

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.06.012

超高压水射流破拆机器人持枪机构设计*

张建新¹, 刘 斌², 石路晶¹

(1. 天津中德应用技术大学 基础实验实训中心, 天津 300350; 2. 浙江纺织服装职业技术学院 机电与轨道交通学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:针对超高压水射流破拆作业的安全及效率问题,设计了超高压水枪夹持摇摆机构。基于破拆机理,设计了曲柄摇杆式水枪摇摆机构,并建立了水枪摇摆机构的运动分析模型;在对破拆作业最优靶距及摆角研究的基础上,优化了曲柄摇杆式水枪摇摆机构;基于流体力学理论,建立了破拆反冲力与水压、流量及靶距之间的关系;采用有限元分析方法,对水枪夹持装置进行了应力分析。研究表明:曲柄摇杆机构可实现喷射的最佳靶距及摆角,能有效提高破拆打击力及效率。应用结果表明:该水枪夹持摇摆机构可显著提高破拆效率及安全性。

关键词:超高压水射流;混凝土破拆;有限元;曲柄摇杆;运动特性

中图分类号:TH69

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)06-0618-04

Gun holding mechanism for ultra-high pressure water jet robot

ZHANG Jian-xin¹, LIU Bing², SHI Lu-jing¹

(1. Basic Experimental Training Centre, Tianjin Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China;
2. School of Mechatronics and Rail Transit, Zhejiang Fashion Institute of Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: Aiming at the safety and efficiency of ultra-high pressure water jet, the clamping and swinging mechanism of ultra-high pressure water gun was designed. Based on the mechanism of concrete demolition, the crank-rocker type water gun swaying mechanism was designed and its kinematic characteristics was established. According to the optimum target distance and swaying angle, the swing mechanism was optimized. Based on the fluid mechanics, the relationship between jet force and pressure, flow and target distance was established. Applying finite element analysis method, the stress of the clamping device was worked out. The results indicate that the clamping device can realize the clamping reliably, the crank-rocker mechanism can improve the demolition efficiency. The experiment show that this mechanism can improve the efficiency and safety of demolition remarkably.

Key words: ultra-high pressure water jet; concrete demolition; finite element method (FEM); crank-rocker; kinematic characteristic

0 引 言

在建筑物的修复、拆除以及对灾害现场坍塌建筑物的破拆施工中,通常会涉及对混凝土结构的切割与破拆。传统的机械破拆方式不仅会带来建筑物的二次破坏,而且其施工中的粉尘、噪音等问题突出。20世

纪70年代后期,随着高压大流量水泵的出现及对水射流技术研究的深入,高压水枪开始逐渐应用于混凝土切割施工。采用超高压水射流技术进行混凝土的切割与破拆,不仅可大幅提高破拆效率,而且不会对破拆周边混凝土及其他结构造成破坏^[1,2]。

目前,用于混凝土切割破拆的超高压水泵压力可

收稿日期:2019-01-01

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2015BAK06B04);天津市企业科技特派员项目(18JCTPJC50500)

作者简介:张建新(1980-),男,湖北武汉人,副教授,硕士生导师,主要从事机电一体化技术,智能机器人技术方面的研究。E-mail:zjx_tj@126.com

达 140 MPa, 流量 160 L/min, 因此, 其水枪的夹持摇摆机构直接关系到破拆作业的安全和效率^[3]。

基于破拆机理的研究, 本文将设计曲柄摇杆式水枪摇摆机构, 并对水枪夹持机构进行有限元分析及优化^[4]。

1 破拆机理及参数研究

1.1 破拆机理

在对混凝土进行超高压水射流破拆时, 当混凝土受到超负荷负载时, 会产生裂纹。在超高压水射流作用下, 水射流自动寻找并射入混凝土孔隙或裂纹, 并在其内部形成超高压。当内部水压超过混凝土的粘接强度时, 混凝土破裂剥落^[5]。

破拆作业时, 为了提高作业效率, 喷枪除了沿切割方向运动外, 还需垂直于切割轨迹往复摆动, 在这两个运动的复合作用下, 超高压水射流在混凝土破拆轨迹线上形成带状的水射流冲击区域。水枪的往复摆动, 对混凝土表面产生切向和法向的水射流冲击, 法向冲击有利于混凝土碎片的剥落, 并将其破碎; 切向冲击有利于将混凝土碎片清理^[6]。

