

分体式空化磨料水射流冷切割装置 在海上应急救助中的发展应用

张洪亮, 刘景民, 李曼

中国海洋工程有限公司, 北京 100011

摘要: 利用三相空化磨料水射流专利技术研制出了海上救助打捞及水下工程专用的分体式空化磨料水射流冷切割装置。对装置的组成、工作原理、工作参数及实际应用进行了叙述。结果表明, 分体式空化磨料水射流冷切割装置具有机动灵活、高效低耗、应用范围广等特点, 是一种新型冷切割设备, 在海事救援、救助打捞、爆炸物销毁、油气管道维修拆除等领域具有良好的应用前景。

关键词: 空化; 冷切割; 救助; 打捞

引言

近年来, 切割技术的开发和应用取得了长足的发展, 切割技术已经从传统的火焰切割发展到包括等离子切割、激光切割、高压水射流切割等在内的现代切割技术。切割的方法有很多种, 大致可归纳为热切割和冷切割两大类。热切割是利用热能使材料分离, 最常见的有气体火焰切割、等离子弧切割和激光切割等。冷切割是在常温下利用机械方法使材料分离, 如剪切、锯切(条锯, 圆片锯、砂片锯等)、铣切等, 也包括近年来发展的水射流切割。

目前, 国内水下应急救助使用的切割方法是潜水员用电弧进行切割及人工手持电钻钻孔切割, 在对难船快速开孔救人时效率极低, 而且在作业时容易形成热积聚, 救捞难船切割油舱时非常危险。高压水磨料切割技术也可用于水下作业, 但工作压强可达到 300MPa 以上, 对操作人员的危险性极大。

针对上述问题, 我们利用公司已有的三相空化磨料水射流专利技术(实用新型专利号 ZL201420167558.4, 发明专利号 201410138823.0)研制出了海上救助打捞及水下工程专用的分体式空化磨料水射流冷切割装置(以下简称切割装置)。该切割装置是一种新型冷切割设备, 切割时无磨损、无火花、无降尘、无热积聚, 可用于易燃易爆、热敏、脆性、有毒、危险水域等特殊场合工作; 切割材料无选择性、无热变性和金相组织变化, 在海事救援、救助打捞、爆炸物销毁、油气管道维修拆除等领域具有良好的应用前景。

切割装置是一款专门用于海上救助打捞以及海洋工程的设备, 主要用于船体局部切割、油气管线切割、危险物清除、海上废弃油气设施拆除, 可以在 60 米以浅的水下及陆地各种工况下进行安全、快速切割作业。根据海上人命救助、打捞及海洋工程在连续工作时间、机动性能等方面不同的需求, 分为打捞(海洋工程)用和救助用两款切割装置。打捞用切割装置(海洋工程大型机)动力源可选用采用柴油机或电机驱动, 工作压力可在 0-50MPa 之间调节, 最大切割钢板厚度可达 45mm; 海上救助用切割装置(灵便小型机)动力源采用小型柴油机驱动, 工作压力可在 0-40MPa 之间调节, 最大切割钢板厚度可达 20mm。

1 工作原理

空化射流是液体流在一定压力和一定温度下发生的含有数量不等气泡的水射流。每当降低液流压力、液流速度或提高液体温度等都可使液流发生空化。由于液流形成水射流能诱发空化泡, 产生具有介孔气泡的水射流, 其在管道中运动时, 便会比无介孔气泡的水射流有更小的阻力更大的流动速度。如果将含有介孔气泡的水射流为载体, 加入适量的磨料粒子配置成一种非牛顿流体, 则这种三相磨料水组成的射流称为三相空化磨料水射流。由于空化磨料水射流可至浆体流均匀化, 使空化磨料射流呈现剪切稀化特性, 大大降低了流体在输送管

路中的压力梯度。在围压淹没环境下，流体中的空泡不仅起到传递能量的作用，形成高速射流，而且当浆体射流冲击到物体表面时，又表现为类固体的瞬时刚性，可以把更多的能量聚集，形成对物面的打击合力。化磨料水射流冲击靶面时，除滞止压力、冲蚀和磨削外，还有空化、水锤作用，剪切应力、楔劈等多种作用力的聚合，使水下切割在 50Mpa 以下压力的条件得以实现。

