

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.018

肯尼亚蒙巴萨港旧 KOT 油码头靠船墩 水下拆除爆破

李 泉, 蒋明明

(广州爆破工程有限责任公司, 广州 510030)

摘 要: 肯尼亚蒙巴萨港在建设 19B 号泊位工程项目时, 需要对旧 KOT 油码头的结构进行拆除。前期对旧码头采用了机械拆除, 但剩下最后三个靠船墩无法机械拆除, 因此决定对其采用爆破方式进行拆除。本文论述了针对靠船墩的技术要求和工程结构特点及当地印度产爆破器材特点所采取的一次性爆破拆除施工方案。该方案计算了针对特殊结构的靠船墩所选取的拆除爆破单耗, 并进行了试爆优化。同时方案还针对所采购的印度产高精度非电雷管, 设计了复式逐孔(2 孔)起爆网路, 确保了一次起爆总装药量近 6 t 的情况下, 爆破振动和水下冲击波均没有超过有关规范要求。另外文章还介绍了码头前沿开放海域气泡帷幕的制作与布设。

关键词: 靠船墩; 高精度非电雷管; 拆除爆破; 水下爆破

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)01-0166-05

Underwater Demolition Blasting for Old KOT Oil Terminal Berthing Piers at Mombasa Port, Kenya

LI Quan, JIANG Ming-ming

(Guangzhou Blasting Engineering Limited Liability Company, Guangzhou 510030, China)

Abstract: During the construction of Berth 19B project at Mombasa Port in Kenya, complete demolition of all existing structures at the old KOT oil terminal was required as part of the construction process. The demolition of the old terminal initially utilized mechanical methods, yet three berthing piers remained intact. Consequently, controlled blasting was selected for their removal. This study examined the technical specifications of the piers, their structural engineering features, the operational characteristics of locally procured India blasting equipment, and the implementation strategy for single-phase explosive demolition. The demolition plan calculated explosive unit consumption specifically tailored for the unique structural configuration of the berthing piers, followed by trial blasting operations for parameter optimization. The plan incorporated a dual-hole sequential initiation network using high-precision non-electric detonators sourced from India, guaranteeing compliance with all regulatory limits for both ground vibration and underwater shock waves despite the single-blast explosive quantity approaching 6 metric tons. The paper also detailed the construction and strategic deployment of an open-water bubble curtain system along the wharf's operational area.

Key words: berthing dolphin; high-precision non-electric detonator; demolition blasting; underwater blasting

收稿日期 (Date of reception): 2025-12-25

网络首发日期 (Published online): 2026-02-09

作者简介: 李 泉 (1970-), 男, 高级工程师、硕士学位, 爆破工程, (E-mail) 13926047369@139.com。

通信作者: 蒋明明 (1991-), 男, 中级工程师、专科, 爆破工程, (E-mail) 1341110967@qq.com。

About the author: LI Quan (1970-), male, senior engineer, master degree, mainly engaged in blasting engineering, (E-mail) 13926047369@139.com.

Corresponding author: JIANG Ming-ming (1991-), male, intermediate engineer, specialist degree, mainly engaged in blasting engineering, (E-mail) 1341110967@qq.com.

