

20CrMnTi 采棉机采摘头失效成因分析

黄天超*

新疆大学智能制造现代产业学院, 新疆乌鲁木齐, 中国

*通讯作者

【摘要】通过对失效采摘头截面金相组织的观察, 结合材料组织对金属性质的影响规律, 深入剖析了采摘头失效的原因。研究过程中, 采用超景深显微镜分析了采摘头断裂横截面的金相组织, 利用显微维氏硬度计测试了失效采摘头的芯部和表面镀层的硬度。最后通过断裂模拟得到断裂位置以及承受最大应力。结果显示, 采棉机采摘头镀层表面的质量存在严重不足, 导致采摘头在集中应力作用下发生断裂失效; 加上采棉机田间工作时异物未及时发现, 造成采摘头磨损严重, 甚至当突增载荷超过采摘头的强度极限, 使采摘头失效, 当最大应力为 1067MPa 时, 采摘头发生断裂位置在顶端 1/3 处, 符合实际断裂情况。

【关键词】采摘头; 金相组织; 失效分析; 断裂模拟

1. 引言

机械化的发展是我国西部棉花高效生产的底气, 采棉机的发展有力地推动了棉花采摘机械化水平的发展, 棉花采摘基本脱离了手工采摘时代, 据相关数据表明我国西部的机械采摘率已经达到 95%[1], 采棉机的迭代更新也为西部棉花的发展添加了助推剂。谈及采棉机, 最重要的零件之一就是采棉机的采摘头, 其关乎采摘棉花的质量和效率, 所以对采摘头的质量有很高的要求, 不仅要耐磨而且抗拉强度要高, 这样才能保证在采摘棉花的过程中不易被拉断和轻易地被磨损[2,3]。当采摘棉花时, 如果速度过快或者吸入棉花太多都有可能使采摘头被严重磨损甚至拉断, 加之采摘棉花时周围的视线不足, 不能立即发现采摘头被拉断或者磨损程度较大的情况, 使采摘头不能对棉纤维很好的缠绕, 致使采棉机采摘质量下降。为了能够有效保证采棉机采摘头有足够的抗拉强度和耐磨性, 对失效的采摘头进行有效的分析可以进一步提高采棉机采摘质量以及采摘头的使用寿命。采棉机工作时的图片如图 1 所示。



图 1. 采棉机采摘过程

采摘头作为采棉机的重要部件, 具有数

量大, 易磨损, 更换成本高等特点[4-6], 更换后的采摘头不能再重复加工使用, 因此了解其磨损和致使其断裂的根源有助于提高采摘头的使用寿命和使用效率。采摘头工作能力的强弱直接影响到棉花的采摘效率、净采率和采收成本[7-10]。作业效率与采净率也是采棉机采摘性能的重要评判标准。为了控制对资源的浪费, 节约采摘成本, 了解故障发生的成因是重中之重。

