



绞吸挖泥船挖掘黏土混粗砂的 绞刀齿磨损试验*

苏召斌^{1,2}, 林 森^{1,2}, 陈刘明², 王力威^{1,2}, 张润喜^{1,2}

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 2. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要: 针对绞吸挖泥船在疏浚工程中刀齿磨损严重的问题, 对绞刀齿的硬质合金材料进行热处理, 并在日照港“天凤”绞吸挖泥船上进行了刀齿磨损试验。试验土质为黏土混粗砂, 布置方式为 3 在用刀齿+3 新刀齿。利用磨损长度和磨损质量两个指标判定刀齿的耐磨性能, 提出了考虑价格因素的刀齿耐磨综合性价比模型。试验结果表明: 在该土质下, 新型刀齿的耐磨性能约为原齿的 87%。

关键词: 疏浚; 耐磨性; 绞吸挖泥船; 挖掘

中图分类号: U 616.5; U 615.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0226-05

Test of cutter teeth wear of cutter suction dredger for excavating clay mixed with coarse sand

SU Zhao-bin^{1,2}, LIN Sen^{1,2}, CHEN Liu-ming², WANG Li-wei^{1,2}, ZHANG Run-xi^{1,2}

(1.CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2.Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

Abstract: In view of the severe wear of the cutter teeth in the dredging project of the cutter suction dredger, the carbide material of reamer teeth is heat-treated, and the test of cutter teeth wear is carried out on the “Tianfeng” cutter suction dredger in Rizhao Port. The test soil is clay mixed with coarse sand, and the arrangement is 3 active cutter teeth and 3 new cutter teeth. Two indicators, the wear length and wear weight are used to determine the wear resistance of the cutter teeth, and a comprehensive cost-performance model for the wear resistance of the cutter teeth considering price factors is proposed. The test results show that the wear resistance of the new cutter teeth is about 87% of that of the original teeth under this soil.

Keywords: dredging; abrasive resistance; cutter suction dredger; cutting

在航道疏浚和吹填造陆的工程建设中, 绞吸挖泥船作为重要施工船型发挥着无可替代的主力军作用^[1]。绞刀是绞吸挖泥船的核心装备, 可更换的绞刀齿与岩土互相作用, 刀齿磨损越快则更换越频繁, 直接影响了绞吸挖泥船的生产效率。

国外绞刀齿使用寿命较国内绞刀长久^[2], 绞刀齿使用寿命体现在硬度和韧性两个指标上^[3],

提高使用寿命的方法包括表面法和热处理法, 表面法是绞刀齿表面堆焊耐磨层^[4], 热处理法是绞刀齿选择恰当的合金比及热处理工艺来提高耐磨性能^[5]。表面法是一种直接的方法, 以不断提高堆焊耐磨层的抗磨损性能来提升绞刀齿的使用寿命^[6-7]。热处理法需要在材料中加入一些合金元素来调节绞刀材料组织^[8], 进而得到想要的成分组

收稿日期: 2020-10-30

***基金项目:** 交通运输基础设施施工安全关键技术与装备研究项目(2017YFC0805300); 深水港口、疏浚工程水上施工安全防护技术研究与应用示范项目(2017YFC0805308)

作者简介: 苏召斌(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事疏浚工程施工装备理论研究和设计开发。

织,加入微量合金元素可以大幅提高材料的性能^[9-10]。选择合理的热处理工艺可以得到较好的耐磨组织^[11],刀齿性能和使用寿命均得到大幅度提升^[12-13]。采用热处理法同时提高刀齿的硬度和耐磨性可以提高使用寿命,随着国内外疏浚业务的不断扩展,工程量不断扩大,疏挖的土质愈加密实,对绞刀齿的耐磨性和高效性的需求愈加强烈^[14-15]。