1.2 破拆参数研究

1.2.1 水枪喷嘴直径

目前, 用于破拆的高压水泵, 其工作水压通常为 140 MPa, 流量为 160 L/min。高压水枪喷嘴直径为:

$$d = 0.69 \sqrt{\frac{q}{\mu \sqrt{p}}} \quad (1)$$

式中: q — 高压水泵输出流量; p — 高压水泵工作压力; μ — 流量系数。

由于在超高压状态下, 水的体积发生压缩, 流经水枪喷嘴的真实流量要比计算流量大, 计算流量与真实流量的比值为 μ , 通常 $\mu \approx 0.96$ 。根据超高压水泵的输出流量及工作压力可得出, 水枪喷射口直径为 2.5 mm。

1.2.2 喷射靶距

水枪喷嘴与被破拆混凝土表面的靶距大小直接影响破拆效率。能获得最大喷射冲击力的靶距称为最佳靶距^[7]。研究表明: 喷射最佳靶距为:

$$l_{\text{opt}} = 99.7 \left(\frac{p}{100} \right)^{-0.88} d^{0.9} \quad (2)$$

根据式(2), 可计算出最佳靶距为 $l_{\text{opt}} = 109$ mm。

1.2.3 水枪摆角

喷枪的摆动能有效提高破拆效率。喷枪摆角靶距示意图如图 1 所示。

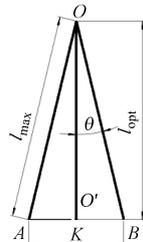


图 1 喷枪摆角靶距示意图

θ — 喷射最大摆角; OO' — 垂直喷射位置(长度为最佳靶距); $OA(OB)$ — 喷枪摆动及前后极限位置(长度为最大靶距); AB — 破拆区域宽度

摆动角度越大, 单次破拆区域宽度越大, 但是摆动角度太大, 在最大摆角位置喷射靶距会加大, 会显著降低破拆区域边缘附近的喷射打击力, 损耗喷射能量。射流打击力 F 与喷射靶距之间关系为:

$$F = 120 \left(\frac{p}{100} \right)^{1.15} \left[\frac{l}{99.7 \left(\frac{p}{100} \right)^{-0.88}} \right]^{-1.94} \quad (3)$$

式中: p — 高压水泵工作压力; l — 靶距。

为减少摆动带来的能量损耗, 最低打击力通常不得低于最佳靶距下打击力的 75%^[8]。根据式(2,3)及最佳靶距可得出: 喷射的最大靶距为 119 mm, 最大摆角 θ 为 10° , 破拆宽度为 120 mm。

2 基于有限元的持枪机构设计

夹持机构主要实现水枪的夹持及摆动, 喷枪夹持摇摆机构模型如图 2 所示。

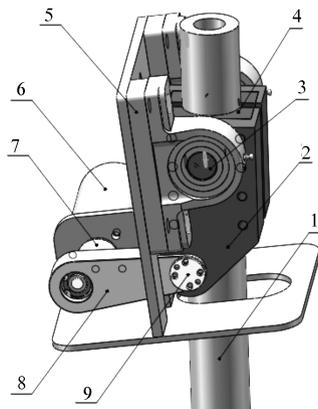


图 2 喷枪夹持摇摆机构模型图

1— 高压水枪; 2— 水枪夹板; 3— 水枪摆动销轴; 4— 橡胶垫; 5— 固定支架; 6— 液压马达; 7— 曲轴; 8— 连杆; 10— 连杆销轴

超高压水枪通过橡胶垫、水枪夹板及其螺栓夹持固定, 水枪夹板后端通过摆动销轴与固定支架铰接, 前

端通过连杆销轴与连杆一端铰接,连杆另一端与曲轴一端铰接。曲轴两端为不同心的两段光轴,曲轴另一端与液压马达输出轴同轴联结。液压马达驱动曲轴旋转,并带动连杆一端的曲柄销轴轴心作圆周运动,通过连杆带动夹持装置上的连杆销轴来回摆动,实现水枪夹板绕水枪摆动销轴往复摆动。该机构实际为一个曲柄摇杆机构。

2.1 超高压水枪夹持装置应力分析

进行超高压水射流破拆时,水枪射流的反冲力是水枪夹持机构设计的重要因素。水枪反冲力为:

$$F = 0.745q\sqrt{p} \quad (4)$$

式中: q —高压水泵输出流量,取 $q = 160 \text{ L/min}$; p —高压水泵工作压力,取 $p = 140 \text{ MPa}$ 。

经计算,反冲力达 $1\,407 \text{ N}$ 。当反冲力达到 250 N 时,必须将水枪装卡于机械夹持装置。水枪夹持装置由一对水枪夹板、橡胶垫及联结紧固两水枪夹板的螺钉组成。橡胶垫安装于水枪与水枪夹板之间,用于提高夹持摩擦力。两个水枪夹板通过 8 个 8.8 级的 M6 螺钉连接,其连接夹紧力达 60 kN 。橡胶垫与碳钢之间摩擦系数为 0.36 ,其夹持摩擦力达 10.8 kN ,满足反冲力要求。

