

全地层自适应绳索取心钻具割心机构优化

徐世毅¹, 王 胜^{*1}, 舒智宏², 李冰乐¹, 张 洁¹

(1.成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都 610059;

2.四川省建筑科学研究院有限公司,四川 成都 610081)

摘要:我国资源勘探逐渐向深层勘探发展,由于我国地域辽阔,遇到的地层具有相当的复杂性和多样性,给深部资源勘查工作带来较大困难。绳索取心因其“四高、三低、两好”的优点成为目前深部资源勘查工作常用的取心方法之一,但依然存在复杂地层岩心采取率低、内管打捞失败等缺点。为了提高绳索取心钻具在复杂地层的岩心采取率,对S75型钻具的割心机构进行了结构性优化,针对基础设计采用ABAQUS进行动态模拟仿真。结果表明,改进后的钻具尺寸合理,结构紧凑,可以实现采用一套钻具完成复杂地层的取心工作,具有全地层自适应能力,不需在钻遇松散软、硬脆碎地层时更换钻具,有效提高内管打捞成功率。

关键词:全地层自适应;绳索取心钻具;割心机构;ABAQUS仿真

中图分类号:P634 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2023)S1-0392-07

Optimization of core cutting mechanism of all-strata self-adaptive wire-line core drilling tool

XU Shiyi¹, WANG Sheng^{*1}, SHU Zhihong², LI Bingle¹, ZHANG Jie¹

(1.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,

Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China;

2.Sichuan Building Research Institute Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610081, China)

Abstract: The resource exploration is gradually developing into deep exploration in China. Due to the vast territory of China, the strata encountered are quite complex and diverse, which brings great difficulties to the exploration of deep resources. Wire-line coring has become one of the commonly used coring methods in deep resource exploration due to its advantages of “four high, three low and two good”. However, there are still some shortcomings such as low core recovery rate in complex strata and failure of pipe salvage. In order to improve the core recovery rate of wireline coring drilling tool in complex formation, the structural optimization of the cutting mechanism of S75 drilling tool was carried out, and the dynamic simulation was carried out by ABAQUS. The results show that the improved drilling tool has reasonable size and compact structure. It can realize the coring work in complex strata by using a set of drilling tools, has all-strata self-adaptive ability; and has the advantages of avoiding the replacement of drilling tools when drilling loose, soft, hard and brittle strata, and effectively avoiding the failure of internal pipe fishing.

Key words: all-strata self-adaptive; wire-line core drilling tool; center cutting mechanism; ABAQUS simulation

0 引言

能源安全是我国国家安全的重要组成部分,我

国浅表层资源勘探存量越来越少,资源勘探逐渐向深层勘探发展。“十四五”规划中,将“深空深地深海

收稿日期:2023-05-21; 修回日期:2023-07-25 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.062

基金项目:珠峰科学研究计划

第一作者:徐世毅,男,汉族,2000年生,地质工程专业,本科在读,研究方向为钻进新技术,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, xsy835786273@163.com。

通信作者:王胜,男,土家族,1982年生,教授,博士生导师,地质工程专业,博士,主要从事钻进新材料与新技术研究工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, yongyuandewangsheng@sina.com。

引用格式:徐世毅,王胜,舒智宏,等.全地层自适应绳索取心钻具割心机构优化[J].钻探工程,2023,50(S1):392-398.

XU Shiyi, WANG Sheng, SHU Zhihong, et al. Optimization of core cutting mechanism of all-strata self-adaptive wire-line core drilling tool[J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):392-398.

和极地探测”列为科技前沿领域攻关的项目之一,是强化国家战略科技力量的重要组成部分。

绳索取心钻进技术在深孔钻探中具有显著的优势,在国外先进地区早已成为一种常规钻探技术。美国、加拿大以及澳大利亚等国家的绳索取心钻进工作量早在20世纪70年代就占金刚石岩心钻探工作量的90%。我国由于起步较晚,绳索取心钻进技术应用水平还达不到世界先进水平。但随着我国钻探行业的发展,绳索取心钻进技术将在深孔钻探中得到进一步应用^[1]。

