

软煤钻杆研究进展及发展趋势

聂百胜 薛斐

(中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院 北京 100083)

摘要:针对软煤钻杆研究及应用现状,基于不同的钻杆形式及排粉动力方式,介绍了不同钻杆的定义、适用范围、优缺点、排粉动力模型,并对软煤钻杆发展历程进行分析。通过对软煤打钻研究工作的分析,指出研究工作中的不足之处:软煤流变研究成果与软煤钻孔理论结合不足;排粉动力学及耦合排粉问题研究工作亟待深入;钻杆表面降阻问题未受足够重视;软煤钻孔孔壁固化研究发展缓慢;整体式成型技术有待推广。同时,指出了软煤钻杆的发展趋势,包括多动力耦合、多结构耦合、高强度钻杆、智能钻杆等方向。

关键词:松软煤层;钻杆;软煤流变;排粉动力模型

中图分类号:TD421; TP273 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2016)01-0047-08

Research progress and development tendency of borehole drilling rod for soft seam

Nie Baisheng, Xue Fei

(Faculty of Resources & Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: According to the study and application status of soft seam drilling rod, based on the different drilling rod mode and the dust removal dynamic mode, the paper introduced the definition, application scope, advantage and disadvantage, dust removal dynamic model of the different drilling rod and analysed the development course of soft coal drilling rod. With the analysis on the study work of soft coal drilling, the paper pointed out the disadvantages of the study work. The study results of the soft coal rheology and the soft coal drilling theory were not sufficiently integrated. The study work on the dust removal dynamics and coupling dust removal problem should be conducted deeply. The resistance reduction problem of the rod surface could not sufficiently be in attention. A study on consolidation of the borehole wall in soft seam was slowly progressed. The integrated prototyping technology was to be promoted. Meanwhile, the paper pointed out the development tendency of the soft seam drilling rod, including the multi power coupling, multi structure coupling, high strength drilling rod, intelligent drilling rod and other orientation.

Key words: soft seam; drilling rod; soft coal rheology; dust removal dynamic model

0 引言

松软煤层是指煤体普氏系数 f 小于 1 的煤层或分层,它是地质构造的产物,主要是由于断层和层滑等原因所形成,所以也称松软煤层为构造煤层。松软煤层具有煤体力学强度低、瓦斯解吸速度快、瓦斯含量及瓦斯压力相对较高的特征,厚度变化较大,可以从几厘米到几米。松软煤层打钻成孔一直是困扰

煤炭行业的一大难题,目前,在 f 小于 0.3 的煤层中,成孔深度仅有数十米,严重制约了瓦斯抽采研究工作的进展。由于松软煤层力学强度低,在钻头和钻杆的公转扰动下,会经常出现大范围塌孔,形成钻穴^[1];同时,由于松软煤层瓦斯含量及压力大,瓦斯解吸速度快,会在钻孔前方形成高压区,出现顶钻、喷孔等瓦斯动力现象^[2-3],以上 2 种情况均会造成夹钻、抱钻事故,迫使打钻作业停止,严重的还会造

收稿日期:2015-07-03;责任编辑:赵瑞 DOI:10.13199/j.cnki.est.2016.01.008

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB201202);国家自然科学基金面上资助项目(E041003);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009K03)

作者简介:聂百胜(1973—),男,山西平陆人,教授,博士生导师。通信作者:薛斐,博士研究生,E-mail:594762090@qq.com

引用格式:聂百胜,薛斐.软煤钻杆研究进展及发展趋势[J].煤炭科学技术,2016,44(1):47-54.

Nie Baisheng, Xue Fei. Research progress and development tendency of borehole drilling rod for soft seam [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1):47-54.

成安全事故。

近些年来,国内外学者对软煤打钻问题进行了较为详尽的研究,取得了一定成果。其中,理论研究主要集中在软煤钻孔孔壁失稳理论^[4-7]、气固耦合两相流理论^[8-12]、螺旋排渣动力学理论^[13-14]等;试验研究主要包括新型钻杆的设计开发^[15]、风力排渣与机械排渣的优化设计^[16]等。除此之外,钻杆强度方面的研究也取得了一定进展^[17-18],新材料、新工艺被不断引入到钻杆设计及制造中。

在松软煤层打钻过程中使用或曾经使用过的主流钻杆包括地质钻杆、螺旋钻杆、肋骨钻杆、三棱钻杆、刻槽钻杆,上述钻杆具有不同的结构形状以及排渣动力方式。同时,结合多种排渣动力或结构于一身的新型钻杆也在推陈出新,逐渐满足松软煤层打钻的需要。

