

# 基于 LS-DYNA 的射流式液动锤回程动力外传机构研究

张鹏飞, 程靖清, 葛东, 彭视明

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:**设计一种改变冲击应力波在射流式液动锤内传播途径的结构,分析在不同传播途径中应力波衰减程度的改变,基于 LS-DYNA 显式动力学分析方法,对冲锤回程阶段进行仿真分析,探究冲锤回程冲击在液动锤内两种不同传播途径的模型中射流元件受到的应力变化。研究表明,动力外传机构通过避免对缸体上部的刚性碰撞,能大大降低射流元件所受到的冲击应力,并且外传机构的几何参数对应力的衰减也有一定的影响。

**关键词:**液动锤;射流元件;动力外传机构;LS-DYNA;冲击应力

**中图分类号:**P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)02-0071-04

## Power external transmission mechanism in return stroke of the jet type fluid hammer based on LS-DYNA

ZHANG Pengfei, CHENG Jingqing, GE Dong, PENG Jianming

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** A structure for changing the propagation ways of the impact stress wave in the jet type fluid hammer is designed, and analysis shows that the attenuation degree of the stress wave changes with different propagation ways. The simulation on the hammer return-stroke is analyzed based on LS-DYNA. The stress change of the fluid element is studied when the hammer impact is propagated in two different ways in the return stroke of the jet type fluid hammer. The results show that the power external transmission mechanism can greatly reduce the impact stress acting on the fluidic element by avoiding the rigid collision on the upper part of the cylinder. Moreover, the geometric parameters of the external transmission mechanism also have some influence on the stress attenuation.

**Key words:** jet type fluid hammer; fluidic element; power external transmission mechanism; LS-DYNA; impact stress

## 0 引言

硬岩的钻进效率在非常规油气资源与地热能资源的开发中日益重要。常规钻进技术如牙轮钻头、PDC 钻头回转钻进的方法在硬岩地层中钻进速度低,钻头寿命短,钻进成本高。潜孔锤钻进技术是目前硬岩钻进中最有效的技术方法之一<sup>[1]</sup>。大量的现场应用表明:在坚硬岩层中射流式液动锤与常规回

转钻进相比,钻速提高 50%,此外射流式液动潜孔锤射流束的附壁与切换原理,决定了该类液动锤不受孔内围压及孔深的影响,利于深孔钻进。

射流式液动锤在钻进中的钻速与冲锤冲击末速度密切相关,通过提高射流速度来提高冲击末速度是一个很好的途径。硬质合金材料的射流元件在高速射流中具有较强的耐冲蚀性,然而硬质合金是一

**收稿日期:**2018-06-23; **修回日期:**2018-12-17 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2019.02.013

**基金项目:**国土资源部公益性行业科研专项项目“干热岩快速钻井用高压高能射流式液动锤研究”(编号:2013111112)

**作者简介:**张鹏飞,男,汉族,1992 年生,在读硕士研究生,地质工程专业,主要研究方向为多工艺冲击回转钻进技术,zhangpf16@mails.jlu.edu.cn。

**通信作者:**彭视明,男,汉族,1975 年生,教授,博士生导师,主要从事多工艺冲击回转钻进技术研究和地质工程教学工作,吉林省长春市西民主大街 938 号,pengjim@jlu.edu.cn。

**引用格式:**张鹏飞,程靖清,葛东,等.基于 LS-DYNA 的射流式液动锤回程动力外传机构研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):71-74,85.

ZHANG Pengfei, CHENG Jingqing, GE Dong, et al. Power external transmission mechanism in return stroke of the jet type fluid hammer based on LS-DYNA[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(2):71-74,85.

种在冲击力下容易碎裂的脆性复合材料<sup>[2-3]</sup>。当活塞杆回程以相当大的末速度撞击缸体时,冲击应力波会将大量的能量通过缸体传递给射流元件,使射流元件很容易遭到冲击破坏,从而缩短液动锤的使用寿命。地面试验过程中,液动锤工作 1 min 左右后射流元件遭到破坏如图 1 所示。因此,有必要设计一种改变回程冲击应力传播途径的结构,此结构是将冲锤回程至上死点时,避免活塞杆与缸体的碰撞,将其转化为冲锤与中接头的碰撞。降低射流元件受到冲击应力的影响,并且结构简单、可靠,在复杂多变的钻孔环境中具有良好的适应性。



图 1 地面钻进试验过程中硬质合金射流元件遭受冲击破坏

Fig.1 Impact failure of tungsten carbide jet elements during surface drilling tests