由于我国幅员辽阔,在钻探过程中遇到的地层具有相当的复杂性和多样性。仅仅是我国境内青藏高原地区,就面临着活动断裂与工程断错、特殊岩土体与不良工程地质特性、高地应力与高温热害等问题^[2]。不少深部勘查项目都指出,青藏高原地区存在地质构造作用较强烈,地应力大,褶皱、断裂较发育,地层破碎严重等问题^[3-4],给钻探工作带来较大困难。

绳索取心钻进被广泛认为拥有“四高、三低、两好”的优点,即工程质量高、时间利用率高、钻进效率高、钻头寿命高;事故率低、劳动强度低、设备材料消耗低;地质效果好、经济效益好^[5]。随着钻孔的不断加深,绳索取心钻进逐渐向深地深海及大尺寸发

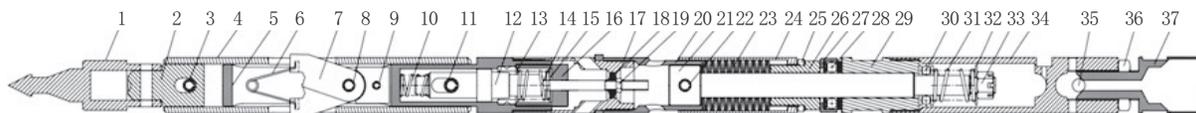
展^[6-10],遇到的地层条件与环境条件变得更为复杂,深孔复杂地层绳索取心钻进面临着严峻的挑战^[11-12],同时存在诸如松散、破碎地层岩心采取率低、内管打捞失效、卡钻等问题。亟需对存在的问题进行合理分析与解决,以满足深孔复杂地层取心要求。因此,开展绳索取心钻进技术的深入研究,对于提高深孔复杂地层的钻进效率具有重要意义。

目前深孔复杂地层绳索取心钻进技术存在的问题主要包括内管钻具打捞失败、岩心卡断失效、冲洗液循环阻力大、到位报信机构可靠性较差、岩心易冲蚀、卡钻事故频繁等^[13]。为了针对性解决绳索取心钻进过程中遇到的问题,有必要对已有的绳索取心钻具进行改进设计,尽可能减少绳索取心钻进事故率,提高钻进效率和岩心采取率。

通过调研绳索取心钻具常见的问题,以实现复杂地层顺利取心为研究目标,对已有的绳索取心钻具的割心机构进行结构优化并借助ABAQUS进行动态模拟仿真,提出针对于复杂地层的绳索取心钻具结构优化方案。对于深部复杂地层快速高效岩心采取具有工程意义和实用价值。

1 钻具割心机构结构优化

选择S75型绳索取心钻具进行优化改进,图1为S75型绳索取心钻具结构图。



1—捞矛头;2—捞矛座;3—弹簧销;4—回收管;5—弹卡座;6—张簧;7—弹卡;8、9—弹卡销;10—复位簧;11—弹簧销;12—阀体;13—定位套;14—弹簧;15—垫圈;16—调节螺堵;17—悬挂接头;18—阀堵;19—螺母;20—接头;21—轴;22—弹簧销;23—碟簧;24—滑套;25—调节螺母;26—调节螺栓;27—轴承套;28—轴承;29—轴承座;30—轴承;31—弹簧;32—垫圈;33—螺母;34—弹簧座;35—钢球;36—调节螺母;37—调节接头

图1 绳索取心钻具装配

绳索取心钻具内管总成分为捞矛、弹卡定位、悬挂、到位报信、岩心堵塞报警、单动、内管保护、调节、扶正、内管、岩心卡取等机构^[14],设计的割心机构主要替代了S75型钻具内管总成调节接头以下的部分。

绳索取心钻进遇到坚硬致密地层时,由于卡簧内部磨损严重,未能及时更换,卡簧与岩心之间的摩擦系数降低,岩心管满后不能顺利拉断岩心,导致岩心采取率低,严重时岩心甚至可能全部丢失。另外,

目前野外应用的绳索取心钻具卡簧设计宽度较小,卡簧内表面与岩心外表面接触面积小,无法提供足够的摩擦力拉断岩心。而钻进松散破碎地层时,由于地层粘结性弱,岩心较破碎,易从割心工具孔隙内掉落,同时冲洗液冲蚀作用也会导致岩心流失,因此常常遇见松散软地层取不上岩心的情况^[15-16]。针对以上问题,有必要设计一种可以同时应用于坚硬致密地层和松散破碎地层的全地层取心工具,即全地层自适应取心工具。