1 工程概况

19B 号泊位工程项目位于肯尼亚蒙巴萨港, 该工程的建筑地点位于港内 19A 泊位西侧, 见图 1。

项目施工内容包括既有旧 KOT 油码头拆除、新建 240 m 集装箱船泊位、新建后方堆场、新建服务楼、消防泵房等。

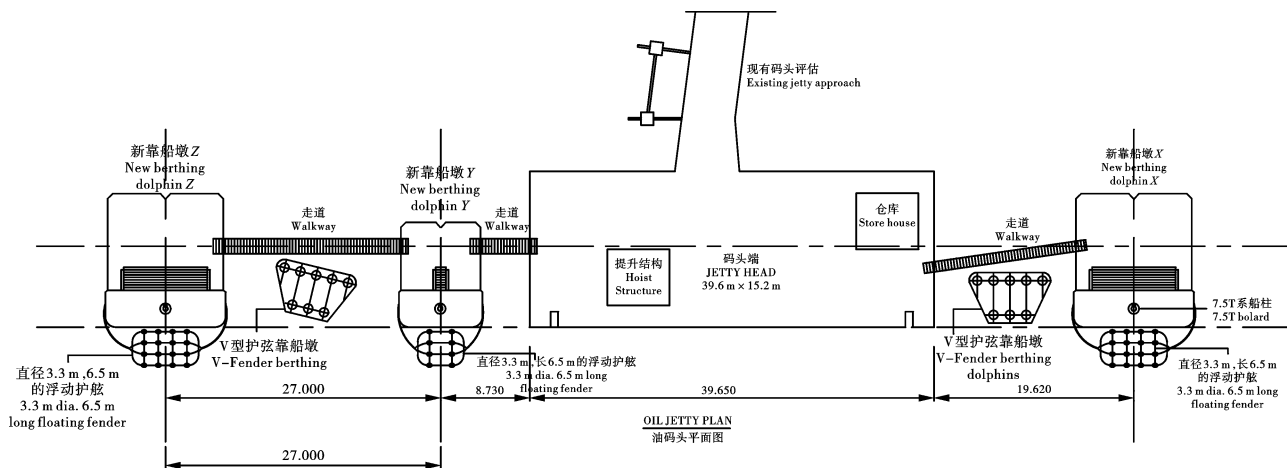


图 1 旧 KOT 码头平面布置图(单位:mm)

Fig. 1 Layout plan of the old KOT wharf(unit:mm)

油码头的绝大部分结构采用炮锤、绳锯等机械方式进行了先期拆除,但在最后拆除图 1 所示的三个靠船墩时,由于遇到了结构复杂,强度大,水深超过 15 m 等不利因素,仅仅拆除了部分面层就不得不中止。后经过多方沟通论证,决定采用爆破方法进行拆除^[1-3]。

1.1 周边环境

对周边环境进行了调查,待拆除靠船墩距离蒙巴萨 20 号码头最近距离 360 m,距离蒙巴萨 19 号码头最近距离 103 m。爆破点距离南侧的石油码头

约 800 m,距离南侧的海军码头超过 1100 m。

1.2 靠船墩结构及爆破前的状况

待拆除靠船墩 3 个,分别为东西侧靠船墩为 X、Z 和中间靠船墩 Y。X 和 Z 靠船墩尺寸为 11.8 m × 13.75 m, Y 靠船墩尺寸为 8.2 m × 10.28 m。三个靠船墩均由打入式钢板桩围成,并每隔一定距离以高度 500 mm 的工字钢加固,上部有一到三层直径约 80 mm 的圆钢对两侧进行拉撑。所有墩台均浇筑混凝土充填,混凝土强度为 C30。见图 2。

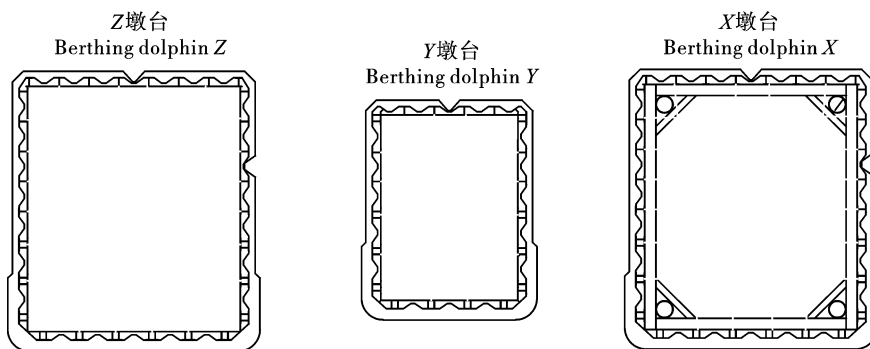


图 2 墩台结构平面示意图

Fig. 2 Schematic plan of abutment structure

其中, X 墩台上部四周还有一圈工字钢形成腰梁,四角还布置有直径 800 mm 的钢管桩,钢管桩打入基岩对整体结构进行进一步加强。

爆破施工前,已通过机械法拆除了上部附属结

构,并用炮机凿除部分了混凝土,现墩顶标高在 +3.0 m 左右,部分高程为 0.5 m 左右。现要求拆除到标高 -13.4 m(当地理论最低潮面),拆除高度为 13.9 ~ 16.4 m。