## 1 冲击应力传播的理论分析

冲锤撞击中接头外传机构如图 2 所示,在常规的射流式液动锤工作中,冲锤回程至上死点时,活塞杆与缸体内缸发生撞击。活塞杆和冲锤组成的冲击部分与缸体形成了冲击机械系统,冲击机械原理在弹性动力学中有两种分析模型:机械振动与应力波传播,在这个回程撞击中缸体受到时间极短的冲击载荷,并且在作用方向上冲击部分与被冲击部分均为细长且独立的部件,撞击后接触面上只传递压力。所以撞击产生的能量以应力波的形式传递给射流元件。在设计外传机构的液动锤中,在保证活塞杆冲程与回程路程匹配的同时,通过增加内缸行程的长度使活塞杆在撞击内缸之前撞击中接头。在同一均匀介质中的应力峰值随传播距离的变化可表述为  $\sigma = \sigma_0 x^{-\alpha}$  (式中  $\sigma_0$  为介质中某一点的应力)。平面应变状态下,应力峰值在线弹性体中的衰减指数  $\alpha$  是一个随着应力峰值降低(或传播距离增加)而增加且

大于 1 的值<sup>[4-5]</sup>。 $l = x/x_0$  为应力波传播的相对距离,取  $x_0$  为单位距离, $x$  为到应力峰值的距离,应力峰值随传播距离的增加而下降。

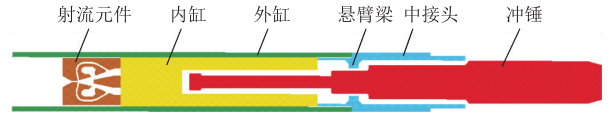


图 2 冲锤撞击中接头外传机构示意图

Fig.2 Schematic diagram of external transmission mechanism through a middle connector during impact of the hammer

除此之外,中接头与缸体之间还存在着缸盖等一系列结构,这样又增加了接触面的数量。在应力波传播的过程中,接触面被称为低速夹层介质,应力波到达这些结构面的时候将发生反射和透射现象,透射波波幅大幅度衰减后会传递给缸体与外管,反射波会带走大量的能量,导致应力波的衰减以及能量的衰减<sup>[6-9]</sup>。

## 2 碰撞模型的建立及边界条件

通过 solidworks 软件建立“冲锤撞击中接头外传机构”与“冲锤撞击缸体”简化模型,缸体顶部余留的厚度为 60 mm。中接头的悬臂梁分别设计了 5 种不同的厚度与 5 种不同的延伸长度(如图 3 与图 4 所示)。

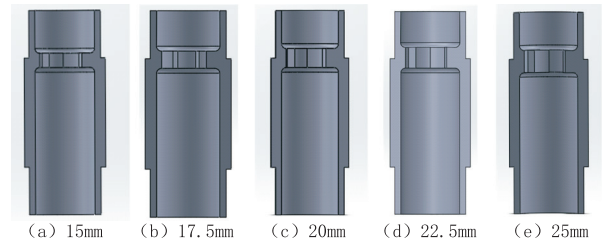


图 3 中接头悬臂梁延伸长度均为 8 mm,厚度不同

Fig.3 The middle connectors with the cantilever beams length of 8mm and different in thickness

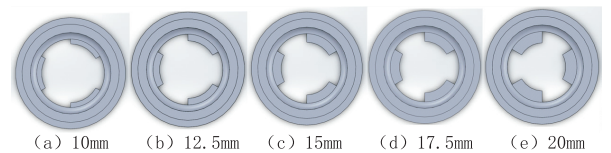


图 4 中接头悬臂梁厚度均为 15 mm,延伸长度不同

Fig.4 The middle connectors with the cantilever beams thickness of 15mm and different in length

采用 Hypermesh 软件在保证计算精度要求的前提下划分自适应网格,对以上模型采用四面体单元进行划分<sup>[10-13]</sup>。由于模型组件较多,四面体网格便于精确捕捉受力点位置,并且在组件较多的情况

下能保证网格与模型较好的贴合。为了进一步提高计算精度,射流元件部分进行网格加密,并且在保证曲率连续的基础上,通过去除和合并多余的边界对曲面拟合模型进行几何修补,单元均采用 solid164 实体单元,单元总数均在 60 万左右。各部件网格模型如图 5 所示。

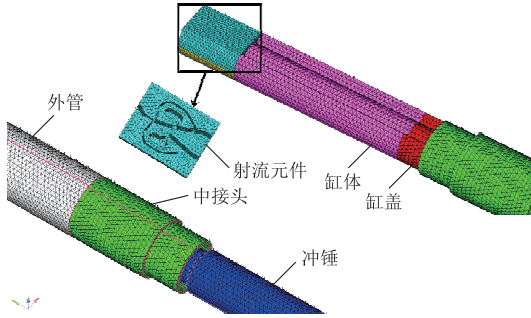


图 5 各部件的网格模型图  
Fig.5 Grid model of components

材料模型均为线弹性材料模型,射流元件的材料为 WC-Co 类硬质合金,其余部件的材料均为合金钢 35CrMo,两种材料力学参数如表 1 所示。各部件之间均为“面一面”自接触。在模拟计算中忽略重力影响,冲锤活塞系统回程末速度为轴向 8 m/s,计算时间步长设置 0.00005 s,计算总时间为 0.05 s。