新型取心机构引用了全封闭岩心爪,以同时满足钻进坚硬致密地层和松散破碎地层的要求。如图2(a)所示,在钻进中硬、坚硬地层时,新型割心机构以自锁式割心为主。在提钻过程中,由于岩心与岩心爪瓣之间存在较大的摩擦,使岩心被拔断,从而取出较完整的岩心,如图2(b)所示。

在遇到松软破碎地层时,新型割心机构的割心方式自动变为自锁式和重力加压力组合。如图3(a)中,在正常钻进时,松散的岩心向上运动,此时岩心爪张开。进行取心操作时,在岩心爪与岩心之间的摩擦力作用下,岩心爪会同拔取完整岩心时一样产生自锁,但是由于此时岩心的结构松散,岩心爪瓣会自动楔入松散破碎的岩心中,如图3(b)所示。继续提钻时,松散破碎岩心会在重力作用下压迫岩心

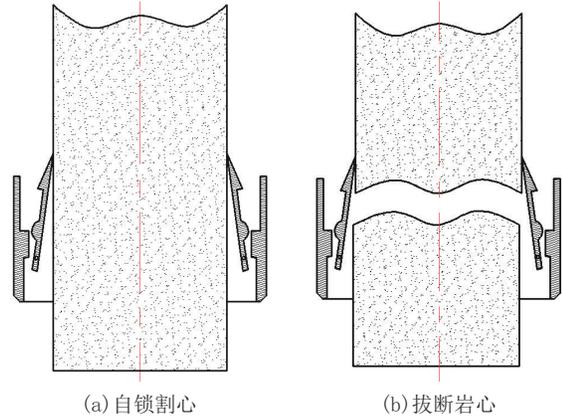


图2 新型取心工具拔取完整岩心示意

爪继续转动,进一步楔入岩心中直到完全割断岩心,此时岩心爪完全闭合形成全封闭状态(如图3c),有效避免了岩心丢失的情况,提高了岩心采取率。

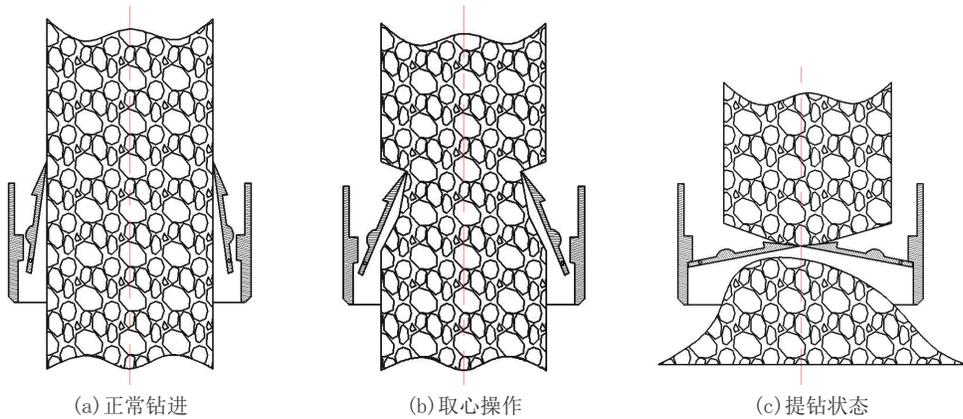


图3 新型取心工具遇破碎松软地层工作示意

通过以上设计,新型割心机构既能完成坚硬致密地层的取心目标,也能有效地防止松散破碎地层岩心掉落的风险,克服了传统绳索取心钻具在钻遇复杂地层时岩心采取情况不理想、需要频繁更换配套钻具的缺点,很大程度上提高了钻进效率。

是利用爪瓣对岩心进行切割;通过接头、转轴和岩心爪座的共同作用,实现岩心爪瓣只能绕转轴旋转运动的目的;岩心内容纳管主要起到保护岩心和岩心爪运动开关的作用,在钻进时抑制岩心爪运动,在割心时使岩心爪进入工作状态。

