● 材料失效分析 Material Failure Analysis ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.07.016

煤矿刮板输送机中板失效分析

朱秀光[1],邱 涵[2,3],穆润青[1],李 杰[2,3],涂小慧[2,3],李 卫[2,3]

(1. 中煤张家口煤矿机械有限责任公司, 河北 张家口 076250;2. 暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院, 广东 广州 510632;3.暨南大学高性能金属耐磨材料技术国家地方联合工程研究中心,广东 广州 510632)

摘 要:利用扫描电子显微镜(SEM),X 射线衍射仪(XRD),透射电子显微镜(TEM)和显微硬度计等表征手段,对国内某煤矿刮板输送机中板的失效行为进行分析研究。结果表明,中板连接处磨损最严重,其磨损失效的主要原因是链条、煤屑和矸石与中板之间相对滑动造成的显微切削;同时,磨损面亚表层组织纳米化造成的疲劳剥落也是导致中板连接处失效的重要因素。因此,在确保一定硬度的情况下,抑制形变层的形成是中板材料设计过程中需考虑的关键问题。

关键词:刮板输送机;中板;磨料磨损;剥层磨损

中图分类号:TG142; TH117.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)07-0617-03

Failure Analysis of Middle Plate of Scraper Conveyor in Coal Mine

ZHU Xiuguang[1], QIU Han[2,3], MU Runqing[1], LI Jie[2,3], TU Xiaohui[2,3], LI Wei[2,3]

(1. China Coal Zhangjiakou Coal Mining Machinery Co., Ltd., Zhangjiakou 076250, China; 2. Institute of Advanced Wear & Corrosion Resistant and Functional Materials, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3. National Joint Engineering Research Center of High Performance Metal Wear Resistant Materials Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Scanning electron microscope (SEM), X-ray diffractometer (XRD), transmission electron microscope (TEM) and microhardness tester were used to analyze and study the failure behavior of the middle plate of scraper conveyor in a coal mine. The results show that the wear is the most serious at the joint of the plate, and the main reason for the wear failure is the micro-cutting caused by the relative sliding between the chain, coal scraps and gangue and the plate. At the same time, the fatigue spalling caused by the nanostructure of the subsurface of the wear surface is also an important factor leading to the failure of the middle plate joint. Therefore, under the condition of ensuring a certain hardness, the suppression of the formation of deformation layer is a key problem to be considered in the design process of medium plate materials.

Key words: scraper conveyor; middle plate; abrasive wear; peeling wear

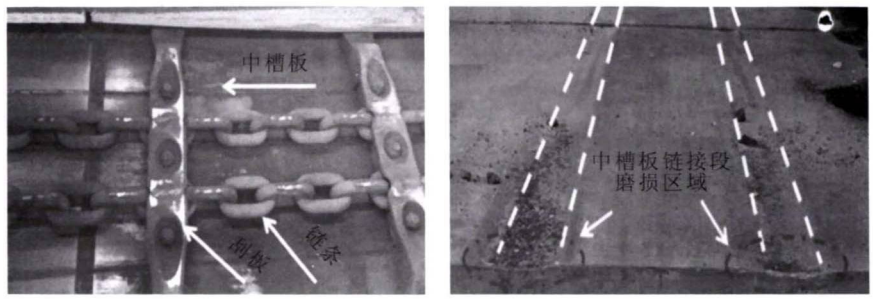
我国“富煤、贫油、少气”的能源储量特点决定了煤炭在我国一次能源生产和消费构成中占据主导地位[1]。因此,煤炭的高效开采对我国工业化的发展具有重要的意义。然而据不完全统计,我国每年在煤炭采运过程中因磨损消耗的钢铁材料(主要为刮板输送机中板)折合资金为 50 亿元,全国煤矿系统每年由于磨损所造成的经济损失约 400 亿元人民币[2]。高性能耐磨钢已成为支撑煤炭采运装备安全、高效运行的关键基础材料[3]。目前,围绕煤炭生产,已从多方面采用耐磨钢板组织调控的研究[4-7],然而,关于中板服役工况下失效机理的研究确鲜有报道。中板在服役工况下失效行为的研究,对于材料微观组织的优化方向及选材用磨损试验的设计均具有重要的指导意义[8-10]。因此,本文作者对国内某煤矿已服役失效的刮板输送机中板连接处进行取样分析,以期揭示其规律。

