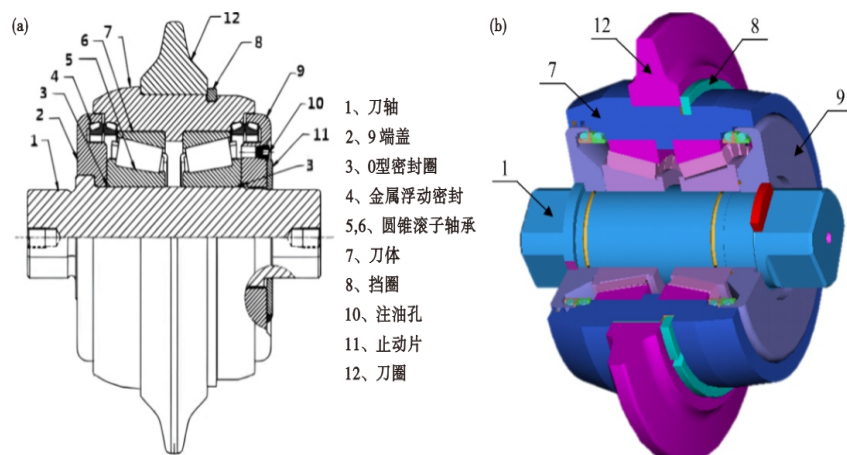


图2 盘形滚刀:(a)结构,(b)实物剖视图

Fig. 2 Disk hob: (a) structure, (b) physical section view

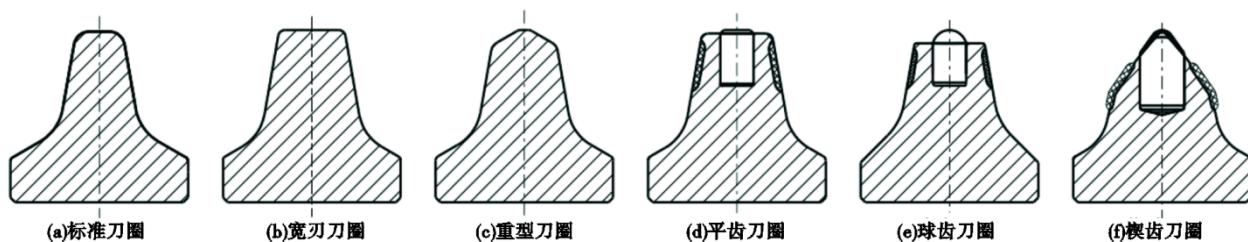


图3 不同几何形状的刀圈截面

Fig. 3 Different cross-sections shapes of cutter ring

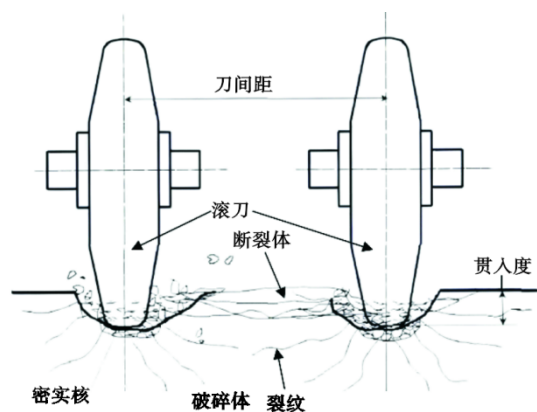


图4 滚刀破岩原理

Fig. 4 Principle of rock breaking by disc cutters

三种主要原因。吴俊等<sup>[12]</sup>从金属摩擦学的角度分析了盾构刀具磨损的机制,表明盾构刀具的磨损主要由磨粒磨损、黏着磨损和疲劳磨损三种机制共同组成,其中磨粒磨损和黏着磨损占主要。TBM滚刀破岩时,岩石碎屑充当了刀圈与开挖面间的磨粒造成刀圈的磨粒磨损。在摩擦磨损过程中,刀圈钢基体与高硬碳化物是相互依存、相互保护的关系<sup>[18]</sup>。破岩初期,碳化物颗粒与基体可以看作在同一平面上,同时受岩石磨损;由于碳化物与基体硬度存在显著差异,二者磨损量差距悬殊。基体耐磨性差,磨损量较大;碳化物耐磨性好,磨损量小。随着磨损量差距的累计,碳化物逐渐从基体中凸出,此时,碳化物颗粒起到了分隔基体与岩石接触的作用,能有效减少材料的整体磨损量<sup>[19]</sup>。直到碳化物颗粒的磨损量累积至与基体磨损量相同,或凸出的碳化物被盾构机碾压破碎,基体才会继续被岩石磨损<sup>[20]</sup>。另一方面,基体若无法固定碳化物,导致碳化物从摩擦表面脱落,脱落的碳化物颗粒会与岩石颗粒一起对基体造成磨损,最终反而增加材料的磨损量<sup>[21]</sup>。碳化物的脱落还会在基体上形成裂纹,裂纹相互影响还会在基体上形成孔隙,孔隙不仅会降低附近基体的强度与耐磨性,还会显著降低基体的抗塑性变形能力,对材料的耐磨性造成极为不利的影 响<sup>[20]</sup>。综上所述,碳化物能显著影响材料的整体耐磨性。

Zhang X H等<sup>[22]</sup>对岩石特性对滚刀刀圈磨损的作用机制进行了深入分析,研究表明,在砂岩中,微观切削为主要的磨损模式,其磨损量与磨损深度受硬度影响较小;而在锈石和片麻岩中,磨损机制则表现为犁沟变形与微观切削的结合,随着刀圈硬度的提高,磨损量与深度显著减少,但在硬度较高的

情况下可能出现脆性断裂现象。此外,刀圈的磨损机制会随硬度的变化发生转变,在硬度较低时以显微切削去除为主,硬度较高时则转变为韧性断裂与剥落,这种转变导致刀圈磨损量在硬度增加过程中呈现出先减少后增加的趋势<sup>[23]</sup>。

## 2.4 盘形滚刀失效形式

滚刀刀圈的失效及寿命与地质状况、掘进模式、掘进参数、刀圈本身性能等密切相关,是刀圈本身质量(刀圈用钢成分、脆性相分布、流线形态、晶粒和相组成分布等)以及外部因素综合作用的结果<sup>[5]</sup>。常见的滚刀刀圈失效形式如图5所示<sup>[3]</sup>,主要包括刀圈正常磨损、刀圈偏磨、刀圈卷刃、刀圈断裂、刀圈崩刃、刀圈脱落、刀轴断裂等形式<sup>[3]</sup>。当刀圈硬度较低、耐磨性较差时,易发生刀圈卷刃失效;当刀圈硬度较高、韧性较差时,易发生刀圈崩刃或断裂失效。而刀圈偏磨、刀圈脱落及刀轴断裂等失效则多与刀圈本身质量关联较小。在盘形滚刀服役过程,期望刀圈呈现正常磨损(也叫均匀磨损)状态,即刀圈径向几乎磨损到相同程度,是盘形滚刀最为常见的失效形式<sup>[11]</sup>。因此,合理控制、调整滚刀刀圈的硬度、耐磨性与冲击韧性是减少刀圈崩刃、断裂或卷边等非正常失效的关键。根据某引水工程中对滚刀失效情况的统计分析,工程总消耗刀圈高达1807把,其中,因正常磨损而更换刀圈的比例为76%,而因刀圈失效导致的非计划性换刀比例为24%。频繁的刀圈维护、检修与更换既增加了掘进施工成本又迟滞了施工进度<sup>[5]</sup>。