本次绞刀齿耐磨试验采用现场试验的方式进行,针对两种不同的刀齿在相同工况下进行对比,根据磨损长度和磨损质量来判定刀齿的耐磨性能。

1 试验方案与过程

1.1 试验概况

试验在山东省日照市岚山港区进行,挖深

-20 m,土质以黏土、粉土为主,标贯击数在 15 击以上。按照 GB/T 50123—1999《土工试验方法与标准》进行土工试验,试验区主要土质参数见表 1。试验区土质不均,其中钻孔 1 处的土含有粗砂和砾石,为黏土;钻孔 2 处的土含有细粉砂,为粉土;钻孔 3 处的土夹结核和砂斑,为粉质黏土。根据实际挖掘情况,钻孔 1 附近的土质对绞刀齿的磨损较为突出,因此选定钻孔 1 附近的土为试验土质。经勘察,土中夹杂明显的粗砂和少量砾石,2 mm 以上的颗粒质量占比达到 28%,按照 GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》(2009 年版)混合土的规定^[16],当粉土或黏性土中粒径大于 2 mm 的粗粒质量超过总质量的 25% 时,应定名为细粒混合土,综合判定试验区的土质为黏土混粗砂。

表 1 试验区主要土质参数

钻孔	天然含水率/%	天然密度/(t·m ⁻³)	孔隙比	液限	塑性指数	液性指数	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	27.2	19.4	0.78	41.2	20.5	0.33	46.6	12.3
2	23.0	19.6	0.69	28.8	7.8	0.57	30.1	11.0
3	22.9	19.7	0.66	26.8	7.6	0.48	28.0	29.3

虽然绞刀在挖掘黏土时相对容易,但是黏土中夹杂的粗砂或砾石对刀齿的磨损比较明显,能够直观统计刀齿磨损情况。试验船舶为中交天津航道局有限公司的“天凤”绞吸挖泥船,试验参数为:泥层厚度 1 000 ~ 1 500 mm,绞刀转速 30 r/min,步进 800 mm,横移速度 5~10 m/min。

1.2 绞刀齿布置

试验刀齿所用的绞刀具有 6 个刀臂,每个刀臂有 8~9 个刀齿。两种绞刀齿的尖齿外形基本一致,其中刀齿 I 为目前在用刀齿,使用进口材料;刀齿 II 为新刀齿,使用国产材料。在切削试验中,考虑水下土质的不均匀特性,在同一绞刀上安装两种刀齿进行对比,以确保相同土质磨损条件。刀齿是绞刀直接挖掘岩土的部位,安装在绞刀的刀臂上,刀臂数目为 6,为了方便表示,按顺序依次是 A~F 刀臂,每个刀臂上的刀齿从轮毂到大圈依次编号,刀齿布置按照“3 在用刀齿+3 新刀

齿”的方式,即其中 3 个相邻刀臂布置刀齿 I,另外 3 个相邻刀臂布置刀齿 II。

如图 1 所示,A、B、C 刀臂的 1、2、3、4 号齿座分别安装刀齿 I,D、E、F 刀臂的 1、2、3、4 号齿座分别安装刀齿 II。A 和 F 刀臂相邻,两种刀齿可能同时参与挖掘;C 和 D 刀臂相邻,也可能同时参与挖掘,属于过度区域,刀齿会相互影响;重点对 B、E 刀臂的两种刀齿进行对比,使两种刀齿的相互影响的因素降到最低。

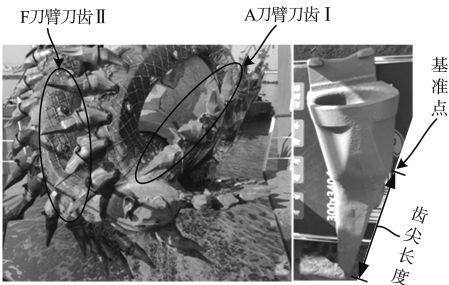


图 1 刀齿布置和齿尖测量方式

1.3 绞刀齿测量

绞刀具有 57 个齿，包括 45 个刀齿 I 和 12 个刀齿 II，其中 12 个刀齿 II 布置在绞刀的 D、E、F 刀臂上，即每个刀臂安装 4 个刀齿 II，位置为 1、2、3、4 号，见图 1。