2 装置组成

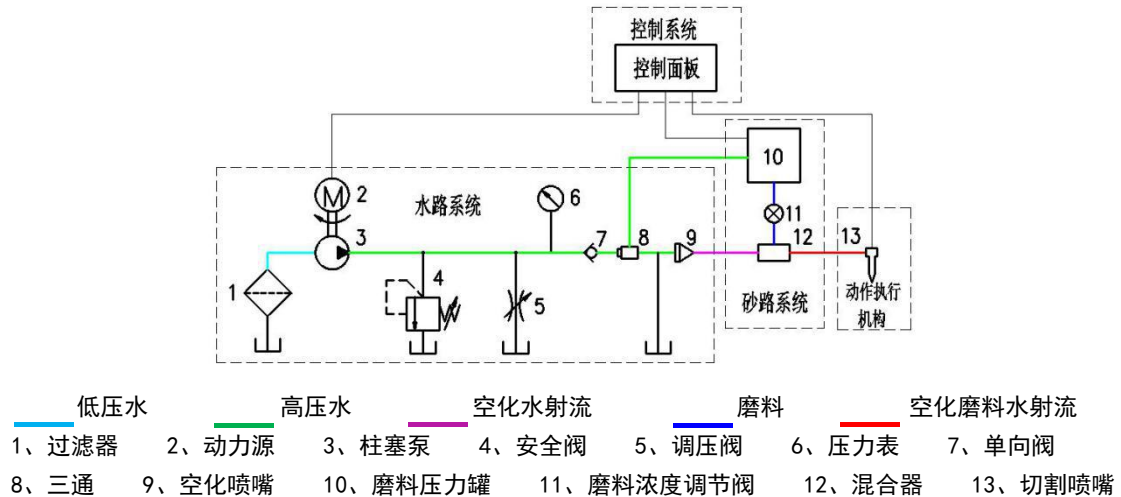


图 1 工作示意图

切割装置采用分体式结构，可拆装组合，分为水路系统、砂路系统及动作执行机构三部分，三者之间采用高压软管连接，水路系统与砂路系统之间连接距离可达 200 多米，大大延长了作业半径。水路系统包括动力源、柱塞泵、变速器、过滤器、调压阀、空化喷嘴等；砂路系统包括磨料压力罐、混合器和磨料浓度调节阀等；动作执行机构包括控制单元、防水步进电机、多种切割轨道及切割喷嘴等。

柱塞泵启动后，水流经过滤器进入柱塞泵加压，经三通分为两路，一路进入磨料压力罐内与事先装入磨料压力罐中的磨料混合成高浓度磨料浆体，在压力的作用下，磨料浆体经磨料浓度调节阀进入混合器；另一路水射流，经空化喷嘴射出含有介孔气泡的水射流射入混合器，并与磨料浆体充分剪切，混合为水、砂、气泡的三相磨料流体，经高压胶管高速流向切割喷嘴，从切割喷嘴中射出高能量密集的空化磨料水射流，高速冲蚀物体表面。

3 工作参数

3.1 水路系统

救助用切割装置水路系统主要用于产生空化水射流，通过动力源，连接柱塞泵，通过安全阀、调压阀、空化喷嘴等产生所需的含有介孔气泡的水射流。

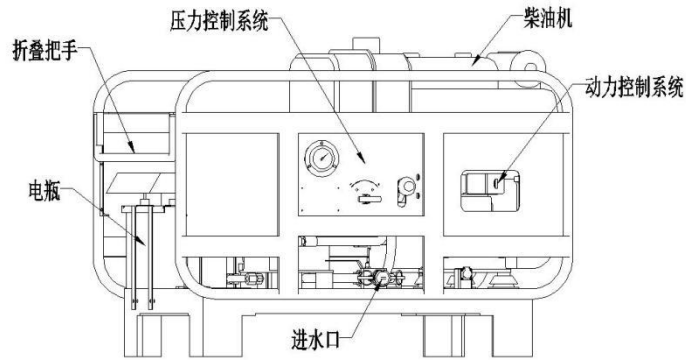


图2 救助用切割装置水路系统结构图

表1 救助用切割装置水路系统技术参数

项目	参数	项目	参数
型号	HG-QG-45-15-C-JZ	动力源	柴油机
结构方式	拆装组合式	框架材质	304
输出功率	15KW	柱塞泵工作流量	13-15L/min
柱塞泵工作压力	0-40MPa	框架尺寸	1×0.75×0.75m
重量	约 180Kg	空化喷嘴直径	2mm

3.2 砂路系统

砂路系统主要作用是对空化水射流与高浓度磨料进行加压混合，向系统提供含有介孔气泡的磨料水射流。砂路系统主要由磨料压力罐、混合器和调控阀组成，当调控阀开启时可向动作执行机构提供切割作业所需的磨料水射流，关闭时则只喷射空化水射流。