表 1 两种不同材料的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of two different materials

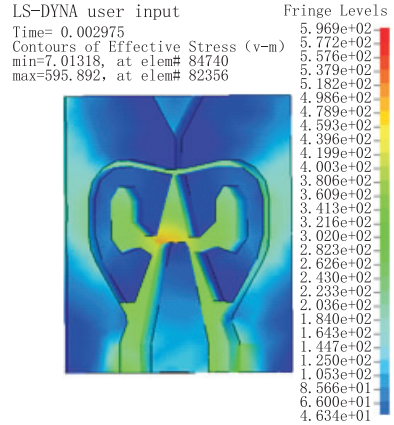
材料类型	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
35CrMo	7.85	206	0.30
YG11C	14.80	588	0.22

### 3 模拟结果与分析

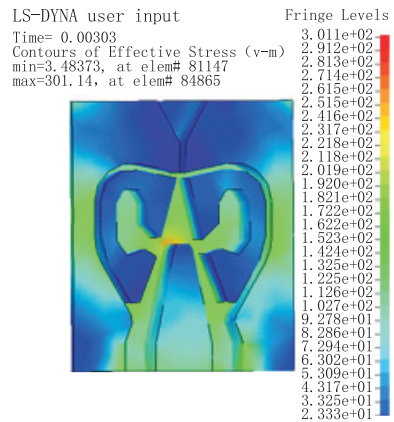
#### 3.1 中接头对射流元件应力强度的影响分析

将活塞杆冲锤系统直接撞击缸体情况下射流元件的应力分布云图(图 6a),与冲锤撞击中接头情况下射流元件的应力分布云图(图 6b)作比较,可以看出射流元件所受到的应力主要集中在具有棱边的应力集中部位与薄弱部位<sup>[14-15]</sup>,这与实际情况是相符的,并且实验过程中破碎部位也是沿着应力图中应力集中部位破坏的。二者最大应力分别为 596 和 301 MPa,可以看出通过这种改变并延长应力传播途径的方式能大幅降低射流元件所受到的最大应力,降低幅度约为 48%。硬质合金的疲劳极限为 1250 MPa,但由于射流元件结构复杂,在加工过程

中难免出现微小的裂纹,这会相应地降低硬质合金的疲劳强度。所以,采取一定的措施来降低射流元件受到的应力是非常有必要的。而我们通过采用中接头与冲锤的碰撞大幅度降低了射流元件所受到的最大应力,有效地保护了液动锤的核心部件——射流元件。



(a)



(b)

图 6 射流元件应力云图

Fig.6 Stress nephogram of fluidic element

#### 3.2 悬臂梁尺寸对射流元件应力强度影响分析

通过改变中接头悬臂梁结构参数的模拟组,射流元件中最大应力与悬臂梁厚度关系和最大应力与悬臂梁长度关系如图 7 所示。从图中可以看出,增加悬臂梁厚度与减小悬臂梁长度均能小幅度降低射流元件所受到的最大应力。随着悬臂梁厚度的增加,射流元件所受到的最大应力的降幅越来越小,并且随着悬臂梁厚度增加,中接头内部空间越来越紧张导致液动锤整体的尺寸增加,所以在能有效地降低射流元件所受最大应力情况下,适当增加中接头悬臂梁厚度即可。同样从图中可以看出,减少悬臂梁长度会小幅降低射流元件所受的应力,但悬臂梁



长度过短会致使悬臂梁容易被冲击破坏甚至冲锤穿过悬臂梁致使动力外传装置失效,所以权衡利弊选取最佳尺寸即可。

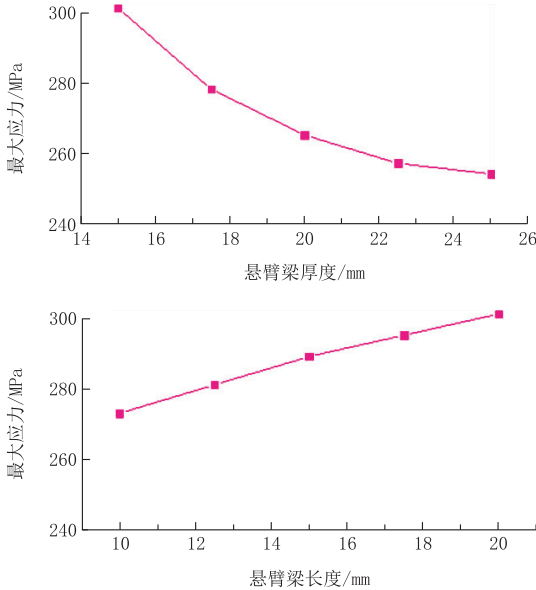


图7 改变悬臂梁结构尺寸对射流元件最大应力的影响

Fig.7 Effect of changing cantilever structure size on the maximum stress of the fluidic element