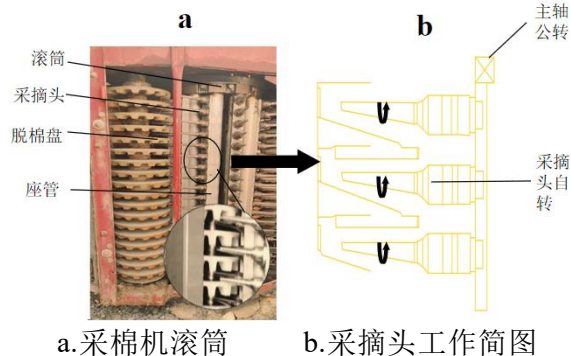
2. 概述

2.1 采摘头的工作状况

图 2a 为采棉机滚筒工作图, 图 2b 为部分采摘头的工作简图。由图 2a 可知, 采棉机将 12 根采摘头座管配置于每个滚筒上, 再在每根座管上安装 18 个采摘头, 如此设置, 可以全方位地对棉花进行采摘。当采摘头的钩齿接触到棉花, 棉纤维被钩住, 在采摘头高速自传缠绕和采摘头滚筒主轴公转的情况下, 将棉花从棉壳内抽出, 经脱棉盘进行脱棉, 然后通过大马力鼓风机将掉落的棉花经输送管收集到集棉箱完成棉花的采摘。当集棉箱中的棉花积攒到一定量时, 将棉花进行压实打包并输出。在这个过程中如果有采摘头的钩齿被磨损或者发生断裂导致采摘头失效无法对棉花进行完整的缠绕, 就会在采棉机前进的过程中对棉花造成漏采或未采净的情况, 进而影响采棉机的净采率[11], 同时也会降低棉农的收入。此外采摘头在工作的时候相互平行, 为了防止采摘头在受力发生弯曲变形影响到其他工作的采摘头, 导致零部件受损, 所以采摘头在设计加工时遵

循“宁断勿弯”的原则[12]，如此，便可防止因采摘

头受力弯曲而致使其其他正常工作的采摘头失效，从而避免更换采摘头带来的高额采摘成本。因此分析采摘头磨损和断裂的原因，有助于较好地提升国产采棉机在国内的地位，对采棉机采摘头的生产也能提供改进思路和建议。采棉机滚筒及采摘头的工作简图如图2所示。



a.采棉机滚筒 b.采摘头工作简图

图2.采棉机滚筒及采摘头的工作简图

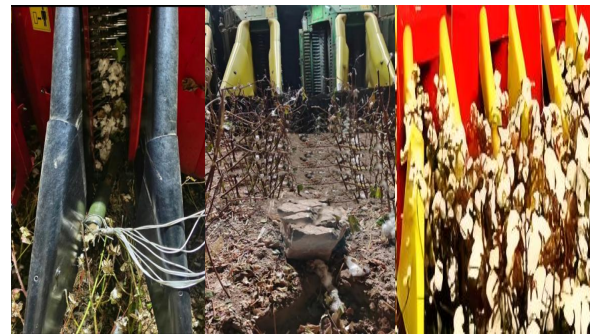
2.2 采摘头常存在的失效原因分析

(1) 采摘头作为采棉机采摘棉花过程中的关键零部件，与座管稳固连接在采棉机摘头中。然而，由于采棉机转速快，田间的硬物及其他生产遗留杂物如图3所示，难以被及时发现。在采棉机前行过程中，这些杂物会缠绕在滚筒座管的采摘头上。在滚筒高速旋转下，经过脱棉盘时，使采摘头受到突增的接触载荷[13,14]，超过采摘头的疲劳强度极限，最终引发采摘头断裂失效。

(2) 为提高采摘头的耐磨性和硬度，生产厂家会在采摘头表面增加一层电镀硬铬。在增加表面硬度的同时也可能导致采摘头表面存在大量的微裂纹[15]，采摘头工作时经过长期的交变载荷和疲劳磨损，可导致采摘头发生断裂失效。

(3) 西北地区风沙肆虐，气候恶劣。在采摘棉花时，细小的沙砾容易混入其中[16,17]。此外，采摘棉田里还存在大量的棉秸秆和滴灌带等杂物，这些杂物与棉花相互缠绕在采摘头上，使得采摘头极易被堵塞。当采摘头经过脱棉盘时，由于阻碍难以顺利通过，摩擦力急剧增大，从而加剧了对采摘头的磨损，缩短了采摘头的使用寿命。