1 软煤钻杆现状及发展历程分析

1.1 地质钻杆

地质钻杆又称为外平钻杆或光面钻杆,其断面为圆环形状,内部中空,可通高压水或高压风流,外壁光滑,如图1所示。地质钻杆最初应用于岩石钻孔,在岩石中打钻时,利用高压水进行排渣,后被引入到煤层打钻领域^[19]。



图1 地质钻杆实物

Fig. 1 Physical picture of geological drilling rod

在硬煤或中硬度煤体中,由于煤层赋存条件好、煤体力学性质较为稳定,水力排渣不会造成孔壁破坏,更不会出现塌孔事故;同时,块煤或大粒度煤在高压水的作用下,全部被携出钻孔,排渣系统较为可靠。因此,水力排渣最适用于普氏系数在中硬度煤以上的煤体。

在松软煤层中打钻时,一方面,煤体极为松软,稍有扰动就会出现塌孔事故,水力排渣对孔壁冲蚀作用强烈,极容易引发大范围塌孔事故;另一方面,孔底煤体经钻头破碎后普遍粒径很小,多呈粉状,与水混合后,会在孔内形成煤泥,更加阻滞了排渣系统。因此,水力排渣逐渐被风力排渣系统取代,地质钻杆内部也开始使用风力进行排渣,地质钻杆风力排渣模型如图2所示。

风流对孔壁扰动要明显小于水流,同时,风流可与煤粉颗粒群形成气固耦合两相流体,共同排出钻

孔,不会对钻孔造成任何堵塞。因此,在所有软煤钻杆排渣系统中,流体排渣基本使用风力排渣形式。

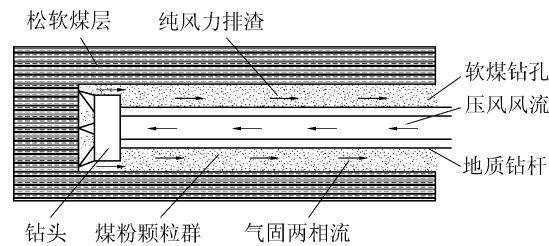


图2 地质钻杆风力排渣模型

Fig. 2 Cuttings transport model of geological drilling rod

然而,基于风力排渣的地质钻杆也不适用于软煤打钻领域。一方面,风力排渣需要具有一定的扬渣能力,而地质钻杆为光面圆形,仅可以依靠摩擦力扬渣,扬渣能力微乎其微;另一方面,一旦出现塌孔事故,由于排粉系统失效,钻机无法继续推进,钻杆只能原地打转,并产生大量热量,此时,极有可能出现钻杆燃烧事故,引发安全事故。

1.2 螺旋钻杆

螺旋钻杆是在地质钻杆高转矩性能的基础上,采用单螺旋叶片或双螺旋叶片,经预应力缠绕工艺加工焊接而成,内部实心,不通风,两端接口方式为销扣连接,如图3所示。在基于风力排渣的传统地质钻杆无法解决排渣难题后,研制了基于钻杆自身旋转动力的机械螺旋排渣方式的螺旋钻杆。



图3 螺旋钻杆实物

Fig. 3 Physical picture of helix drilling rod

目前,认可度较高的螺旋排渣力学模型为:螺旋叶片在围绕轴心公转的过程中,对煤粉颗粒群施加垂直于接触面的正压力,与主轴夹角为 α ;同时,对煤粉还存在一个滑动摩擦力,摩擦力与正应力夹角为摩擦角 φ 。假设钻杆上距离轴心为 r 的一点 O 处存在煤粉颗粒 M , O 点自转线速度为 V_0 , M 颗粒在正应力和摩擦力的作用下分别具有 V_n 和 V_t 两个分速度,合成分运动速度为 V_0 ,再次正交分解后, M 颗粒环向运动速度为 V_2 ,小于 V_0 ,轴向运动速度为 V_1 ,煤粉颗粒运动分析如图4a所示。煤粉颗粒群在合力作用下围绕轴线作公转运动,同时沿着轴线向孔口方向运动。若将螺旋钻杆视作固定不动,则煤粉运动为沿着螺旋槽体作螺旋排出运动,其纯机械排渣模型如图4b所示^[16-20]。