选择相同的基准点进行刀齿磨损长度的测量，基准点为刀齿工作面的拐角处，见图 2。由于刀齿 I 和刀齿 II 分别属于两个不同厂家产品，虽然刀齿形状一致，但冒口位置有所不同，导致质量和量取长度略有差别(表 2)，可以认为两种刀齿外形参数一致。对刀齿进行硬度检测和冲击检测，刀齿 I 的平均硬度稍高于刀齿 II、抗冲击值稍低于刀齿 II。

表 2 两种刀齿参数对比

刀齿	原始长度/mm	原始质量/kg	硬度 HRC	抗冲击值/J
I	304	7.23	49.8	18.6
II	305	7.38	49.5	18.8

注：以上数值均为平均值。

2 结果与分析

2.1 试验结果

对各刀臂上的 1、2、3 和 4 号齿标记(共计 24 个齿)，累计挖掘时间 6.5 h，累计挖掘产量约

1 800 m³，对磨损后的刀齿(图 2)的长度和质量进行测量。根据记录的刀齿磨损情况，对磨损量进行整理，其中磨损长度为磨损前和磨损后齿尖长度的差值，磨损质量为磨损前和磨损后整个刀齿质量的差值，见表 3。



a) 刀齿 I



b) 刀齿 II

图 2 刀齿磨损后情况

表 3 刀齿磨损

刀臂	刀齿类别	长度磨损/mm					质量磨损/kg				
		1 号	2 号	3 号	4 号	均值	1 号	2 号	3 号	4 号	均值
A	I	36	76	72	55	59.8	0.48	1.36	1.10	0.71	0.91
B	I	42	53	67	72	58.5	0.44	0.68	0.97	1.1	0.80
C	I	32	73	64	65	58.5	0.50	1.02	0.99	0.77	0.82
D	II	32	59	85	74	62.5	0.21	0.75	1.31	1.17	0.86
E	II	34	58	79	77	62.0	0.44	0.78	1.22	1.31	0.94
F	II	11	25	73	67	44.0	0.15	0.35	1.19	0.95	0.66

2.2 磨损性能判定

如表 3 所示，每个刀臂不同位置的磨损长度差别明显，以 B 刀臂为例，平均磨损长度为 58.5 mm，磨损长度最大在该刀臂 4 号刀齿，为 72 mm，因为 4 号刀齿的安装半径最大。经计算，刀齿 I (共 12 个) 的平均磨损量为 58.9 mm，刀齿 II (共 12 个) 的平均磨损长度为 56.2 mm，两个刀齿的磨损基本持平，刀齿 I 的磨损量高出 4.6%。但是，对比 B 与 E 刀臂上刀齿磨损长度，刀齿 II 的磨损长度超过刀齿 I 约 6.0%。

如表 3 所示，每个刀臂不同位置的磨损质量差别明显，以 B 刀臂为例，平均磨损质量为 0.80 kg，磨损长度最大在该刀臂 4 号刀齿，为 1.1 kg。经计算，刀齿 I (共 12 个) 的平均磨损质量为 0.84 kg，刀齿 II (共 12 个) 的平均磨损质量为 0.82 kg，两种刀齿的磨损基本持平，刀齿 I 的磨损量高出 2.4%。但是，对比 B 与 E 刀臂上刀齿磨损质量，刀齿 II 的磨损质量超过刀齿 I 约 17.5%。

如图 2 所示，每个刀臂的 1 号刀齿磨损后呈狭长状，属于偏磨现象，2 号刀齿次之，经判断为

齿座角度出现偏差而导致的偏磨。尤其是 F 刀臂的 1、2 号刀齿偏磨最为显著, 因此以各刀臂 3、4 号的刀齿为主要分析对象较为合理。

经计算, 刀齿 I (共 6 个) 的平均磨损长度为 65.8 mm, 刀齿 II (共 6 个) 的平均磨损长度为 75.8 mm, 则刀齿 II 的磨损长度超过刀齿 I 约 15.2%。同时, B 刀臂的 3、4 号刀齿平均磨损长度为 69.5 mm, E 刀臂的 3 号、4 号刀齿平均磨损长度为 78.0 mm, 则刀齿 II 的磨损长度超过刀齿 I 约 12.2%。刀齿 I (共 6 个) 的平均磨损量为 0.94 kg, 刀齿 II (共 6 个) 的平均磨损质量为 1.19 kg, 则刀齿 II 的磨损质量超过刀齿 I 约 26.6%。同时, B 刀臂的 3、4 号刀齿平均磨损质量为 1.04 kg, E 刀臂的 3、4 号刀齿平均磨损质量为 1.27 kg, 则刀齿 II 的磨损质量超过刀齿 I 约 22.1%。