1.3 技术要求和工程特点

拆除爆破的技术要求如下:

(1)爆破后墩台内部混凝土破碎,满足抓斗船清挖;墩台的四周钢板桩结构及灌注桩必须完全与混凝土脱离,但不能倒入水中或者发生断裂,以便于振动拔桩设备可以在水面以上作业并且将其完全拔除干净。

(2)爆破产生的飞石必须控制好,不能对附近 19A 码头进行装卸作业的外籍货船产生影响;水下冲击波的控制也必须满足国际标准要求,减小和控制对海洋生物的影响。

(3)必须保证钻孔质量和钻孔精度,爆破必须一次成功,墩台底部不能留埂,否则会无法清挖,影响整体工程进度。

(4)爆破方案和爆破效果需要满足肯尼亚国家港务局和环保局的安全及环保要求。

由于是海外工程,根据工程的技术要求及现场情况分析,我们分析了本次拆除爆破有如下特点:

(1)肯尼亚本土不生产爆破器材,所有爆破器材均要从邻国购买。这些爆破器材包括乳化炸药和高精度非电导爆管雷管均由印度的 Solar Industries India Limited 公司生产,根据前期调查,印度公司生产的乳化炸药抗水压性能一般。

(2)本次拆除爆破的钻孔,装药、联网和起爆作业均受潮水影响,高潮时所有墩台均位于水下,低潮时约有 2/3 墩台出露海面。因此所有作业必须考虑潮水影响。

(3)根据前期的钻孔取芯探查,所有墩台的混凝土并不完整,特别是 X 墩台,下部混凝土浇筑质量不高,发现大面积的流砂层。因此钻孔工艺的选择非常重要,对保证成孔率和钻孔精度至关重要。此外,墩体内部多层拉撑的圆钢和加强工字钢腰梁的具体位置不清楚。

(4)建设方肯尼亚国家港务局没有接触过水下爆破,对爆破产生的危害比较关注。因此爆破振动和飞石防护措施要做足做好。

(5)此外,肯尼亚国家环保局特别关注水下冲击波对海洋生物的影响。要求采取合理的爆破方案和措施尽量降低所产生的水下冲击波强度,并进行冲击波的监测。

1.4 工程重难点及应对措施

根据工程技术要求,在靠船墩拆除爆破的过程中需要解决以下几个问题:

(1)对于所采购的印度产爆破器材,先进行乳化炸药和雷管的抗水压试验,并通过爆破试验评估

乳化炸药威力和爆破参数。然后再对三个墩台进行一次爆破。

(2)对于保证钻孔成孔率问题,采用如下钻孔工艺:对于上部完整结构墩体采用潜孔钻,钻孔钎头 100 mm;遇到不完整结构的墩体用地质钻,用 91 mm 合金钻头,采用泥浆护壁工艺,如泥浆护壁不行,则采用打套管的方式,利用潜孔钻将碎状物边打边吹出孔外,护孔用 80 mm 的 PVC 管。

(3)对于飞石控制问题。根据钻孔深度和地层完整程度,合理确定装药直径和堵塞长度。本项目采用复合装药结构,底部采用 $\phi 65$ 乳化炸药,中上部采用 $\phi 50$ 乳化炸药,顶部采用 $\phi 25$ 的乳化炸药,堵塞长度在 2.0 ~ 2.5 m。这样既能保证爆破效果,又能减少上部炸药能量,对控制飞石更为有利。同时在起爆前,所有炮孔孔口压砂袋,上覆石场废弃传送胶带,再用砂袋压实。最后将起爆时间设定在最高潮位,使整个爆区再上盖一层“水被”,进一步控制飞石。