(4) 棉花的采摘周期较短，为减少采摘成本，提高采摘效率，长时间超负荷的工作可能造成润滑不到位，也会加剧采摘头的磨损，导致钩齿失效无法工作。



a: 异物缠绕 b: 硬质石头 c: 棉花堵塞

图3.采摘头失效状况图

3.研究方法

3.1 宏观分析

3.1.1 断裂失效

在我国西北部地区某农场取来了2个断裂的采摘头，分别命名为试样1、试样2。试样1从靠近尖部约三分之一处断裂，试样2从靠近根部约三分之一处断裂。由断口宏观形貌观察试样1和试样2断裂面，均未发生明显的塑性变形和延性断裂，且断口平齐而光亮，呈现结晶状。试样1的断口呈现中心汇聚，两边扩散的样貌，且放射条纹较细，因此试样1采摘头断裂是由裂纹导致，在长期交变载荷作用下发生的疲劳断裂；试样2的断裂面较平整，这是突增载荷超过采摘头的抗拉强度发生的突然断裂失效。采摘头断裂面如图4所示。



a: 试样一

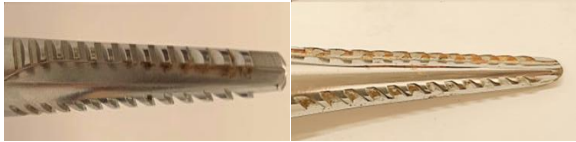
b: 试样二

图4.宏观观察断裂面

3.1.2 磨损失效

采摘头使用前对比图，如图5所示，a为使用前正常钩齿，b为使用后钩齿磨损情况。对比采摘头使用前后的宏观样貌图，发现采摘头钩齿出现严重的磨损，采摘头表面的倒角也已磨损，无法对棉纤维进行钩取，出现采摘头失效。分析其原因有二：一是采

摘头表面的镀层太薄，无法满足采摘头表面的耐磨性和强度要求；二是受采摘环境的影响，我国西北部的气候条件导致棉花中含有硬质沙石颗粒加之棉花本身较硬容易使采摘头产生磨损，导致磨损失效。



a: 使用前 b: 使用后

图 5.宏观观察磨损情况

3.2 金相分析法

借助金相组织分析可以揭示出材料的微观结构、晶粒大小与相的组成[18]。当材料因发生故障而致使失效之际，金相分析能够协助明确故障的缘由，诸如裂纹、过热、腐蚀等微观问题。通过掌握不同工况下的金相组织变化状况，有助于优化设备的加工生产过程，更好地维护产品，延长其使用寿命。

利用超景深显微镜进行采摘头断裂面和钩齿表面进行金相组织观察。超景深显微镜作为一种具有连续变倍能力的体视显微镜，主要作用在于观察高分辨率的显微组织，特别是在观察细胞、组织及微观结构时表现不凡。它的最大优势在于能够在深度方向上实现超深度成像。和传统显微镜有别的是，超景深显微镜能够穿透样本的厚度层，获取到材料的微组织，由此可以更精细地观察微结构的表面特点。此外，它还能提供更高的分辨率和更大的深度观测范围，且操作简单，对于观察和研究采摘头失效表面的材料微观形貌与结构具有很大的帮助。

3.2.1 采摘头断裂截面金相组织观察

利用超景深表面形态观测系统对断裂的截面进行金相组织分析，相较于市面上更多的金相显微镜来分析材料金相结构，超景深显微镜可以更好的观察到金相组织的细节，能够对组织进行更深入的研究和分析，对分析采摘头断裂的原因更有说服力。在观察金相组织之前，首先对采摘头断裂截面进行金相试样制备。在靠近断裂截面的位置切割试块，然后经过镶嵌、研磨、抛光、腐蚀、清洗等步骤，完成金相试样的制备。通过超景深显微镜观察试样 1 和试样 2，发现两个试样均存在裂纹和气孔的缺陷。超景深显微镜观察断裂面金相组织如图 6 所示。其中，图 6 中的图 a、b、c 为试样 1 的金相组织；图 d、e、f 为试样 2 的金相组织。