2 钻具割心机构尺寸设计

割心机构的基础设计如图4所示,其割心状态三维立体图如图5所示。割心机构主要由岩心内容纳管、岩心外容纳管、接头、岩心爪、转轴、岩心爪座共6个部分组成。其中岩心管主要起到保护岩心内容纳管和连接岩心爪座的作用;岩心爪座则是为了限制岩心爪瓣轴向运动,同时为切割岩心时的岩心爪瓣提供反作用力;岩心爪是由若干有弧度的三角形爪瓣组成(每片爪瓣结构参见图6),其主要作用

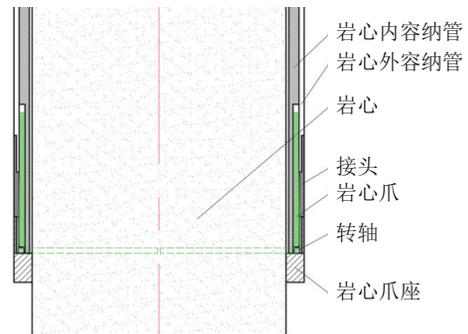


图4 割心机构基础设计

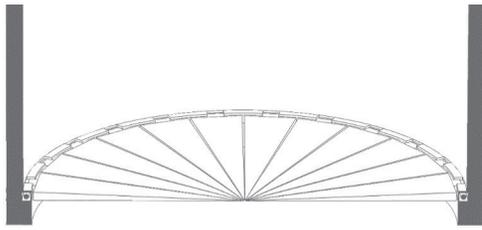
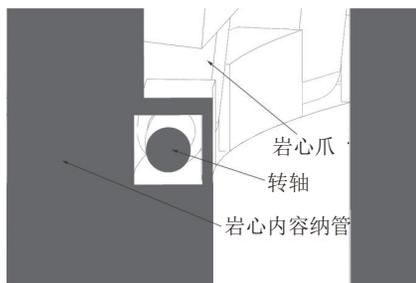
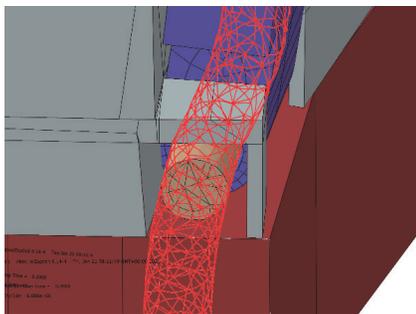


图5 割心状态

在钻进时,岩心通过钻头进入岩心内容纳管,此时岩心爪位于岩心内容纳管和岩心管之间的环空间隙中。由于岩心内容纳管的长度小于岩心管的长度,随着钻进过程的进行,岩心内容纳管将逐渐被岩心顶起,直到岩心内容纳管底面高于岩心爪。通过特殊的设计,岩心爪在未工作时也有绕转轴向内旋转的倾向。如图6(a)所示,接头底部用于安装转轴的凹槽内表面与岩心管内表面不在同一平面,因此岩心爪竖立时会迫使转轴产生形变,如图6(b)所示。当岩心内容纳管被顶起时,以岩心爪和接头的接触点为支点,岩心爪和支点形成了简易的杠杆,转轴形变产生的作用力就迫使岩心爪绕支点向内部旋转。起钻时,由于岩心爪顶部尖角紧贴岩心,自然位于岩心内容纳管与岩心之间的环空间隙中,在起钻时受拉力作用,岩心爪楔入岩心,达到切割岩心的效果。



(a) 转轴安装示意



(b) 转轴受力弯曲

图6 转轴受力弯曲示意

3 钻具割心机构仿真分析

3.1 岩心内容纳管仿真分析

3.1.1 建立源模型

为了研究割心机构薄壁岩心爪在实际应用中的使用情况,采用ABAQUS数值模拟软件进行模拟仿真。在岩心内容纳管的模型仿真中,根据设计尺寸建立模型。主部件和辅助部件一共10组,岩心爪、转轴、岩心内容纳管和外容纳管均采用常见的钢材材料参数设置,密度为 7.8 g/cm^3 ,各向同性,弹性本构,弹性模量为 207 GPa ,泊松比为 0.29 。岩心选用莫尔-库伦本构,按花岗岩参数进行岩心材料设置,弹性模量为 80 GPa ,泊松比为 0.1 ,内摩擦角 50° ,粘聚力 30 MPa 。