为了减少滚刀刀圈的非正常磨损失效,必须实现刀圈自身硬度、耐磨性和冲击韧性的灵活调控,并将刀圈性能与地层特征相适应,辅以合理的掘进模式、掘进参数及刀圈磨损在线监测等技术,及时找出“零号病刀”,减少刀具失效后引起的连锁反应带来的更大损失。为此,从刀圈材料出发,掌握刀圈自身性能影响因素及其调控方法十分重要。

## 3 盘形滚刀服役性能的影响因素

从材料科学与工程四要素出发,材料的使用效能与其结构与成分、合成与加工、材料的性质密切相关。当前,国内外工程掘进领域所使用滚刀刀圈主要是H13E(5Cr5MoSiV1)及DC53(Cr8Mo2SiV)等材质,二者分属热作模具钢及冷作模具钢,其本质均可看作是由硬质相(碳化物)和基体组成的复相组织。因此,在分析滚刀刀圈材料成分-结构-性能时可依照模具钢研究进行。围绕盾构滚刀刀圈用

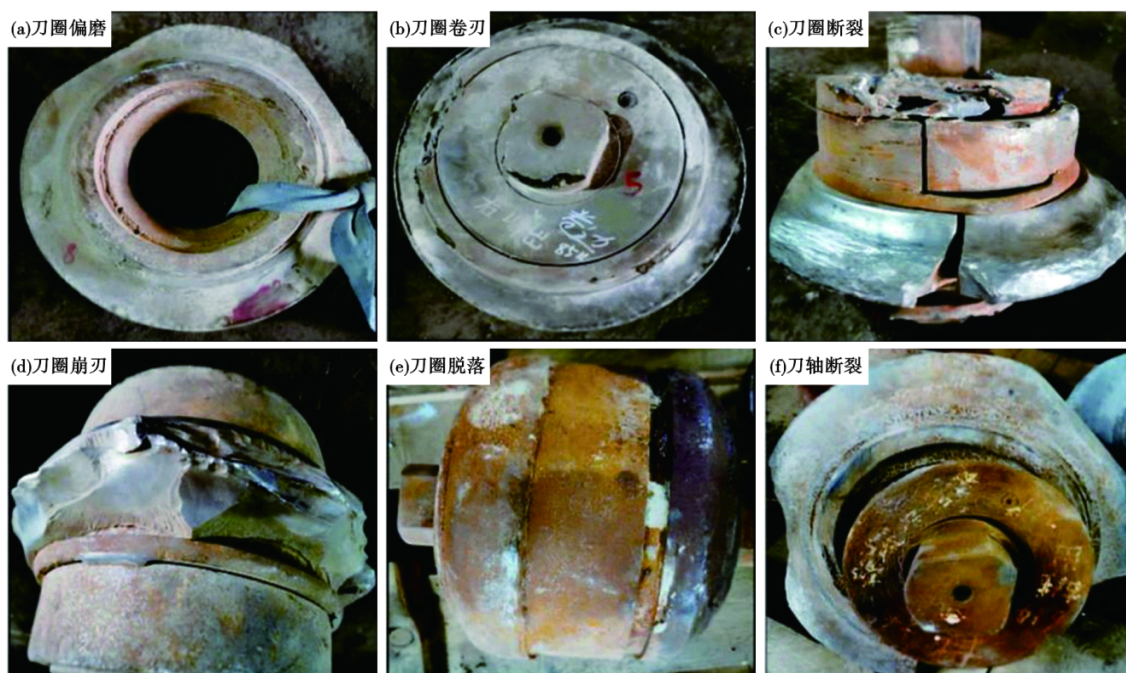


图5 刀圈的常见失效形式

Fig. 5 Common failure forms of cutter ring

钢的成分优化、热处理组织及性能调控等,相关学者开展了大量研究工作<sup>[24-27]</sup>,为盾构滚刀刀圈的高质量发展提供了有力支撑。

当前,滚刀刀圈的生产制备工艺主要为:电弧炉冶炼→LF精炼→VD精炼→模铸→电渣重熔→锻造开坯→切段→模锻→冲孔→碾扩成形→粗加工→热处理→精加工→成品,如图6所示。此工艺过程对于滚刀刀圈用钢的成分及洁净度控制、微观组织及性能调控至关重要,如EAF冶炼过程对钢中杂质元素P的去除、LF精炼及ESR冶炼过程对钢中杂质元素S及非金属夹杂物的去除、VD精炼过程对钢中杂

质元素O、N、H等的去除、锻造/碾扩/热处理过程对钢中缺陷/微观组织/性能的调控等。尤其是热处理过程,通过调整淬火及回火温度和时间可对钢中组织转变、碳化物溶解与析出等进行控制,进而实现刀圈用钢硬度、耐磨性、冲击韧性等综合性能调控。

### 3.1 刀圈硬度及其影响因素

刀圈硬度与钢中高硬碳化物的类型、形貌、尺寸、数量、分布及钢基体的成分、组织类型等密切相关。刀圈用钢中通常含有较高的碳及铬、钼、钒、钨等合金元素含量。按照与碳的相互作用情况,可将钢中合金元素分为非碳化物形成元素和碳化物形