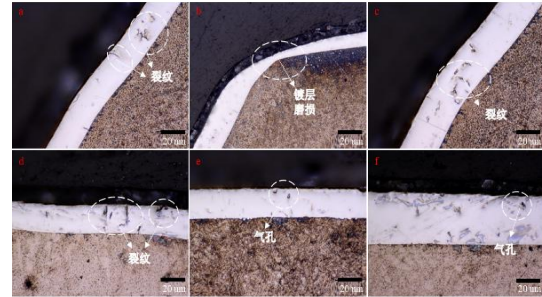


图 6.不同位置断裂面金相组织

3.2.2 采摘头断裂原因分析

从超景深显微镜中观察到的金相组织情况来看，造成采摘头断裂的原因有两方面，一是采摘头的镀层表面产生不同程度的裂纹和气孔，从中可以分析出采摘头断裂可能受裂纹或者气孔的影响，造成应力集中，在长时间的工作状态下受到突增载荷超过许用强度极限时发生断裂而失效；二是在工作的过程中产生镀层磨损或者生产时采摘头表面的镀层不均，导致采摘头表面镀层较薄的区域可能出现应力集中，使表面产生裂纹和断裂的情况。镀层不均也更容易被磨损，应该优化电镀工艺，确保镀层在采摘头表面均匀分布。进行镀层时产生的气孔也是导致断裂失效的主要原因，因此在采摘头生产制造的过程中严格控制采摘头的加工工艺至关重要。

图 7a、b 分别是试样 1、试样 2 的横截面结构图。均是在超景深显微镜中观察到的采摘头在 2000 倍率下的电镀铬镀层与基体芯部的截面图。由显微结构可以看出试样的芯部主要组织是隐针状马氏体，该组织是由于采摘头在生产制造过程中，因为快速加热和快速冷却的条件，致使奥氏体没来得及均匀化以及碳化物未完全溶解所造成。图 7b 中的“黑点”就是奥氏体内形成的含碳不同的微小区域。隐针马氏体由于晶粒细化，因此具有很高的强度、较好的塑性和韧性，对提高采摘头的强度有很大的作用。

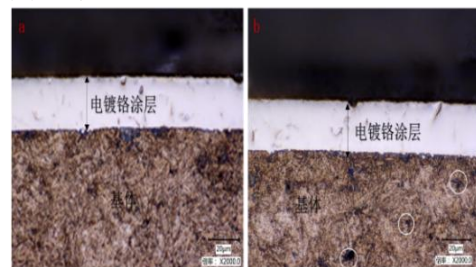
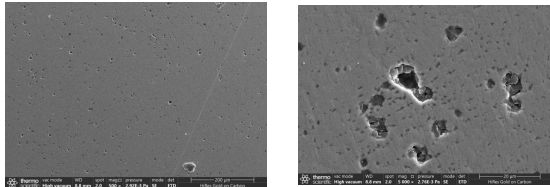


图 7.试样采摘头横截面结构图

3.2.3 采摘头钩齿磨损表面形貌分析

采用 SEM 在钩齿磨损表面进行形貌观察，其中低倍镜形貌和高倍镜形貌如图 8，

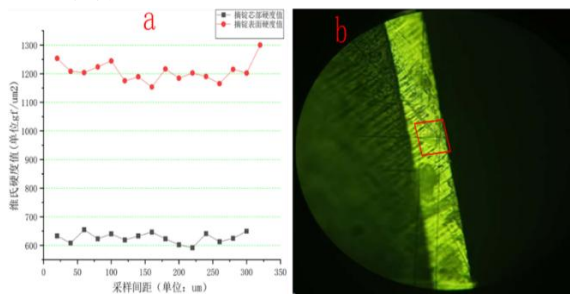
通过观察发现,在低倍下可以看到整个磨损区域呈现出不规则的沟槽状分布,主要集中在样品的一侧,初步判断该磨损属于磨粒磨损。高倍下观察到沟槽内部存在大小不一的颗粒,且边缘有裂纹扩展迹象,通过测量发现磨损后的表面粗糙度显著增加。综合上述,判断该磨损主要是由磨粒磨损引起的,伴随有一定的氧化作用和局部剥落现象。