在岩心内容纳管的仿真过程中,岩心受力主要依靠岩心内容纳管对岩心爪的作用力提供,转轴变形提供给岩心爪的作用力相对于岩心内容纳管提供的作用力可以忽略不计。因此仿真时可以直接在初始分析步骤中将岩心爪、岩心、岩心内容纳管设置为岩心恰好顶起内容纳管、岩心爪还未落下的状态,划分网格后如图7所示。

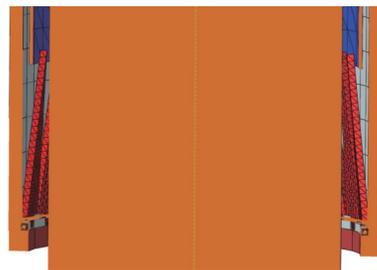


图7 岩心内容纳管模型装配与网格划分

模型仿真分析分为2个步骤,步骤1模拟岩心进入岩心内容纳管后,内容纳管在轴压作用下向下运动,然后与岩心爪相撞,使其楔入岩心的过程。步骤2模拟提钻时岩心与割心机构相对运动的过程。

步骤1中,边界条件设置为岩心外容纳管、接头和岩心爪底座完全固定,从而岩心内容纳管和岩心只能沿轴向运动,岩心爪绕转轴运动,荷载设置在岩心内容纳管上,为压应力。

步骤2中,保持步骤1中的荷载不变,在岩心底部另外施加拉应力,模拟岩心拉拔的过程。

3.1.2 仿真结果分析

提交仿真模型计算后得到仿真计算结果,其动态仿真过程如图8所示。

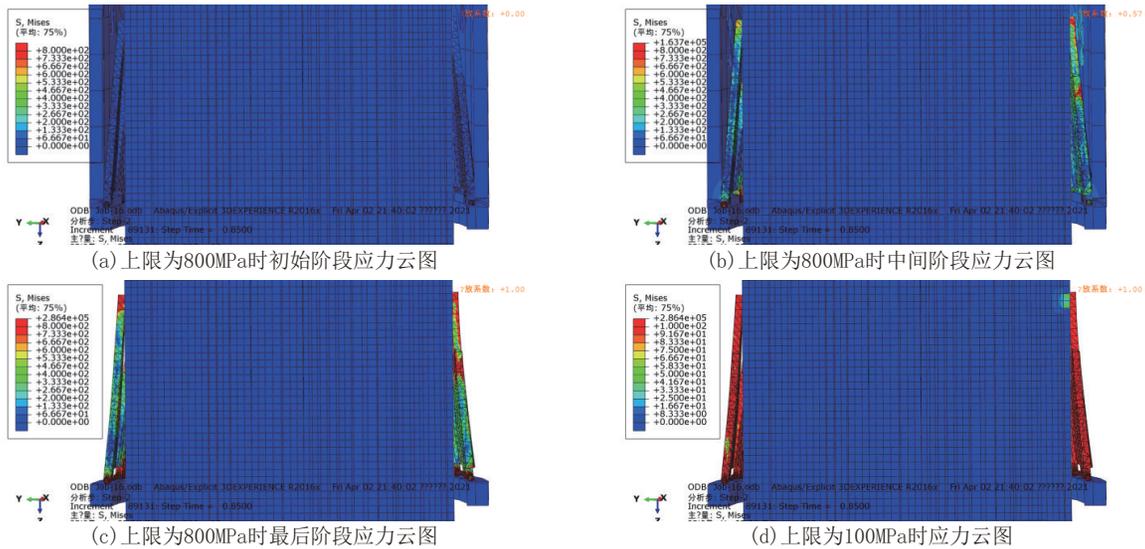


图8 岩心内容纳管动态仿真结果

如图8所示,(a)、(b)、(c)为岩心内容纳管压迫岩心的过程,可以看出岩心爪作用力逐渐增大,将应力云图上限调至800 MPa,可以看出全过程中岩心爪应力大部分在800 MPa以内,如图8(c)所示。将应力云图上限调至100 MPa,如图8(d)所示,可以看出,岩心爪对岩心的作用力最大在60 MPa左右,仍然达不到理论计算得到的作用应力,这可能是由于理论计算中忽略了岩心爪的尺寸影响,而现实当中岩心爪是有厚度的,可能存在变形的情况。因此,将岩心爪削尖并提高刚度应该能得到与理论计算相近的结果。