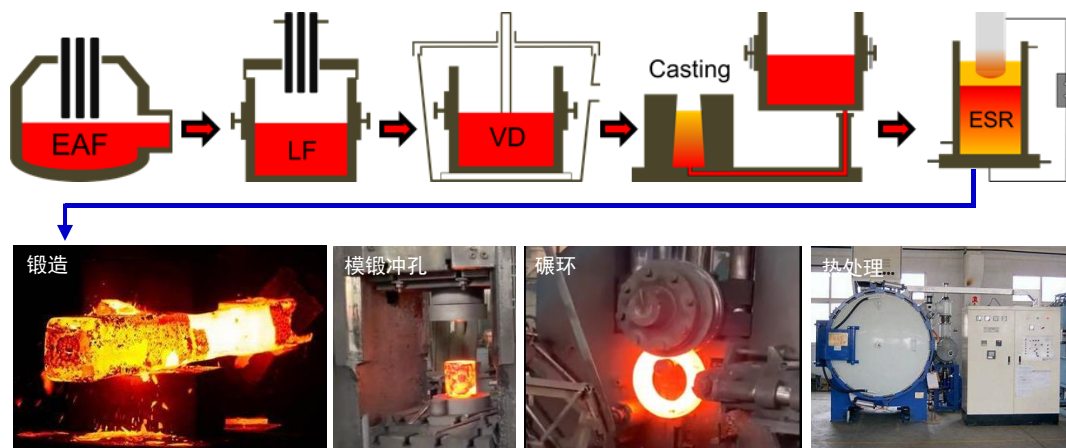


图6 滚刀刀圈的冶炼、加工及热处理工艺流程

Fig. 6 The smelting, machining, and heat treatment process of cutter rings

成元素两大类。非碳化物形成元素主要包括Ni、Si、Co、Al、Cu等。碳化物形成元素又分为强碳化物形成元素(Zr、Ti、Nb、V等)、中强碳化物形成元素(W、Mo、Cr等)及弱碳化物形成元素(Mn、Fe等)。与 $Cr_{23}C_6$ 、 $Cr_7C_3$ 、 $Fe_3Mo_3C$ 、 $Fe_3W_3C$ 、 $Fe_3C$ 等类型碳化物相比,WC、VC、TiC、 $W_2C$ 、 $Mo_2C$ 等类型碳化物熔点、硬度高且性质稳定,加热时不易溶于基体,回火析出时间较晚且不易长大。不同类型碳化物特性见表1<sup>[28-29]</sup>。

常用的刀圈钢的组织主要以马氏体为主,马氏体的硬度和强度受C元素含量的影响显著。当 $w(C) \leq 0.6\%$ 时,其硬度随碳含量的增加而升高,当 $w(C)$ 接近0.6%时,马氏体的硬度接近最大值<sup>[30]</sup>。钢中的另一部分碳则会与碳化物形成元素结合形成各种类型的碳化物,不同研究者给出了与碳化物形成元素相平衡的“平衡碳”计算公式<sup>[31-33]</sup>。其中之一如公式(1)<sup>[33]</sup>。

$$w(C) = 0.060w(Cr) + 0.063w(Mo) + 0.033w(W) + 0.235w(V) + 0.130w(Nb) \quad (1)$$

此外,在锻造加工及淬火处理过程中,随着高温奥氏体化过程的碳化物溶解、晶粒长大及随后冷却过程的奥氏体向马氏体、贝氏体转变等,以及回火处理过程所转变马氏体的分解、残余奥氏体的继续转变、碳化物的析出及转变等,一系列微观组织的转变均会引起刀圈材料硬度及其他性能的连锁变化。

### 3.2 刀圈耐磨性及其影响因素

钢的耐磨性能是指材料在摩擦过程中抵抗材料损失的能力,这一性能可以通过测量磨损量来定量表征,磨损量愈小,耐磨性愈高。磨损量可用摩擦表面法向尺寸减少来表示,也可用体积和重量的减少量来表示,磨损量越小说明耐磨性越好。滚刀刀圈的耐磨性主要与刀圈的硬度、基体组织类型、碳化物硬质相特征、夹杂物、缺陷及其使用温度等有关。

岩石对滚刀刀圈的磨损机制主要为磨粒磨损,在岩石基体的支撑下,岩石磨粒持续对刀圈表面进行刮削,刀圈的基体硬度越高,岩石磨粒越难贯入

刀圈表面,对刀圈基体的刮程度就越低,反之亦然。当刀圈与岩石摩擦生热致使其表面温度升高、硬度降低时,其耐磨性下降。在金属材料内部,如果存在有氮化物、氧化物和硅酸盐等非金属夹杂物,由于其形态通常呈现为具有棱角的质点,在刀圈整体受力过程中,这些夹杂物的变形行为与周围的钢基体存在显著差异,导致应力分布不均,最终导致裂纹的产生,降低材料整体的耐磨性。关于钢中基体组织对耐磨性的影响,余德锋等<sup>[34]</sup>给出了各种钢铁组织的耐磨粒磨损性关系,如图7所示。可见,相比珠光体、奥氏体,贝氏体、马氏体组织通常具有更高的硬度和耐磨粒磨损性能。

随刀圈用钢的成分不同,钢中形成的碳化物硬质相特征(类型、形貌、尺寸、数量、分布)也有所不同,在MC、 $M_2C$ 、 $M_6C$ 、 $M_7C_3$ 、 $M_{23}C_6$ 与 $M_3C$ 等不同类型碳化物中,主要由C、V、W等形成的MC型碳化物具有最高的硬度<sup>[35-36]</sup>。一般来说,刀圈材料中的高硬度碳化物越多,刀圈材料的磨损量越小,刀圈材料的耐磨性越好<sup>[37]</sup>,含大量高硬MC型碳化物时常具有更好的耐磨性<sup>[38]</sup>。此外,在钢中具有同样类型的碳化物时,随碳化物数量的增加、分布均匀性的提高,其耐磨性也呈增加趋势<sup>[39]</sup>。

围绕盾构滚刀刀圈耐磨性及其影响因素,相关

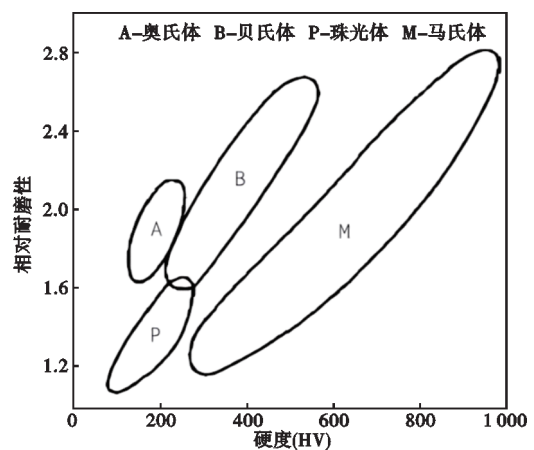


图7 各种钢铁组织的耐磨粒磨损性

Fig. 7 Abrasive wear resistance of various microstructure in steels

表1 钢中常见碳化物的硬度及熔点<sup>[28-29]</sup>

Table 1 Hardness and melting point of common carbides in steels<sup>[28-29]</sup>

性质	NbC	$W_2C$	WC	$Mo_2C$	TiC	ZrC	VC	$Cr_{23}C_6$	$Cr_7C_3$	$Fe_3C$
熔点/ $^{\circ}C$	3 770±125	3 130	2 867	2 960±50	3 410	3 805	3 023	1 577	1 780	1 227
硬度(HV)	2 050	-	1 730	1 480	2 850	2 840	2 010	1 650	1 700	≈800
密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	7.9	17.2	15.8	9.1	-	-	5.7	-	6.9	7.2