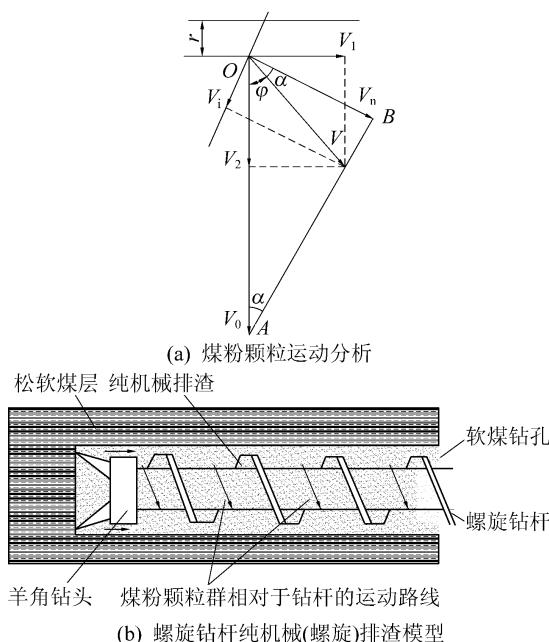


图4 煤粉颗粒运动分析及螺旋钻杆纯机械排渣模型

Fig. 4 Mechanical analysis of single coal powder and cuttings transport model of helix drilling rod

螺旋钻杆较为适用于软煤打钻主要原因:①其螺旋叶片对于煤粉的推动力作用比对块煤的推动力作用更加平稳,携渣量也更大;②在遇到塌孔状况时,可继续依靠螺旋槽体逐步排渣,而风力排渣在此种情况下无法有效排渣;③螺旋排渣无需外接动力源,安装及施工较为方便,大幅提高了钻进效率。

螺旋钻杆也存在如下不足:螺旋排渣相对风力排渣而言,单位时间排渣量较小;螺旋钻杆所需转矩较大,在煤粉量较大的情况下,特别是塌孔后,螺旋钻杆易出现扭断钻杆的现象。

1.3 三棱钻杆

三棱钻杆是一种基于三角形结构的钻杆,外壁形状为类三角形,内部中空,三角形的3个棱设计为圆弧形,可以有效减小转矩,如图5所示。针对地质钻杆无法有效解决软煤排渣问题,研制了三棱钻杆。目前,三棱钻杆作为一种有效的软煤钻杆,得到了一定的推广。



图5 三棱钻杆实物

Fig. 5 Physical picture of tri-angular drilling rod

三棱钻杆对于煤粉的排出也是依靠压风系统实现的。三棱钻杆的断面呈类三角形,3个相对突出的圆弧棱边可以在公转过程中对孔内煤粉颗粒群起

到搅动作用,煤粉时刻处于环向和径向运动中,特别是钻孔断面下半部分的煤粉,搅动效果尤为明显。在风力排渣的作用下,运动中的煤粉更易被排出钻孔,达到有效排粉的目的^[21]。三棱钻杆风力排渣模型如图6所示。

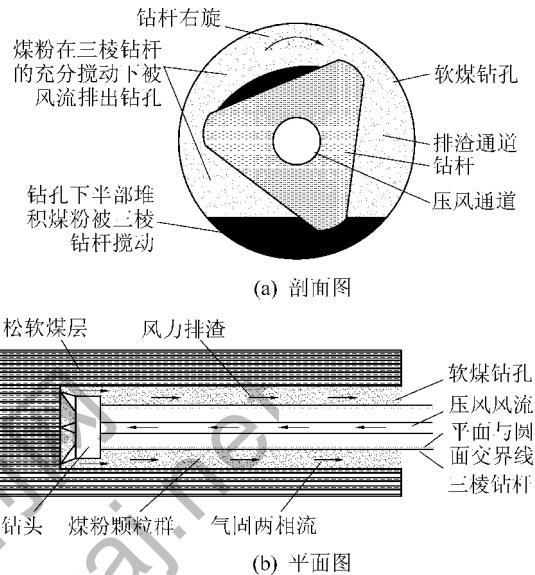


图6 三棱钻杆风力排渣模型

Fig. 6 Cuttings transport model of tri-angular drilling rod

三棱钻杆可以适用于不同硬度煤体,但由于硬煤钻孔可以利用水力排渣,排渣问题很小,因此三棱钻杆在硬煤排渣中价值一般,也就是说,三棱钻杆更适用于软煤打钻过程,在软煤中价值更大。三棱钻杆的优势主要体现在以下2点:①三棱钻杆利用风力进行排渣,排渣量较螺旋钻杆而言大幅增加;②三棱钻杆对于煤粉的搅动作用可以使煤粉时刻保持环向及径向运动,煤粉在钻孔断面的分布较为平均,风力排渣的效率及能量利用率大幅增加,对风力排渣起到助推作用。

三棱钻杆也存在以下缺点:①三棱钻杆仅依靠风力排渣,当风力排渣失效时,三棱钻杆也即失效;②三棱钻杆在遇到塌孔、“抱钻”事故后,由于结构设计的因素,转矩会非常大,强制转动经常会引起钻杆断裂事故,导致打钻作业停止。