a: 500 倍镜下 SEM b: 2000 倍镜下 SEM
图 8.钩齿磨损表面 SEM 形貌图

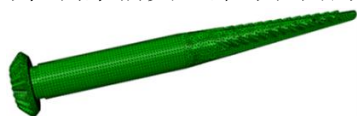
3.3 采摘头硬度检测

为检测失效采摘头的抗拉强度,研究其综合力学性能,对采摘头的芯部及表面镀层利用数显显微维氏硬度计在载荷为 200gf,保荷 15s, HV0.2 条件下,每隔 20um 进行采样。采样结果如图 9a 所示,显微维氏硬度计采样如图 9b 所示。



a: 采摘头硬度分布 b: 采样点分布
图 9.硬度分布以及采样点分布图

根据 GB/T 34623-2017 对采棉机采摘头的硬度要求,即采摘头的表面硬度为 HRC 60~65 和芯部硬度 HRC 38~45。将洛氏硬度换算为维氏硬度,采摘头的表面硬度为 HV 700~840,芯部硬度 HV 380~450。用数显显微维氏硬度计检测采摘头芯部与表面的硬



a: 网格划分

度值,发现此采摘头的芯部维氏硬度在 600 以上,表面镀层的维氏硬度在 1150 以上,均超过国标对采棉机采摘头的制作要求,因此不存在因材料硬度导致采摘头断裂或磨损失效的因素。

3.4 采摘头断裂模拟分析

3.4.1 模型建立与网格划分

采用有限元分析软件 ABAQUS 进行断裂力学数值模拟,模型由采摘头整体模型为主。使用 ABAQUS 建立包含材料参数、网格模型、边界条件和载荷的有限元模型。考虑到采摘头变形过程中的温度变化影响,对采摘头进行热力耦合模拟,采摘头的主要材料为 20CrMnTi,通过 Jmatpro 得到 20CrMnTi 的热力学参数,如表 1 所示。若对采摘头进行断裂模拟分析则需得到 20CrMnTi 力学参数,如表 2 所示。

表 1. 20CrMnTi 的热力学参数

杨氏模量	泊松比	密度	比热容
$2.07 \times 10^5 \text{MPa}$	0.27	$7.86 \times 10^3 \text{Kg/m}^3$	406

表 2. 20CrMnTi 力学参数

屈服强度	抗拉强度	临界裂纹长度	断裂韧度
895MPa	1080MPa	0.8mm	74MPa/m ²

对采摘头进行网格划分,采用六面体法划分网格,对采摘头断裂分析进行网格划分,生成网格大小为网格生成有限元模型如图 10a,将模型导入有限元分析软件中。设置约束条件,由采摘头与座管的配套位置可知,采摘头与轴套配合通过螺纹连接被固定安装在座管上,因此将采摘杆部位设置为圆柱支撑约束[19]。对采摘头田间采棉作业过程的受力分析知道,主要受传动系统提供扭矩约为 300 N/mm,转速为 480rad/s。其中约束条件添加如图 10b,由于采摘头表面镀层较薄对于采摘头应力与应变影响较小,因此,忽略镀层的影响[20]。



b: 约束添加

图 10.采摘头网格划分及约束添加

3.4.2 模拟结果分析

对采摘头施加扭矩以及转速,得出的应力与应变分析结果如图 11a 所示。从应力应变云图可以看出,采摘头所受应变主要集中在前 3、4 钩齿,说明田间采棉作业过程采

摘头前 3、4 钩齿易发生失效的问题。从摘头应力分布云图可以看出,采摘头钩齿齿尖、齿刃处应力分布较为明显,表明采摘头钩齿齿尖与齿刃处为危险区域,钩齿磨损易发生在齿尖与齿刃处。从静力分析结果可以观察

到, 采摘头顶部 1/3 处存在显著的应力集中现象, 最大值为 636.7MPa, 对该部分建立单元集合, 在应力集中最大值处植入裂纹。裂纹植入后, 对裂纹尖端的网格进行加密处理, 以提高分析的准确性, 裂纹植入结果如