学者开展了大量研究工作。李晨辉等<sup>[40]</sup>对不同工艺的Cr8型钢进行了磨损实验,研究指出,钢中 $M_7C_3$ 共晶碳化物含量越高,磨损量越大。在钢中碳化物总量接近的情况下,对磨损性能起决定性作用的是碳化物的形态与分布情况<sup>[41-42]</sup>,共晶碳化物形状不规则受交变应力影响易从基体剥落,加剧磨粒磨损<sup>[43]</sup>。此外,基体的强度、基体与碳化物的结合力也是影响刀圈用钢耐磨性能的一个重要因素。文献<sup>[44]</sup>对比了当前常用H13与DC53刀圈材料与岩石作用的耐磨性,二者所用磨损条件相同。两种不同材料的刀圈在磨损后的表面微观形貌如图8所示<sup>[44]</sup>,由图8(a)(b)可见,由于H13钢基体硬度较低且缺少碳化物保护,因而其表面很容易受到磨粒的刮削,在磨损表面有大量的沿滑动方向分布的犁沟以及塑性变形产生的褶皱;由图8(c)(d)可见,DC53钢表面的一次碳化物尺寸较大、数量较多,且在這些一次碳化物附近还散布着尺寸较小的颗粒碳化物,这些碳化物有效地保护了基体,在一定程度上阻止了磨粒的嵌入和对磨损表面的刮削<sup>[45]</sup>。此外,由于碳化物的硬度较高、韧性较差,在磨损过程中容易脆断或者与基体结合面较小时容易被磨粒从基体中刨出<sup>[46]</sup>,因此,在DC53的磨损表面会留下剥落坑,如图8(d)箭头所示。

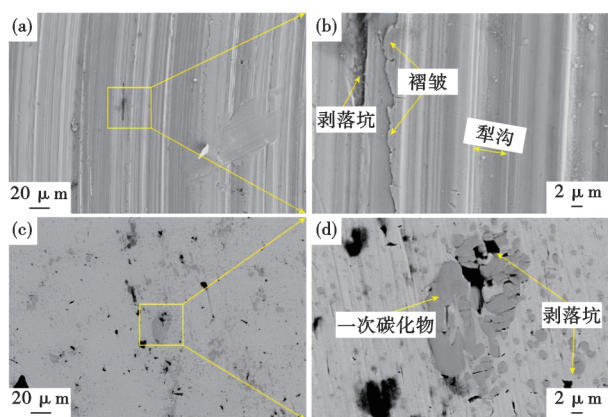


图8 两种TBM刀圈材料磨损表面微观形貌:(a)(b)H13钢;(c)(d)DC53钢

Fig. 8 The micro-morphology of the wear surface of TBM cutter ring materials : (a)(b) H13 steel, (c) (d) DC53 steel

### 3.3 刀圈抗冲击韧性及其影响因素

材料的冲击韧性是材料在受到冲击载荷作用下在断裂过程中吸收的能量,用于反映材料的韧脆程度。冲击韧性与钢的化学成分、非金属夹杂、微观组织类型、晶粒尺寸、有无缺陷等密切相关。通

常,钢中C、P、S、O、N、As、Sn等元素含量的增加将降低其冲击韧性。钢中杂质S,易于Fe结合形成脆性大、塑性差的FeS,进而形成Fe-FeS二元低熔点共晶体,造成钢在800~1200℃时变脆而易于开裂,即产生“热脆性”。钢中的杂质P与S类似,也易在晶界偏析,形成脆性大的 $Fe_3P$ 相,同时,P的偏析还使钢材在热轧后形成带状组织。钢中存在的非金属夹杂物,尤其是大尺寸、不规则、难变形夹杂物的存在,将割裂基体、破坏组织连续性,因易产生应力集中而导致材料破坏;钢中常见微观组织类型的抗冲击韧性呈现出铁素体>奥氏体>珠光体>贝氏体>马氏体的规律。然而,刀圈用钢是碳化物硬质相和基体组织的复相组织,其抗冲击韧性还与碳化物的类型、形貌、分布、尺寸、数量等密切相关。比如,分布于晶界的网状碳化物在材料受到外力时易成为裂纹萌生和扩展的通道,最终形成沿晶界断裂<sup>[47]</sup>。对于晶粒尺寸而言,细晶增加材料韧性,粗晶降低材料韧性。通常,在金属材料冶炼凝固过程,采用增加过冷度、变质处理、振动与搅拌等措施进行钢的晶粒细化<sup>[28]</sup>。

## 4 新型高性能滚刀刀圈研发制造

刀圈用钢的成分、冶炼工艺、塑性成形工艺及其热处理工艺是影响滚刀刀圈韧性和耐磨性等性能的关键,国内外学者为此开展了系统工作。目前,用于岩石隧道施工的盾构刀圈主要有高硬度盾构刀圈、梯度硬度盾构刀圈、镶齿盾构刀圈等<sup>[48]</sup>。其中,高硬度盾构刀圈由优质模具钢直接制造成形,国内外专家长期致力于对滚刀刀圈用钢进行成分设计与优化;梯度硬度盾构刀圈则是在高硬度盾构刀圈基础上进行改良,通过使用专用设备对成型刀圈进行二次淬火、回火处理的方法,使刀圈基体硬度呈现出梯度变化的趋势,梯度硬度的刀圈既能保证刀圈刃部高硬度的性能,又能有效降低刀圈芯部断裂的风险;镶齿盾构刀圈,是在金属刀体上嵌入高硬度碳化钨合金齿形成的一种组合式刀圈,具有耐磨性好、硬度高等特点。

### 4.1 滚刀刀圈的成分创新

当前,国内外工程掘进领域所使用滚刀刀圈主要是H13与DC53等材质,基于常用钢的成分特征及碳、合金元素对钢中碳化物相与基体性能的影响规律,国内外学者聚焦碳与合金元素含量调整,设计了众多的刀圈用钢成分见表2。

张国利等<sup>[49]</sup>研制了盾构机刀圈用钢DQ50,并

表2 新型刀圈用钢的成分设计(质量分数)

Table 2 Composition design of new type cutter ring steel %

牌号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
H13	0.32~ 0.45	0.80~ 1.20	0.20~ 0.50	4.75~ 5.50	1.10~ 1.75	0.80~ 1.20	-
DQ50	0.51	0.94	0.27	4.95	1.41	0.80	-
DC53	0.95~ 1.03	0.80~ 1.20	0.20~ 0.50	7.80~ 8.30	2.00~ 2.80	0.25~ 0.40	-
H13E	0.49	0.95	0.40	5.40	1.35	1.05	-
H418E	0.66	0.30	0.50	5.20	2.40	1.10	-
K4	0.39	0.35	0.35	4.87	1.77	0.49	-
SDH55	0.48~ 0.55	≤ 0.50	≤ 0.50	5.10~ 6.10	2.20~ 3.00	0.45~ 0.85	0.95
CREG-1	0.46~ 0.55	0.70~ 1.40	0.30~ 0.70	4.50~ 5.30	0.90~ 1.50	0.80~ 1.30	-
C-2	0.83	0.87	0.48	4.95	2.34	0.69	-
DB1	0.87	1.02	0.44	7.67	2.01	0.24	-