在称量刀齿磨损质量时发现, 刀齿表面夹带了大量的黏土, 十分难以清理。而刀齿的磨损长度测量较为简便, 从测量结果来看, 二者的测量结果趋势一致。

2.3 重复试验

为准确判定两种刀齿的磨损性能, 在相同工况下进行第 2 组、第 3 组挖掘试验。刀齿布置方式相同, 其中第 2 组挖掘试验的挖掘时长 7.5 h, 第 3 组挖掘试验的挖掘时长为 7.0 h。

对第 2 组挖掘试验的 B、E 刀臂进行刀齿磨损长度测量, 结果表明, B 刀臂的 3、4 号刀齿平均磨损长度为 67.5 mm, E 刀臂的 3、4 号刀齿平均磨损长度为 78.0 mm, 刀齿 II 的磨损长度超过刀齿 I 约 15.5%。

同理, 对第 3 组挖掘试验的 B、E 刀臂进行刀齿磨损长度测量, 结果表明, B 刀臂的 3、4 号刀齿平均磨损长度为 69.5 mm, E 刀臂的 3、4 号刀齿平均磨损长度为 77.0 mm, 刀齿 II 的磨损长度超过刀齿 I 约 10.8%。

3 组挖掘试验表明: 刀齿 II 的磨损长度超过刀齿 I 分别为 12.2%、15.5%和 10.8%, 平均值为

12.8%, 3 组试验结果的极差为 21%, 因此能够表明刀齿 II 的耐磨性低于刀齿 I, 约为刀齿 I 的耐磨性能的 87%。

2.4 综合性价比

一般地, 刀齿磨损后需要及时更换, 单次更换刀齿需要消耗 1~2 h, 期间绞吸挖泥船的产量为 0。刀齿磨损程度与更换频率具有一定的关系, 刀齿越容易磨损, 则换齿愈加频繁。提高刀齿的耐磨性, 有助于增加刀齿使用时间, 减少换齿次数, 提高绞吸挖泥船的施工效率。

耐磨性与磨损长度成反比, 考虑刀齿的价格因素, 定义刀齿综合耐磨指标 V 为:

$$V=\frac{1}{L^aC}$$

(1)

式中: L 为刀齿磨损长度; a 为磨损因子, $a \geq 1$, 根据使用时间和换齿时间综合确定; C 为刀齿价格。

刀齿的综合耐磨指标 V 值越大表明该刀齿越好。以该次刀齿试验结果为例, 刀齿 II 的磨损长度为刀齿 I 的 1.128 倍, 在价格上刀齿 I 为刀齿 II 的 0.75 倍, 当 $a=1$ 时, $V_{II}/V_I=1.18$; 当 $a=1.5$ 时, $V_{II}/V_I=1.11$; 当 $a=2$ 时, $V_{II}/V_I=1.05$ 。能够看出, 刀齿 II 的耐磨性能虽然稍低于刀齿 I, 但是刀齿 II 的综合性价比超过刀齿 I。

3 结论

1) 黏土混粗砂的土质对刀齿的磨损显著, 试验过程中没有出现断齿现象, 其中粗砂成分对刀齿的磨损明显, 该种土质可以用于刀齿的耐磨对比试验。

2) 以刀齿磨损长度和磨损质量为绞刀齿耐磨试验的分析指标, 二者在判断耐磨性能的趋势上—致, 其中刀齿磨损长度更容易测量。

3) 磨损试验结果具有有效性, 刀齿 II 的耐磨性低于刀齿 I 约 12.8%, 该指标可以为现场技术人员提供帮助。

4) 提出一种刀齿性价比评估模型, 考虑了刀齿的价格和磨损长度, 能够评估刀齿的综合耐磨性价比。

参考文献：

[1] 刘守金.绞吸式挖泥船施工与管理[M].北京:中国水利水电出版社,2005.