#### 4 结论

本文以冲锤与中接头相撞代替活塞杆与缸体相撞研究分析了增加动力外传装置对射流元件受的回程冲击的影响,并利用 LS-DYNA 显式非线性动力学分析方法,分别建立了“冲锤撞击中接头”和“活塞杆撞击缸体”碰撞模型,并通过改变中接头悬臂梁的参数探究其对射流元件所受冲击应力的影响。结论如下:

(1)动力外传装置通过改变应力传播途径,延长了冲击应力的传播路径,增加反射波带走的能量,可使射流元件所受的最大应力降低 48%。表明本结构对于提高射流元件寿命具有可行性。

(2)应力集中部位出现在射流元件的沟槽薄弱部位,试验中射流元件也是沿着这些部位断裂开来的,这些脆弱的部位在今后的设计过程中应更加注意。

(3)通过改变中接头悬臂梁的长度与厚度参数会一定程度影响射流元件所受到的应力大小。在一定范围内,悬臂梁厚度越大长度越小射流元件所受到的最大应力越小。但是影响幅度较小,并且悬臂梁如果过厚或者过短都会产生一系列问题,所以衡

量取适合参数即可。

#### 参考文献(References):

- [1] Jian, Z. J., Sang, L., Hu, G. Q., et al. The Drilling experiment in geothermal well of DGSC - 203 type Hydro-Efflux hammer[J]. *Geology and Prospecting*, 2002,38(5):92-93.
- [2] 李亚林,刘咏,周永贵,等.梯度结构硬质合金的疲劳断裂[J]. *粉末冶金材料科学与工程*,2011,16(5):747-754.  
LI Yalin, LIU Yong, ZHOU Yonggui, et al. Fatigue fracture of functionally-graded cemented carbides[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2011, 16(5): 747-754.
- [3] 何剑,赵顺波,谷秀萍,等.锤击打入式预制桩断桩成因及处理研究[J].*中国港湾建设*,2002,(5):31-35.  
HE Jian, ZHAO Shunbo, GU Xiuping, et al. Causes for breaking of hammer-driven prefabricated piles and remedies for broken piles[J]. *China Harbour Engineering*, 2002,(5): 31-35.
- [4] 刘合,王秀喜.套损井整形冲击应力波的传播机理研究[J].*工程力学*,2005,22(4):206-210.  
LIU He, WANG Xiuxi. Mechanism of impact stress wave spread in reshaping of destroyed casing well[J]. *Engineering Mechanics*, 2005,22(4):206-210.
- [5] 尚嘉兰,沈乐天,赵坚.粗粒花岗岩闪长岩中应力波的传播衰减规律[J].*岩石力学与工程学报*,2001,20(2):212-215.  
SHANG Jialan, SHEN Letian, ZHAO Jian. Attenuation law of stress wave in the bukit timah granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001,20(2):212-215.
- [6] 杨冬冬,李国琳,纪天坤,等.基于 LS-DYNA 的射流式液动锤活塞回程缓冲结构的研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016,43(5):37-40.  
YANG Dongdong, LI Guolin, JI Tiankun, et al. Research on disc spring buffering the backward impact of piston of liquid-jet hydraulic hammer based on LS-DYNA[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016,43(5): 37-40.
- [7] 吴东宇.高能射流式液动锤冲击系统理论研究及关键结构优化分析[D].吉林长春:吉林大学,2017.  
WU Dongyu. Study on impact system based on fluidic hammer with high impact energy and optimizing analysis of other key structures[D]. Changchun Jilin: Jilin University, 2017.
- [8] 黄中伟,杨磊.应力冲击波在结构节点的反射和透射[J].*深圳大学学报(理工版)*,2007,24(1):9-12.  
HUANG Zhongwei, YANG Lei. Reflection and transmission of stress shock wave at structure node[J]. *Journal of Shenzhen University (Science & Engineering)*, 2007,24(1): 9-12.
- [9] 李娜娜,李建春,李海波,等.节理接触面对应力波传播影响的 SHPB 试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2015,34(10):1994-2000.  
LI Nana, LI Jianchun, LI Haibo, et al. SHPB experiment on influence of contact area of joints on propagation of stress wave [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015,34(10):1994-2000.