1 中板失效分析方法

图 1 为国内某煤矿刮板输送机运行时的形貌。如图 1(b)所示,在中板的中间有两条较深的凹痕。该凹痕位于刮板输送机链条的正下方,由链条、运输物料(煤和矸石)与中板之间的相互运动造成的。此外,由于安装或者地形原因, 中板节间连接处会有一定的高度差。生产过程中,由于链条对中板连接处产生一定的冲击作用, 链条下方中板连接处的凹痕最深,即磨损最严重。因此,试样取自链条下方中板连接处。

首先,采用直读光谱仪对试样的成分进行标定,表 1 为试样主要化学成分。从材料成分可以看出,该中板所用耐磨钢的材质是中碳低合金钢。

收稿日期:2021-06-11
基金项目:“十三五”国家重点研发专项(编号:2017YFB0305100)和广东省自然科学基金(2018030310035)
作者简介:朱秀光(1983—)山西平遥人,硕士.主要从事矿用刮板输送机制造新材料、新工艺研究方面的工作.
电话:03132056036,Eamil:18693234989@163.com



(a)运行时的局部形貌　(b)已失效中板形貌

图 1 国内某煤矿刮板输送机

Fig.1 A domestic coal mine scraper conveyor

表1 试样的化学成分 w(%)

Tab.1 Chemical composition of the sample

C	Ti	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
0.294	0.422	0.331	0.634	1.010	0.313	0.566	0.040 5	0.195

图 2 为试样的 XRD 图谱，表明试样的物相主要由 α-Fe 组成。图 3 为试样的组织形貌，可以看出，试样的基体组织主要为板条状马氏体，但在基体组织上还散乱分布着棒状碳化物。结合 XRD 图谱及微观组织形貌，可知该失效中板的材质为板条状马氏体钢。随后，利用扫描电子显微镜，显微硬度计以及透射电子显微镜对试样的磨损面形貌、亚表面形貌及组织进行进一步的表征分析。

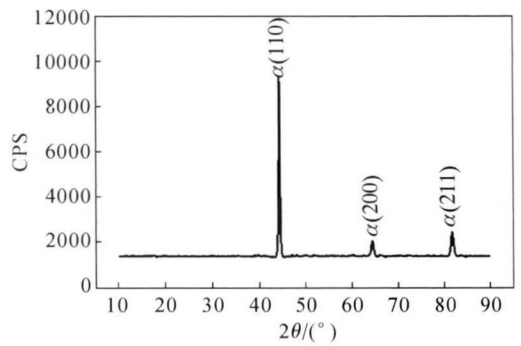
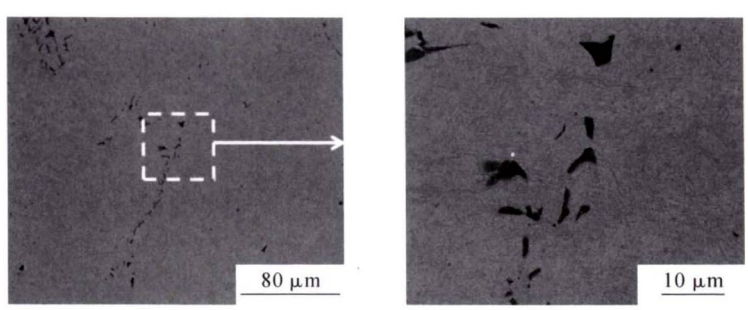