[2] 王致道,范秀红.进口挖泥船备品配件国产化的浅析[J].江苏水利,2006(2):21-22.

[3] 全健民.耐磨钢研究进展[J].水利电力机械,2003(2):29-32,40.

[4] 刘政军,张桂清,尹奕君,等.合金元素对铁基耐磨堆焊合金性能的影响[J].焊接学报,2007(3):69-72,116.

[5] 陈虎.绞吸式挖泥船耐磨刀齿研究[D].武汉:武汉理工大学,2014.

[6] 李爱农.疏浚工况泥沙磨损机理及其耐磨新材料研究[D].武汉:武汉理工大学,2003.

[7] 李爱农,施雨湘,吕奎清.绞吸挖泥船绞刀片特种耐磨堆焊技术[J].船海工程,2003(1):12-14.

[8] 王联波,汪慧莲,温浩宇,等.奥氏体化温度对中碳低合金耐磨钢组织和耐磨性的影响[J].金属热处理,2012,37(5):34-37.

[9] 孙宇凡,杨鹏辉,符寒光,等.奥氏体化温度对高锰含碳

化物等温淬火球墨铸铁组织和性能的影响[J].材料热处理学报,2020,41(10):44-50.

[10] 陈德东,李卫.低合金耐磨铸钢技术研究与应用[J].热加工工艺,2011,40(11):17-20,25.

[11] 魏昂,鲁宁斌,李日新,等.低合金耐磨铸钢绞刀齿的研制[J].热加工工艺,2020,49(6):50-52.

[12] 赵家利.绞刀齿的热处理[J].热处理,2013,28(2):72-74.

[13] 严军,高玮,吴江平,等.绞刀齿新研材料 ZG28 及其性能优化研究[J].武汉理工大学学报,2012,34(11):14-17.

[14] 张泽云.新型耐磨钢热处理参数模拟计算及组织性能研究[D].秦皇岛:燕山大学,2020.

[15] 赵云冲,杨兴亚,龙伟漾,等.热处理工艺对 TBM 刀盘低合金耐磨钢的耐磨性影响研究[J].热加工工艺,2020,49(12):135-137.

[16] 建设部综合勘察研究设计院.岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S].2009 年版.北京:中国建筑出版社,2009.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 204 页)

4)在同样变化率下,内摩擦角对抗力分项系数的影响明显高于黏聚力。

5)在一定条件下,抗力分项系数采用简单条分法的计算值和复合滑动面法的最小计算值,相关系数为 0.87,为高度相关。

4 结语

1)高桩码头接岸结构存在软弱夹层时,地基稳定验算应在简单条分法计算的基础上,采用复合滑动面法校核。

2)在同样变化率下,内摩擦角对抗力分项系数的影响明显高于黏聚力。

3)类似条件下,抗力分项系数采用简单条分法的计算值和复合滑动面法的最小计算值,相关系数为 0.87,可作为定性判断的依据。

参考文献：

[1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.码头结构设

计规范:JTS 167—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

[2] 杨晓松,高涛.瑞典条分法与简化毕肖普法在海堤抗滑稳定分析中的比较[J].水运工程,2017(2):27-32.

[3] 回恒酉,谭洪平,仲启珂.护岸工程基坑边坡稳定性计算传统方法与数值模拟法的对比[J].水运工程,2019(4):110-114.

[4] 陈奋键,赵维军,杜庭瑞,等.边坡稳定设计方法的对比研究[J].水运工程,2004(2):7-10,15.

[5] 刘怡林,黄茂松,袁伟,等.斜坡含软夹层地基路堤离心模型试验与数值模拟[J].岩土力学,2013,34(S2):22-26,34.

[6] 高志义,张宁.某人工岛护岸滑坡段成因分析与修复[J].中国港湾建设,2006(3):13-15,50.

[7] 喻志发,黄传志,杨京方,等.港口工程地基计算系统(2008 版)[J].中国港湾建设,2010(6):21-24.

[8] 中交天津港湾工程研究院有限公司.水运工程地基设计规范:JTS 147—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

(本文编辑 武亚庆)