水枪夹持装置的体积如果过大,势必缩小其有效工作范围^[9-10]。基于有限元方法,本文对水枪夹持装置进行优化分析。

橡胶垫应力分析图如图 3 所示。

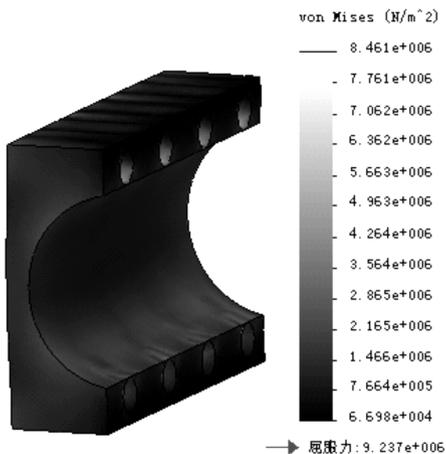


图 3 橡胶垫应力分析图

水枪夹板应力分析图如图 4 所示。

该装置的橡胶垫安装于半封闭结构内,其内壁与水枪外圆充分接触,其外壁置于刚度较高的水枪夹板内侧半包围结构中,有利于使其挤压并提高摩擦力。

有限元分析计算结果表明:橡胶垫最大应力为 7.4 MPa ,水枪甲板最大应力为 45.7 MPa ,尚未达到材

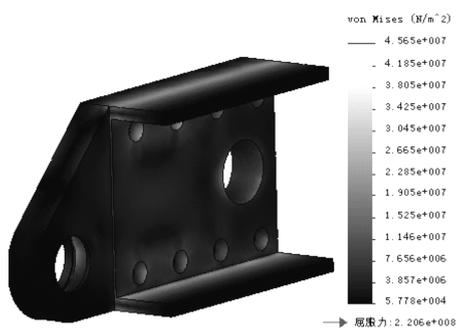


图 4 橡胶垫应力分析图

料屈服强度^[11]。

2.2 超高压水枪摇摆机构运动分析

超高压水射流机器人采用曲柄摇杆机构实现水枪的摇摆运动,水枪摇摆机构传动示意图如图 5 所示。

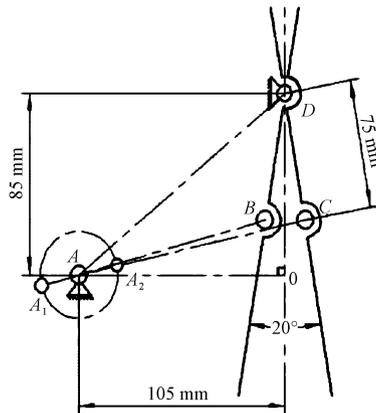


图 5 水枪摇摆机构传动示意图

该结构中,水枪摆角为 20° 。摇杆长度为水枪夹板上摆动销轴与连杆销轴之间距离,曲柄回转中心为驱动马达输出轴中心。经结构设计,曲柄回转中心与摇杆转动中心之间的相对位置为水平间距 105 mm ,竖直间距为 85 mm ,摇杆长度为 75 mm 。依据以上条件,可解得:

$$\angle ADO = \arctan\left(\frac{\overrightarrow{AO}}{\overrightarrow{AB}}\right) = 51^\circ,$$

$$AD = \sqrt{AO^2 + DO^2} = 135 \text{ mm},$$

$$\angle ADC = 61^\circ, \angle ADB = 41^\circ.$$

根据以上结果及余弦定理,可计算出:

$$AC = 118.5 \text{ mm}, AB = 92.5 \text{ mm}.$$

则曲柄长度为:

$$AA_1 = \frac{AC - AB}{2} = 13 \text{ mm}.$$

连杆长度为:

$$A_2C = AC - AA_2 = 105.5 \text{ mm}.$$

水枪摆动的驱动为曲柄的转动,曲柄实际为一个

曲轴。

经运动分析,当曲柄做匀速转动时,水枪摇摆运动特性曲线如图6所示。

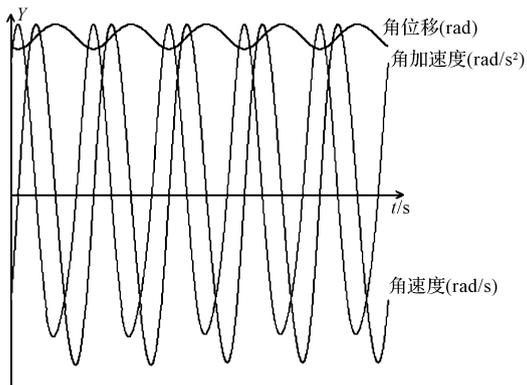


图6 水枪摇摆运动特性曲线

由图6可知:当水枪摆动到前后极限位置时,喷枪摆动的角加速度较大,速度相对较慢,这样相互作用,有利于降低该区域摆动是摆动功率的峰值^[12];而前后极限位置域靶距较长,打击力稍有减弱,水枪在该区域的缓慢移动,有利于整体区域破拆深度的同步性^[13]。

综上所述可知:该曲柄摇杆机构不仅有利于提高整体破拆效率,而且在摆动驱动功率的利用上也是合理的^[14-15]。

3 结束语

为了解决混凝土破拆作业中,超高压水枪的夹持和摆动问题,本文基于有限元分析方法,对超高压水枪夹持装置的应力进行了分析计算;基于破拆机理及参数的研究,进行了超高压水枪最佳靶距及摆角的分析,在此基础上设计了超高压水枪摇摆机构,并进行了摇摆机构的运动特性仿真研究。

研究表明:对水枪的靶距及摆角进行优化之后,本文所设计的摇摆机构不仅有利于提高整体破拆效率,也提高了其施工安全性^[16]。

参考文献 (References):

[1] 祁宇明,邓三鹏,王仲民,等. 坍塌现场高压水射流破拆机器人系统研究[J]. 机械设计与制造,2013,12(6):209-211.

- [2] 许惠敏. 基于环境与荷载因素的混凝土率效应及破坏机理试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学土木工程与建筑学院,2013
- [3] 王永强,任启乐,薛胜雄,等. 水射流新型应用技术与装备的研究[J]. 流体机械,2018,46(2):36-40.
- [4] CHEN Hai-long, LI Zhao-min, GAO Zhi-han. Numerical investigation of rock breaking mechanisms by high pressure water jet[J]. *Procedia engineering*, 2015, 12(12):295-299.
- [5] 薛胜雄,陈正文,陈波,等. 超高压水切割多功能特征解析[J]. 流体机械,2017,12(11):17-21.
- [6] LIU Xiao-hui, LIU Song-yong, JI Hui-fu. Numerical research on rock breaking performance of water jet based on SPH[J]. *Powder Technology*, 2015, 12(8):181-192.
- [7] TAYLOR C J, ROBERTSON D. State-dependent control of a hydraulically actuated nuclear decommissioning robot[J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 12(8):1716-1725.
- [8] 冯玮,王晓刚. 高压水射流破碎技术在水泥混凝土路面维修中的应用初探[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2013,12(1):20-21.
- [9] 张建新,张志利,郭肖鹏,等. 工程机械液压缸拆装设备研制[J]. 机床与液压,2015,24(20):128-130.
- [10] 张建新,李磊. 移动式数控火焰切割料架研制[J]. 制造技术与机床,2016,12(5):149-152.
- [11] 田海波,马宏伟,魏娟. 串联机器人机械臂工作空间与结构参数研究[J]. 农业机械学报,2013,12(4):196-201.
- [12] 张建新,汤晓华,张国胜,等. 移动式工程机械变速箱翻转台设计[J]. 筑路机械与施工机械化,2016,12(8):107-109.
- [13] 阎思达,陈雁,陈文卓. 六自由度加油机器人运动特性分析[J]. 液压气动与密封,2017(11):26-29.
- [14] 邓三鹏,杨文举,祁宇明,等. 超高压水射流破拆机器人液压系统设计与研究[J]. 液压与气动,2016,12(1):91-94.
- [15] 桑勇,王旭东,邵利来. 水下机器人液压缸O形密封圈有限元分析[J]. 液压气动与密封,2018(5):24-28.
- [16] 张建新,张兴会,王仲民,等. 海洋平台导管架清洗机器人步态研究[J]. 机械设计与制造,2017,12(4):250-252.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

张建新,刘斌,石路晶. 超高压水射流破拆机器人持枪机构设计[J]. 机电工程,2019,36(6):618-621.

ZHANG Jian-xin, LIU Bing, SHI Lu-jing. Gun holding mechanism for ultra-high pressure water jet robot[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(6):618-621.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>