图 2 试样的 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of the sample

2 结果及讨论

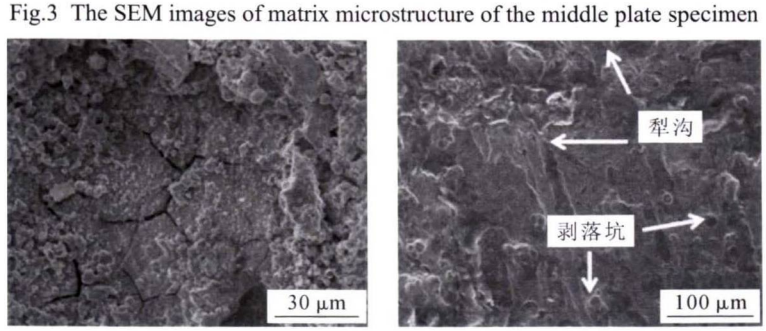
图 4 为试样磨损面形貌，如图所示，由于中板报废后在矿井下滞留时间较长，表面已被腐蚀产物覆盖。通过橡皮擦拭和超声波清洗交替进行的方式去除表面覆盖物后，中板真实的磨损形貌如图 4(b)所示。在磨损表面可以观察到大量长度有数百微米的犁沟和直径为数十微米的凹坑。犁沟是由链条、煤料和矸石与中板之间相对滑动造成的，凹坑是中板在链条冲击下造成的疲劳剥落而形成的。磨损面的



(a)低倍形貌图　(b)局部放大形貌图

图 3 中板试样基体组织 SEM 形貌

Fig.3 The SEM images of matrix microstructure of the middle plate specimen



(a)原始形貌　(b)去除腐蚀产物后的形貌

图 4 中板连接处磨损面

Fig.4 The worn surface morphology of the connection of middle plate

磨损形貌表明服役工况下，链条下方中板连接处的失效机理是以磨料的显微切削为主，疲劳剥落为辅。

图 5 为所取试样磨损面亚表层侵蚀前的典型形貌，在距离磨损面 10~15 μm 处，有大量长度为数十微米且主要平行于磨损面扩展的剥层裂纹。当剥层裂纹扩展至表面时导致材料的剥落，进而在磨损表面形成宽度和深度均只有数十微米的凹坑。

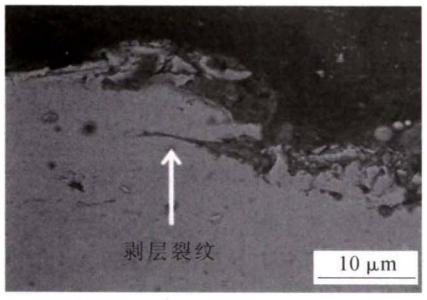


图 5 试样磨损面亚表层侵蚀前的典型形貌

Fig.5 Typical subsurface morphology of worn surface before erosion

为了进一步探究亚表层剥层裂纹的萌生及扩展的原因，对试样截面腐蚀后的形貌进行观察。如图 6 所示，在氧化层和基体之间出现了一层形变层，磨损面亚表层由表及里依次为氧化层、形变层和基体。基体组织为板条状马氏体，无规则取向；形变层马氏体板条发生显著变形，呈流变状，与表面平行。剥层裂纹位于形变层与基体的界面处或形变层一侧，剥层裂纹的萌生和扩展与形变层密切相关。

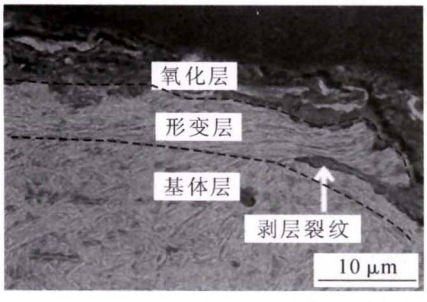


图 6 试样磨损面亚表层侵蚀后的典型形貌

Fig.6 Typical subsurface morphology of worn surface after erosion

图 7 是中板基体和磨损面亚表层的显微维氏硬度（10 个数值的平均值），基体的显微硬度值为 449.2 HV，形变层的平均显微硬度值为 517.6 HV。即形变层硬度较基体硬度提升了 68.4 HV，提升幅度约为 15%。文献[11]研究表明，磨损硬化机理主要有残留奥氏体向马氏体转变、位错强化、孪晶强化、晶粒细化等等。为了进一步探究中板磨损面亚表层的硬化机制，将对磨损面亚表层进行表征。