磨料压力罐属特种设备，制造单位需由中国船级社认可，具有 GB/T19001-2000 (ISO9001-2000)、GJB9001A-2001 质量体系资格许可证。磨料压力罐按照 ISO 9809-2 《气瓶. 可重复充装的无缝钢气瓶. 设计、结构和试验. 第2部分刚拉强度大于或等于 1100MPa 的淬火加回火钢瓶》进行设计、制造、检验和验收，材料为 998G，且具有材质证明书，精加工后，逐个对两端螺纹进行渗透探伤，I 级合格；逐个进行超声波探伤，磁粉探伤；逐个按 GB/T 9251-2011 《气瓶水压试验方法》进行水压试验，试验压力 90MPa，保压 1 分钟，瓶体任何部位无渗漏；逐个按 GB/T 9251-2002 《气瓶气密性试验方法》进行气密试验，试验压力 35MPa，保压 3 分钟，瓶体任何部位无渗漏；逐个进行壁厚测定，实测壁厚不得小于 21.7mm。

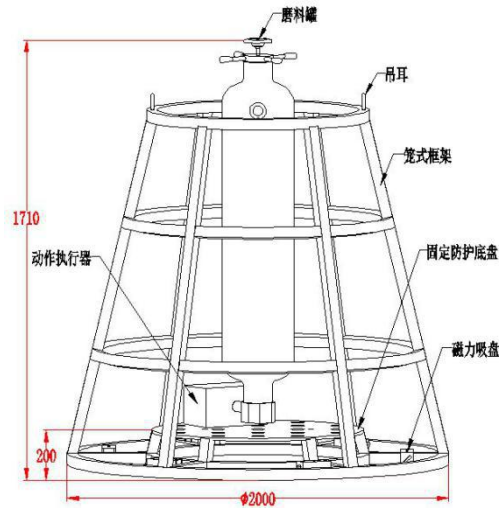


图3 救助用切割装置砂路系统结构图

砂路系统由容量40L的罐体组成，一次最多可装填磨料40升。磨料填充完毕后，磨料压力罐使用时间不少于20分钟。出砂阀的控制阀使用直流24V的电动执行器带动，电动执行器与罐体连接部位做密封，使用等级IP68，水下60米使用，可防100米水深压力，配置潜水电缆2更，每根200米。砂路系统可吊装至靠近作业现场，缩短切割喷嘴与砂路系统之间的距离，可减少压力损失，提高切割效率。

表2 砂路系统技术参数

项目	参数	项目	参数
磨料压力罐数量	1个/组 (每组具体数量可选)	连接方式	串联
控制位置	就近控制	启停方式	机械开关
理论出砂时间	40min	磨料灌容积	40L
框架材质	304	切割长度(20mm厚钢板)	1.88米/组
尺寸	1000×700×1400mm	空罐总重量	450Kg
工作压力	0-60MPa	使用环境条件	海洋气候
设计厚度	21.7mm	罐体材质	998G
磨料	80目，石榴石或金刚砂	潜水深度	60米
试验压力	水压90MPa，气密35MPa，爆破压力≥144MPa		

3.3 动作执行机构

动作执行机构主要作用是用来固定切割喷嘴，通过控制面板调整防水步进电机运动速度，使其能够按照设定的预定轨道进行切割。

割装置配置三种切割器，第一种为水下开孔器，用来在水下切割圆孔；第二种为多功能柔性组合式切割器，用来在水下平面或者弧面上切割直线；第三种为手持切割枪，用来在水下短距离切割。三种切割器均可在水上、水下使用，水下使用时为降低安装难度，在切割器表面安装多个浮力块，充分利用海水浮力，使其能够方便快捷的安装在预定位置。