(4)对于爆破所产生的水中冲击波。主要通过严格控制最大单段药量来实现,另外再采用一定的防护措施。就墩台的本身结构来说,其外围的钢板桩可以减少一部分冲击波。而且本次拆除针对水下冲击波,专门在墩台周围设置了两个封闭的方形水下气泡帷幕。其中一个周长采用 $\phi 50$ mm 的不锈钢管,在中轴线两侧分别钻 $\phi 2.0$ mm 的布气孔,间距 50 mm,错开布置,制作合适长度并固定在海底面以上 0.15 ~ 0.2 m 左右,防止淤泥堵塞,侧面连接钢管接上空压机,形成一个气泡帷幕圈,以减弱冲击波影响。

(5)对于工期和安全:因 3 个靠船墩均受潮位影响,高潮位时会淹没,因此作业人员需根据潮水进行调整作业时间;临水作业,每天上下班钻孔机械设备均需要来回吊装,且涉及当地劳工,对作业人员安全教育和安全操作极为重要。

2 拆除爆破方案选择和施工整体思路

根据拆除对象的特点、现场环境情况,本项目应优先考虑深孔钻孔爆破,一次钻至设计底部标高 - 13.4 m,钻孔超深 1.0 m。采用毫秒微差爆破,控制单段药量,尽量减少爆破所产生的有害效应。

根据工程技术要求,墩台拆除后原址要新建一个新高桩码头。如果深埋在基岩中的钢板桩不能清理干净,会影响到下一步的桩基基础施工。另外,钢板桩的振拔设备只能在水面上进行作业,不能进行水下拔桩,因此爆破不能将钢板桩炸倒或断裂。因

此墩台的周边孔采用松动爆破,将混凝土和钢板桩炸脱离即可;墩台的中心孔采用减弱松动爆破,防止爆渣抛掷而造成钢板桩倒入水中。

经过大量分析和研究,确定了爆破拆除施工的整体思路如下:

(1)进场后详细了解每个靠船墩的结构,进行布孔设计,组装钻机。钻孔原则是钻孔质量优先,确保每个孔均钻至设计标高,并严格控制周边孔的最小抵抗线偏差。

(2)尽早对所采购的乳化炸药及高精度非电雷管进行抗水压试验,并对 X 靠船墩的一个角共计 9 个孔进行爆破试验。然后根据抗水试验结果及爆破试验结果调整优化最终的爆破参数。

(3)在正式爆破前几天,布置好气泡帷幕并进行试验,保证气泡帷幕系统工作正常,配合当地咨询公司(爆破安全的第三方监测单位)布置好水击波监测设备以及测震设备。

(4)考虑到蒙巴萨港作业繁忙,在正式爆破前一天,组织相关单位进行爆破警戒演练。

(5)爆破区域防护覆盖时要认真细心,既要保证覆盖到位,又要监督当地土著工人不能损坏网路。起爆时间选择在 2025 年 11 月 9 日下午 6 点,为当日最高潮位。

(6)爆破后对表面一些大块进行二次解炮,然后利用船载长臂反铲挖除上部爆渣,最后用振动拔桩锤拔除钢板桩。

(7)最后用抓斗式挖泥船对所有爆渣进行清挖,清挖至设计底标高。

3 爆破参数设计

3.1 水下钻孔爆破单耗的确定

靠船墩的爆破参数首先需要确定爆破单耗。因为这种结构比较罕见,需要精心核算,并根据爆破试验情况最终确定。

水下钻孔爆破的炸药单耗一般按以下瑞典的经验公式确定

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4$$

式中: q_1 为基本装药量, kg/m^3 , 是一般陆地台阶爆破单耗的 2 倍, 周边孔考虑到外围钢板桩的作用, 按混凝土桥墩及桥台的爆破单耗取大值, 这里取 $0.3 \text{ kg}/\text{m}^3$, 中心孔则取较小值, 这里取 $0.2 \text{ kg}/\text{m}^3$; q_2 为爆区上方水压增量, kg/m^3 , $q_2 = 0.01h_2$, h_2 为水深(至开挖底部), 这里上部取 0 m, 从上往下逐步增大, 下部最大取 0.15 m; q_3 为爆区上方覆盖层增量, kg/m^3 , $q_3 = 0.02h_3$, h_3 为覆盖层(淤泥或土、砂)厚