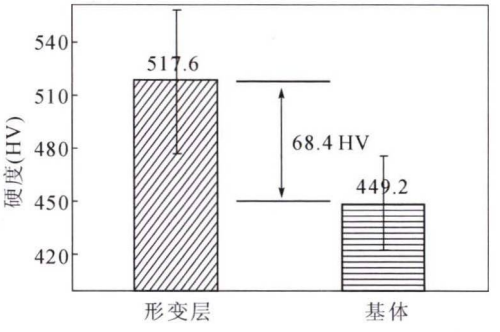
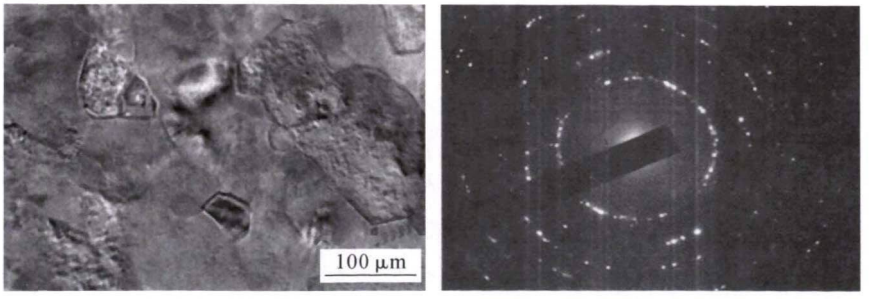


图 7 中板连接处磨损面亚表层和基体显微维氏硬度

Fig.7 Micro-Vickers hardness of subsurface and matrix of wear surface at the connection of middle plate

图 8 为中板连接处形变层组织。从 TEM 明场像和衍射花样可知，形变层组织由尺寸为数十纳米或数百纳米不等的等轴状晶粒组成。根据霍尔 - 佩奇公式，晶粒的细化将增大材料的屈服强度进而提升材料的硬度。因此，亚表层的硬度增加是由于组织纳米化所导致的。

综上所述，由图 4(b)磨损面形貌可知，服役工况下，链条下方中板连接处的失效机理以显微切削为主，疲劳剥落为辅。显微切削主要是由于煤屑、矸石和链条与中板间的相对运动造成的。疲劳剥落则是由于反复的冲击磨损导致磨损亚表层组织的纳米化造成的。纳米化使组织的硬度急剧增加，材料抗塑性变形能力增加。形变层和基体组织间形变的不一致性导致剥层裂纹在两者的界面处萌生、扩展。在冲击作用与煤料的犁削作用下，剥层裂纹不断扩展至表面或与其他剥层裂纹交叉，最终导致材料的剥落



(a)TEM明场像　　(b)选区衍射花样

图 8 中板连接处形变层组织 TEM 形貌

Fig.8 TEM images of the structure of deformed layer in middle plate connection

流失。

中板连接处失效分析表明，中板的实际工作环境是含有磨粒、伴随冲击作用的复杂摩擦环境，磨损硬化造成的剥层磨损是加速中板连接处等部位容易发生严重磨损导致失效的重要原因。因此，在确保一定硬度以抵御磨料磨损的同时，抑制形变层的形成将有利于提升材料的抗疲劳剥落的能力，进而提升中板的整体寿命。

3 结论

(1)中板连接处的失效机制以磨料磨损为主，剥层磨损为辅。

(2)犁削磨损源于链条、煤料、矸石与中板之间相对滑动造成的显微切削；剥层磨损源自冲击磨损过程中磨损面亚表层组织的纳米化导致的剥层裂纹。

(3)中板材料研制过程中，在确保一定硬度以抵御磨料磨损的同时，抑制形变层的形成也可以提升中板服役寿命。

参考文献：

[1] 唐勇. 循环经济矿山一体化模式的思考与实践 [J]. 中国煤炭工业, 2018(9): 66-67.