3.3.1 水下开孔器

水下开孔器自带两种行走机构：可以带动切割喷嘴进行圆形行走，从而切割圆孔；另一种机构为带动切割喷嘴上下移动，用来自动调节喷嘴与被切割面的距离。

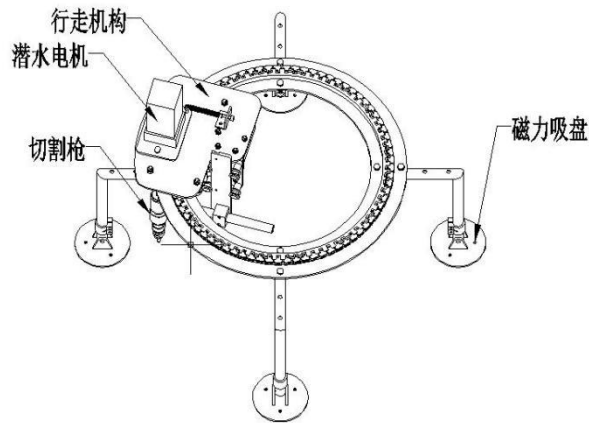


图4 水下开孔器结构图

水下开孔器通过磁力吸盘吸附在被切割物体表面，通过控制器控制其进行圆孔切割，控制器位于水上操作，通过水下摄像头进行实时监控。

表3 水下开孔器技术参数

项目	参数	项目	参数
控制方式	远程触摸控制	传动方式	齿轮齿条
驱动方式	防水步进电机	电力供应	DV 24V
防水等级	IP68	潜水深度	60米
切割速度	50mm/min (20mm厚钢板)	默认切割长度	Φ600mm圆孔,也可根据切割对象预制不同直径的轨道
重量	25Kg	外形尺寸	Φ861×H505mm
切割喷嘴直径	0.8mm		

3.3.2 多功能柔性组合式切割器

多功能柔性组合式切割器用来在水下平面或者弧面上切割直线，切割器主要由两部分组成，行走机构及轨道。行走机构带动切割喷嘴前后运动，轨道用来使其能够适应不同的切割面，并为行走机构提供行走参考，使其能够切割直线。

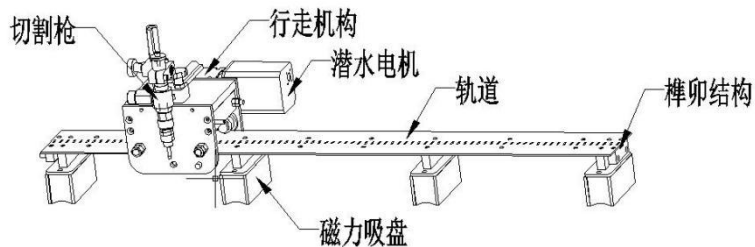


图5 多功能柔性组合式切割器结构图

切割器轨道为柔性轨道，可以在一定范围内任意弯曲，通过轨道下方的磁力吸盘可以吸附在平面或者弧面上，然后通过控制器控制行走机构，使其沿轨道进行切割。单个轨道长度

为1米，也可根据需要加工定制不同长度。轨道两端带有榫卯结构，可以进行无缝隙拼接，使用时可以一次性安装多段轨道，形成较长的预定轨迹，然后进行切割。切割过程中也可以将切割过的轨道拆卸下来安装在待切割处，循环利用轨道，直至切割完毕。

表 4 多功能柔性组合式切割器技术参数

项目	参数	项目	参数
控制方式	远程触摸控制	传动方式	齿轮齿条
驱动方式	防水步进电机	电力供应	DV 24V
防水等级	IP68	潜水深度	60米
切割速度	50mm/min (20mm 厚钢板)	默认切割长度	1000mm, 也可根据切割对象 预制或连接不同长度的轨 道
重量	20Kg	外形尺寸	1097×309×350mm
切割喷嘴直径	0.8mm		

3.3.3 手持切割枪（根据工程需要进一步完善）

手持切割枪可进行钻孔作业和线型切割作业，主要由枪体、枪托、防护罩、切割喷嘴及行走机构五部分组成。枪体通过快接对丝连接高压软管，输送切割介质；防护罩用来在钻孔及切割过程中起到防护作用；行走机构由磁力滚轮、防水电机及链条组成，磁力滚轮可以吸附在被切割物表面，静止时可以用来钻孔，当通过防水电机带动磁力滚轮旋转时可实现短距离的切割作业。

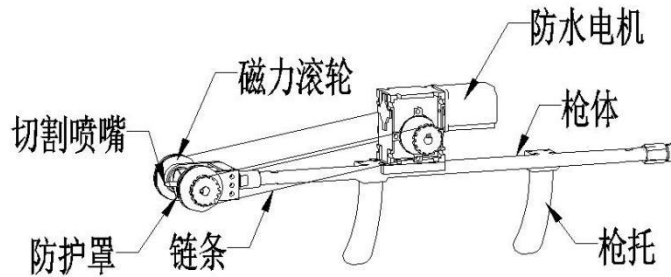


图 6 手持切割枪结构图

表 5 手持切割枪技术参数

项目	参数	项目	参数
切割方式	手动	连接方式	快接对丝
控制方式	远程触摸控制	传动方式	链传动
驱动方式	防水步进电机	电力供应	DV 24V
防水等级	IP68	潜水深度	60米
重量	8Kg	外形尺寸	764×110×182mm
切割喷嘴直径	0.8mm	/	/