度, 这里取 0 m; q_4 为岩石膨胀增量, kg/m^3 , $q_4 = 0.03h_4$, h_4 为台阶高度, m, 这里考虑到四周均为临空面, 取 0。

最后, 还要特别注意的是, 长江科学院张正宇等人考虑受水深影响的炸药爆速降低系数, 提出了如下修正公式。

$$q_{\text{水下}} = q_{\text{陆地}}/k_D^2 + 0.01H_{\text{水}} + 0.02H_{\text{覆盖层}} + 0.03H_{\text{台阶}}$$

由于我们并不了解所采购炸药的抗水压性能, 也就是受水深影响的炸药爆速降低的具体情况, 现场也没有条件进行测定。只能通过爆破试验进行估计。

3.2 靠船墩其它参数设计

(1)周边孔爆破参数: 炮孔直径 $d = 90 \text{ mm}$, 最小抵抗线 $W = 1.5 \text{ m}$, 炮孔间距 $a = 1.0 \text{ m}$, 最大孔深 $L = 17.4 \text{ m}$, 最大单耗 $q = 0.75 \text{ kg}/\text{m}^3$; 堵塞长度 $L_r = 2.5 \text{ m}$, 单孔装药量 $Q_1 = 31.32 \text{ kg}$, 采用间隔装药结构。

(2)内部孔爆破参数: 炮孔直径 $d = 90 \text{ mm}$, 最小抵抗线 $W = 1.9 \text{ m}$, 炮孔间距 $a = 2.0 \text{ m}$, 排距 $b = 1.9 \text{ m}$; 最大孔深 $L = 17.4 \text{ m}$, 最大单耗 $q = 0.55 \text{ kg}/\text{m}^3$; 堵塞长度 $L_r = 2.3 \sim 2.4 \text{ m}$, 单孔装药量 $Q_1 = 33.06 \text{ kg}$, 采用间隔装药结构。

3.3 爆破试验情况及单耗调整

2025 年 11 月 5 日, 我们对爆破试验区进行了抗水压试验和爆破试验, 共计做了浸水深度 15 m 和浸水时间超过 36 h 的 10 个试验药包, 爆破试验孔 9 个。发现印度产乳化炸药虽然全部都可以爆炸, 但爆破威力较差。按上述单耗进行的爆破试验, 混凝土破碎效果不好, 钢板桩和混凝土脱离不够充分, 见爆破试验区爆前和爆后对比图 3。



图 3 爆破试验区前后对比图

Fig. 3 Comparison image of the blasting test area before and after

因此, 我们立即将最终爆破的周边孔单耗增加到 $1.0 \text{ kg}/\text{m}^3$, 中心孔增加到 $0.7 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。每个孔的装药结构均为连续复合装药, 增加直径 65 mm 的炸药装药量。

3.4 起爆网路设计

每个墩台均采用复式非电导爆管高精度雷管网

路,每个孔内装 4~6 发延期时间为 600 ms 孔内高精度雷管,孔外以两发 17 ms,或者 25 ms 地表传爆雷管进行复式传爆。设计两孔一响,周边孔依次先