进行了热处理工艺的设计,使得DQ50钢的硬度与耐磨性都达到了德国WIRTH公司的产品水平,能满足国内盾构机的使用,使得国内盾构机刀圈摆脱了对进口的依赖。牛旭斐等<sup>[50]</sup>在H13盾构刀圈基础上开发了H13E和H418E两种高品质专用刀圈材料,通过合金化设计、控制变形、生产工艺优化等,在保持与H13类冲击韧性相近的基础上实现了硬度和耐磨性提高,并且设计出的H418E钢相比于H13钢更适用于极恶劣硬岩地层的掘进工作。燕云等<sup>[51]</sup>在H13基础上,适当提高C、Cr、Mo等含量,降低Si含量,研制出盾构刀圈专用热作模具钢6Cr5Mo2V,该钢经1050℃淬火、560℃回火时硬度为57.7~58.9HRC,并且通过非真空感应、电渣重熔和精快锻联合的新工艺进行了实际生产。孟令超等<sup>[52]</sup>在H13钢基础上通过降Si、增Mo、降V、增W(Ni)等进行了刀圈用钢成分设计研究,指出,低Si高Mo的成分调整有利于提高H13型工模具钢的力学性能,添加适量的Mo、W对提高材料的冲击性能有利,W的添加有利于提升钢的热稳定性,并通过调整成分与热处理制度,使得H13的冲击功提升了15%。印康莹等<sup>[53]</sup>开发了刀圈用钢SDH55,研究了回火温度对其强韧性及组织的影响,结果表明,1030℃保温30min油淬后,经500~540℃回火时,硬度缓慢下降、冲击韧性逐渐提升,回火稳定大于540℃时,硬度和冲击韧性降低趋势明显。王锴等<sup>[54]</sup>在5Cr5MoSiV1基础上微调Cr、Mo、V等含量,设计出CREG-1钢,并就回火温度对CREG-1钢组织和力学性能的影响进行了研究,结果表明,随回火温度由520℃升高至580℃时,该钢冲击韧性明显升高,硬度逐渐下降,组织中析出

的细小碳化物增多。总体而言,CREG-1钢在540~560℃范围内回火具有均衡的力学性能。贾连辉等<sup>[55]</sup>基于H13钢(C-1)设计了C-2刀圈成分,对比实验指出,经过热处理以后,C-2刀圈硬度高于C-1刀圈,但冲击韧性却低于C-1刀圈,在特定弱冲击高磨损地质中进行掘进工程时,C-2刀圈的寿命远大于C-1刀圈。蒋金哲等<sup>[44]</sup>在DC53钢基础上,通过降C、Cr开发了新型刀圈材料DB1、DB3,经热处理后,其硬度比H13高、比DC53略低,其冲击功比H13低、但比DC53明显有所提升。相同条件下,DB1的磨损失重高于DC53钢30%以上,其耐磨性低于DC53钢,因此,新型DB1钢适用于中等抗压强度的大理石地层(抗压强度150MPa左右)。

#### 4.2 滚刀刀圈的工艺创新

当前滚刀刀圈的主流制造工艺如图6所示,包括钢水冶炼、精炼及铸锭模锻、冲孔、碾环及后续热处理等流程,具有工艺流程长、生产能耗高、材料利用率低等不足。针对传统工艺的不足,国内外学者也一直在对刀圈进行工艺的创新与优化。

##### (1) 滚刀刀圈一次成形工艺

李少英等<sup>[56-57]</sup>使用超重力离心浇铸技术,将钢液直接浇铸为刀圈形状,后续只需进行热处理和机加工即可,新工艺精简了刀圈的制造流程,减少了材料的损耗,研发的产品在工程项目中进行了试用,其耐磨性良好。为了提高离心浇铸滚刀刀圈的耐磨性,赵兴明等<sup>[58]</sup>将WC颗粒通过离心铸造方法加入到刀圈用H13钢中,结果表明,随着WC颗粒加入量由0%增至1%、2%、3%时,H13钢的硬度持续增加、冲击韧性则持续降低,如图9(a)所示,其磨粒磨损失重呈先降低、后增加趋势,在WC加入1%时呈现最好的耐磨性,如图9(b)所示<sup>[58]</sup>。这与夏毅敏等<sup>[23]</sup>开展的H13刀圈磨损失重随其硬度增加而呈现先减小后增大的趋势一致,这是由于刀圈硬度的变化导致了刀圈磨损机制的转变,由低硬度的显微切削去除机制转变为高硬度时的韧性断裂剥落去除机制。

##### (2) 梯度性能滚刀刀圈制造工艺

根据滚刀刀圈服役工况,要求其刃口部位硬度高、耐磨性好,而与刀体配合的心部则需硬度较低、韧性较好。对于单材料的刀圈的热处理而言,其硬度、耐磨性与冲击韧性往往不可兼得,因此,梯度性能的滚刀刀圈被研究出来。要获得从刀圈刃部至心部的梯度性能过渡,则需对刃部或心部开展不同

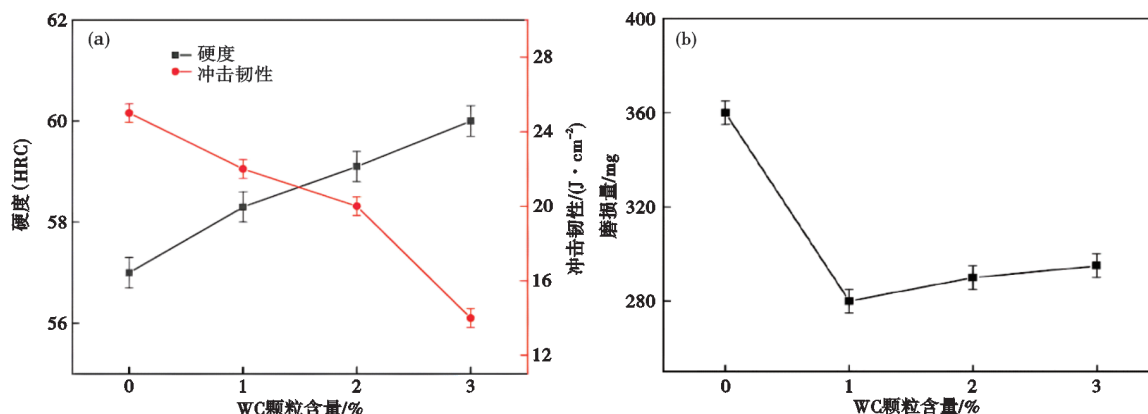


图9 H13钢在不同WC颗粒含量下:(a)力学性能,(b)耐磨性

Fig. 9 H13 steel with different WC particle contents : (a) Mechanical properties, (b) wear resistance

于整体的热处理<sup>[59]</sup>。于庆增等<sup>[60]</sup>为了调节DC53刀圈的组织及性能,采用刀圈刃部感应加热淬火与刀圈心部感应加热回火的处理工艺,其热处理过程如图10所示,结果表明:刃部感应加热淬火与刀圈心部感应加热回火两种工艺都能得到刃口硬度高、心部韧性好的梯度性能滚刀刀圈,其中心部感应加热回火的工艺方案更佳。