图 11b 所示。其中当最大应力达到 1067MPa 时发生断裂, 有限元仿真分析结果与实际采摘头采棉作业过程的断裂失效结果基本保持一致。

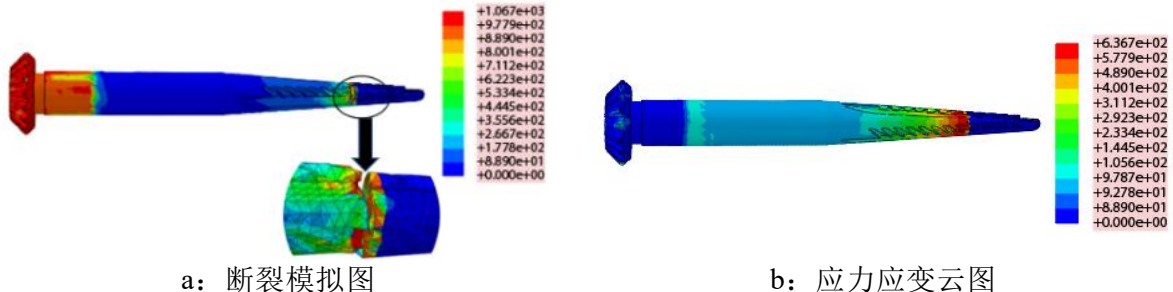


图 11. 采摘头断裂模拟图以及应力云图

4. 结论

(1) 断裂失效分析: 金属制件的前期失效形式无外乎断裂、塑性变形、表面摩擦损伤 3 类, 其主要失效原因与原材料以及金属的设计工艺, 加工造成的, 萌生裂纹是由于受到交变载荷作用下, 不同环境及承载状态的影响而使裂纹扩展直至断裂。由试样断口观察并未出现明显的塑性变形, 因此断裂的采摘头均属于脆性断裂, 同时也符合采棉机采摘头“宁断勿弯”的设计要求。

质物件, 当钩齿钩住卷入摘头中, 在高速运转的情况下, 就有可能使采摘头受到突增的载荷, 导致采摘头折断失效。在采摘头的批量生产中, 由于生产工艺质量不稳定导致采摘头的表面镀层质量下降, 稍加外力就有可能使采摘头在集中应力的作用下发生断裂失效。钩齿的磨损失效是采摘头的主要的失效形式, 其受表面电镀铬层的厚度和工作环境的影响, 不能改变采摘环境, 因此提高采棉机采摘头表面的耐磨性是增加采摘头使用寿命有效方式。

(2) 磨损失效分析: 采棉机采摘性能的关键评价指标是作业效率和采收率。主轴的采棉过程是一个螺旋缠绕过程。当采摘头钩齿接触到棉花, 棉纤维被钩住, 在采摘头自传和主轴公转的情况下, 缠绕的棉花及杂物会对采摘头产生摩擦力, 才能将棉花钩入滚筒; 同时也避免不了与夹杂的杂质进行相互的摩擦, 长期工作将造成钩齿磨损失效的情况。加之我国西北部气候条件的影响, 棉花中夹杂的硬质颗粒也会加速采摘头的磨损过程, 使钩齿无法正常工作。

(1) 对于采摘头磨损情况, 需采用先进制造工艺方法, 如激光熔覆、激光增减材工艺进行再制造, 使用耐磨损材料, 但在再制造过程中对钩齿的形成解决是一个需要研究的问题。

(3) 通过对采摘头断裂模拟失效分析发现, 采摘头应力最大位置为顶端 1/3 处, 在采摘头最大应力处添加裂纹, 当达到 1067MPa 时, 采摘头发生断裂。断裂位置与实际断裂位置相符。