[2] 朱华，吴兆宏，李刚，等. 煤矿机械磨损失效研究[J]. 煤炭学报, 2006 (3): 380-385.

[3] 姚昊，周圆. 浅谈煤炭机械的磨损及耐磨钢的重要应用[J]. 山东工业技术, 2014(3): 110-110.

[4] 郑健，温长飞，黄龙，等. 低合金高强度耐磨钢板 NM500 的研发[J]. 金属热处理，2019 (3): 42-46.

[5] 邓想涛，王昭东，付天亮，等. 新型超级耐磨钢板研制开发与工业化应用 // 第十二届中国钢铁年会论文集—6. 先进钢铁材料[C]. 2019，1-5.

[6] 张雨佳，王昭东，邓想涛，等. 低合金耐磨钢板 NM600 组织及其磨损性能研究[J]. 轧钢, 2016, 33 (2): 5-9.

[7] DENG X, FU T, WANG Z, et al. Epsilon carbide precipitation and wear behaviour of low alloy wear resistant steels[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(4): 320-327.

[8] 胡元哲. 刮板输送机中部槽磨损失效分析与抗磨措施 [J]. 矿山机械, 2009, 37(1): 33-36.

[9] 朱真才，李剑锋，彭玉兴，等. 刮板输送机中部槽的研究现状及展望[J]. 机械制造与自动化，2020，49(1): 1-3，15.

[10] CHEN H, WANG R. Study on Wear of Scraper Conveyor Chute [C]. Proceedings of the 2015 International Conference on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering, 2015: 2254-2257.

[11] 田文帅，马英喆，王军祥，等. 高耐磨新型刮板抗冲击磨料磨损硬化机理[J]. 煤矿机械, 2019, 40(11):46-48.

《铸造技术》杂志优秀企业、先进人物专访通告

《铸造技术》杂志开展专访活动，旨在通过专访这一内涵深邃、读者喜闻乐见、欣赏韵味独特的交流方式，深度挖掘铸造界人文财富，倾心打造行业精深资讯，进而从独有的精神与文化之角度施力，推动中国铸造业的科学振兴和健康发展。

《铸造技术》基于“榜样的力量是无穷的”以及“益言可以兴邦”的基本理念和初衷，《铸造技术》杂志社记者与业界企业家、专家学者、工程技术人员等先进人物近距离接触、多层面无障碍恳谈，从而接地气地见识与领略中国铸造业界深邃浩瀚的人文资源、鲜活生动的真人与实事，在第一时间得到启迪与感悟，进而把这发自心灵的收获通过专访报道奉献给读者朋友。

《铸造技术》专访笃信“唯有真情可以感人”。能感动人的专访报道，必然是被访者真实生活的经历、体验和独特感受，高尚人格的彰显。专访报道中的所有感人之处，无不源于被访者独有的生活经历加上独到的见解。不可复制的人生阅历之润养、对生活的挚爱、对事业的全身心投入，是每一位被访者能够超越现实与自我而永葆充沛生命力的秘诀。从自己挚爱的事业那里领悟人生的真谛，激发爱与美相交融的情感。被这真实的情感所感染，使人情不自禁地用看似清淡的笔墨，仰仗倾情产出令人心颤的专访报道。

《铸造技术》专访对“说理”情有独钟。信奉“唯有讲理可以服人”。因“至”即无限趋近高端，故“至理”系高度符合科学规律的道理。“科学”乃说理的学问，科学是迄今全人类生产及社会实践的顶级智慧结晶，科学是全人类的共同财富，科学是人类从必然王国走向自由王国的桥梁。唯科学之理能使人们正确认识世间万物、尤其包括认识者自己。《铸造技术》专访已延续多年，读者不难发现，所有被访者的感人之处无不根源于其自觉或不自觉地遵循了科学的思维与行为的准绳。

《铸造技术》专访所追求的是，以优秀传统文化底蕴为基石，以高尚道德操守与精神境界为标杆，倾力打造铸造专访的精到内涵和独特风格，倾心为读者朋友打造理性思考的空间，竭力实现被访者—读者的理性与情感的惊人共鸣。