3.2 薄壁岩心爪仿真

3.2.1 建立源模型

由3.1.1可知,理论上来说模型中岩心爪削尖后得到的结果应该更接近理论计算结果,且由于厚岩心爪容易与岩心内容纳管发生碰撞导致岩心爪变形,为了减小岩心爪与岩心内容纳管碰撞的概率,可以将岩心爪顶端和岩心内容纳管底部削尖。为了验证薄壁岩心爪在实际应用中的使用情况,采用ABAQUS对薄壁岩心爪的工作情况进行模拟仿真,使用的参数与3.1.1节相同,图9是划分网格后的模型。

分析步骤和边界条件设置与3.1.1相同。

3.2.2 仿真结果分析

提交模型计算后得到仿真计算结果,其动态仿真过程如图10所示。

将仿真计算的应力云图上限调至200 MPa,可

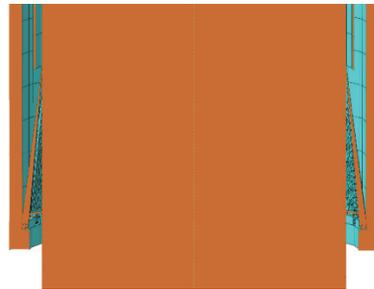


图9 薄壁岩心爪模型装配与网格划分

以看出,在岩心内容纳管施加作用力时,薄壁岩心爪也会给岩心施加一定的应力。如图10(c)、(d)所示,薄壁岩心爪施加给岩心的最大作用力在130~160 MPa之间,远大于厚壁岩心爪所能提供的最大作用力。这是由于薄壁岩心爪与岩心接触面积更小,相同作用力条件下能产生更大的应力。但是由于岩心爪过薄,因此仿真计算最终因岩心爪网格过度变形而中断,中断时岩心爪顶部过于扭曲,无法投入实际应用,只能尝试增加岩心爪材料刚度重新进行计算。

3.2.3 提高岩心爪刚度计算结果

在3.2.2节分析的基础上,将岩心爪刚度提高10倍后进行仿真分析。其余参数和设置保持不变。

随着施加在岩心内容纳管上的压力不断增大,岩心内容纳管上的应力也不断增大,当岩心内容纳管与岩心爪相接触时,岩心爪受到岩心内容纳管上的压力从而楔入岩心。将变形与应力云图上限调至200 MPa,如图11(a)所示,可以明显看出岩心爪顶部对岩心施加了较大的作用力,且岩心爪施加的作