3.4 多功能通用控制器

多功能通用控制器用来控制动作执行机构进行切割，控制器与多款切割器通用，控制器由控制箱及控制端组成，控制器采用安全电压直流 12V 作为输入电压，电子元器件密封在控制箱内，控制端采用触摸方式控制，控制端可以与控制箱分离，操作方便快捷。



图 7 多功能通用控制器外形图

表 6 多功能通用控制器技术参数

项目	参数	项目	参数
输入电压	DC12V	电流	7A
功率	84W	防护等级	IP65
结构方式	分体式	控制方式	触摸屏控制
重量	7Kg	外形尺寸	460×270×200mm

4 实际应用

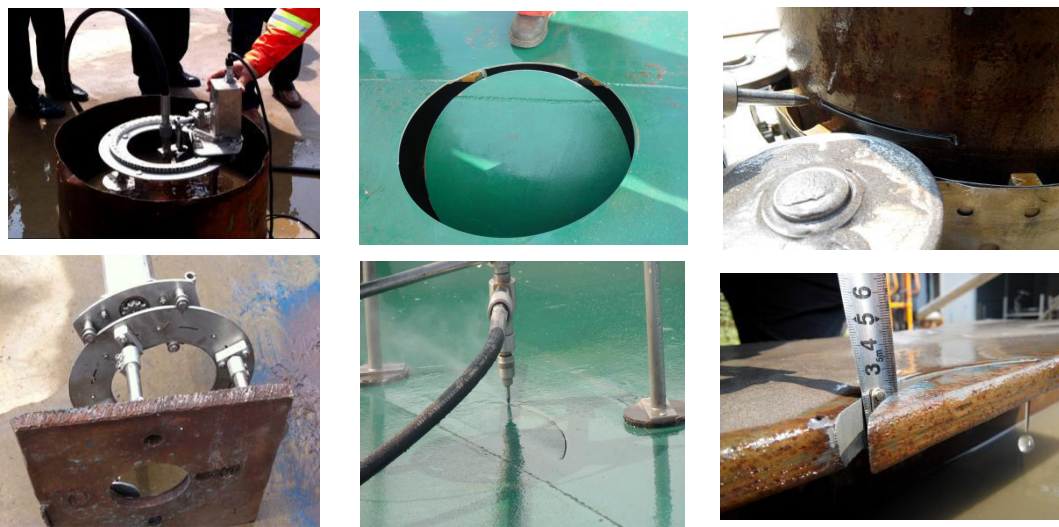


图 8 切割 20mm 厚船板



图 8 切割废弃炮弹

5 结论

切割装置在作业过程无明显温度变化,无火花、明火、静电产生,最大限度地保证了一些特定危险领域和环境的安全作业,在 30MPa 射流压力下切割 20mm 厚船板时,速度达到了 50mm/min,如需提高切割速度,可使用硬度较硬的金刚砂,提高射流压力。切割装置压力最大值 50MPa 远低于国际公认安全阈值 236.7MPa,将势能冲击能量所造成的危险性和不确定性降到了最低。

不论是生产加工过程还是产品作业过程,不产生化学反应衍生物,均符合国家低碳环保要求。经过我们的不断研发,产品本身及配套工装已完成系列化,可替代已有多套设备,实现一机多能。

与国内外传统水切割设备相比,产品的体积、重量均下降,切割能力与大型设备基本相同,采取特殊的软管连接技术,可实现远程操控。

参考文献

- [1] 王献孚,空化泡和超空化泡流动理论及应用[M]北京国防工业出版社
- [2] R. T 柯乃普等,水利水电科学院译《空化与空蚀》[M]北京水利水电出版社
- [3] 卢晓江等,高压水射流清洗技术及应用[M]北京化学工业出版社
- [4] 王瑞和,高压水射流破岩机理研究[M]中国石油大学出版社
- [5] 廖华林等,围压条件下空化磨料射流冲蚀特性与机制分析
- [6] 王海斌等,空泡形态与典型空化器参数关系的研究—小空泡数下的发展空泡形态[J],水动力学研究与进展,2005, A20(2): 251—257