响,然后再响中心孔,每两孔的微差间隔时间为 17 ms 或者 25 ms。具体见图 4 所示。

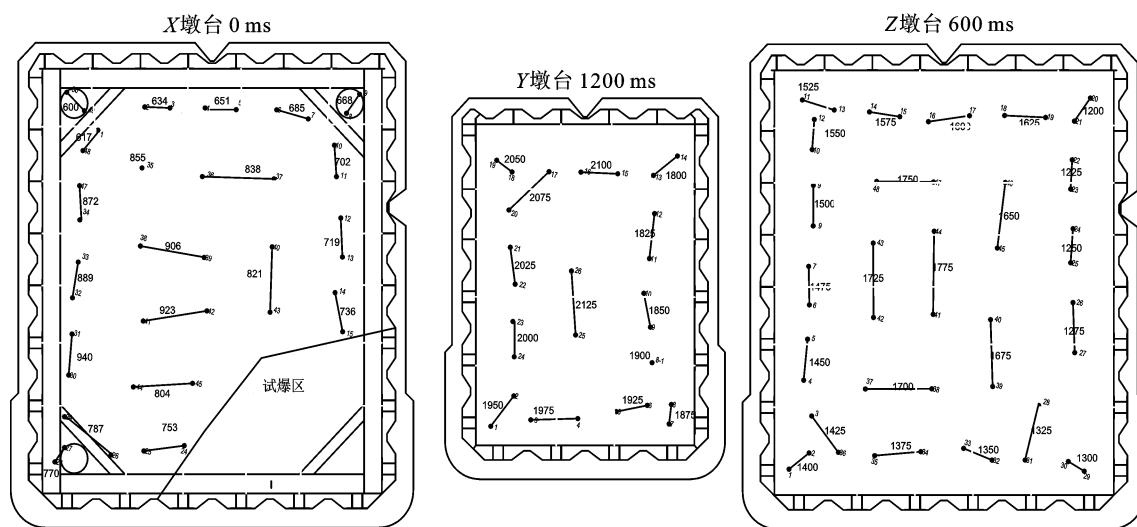


图 4 三个墩台的起爆网路示意图(单位:mm)

Fig. 4 Schematic diagram of the detonation network for three abutments(unit:mm)

所有墩台网路联接好后,Z 墩台整个网路联接两发并接 600 ms 高精度雷管,Y 墩台整个网路联接一个两发并接 600 ms 高精度雷管再串接一个两发并接 600 ms 高精度雷管,最后三个墩台联入一个电爆网路,用电雷管对三个墩台进行起爆。做到所有墩台均为两孔一响,网路总延时约 2 s。

4 爆破安全性评价及监测比较

本次拆除爆破主要的有害效应为爆破振动、水下冲击波和爆破飞石,重点保护对象是蒙巴萨 19 号码头,距离爆区最近距离 103 m。

4.1 爆破质点振动速度

根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014)

$$V = K(Q^{1/3}/R)^{\alpha}$$

式中: V 为爆破振动速度; K 、 α 为与爆破点地形、地质等条件有关的系数和衰减指数,结合本工程的地质情况,根据《爆破安全规程》的有关规定,本次拆除取 $K = 300$, $\alpha = 1.9$; Q 为一次起爆炸药量,kg,毫秒差起爆时取最大一段的装药量; R 为爆破点与被保护建(构)筑物的距离,m。

对于码头的振动速度允许 8.0~10.0 cm/s,取小值,本次拆除工程最大单段药量为 84.2 kg,距离码头最近 103 m,计算出质点振动速度为 0.74 cm/s。因此对码头不会造成影响。

根据当地咨询单位实际测量数据,码头观测点实际测振数据为 2.06 cm/s。估计是地层偏软,含水量较高的缘故。

4.2 水中冲击波影响

根据类似工程水下岩坎拆除控制爆破项目,得到的水中冲击波压力计算公式如下

$$\Delta P = 30.0(Q^{1/3}/R)^{1.122}$$

式中: ΔP 为超压,0.1 MPa; Q 为单段最大药量,kg; R 为测点至爆源的距离,m; K 为实测系数; α 为衰减指数。

本项目最大单响装药量为 82.4 kg,计算出 25 m 时,水中冲击波压力为 0.422 MPa。

根据当地咨询单位布设在 25 m 处的水击波监测点,测量出水中冲击波的实际强度为 0.125 MPa。小于本项目业主提出的美国 NOAA 关于有鳃鱼类听力永久受损的 0.207 MPa 的安全阈值。分析认为,墩台的外围钢板桩和气泡帷幕对降低水击波的强度起到了重要作用。

4.3 爆破飞石影响

本项目利用高潮位起爆,受到水压力影响,飞石会减弱。为确保安全。爆破实施中还是采用炮被进行覆盖防护,沙袋压盖进行控制。同时对于码头侧的警戒距离取 150 m。

爆破后没有发现任何飞石。分析认为,印度产乳化炸药在水下使用爆速明显下降,和墩台上层混凝土内部的拉撑圆钢没有预先切割等也有较大关系。