(2) 在采摘头断裂问题的中, 解决的方法主要是采用硬度较好的材料, 如硬质合金, 高速钢和工具钢, 另外采取的改性方法, 如采用淬火的处理方式改变表面硬度。

5. 改进措施

从失效采摘头的截面宏观观察和材料内部金相组织分析, 可以分析出在田间作业条件下采摘头的失效受许多因素的影响。分析其断裂的原因受田间工作环境的因素影响较大, 工作时的工况环境恶劣, 采棉机行走的过程中工作人员不能及时查看摘头中的采摘头的工作情况, 也不能及时发现田地里的硬

参考文献

- [1] 国家统计局关于 2022 年棉花产量的公告 [EB/OL]. 国家统计局, 2022.
- [2] 潘鹏. 采棉机摘锭表面 TiN 涂层的性能研究[D]. 塔里木大学, 2024.
- [3] 罗树丽, 张有强, 马少辉. 采棉机摘锭磨损机理分析[J]. 塔里木大学学报, 2018, 30(01): 132-137.
- [4] 吴蓓, 张立新, 左玉婷, 等. 采棉机水平摘锭材料元素分布研究——基于扫描电镜/能谱分析[J]. 农机化研究, 2013, 35(7): 174-178.
- [5] 吴天松, 胡蓉, 鲁彦志. 采棉机摘锭磨损

- 程度的数字图像法研究[J]. 机械研究与应用, 2017, 30 (6): 159-162.
- [6] 李文春, 乔园园, 邓亚猛, 等. 水平摘锭钩齿磨损的评价与分析[J]. 中国农机化学报, 2018, 39 (3): 11-14.
- [7] 郭健. 采棉机采净率的影响因素及处理措施分析[J]. 南方农机, 2023, 54 (04): 27-29.
- [8] 李海洋, 王玉刚, 傅秀清等. 田间作业条件下摘锭耐磨性能及棉花采净率的试验研究[J]. 农业工程学报, 2023, 39 (07): 89-97.
- [9] Baker K D, Delhom C D, Hughs S E. Spindle Diameter Effects for Cotton Pickers. *Applied Engineering in Agriculture*, 2017, 33 (3): 321-327.
- [10] Baker K D, Hughs E, Foulk J. Spindle Speed Optimization for Cotton Pickers. *Applied Engineering in Agriculture*, 2015, 31 (2): 217-225.
- [11] 邓亚猛, 李文春, 俞天柱, 等. 水平采摘头式采棉机的摘锭磨损因素分析与研究[J]. 中国农机化学报, 2017, 38 (09): 11-13.
- [12] 张有强, 马彦, 周岭. 采棉机摘锭的采摘力学分析及仿真[J]. 塔里木大学学报, 2012, 24 (02): 31-36.
- [13] Li H., Fu X, Zhang H, et al. Analysis and Experiment of Dynamic Picking Process of Spindle of Cotton Picker. *Agriculture*. 2022, 12, 1346.
- [14] 肖霄, 孙奎, 谢方平, 等. 水平摘锭式采棉机采摘系统研究现状与展望[J]. 农机化研究, 2023, 45 (10): 1-9.
- [15] 潘鹏. 采棉机摘锭表面 TiN 涂层的性能研究[D]. 塔里木大学, 2024.
- [16] 谷艳清. 采棉机摘锭钩齿磨损失效机理的试验研究[D]. 石河子大学, 2023.
- [17] Wang Y, Li Z, Gu Y, et al. Experimental study on wear failure of spindle hook teeth of cotton picker. *Front. Mater.* [J] 2024, 10: 1309617.
- [18] Zhao J, He A F, Jing B, et al. A Detection Technique of Laser Pyrotechnics Sealing Quality Based on 3D Microscope with Super Depth of Field. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2478.
- [19] 吴蓓, 张立新, 左玉婷, 等. 采棉机水平摘锭材料元素分布研究-基于扫描电镜/能谱分析[J]. 农机化研究, 2013, 35 (7): 174-178.
- [20] 张龙唱. 水平摘锭式采棉机摘锭结构及工作参数优化研究[D]. 石河子大学, 2021.