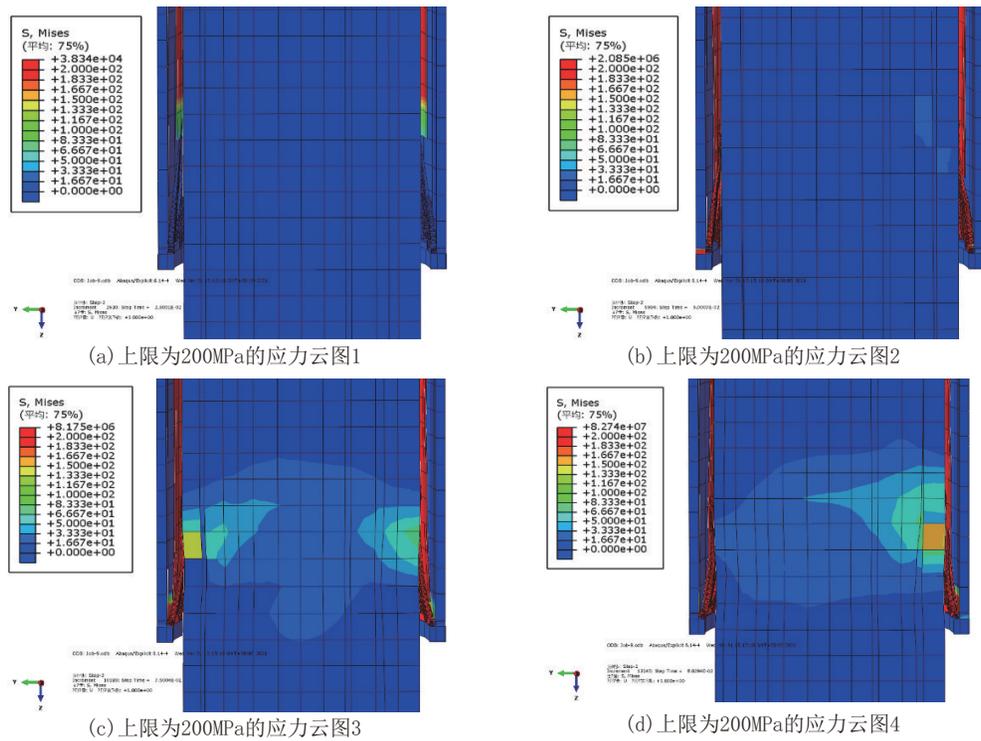


图 10 薄壁岩心爪动态仿真结果

用力大小范围在 20~2800 MPa 之间波动。图 11 (b)显示的是作用力最小的岩心爪,此时云图上限为 50 MPa,从图中可以看出岩心爪施加给岩心的作用力仅有 20~35 MPa。而岩心爪最大可施加 2000~