梯度性能刀圈的刃部硬度可以达到59~61HRC,同时心部硬度保持在48~52HRC,这使得刀圈既能保证刃部的耐磨性也能保证心部的冲击韧性,有效吸收冲击功,防止刀圈断裂。在复杂地势下,梯度性能滚刀刀圈的优势更加明显。

#### 4.3 滚刀刀圈的结构创新

##### (1) 表面强化刀圈

镶齿刀圈:刀圈和硬质合金采用过盈配合,借助压力机的压力将硬质合金柱齿压进刀圈合金孔内,刀圈球齿孔利用材料的弹性变形将合金柱齿抱紧,利用硬质合金的耐磨性延长刀圈使用寿命。

钎焊硬质合金刀圈:刀圈和硬质合金采用钎焊的方式进行连接,通过钎料在高温时的扩散作用完成硬质合金,钎料及钢基体的冶金结合,利用硬质合金的耐磨性延长刀圈使用寿命。

激光熔覆堆焊刀圈<sup>[61-62]</sup>:采用先进的激光熔覆技术,将镍基碳化钨复合材料粉末在滚刀刀圈上制成耐磨性熔覆层。在面对复杂地质条件时,能够有效降低刀圈的磨损情况,减少换刀次数,降低施工成本。

等离子熔覆堆焊刀圈<sup>[63-64]</sup>:利用等离子喷焊工艺,将硬质合金粉末熔覆在刀圈基体上,硬质合金粉末与刀圈基体形成冶金结合,从而确保焊接强度,它的最大特点是抗崩性优于硬质合金,脱落及崩裂的可能性更小。

##### (2) 双金属复合刀圈

当前单一材质的滚刀刀圈(尤其是TBM用DC53刀圈),通常为了保持一定的冲击韧性(以免刀圈崩刃或断裂)而不得不牺牲其高耐磨性的特质,

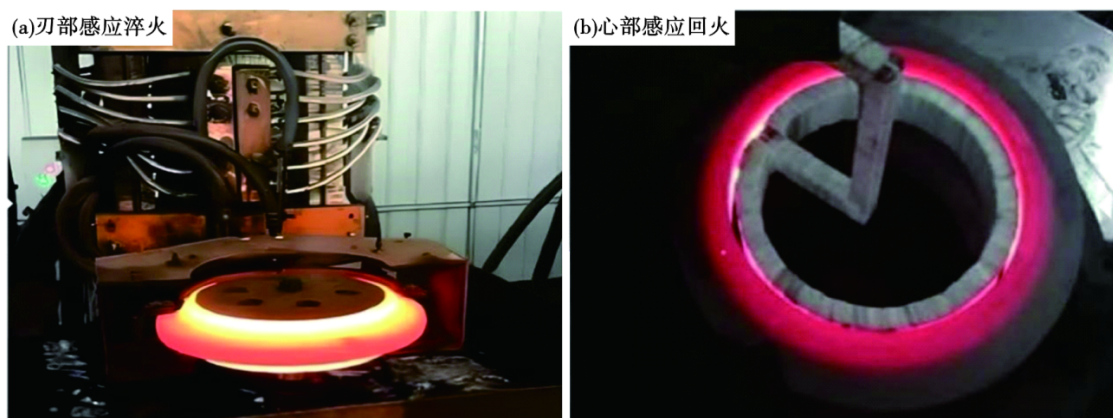


图10 梯度性能刀圈热处理工艺过程

Fig. 10 Test and equipment for heat treatment of cutter rings with different hardness gradients

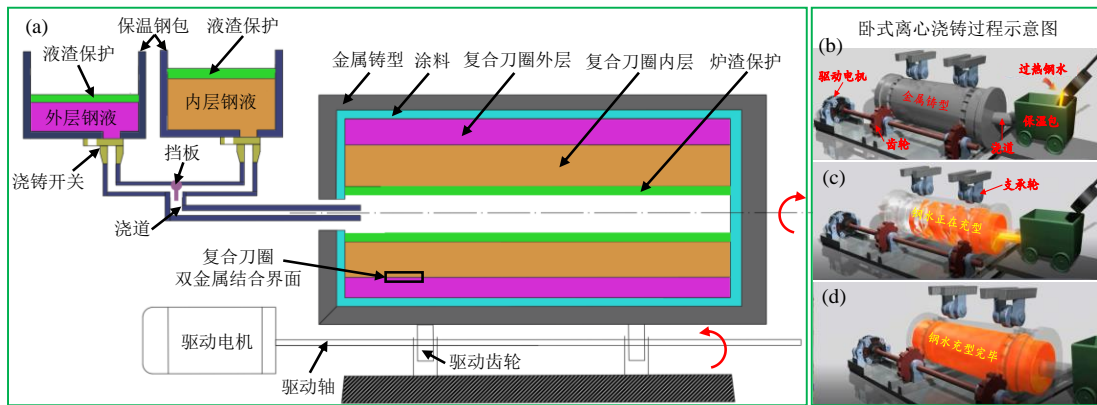


图 11 离心浇铸制备双金属复合管坯过程示意图: (a) 内外层钢液离心浇铸复合过程, (b) 钢液浇铸, (c) 钢液充型, (d) 钢液充型结束

Fig. 11 Process diagram of centrifugal casting preparation of bimetallic composite tube blank : (a) Centrifugal casting composite process of inner and outer liquid steel, (b) liquid steel casting, (c) liquid steel filling, (d) liquid steel filling end

使得高合金 DC53 刀圈难以充分发挥其高硬、高耐磨优势。双金属复合材料可根据内外层服役性能需求进行不同材料的有效匹配,具有综合性能优、服役寿命长、原料成本低等多重优势,广泛应用于耐磨、耐蚀等领域<sup>[65-67]</sup>。曹玉龙等<sup>[47,68-71]</sup>长期致力于高性能双金属复合材料制备领域研究并取得了系列研究成果。基于滚刀刀圈的生产现状及服役性能要求,他提出了一种“高性能双金属复合刀圈高效、低成本铸碾成形一体化制备”新方法<sup>[72]</sup>。首先采用离心铸造制备外硬、内韧的双金属空心管坯,如图 11 所示。然后,按每个滚刀刀圈重量所需均匀切段,每段经模锻、热辗扩成形制成双金属复合刀圈,如图 12 所示。相比图 6 所示的传统刀圈制造工艺,该铸碾一体化制备工艺具有工艺流程短、生产能耗低、材料成本低等优势。同时,高性能双金属复合刀圈的应用能有效保障施工安全、提高施工效率、降低工程成本,在未来刀圈发展中必将充满竞争力。

### 5 结语

(1) 滚刀刀圈作为盾构机掘进施工的核心部件,因承受高强、高硬岩石对其产生的高冲击、强挤压、高磨蚀作用而成为最易磨损和失效的部件。关于滚刀刀圈的未来发展,一方面,应加强滚刀刀圈材质、性能与待开挖地层的适配研究,围绕地层特征定制化设计滚刀刀圈综合性能,延长刀圈使用寿命;另一方面,继续加强滚刀刀圈磨损状态在线监测研究,及时准确发现“零号病刀”,减少刀圈失效引起的连锁反应带来的更大损失。