3000 MPa 的作用力,如图 11(c)所示,图中的显示上限已经被调为 3000 MPa,可以看出,岩心爪顶部尖端施加给岩心的作用力在 2800 MPa 左右。

从图 11(c)中还可以看出,在岩心爪楔入岩心

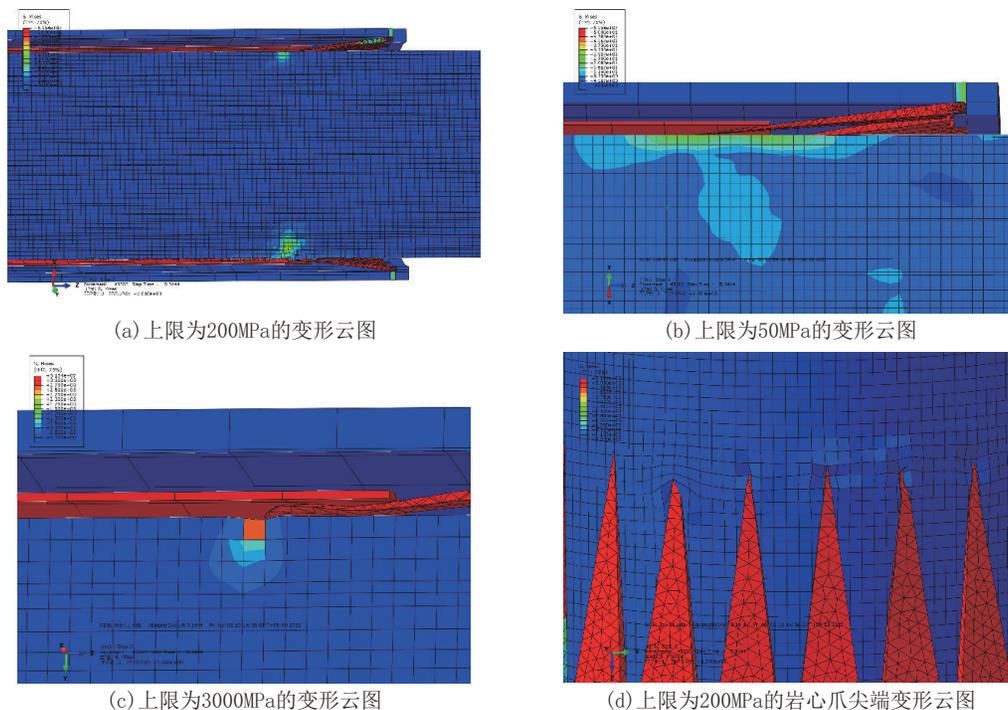


图 11 岩心与岩心爪应力变形云图

的过程中,岩心爪会产生一定的变形,进行仿真计算时,由于岩心爪尖端厚度接近于零,且斜率很小,几乎没有抵抗变形的能力,因此可以看出几乎所有岩心爪尖端都产生了不同程度的变形。但在实际生产中,做出这样的形状是极为困难的,都会在切削达到一定厚度后直接断裂,因此如果刚度能满足仿真条件,实际应用中岩心爪的尖端并不会产生这么剧烈的变形。同时从图 11(d)中可以看出,由于岩心爪的楔入力,岩心表面与岩心爪接触的地方发生了明显变形,形成凹槽,这与前文提到的岩心爪割心过程相符。

4 结论

(1)以实现全地层自适应绳索取心为研究目标,对已有绳索取心钻具的割心机构进行结构优化,研制出一种单动三管全封闭割心机构。

(2)经改进后的钻具在钻进硬岩地层时,在岩心内容纳管作用下,岩心爪顶部楔入岩心,岩心与钻具相对运动使岩心爪拔断岩心,达到硬岩地层取心的目标;钻进松散软及破碎地层时,岩心爪楔入岩心并继续向内旋转,形成全封闭状态,减少了钻进松散软及破碎地层时岩心掉落的风险。

(3)利用 ABAQUS 有限元分析软件对割心机构中的岩心内容纳管和薄壁岩心爪在岩心内容纳管有轴压的条件下进行仿真分析,针对基础设计存在的不足对割心机构进行了优化设计。结果表明改进后的割心机构能够避免薄壁岩心爪过度扭曲,满足复杂地层的取心要求。

(4)由于加工精度和设计方面的问题,没有对优化后的割心机构进行现场实验,因此无法客观评价其使用效果,后续将进一步对参数进行优化后重新加工一套钻具进行现场实践,从而验证其实际效果。

参考文献:

- [1] 李军委,李凤乐,魏冬哲. 矿山深孔钻探绳索取芯钻进技术的应用研究[J]. 世界有色金属, 2019(3): 281-283.
- [2] 郭长宝. “川藏铁路交通廊道关键地质问题研究”专辑评述[J]. 现代地质, 2021, 35(1): 1-2.
- [3] 徐国辉,马志明. 青海拉陵高里河沟脑矿区钻探技术研究[J]. 中国锰业, 2017, 35(5): 196-199.
- [4] 翟育峰. 西藏甲玛 3000 m 科学深钻施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(6): 8-12, 53.
- [5] 陈坚,胡海波. 绳索取芯钻探技术现状及在水文水井钻探的发展创新[J]. 林业科技情报, 2011, 43(3): 92-93.
- [6] CHEN Ying, DUAN Longchen, LU Yubei. Technical and economic evaluation for wire-line coring in large diameter deep drilling project in Salt Basin [J]. Procedia Engineering, 2014, 73: 63-70.
- [7] 郭秀钦,桂宝林,董树昆. S95煤层气井绳索取心工具[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(2): 76-78.
- [8] 彭奋飞. 针对海底钻机硬岩钻进的绳索取心钻具关键机构优化[J]. 地质与勘探, 2020, 56(1): 154-162.
- [9] 王佳亮,彭奋飞,万步炎,等. 海底钻机的高可靠绳索取心钻具的结构优化与仿真分析[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 206-211.
- [10] 刘协鲁,阮海龙,陈云龙,等. 国内常规海洋地质钻探取心技术进展[J]. 钻探工程, 2021, 48(3): 113-117.
- [11] 周云,张绍和. 浅孔复杂地层 $\Phi 110$ 型绳索取心钻具的研制与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 163-169.
- [12] 卢予北,吴焯,陈莹. 绳索取心工艺在大口径深部钻探中的应用研究[J]. 地质与勘探, 2012, 48(6): 1221-1228.
- [13] 于建丛. 深孔绳索取心钻具的结构优化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [14] 李世忠,等. 钻探工艺学(上册)[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [15] 牛军辉. 松散软及破碎地层绳索取心钻具的研制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- [16] 李鑫淼,刘秀美,尹浩,等. 深孔复杂地层绳索取心钻具优化设计思路[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(11): 56-59.

(编辑 周红军)