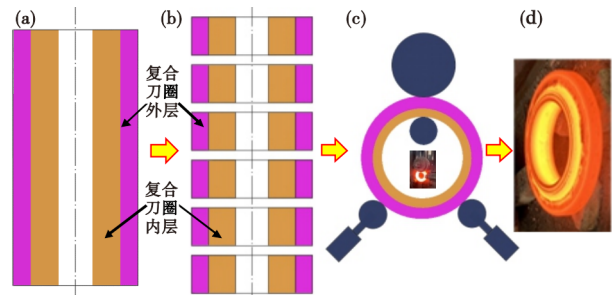


图 12 所制备复合管坯切段→碾扩成形制备复合刀圈过程示意图: (a) 离心浇铸复合空心坯, (b) 空心管坯切段, (c) 高温碾扩成形, (d) 复合刀圈成形

Fig. 12 The schematic diagram of the process of cutting the prepared composite tube blank and milling forming to prepare the composite tool ring : (a) centrifugal casting composite hollow billet, (b) hollow tube billet cutting, (c) high temperature rolling forming, (d) composite cutter ring forming

(2) 作为一种由碳化物硬质相和基体相组成的复相组织,滚刀刀圈用钢的耐磨性和冲击韧性等不仅与基体组织密切相关,还与碳化物种类、数量、形貌、分布等密切相关,实现滚刀刀圈综合性能调控要从基体组织和碳化物两个方面综合考虑。

(3) 继续开展滚刀刀圈成分创新、工艺创新及结构创新系统研究,助力新型高性能滚刀刀圈不断突破。系统揭示钢成分-冶炼工艺-热加工/热处理工艺、刀圈结构对滚刀刀圈耐磨性与冲击韧性的影响规律,围绕钢中碳化物类型/特征设计、钢中杂质去除/夹杂物控制、组织与成分均匀化、外硬内韧的梯度性能调控等进一步优化、提升滚刀刀圈综合性能,延长其使用使命。

## 参考文献

- [1] 钱七虎. 建设城市地下综合管廊, 转变城市发展方式[J]. 隧道建设, 2017, 37(6): 647-654.
- [2] 苗圩巍, 颜世钊, 李纪强, 等. 我国全断面隧道掘进机的发展现状及发展趋势[J]. 内燃机与配件, 2021, 42(2): 203-205.
- [3] 卢庆亮, 袁乃强. 某地铁工程盾构机滚刀失效分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(2): 92-96.
- [4] 张敏. 盾构滚刀断裂失效分析[J]. 建筑机械化, 2020, 41(7): 35-37+64.
- [5] 李增良. 盘形滚刀刀圈失效原因及成形方法研究[J]. 低碳世界, 2017, 7(1): 79-81.
- [6] 李建斌. 我国掘进机研制现状、问题和展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6): 877-896.
- [7] 李建斌, 才铁军. 中国大盾构: 中国全断面隧道掘进机及施工技术发展史[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [8] 钱七虎, 胡小强, 李树忱, 等. 中国盾构隧道工程关键技术的新进展综述[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(5): 897-926.
- [9] 陈赓, 杨延栋. 中国盾构制造新技术与发展趋势[J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 276-284.
- [10] 张魁, 陈春雷, 郑学军, 等. 基于脉冲涡流的TBM盘形滚刀磨损检测方法[J]. 中国铁道科学, 20, 44(3): 122-129.
- [11] 邓林, 于榕, 宋山, 等. TBM新型耐磨滚刀刀圈技术研究及应用[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(23): 50-56.
- [12] 吴俊, 袁大军, 李兴高, 等. 盾构刀具磨损机理及预测分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 109-116+142.
- [13] 万治昌, 沙明元, 周雁翎. 盘形滚刀的使用与研究(1)——TB880E型掘进机在秦岭隧道施工中的应用[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(5): 1-11.
- [14] 梁飞, 于庆增. 梯度硬度盾构滚刀刀圈关键技术研究及应用[J]. 建筑机械化, 2023, 44(1): 29-32.
- [15] 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.
- [16] 刘高峰, 宋天田. 成都地铁盾构刀具磨损分析研究[J]. 隧道建设, 2007, 27(6): 89-93.
- [17] 聂佳辉, 吴志鑫, 雷磊, 等. TBM的刀具改性与辅助破岩技术研究现状[J]. 机械, 2021, 48(12): 1-10+19.
- [18] Hauert A, Rossoll A, Mortensen A. Ductile-to-brittle transition in tensile failure of particle-reinforced metals[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2009, 57(3): 473-499.
- [19] Velasco F, Gordo E, Isabel R, et al. Mechanical and wear behaviour of high-speed steels reinforced with TiCN particles[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2001, 19(4-6): 319-323.
- [20] 刘芳, 周科朝, 李志友. 颗粒强化粉末冶金钢耐磨性能的影响因素[J]. 粉末冶金技术, 2011, 29(5): 357-361.
- [21] 尤显卿, 任昊. 颗粒增强钢基复合材料摩擦学研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(5): 57-61.
- [22] Zhang X H, Lin L K, Xia Y M, et al. Experimental study on wear of TBM disc cutter rings with different kinds of hardness[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82(1): 346-357.
- [23] 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.
- [24] 胡怡, 顾红星, 张国利. 全断面隧道掘进机盘形滚刀用钢5Cr5MoSiV的研制[J]. 特殊钢, 2001, 22(4): 47-48.
- [25] 郑禹, 姜培扬, 张豪臻, 等. 盾构机轴承套圈用钢42CrMo连续加热奥氏体晶粒长大模型[J]. 特殊钢, 2014, 35(6): 57-59.
- [26] 李进, 周许, 苏超, 等. 热处理工艺对H13ESR大型模具钢锻圆组织性能的影响[J]. 特殊钢, 2025, 46(1): 87-91.
- [27] 李冬丽, 马党参, 迟宏宵, 等. Si含量对冷作模具钢Cr8Mo2SiV组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2010, 31(2): 57-59.
- [28] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理(第2版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [29] Kenji I, Yoshihiro K, Tomoya K. Development of centrifugal cast roll with high wear resistance for finishing stands of hot strip mill[J]. Kawasaki Steel Technical Report, 1997, 37(3): 13-18.
- [30] 姚玉环, 张立斌, 王海泉, 等. 碳钢淬火马氏体硬度与含碳量的关系[J]. 金属热处理, 2014, 39(8): 136-138.
- [31] 王强, 杨涤心, 魏世忠, 等. 碳对高钒高速钢冷轧辊耐磨性的影响[J]. 铸造技术, 2006, 27(8): 812-817.
- [32] Steven G, Nehrenberg A E, Philip T V. High performance high speed steels by design[J]. Transactions of American Mathematical, 1964, 57(11): 925-948.
- [33] 张绍顺. 高速钢复合轧辊的成分设计及生产工艺[J]. 有色金属加工, 2011, 40(5): 43-45+62+12.
- [34] 余德锋, 辛松鹤, 唐莉梅, 等. 提高盾构刀具耐磨性能的研究[J]. 隧道建设, 2009, 29(S1): 5-8.
- [35] Sano Y, Hattori T, Haga M. Characteristics of high-carbon high speed steel rolls for hot strip mill[J]. ISIJ International, 1992, 32(11): 1194-1201.
- [36] Artimes J M, García J, Llano J M, et al. Characterization of  $M_7C_3$  carbides present in high speed steel (HSS) rolls manufactured by centrifugal casting method[C]. 17th Rolling Conference, 2008, Rosario, Argentina, 484-493.
- [37] Badisch E, Mitterer C. Abrasive wear of high speed steels: Influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance[J]. Tribology International, 2003, 36(10): 765-770.
- [38] Xu L J, Wei S Z, Xiao F N, et al. Effects of carbides on abrasive wear properties and failure behaviours of high speed steels with different alloy element content[J]. Wear, 2017, 376: 968-974.
- [39] 徐流杰, 魏世忠, 邢建东, 等. 高碳化物铁碳合金的磨粒磨损性能研究[J]. 金属热处理, 2006, 31(12): 36-39.
- [40] 李晨辉, 吴晓春, 谢尘, 等. Cr8型模具钢耐磨性能研究[J]. 摩擦学报, 2013, 33(1): 36-43.
- [41] 王树奇, 姜启川, 隋学民, 等. 具有粒状碳化物的莱氏体铸造模具钢的耐磨性研究[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(1): 33-38.
- [42] 季英萍, 李炎, 魏世忠, 等. 碳含量对高钒高速钢干滑动磨损性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(S1): 116-119.
- [43] 揭晓华, 官俊英. 热处理工艺对Cr12MoV钢耐磨性能的影响

- [J]. 热加工工艺, 1994, 23(1): 32-34.
- [44] 蒋金哲, 王 锴, 郭 浩, 等. 新型TBM刀圈材料微观组织及耐磨性能研究[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(1): 17-26.
- [45] Tressia G, Penagos J J, Sinatora A. Effect of abrasive particle size on slurry abrasion resistance of austenitic and martensitic steels[J]. Wear, 2017, 376: 63-69.
- [46] 辛 悦, 赵秀娟, 潘金芝, 等. D2车轮钢原始组织对滑动磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(4): 479-488.
- [47] Cao Y L, Dong Y W, Jiang Z H, et al. Characteristics of high speed steel/ductile cast iron composite roll manufactured by electrosag remelting cladding[J]. ISIJ International, 2021, 61(7): 2127-2134.
- [48] 刘 畅. TMB隧道掘进机盾构刀圈改进性研究[J]. 科技与创新, 2021, 8(6): 67-68.
- [49] 张国利, 孙晓洁, 陈立志, 等. TBM盘形滚刀刀圈新材质DQ50钢的研制[J]. 大型铸锻件, 2001, 23(3): 15-18+21.
- [50] 牛旭斐, 王 雪, 朱长青, 等. 高品质盾构刀圈材料的开发[J]. 河北冶金, 2020, 42(1): 9-11+37.
- [51] 燕 云, 冯淑玲, 刘宝石, 等. 新型盾构机刀圈用6Cr5Mo2V钢力学性能研究[J]. 模具制造, 2019, 19(7): 86-89.
- [52] 孟令超. 盾构机滚刀刀圈用钢的组织与性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [53] 印康莹, 左鹏鹏, 何西娟, 等. 回火温度对新型盾构刀具用钢SDH55强韧性及组织的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(3): 57-61.
- [54] 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.
- [55] 贾连辉, 尚 勇, 龙伟民, 等. TBM滚刀刀圈材料合金成分对组织和耐磨性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(10): 2730-2738.
- [56] 李少英. 复合超重力场近终形电渣浇铸TBM刀圈工艺基础研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- [57] Li S Y, Qin S Y, Xi X J, et al. Solidified structure refinement of H13 tool steel under a multi-rotational speed super gravity field[J]. Metals, 2020, 10(11): 1428.
- [58] 赵兴明, 刘学红, 闫光立, 等. WC颗粒增强盾构机滚刀刀圈的组织性能[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(7): 121-128.
- [59] 唐 欢, 杜水明. 盾构H13E刀圈的热处理工艺研究[J]. 凿岩机械气动工具, 2017, 43(4): 37-42.
- [60] 于庆增, 龙伟漾, 杨兴亚, 等. 具有不同硬度梯度的热处理工艺对盾构刀圈组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(12): 150-152+156.
- [61] Hu D W, Liu Y, Chen H, et al. Microstructure and wear resistance of Ni-based tungsten carbide coating by laser cladding on tunnel boring machine cutter ring[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 404: 126432.
- [62] 张振光, 王晓翔, 阿继盛, 等. 激光熔覆盾构滚刀刀圈在复合地层中的应用[J]. 中国市政工程, 2021, 46(1): 4-7+83.
- [63] 段文军, 李 贞, 王好平, 等. 盾构滚刀材料表面镍基碳化钨涂层摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 313-321+365.
- [64] Wang H P, Sun R X, Zhang M Q, et al. Impact-sliding behavior of Ni-based coating prepared on tunnel boring machine disc cutter material produced using a plasma transferred arc welding process[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 442: 128186.
- [65] 宋延沛, 周 汉, 陈丹萍, 等. 铸造耐磨材料的研究应用现状及发展趋势[J]. 铸造, 2022, 71(12): 1477-1484.
- [66] Orozco K M, Dessi J G, Afonso C R M, et al. Experimental study and thermodynamic computational simulation of phase transformations in centrifugal casting bimetallic pipe of API 5L X65Q steel and Inconel 625 alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32(4): 318-326.
- [67] Sun J H, Liu X F, Yang Y H, et al. Interfacial gradient M7C3 carbides precipitation behavior and strengthening mechanisms of stainless steel/carbon steel clad plates[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 3476-3488.
- [68] 曹玉龙, 姜周华, 董艳伍, 等. 电渣复合制备双金属复合轧辊的研究进展[J]. 特殊钢, 2020, 41(5): 6-13.
- [69] Cao Y L, Jiang Z H, Dong Y W, et al. Research on the bimetallic composite roll produced by an improved electrosag cladding method: Mathematical simulation of the power supply circuits[J]. ISIJ International, 2018, 58(6): 1052-1060.
- [70] Cao Y L, Jiang Z H, Dong Y W, et al. Research on the bimetallic composite roll produced by a new electrosag cladding method: Microstructure and property of the bonding interface[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2020, 47(6): 686-692.
- [71] Cao Y L, Ma C S, Jiang Z H, et al. Element migration and diffusion at the bonding interface of the bimetallic composite billet produced by the ESRC method[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(4): 2398-2406.
- [72] 曹玉龙, 马崇圣, 刘龙超, 等. 一种双金属盾构复合刀圈的制作方法: CN118045962A[P]. 2024-05-17.