1.4 肋骨钻杆

肋骨钻杆也称低螺旋钻杆,是在螺旋钻杆设计思路的基础上改进得到的,内部中空,可以通风。由于螺旋钻杆叶片较高,对风力排渣的阻碍非常大,基本只能依靠螺旋排渣方式钻进,钻进效率完全依赖于螺旋槽体深度、螺旋升角、钻机动力等因素,无法利用井下压风系统的动力,因此,在其基础上,适度

降低螺旋叶片的高度,在保证一定螺旋排渣能力的前提下,增大风力排渣所起的作用^[22]。肋骨钻杆可以认为是真正意义上的双动力钻杆——机械动力排渣和风力排渣,如图7所示。



图7 肋骨钻杆实物

Fig. 7 Physical picture of rib-like drilling rod

肋骨钻杆螺旋叶片较低,风力排渣是其最主要的排渣手段,同时也具有一定的机械排渣能力,排渣模型如图8所示。其基本原理是:在由叶片外径与孔壁组成的环状间隙中,风力排渣起绝对主导作用;而在螺旋槽体内,机械排渣起作用;在正常钻进过程中,风力排渣可将绝大多数煤粉排出钻孔,螺旋槽体辅助排渣;若遇到塌孔等事故,风力排渣暂时失效,此时,螺旋排渣起主导作用,逐步“扒孔”、清孔,最终使钻孔疏导,继续钻进。

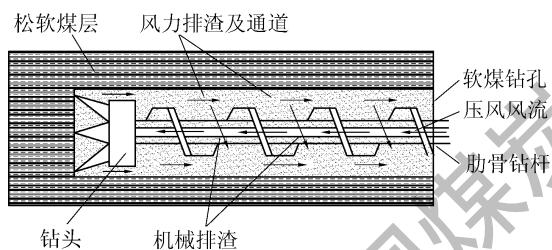


图8 肋骨钻杆风力+机械排渣模型

Fig. 8 Cuttings transport model of rib-like drilling rod

肋骨钻杆的最大优势在于,它兼具了地质钻杆与螺旋钻杆的优点,同时具备2种排渣方式。这就使得肋骨钻杆在保证高效的钻进排粉的情况下,具备了处理塌孔和抱钻的能力,这对肋骨钻杆的推广具有重要意义。

正因为肋骨钻杆具备了2种钻杆的特点,它也具有2种钻杆的不足:①风力排渣与机械排渣具有一定的冲突性,即增加螺旋叶片高度就会降低风力排渣能力,而增加风力排渣能力势必要降低螺旋排渣的输送能力,这种冲突是一种此消彼长的关系,而且会一直存在;②螺旋叶片会对风流产生扰动,影响风力排渣效果;③由于增加了风力排渣,螺旋叶片降低,在遇到塌孔事故时,机械排渣效率相对于螺旋钻杆显著降低,清孔能力也降低了许多。

1.5 刻槽钻杆

刻槽钻杆是在地质钻杆的外壁上刻出螺旋槽体,并使其具有一定机械排渣能力的钻杆^[15],如图

9所示。刻槽钻杆实质上与肋骨钻杆排渣机理一致,只是在同一螺旋升角的情况下,刻槽钻杆的螺旋槽体宽度变化范围较大,而肋骨钻杆的螺旋叶片宽度变化范围很小。刻槽钻杆也是目前软煤钻杆领域发展的方向之一。



图9 刻槽钻杆实物

Fig. 9 Physical picture of trenched drilling rod

1.6 软煤钻杆

软煤钻杆的发展经历了从借鉴地勘、硬煤钻杆到针对松软煤层特点而设计的软煤专用钻杆的过程,在设计思路以及对软煤打钻的认识上,产生了重要的变革。

1) 软煤钻杆设计的发展历程。松软煤层中最先引入的是地质钻杆,排渣方式为水力排渣,这样的设计主要是为了适应硬岩、硬煤钻孔钻进排渣的需要,然而地质钻杆与水力排渣的组合并不适用于松软煤层,风力排渣逐渐取代水力排渣;由于地质钻杆无法处理塌孔事故,螺旋钻杆被引入软煤打钻领域,螺旋钻杆排渣较为稳定,对解决夹钻、抱钻难题具有一定的优势,然而,其排渣速率有限,且无法利用外部排渣动力,这一点限制了螺旋钻杆的进一步推广;在此之后,三棱钻杆被研发并推广,其价值主要在于更好地利用风力排渣降低塌孔危害,三棱钻杆棱边可以不断搅拌煤粉,充分利用风力排渣,但是失去了螺旋排渣的功能,无法有效处理夹钻事故;肋骨钻杆、刻槽钻杆原理相同,在设计思路上结合了风力排渣、机械排渣的优势,不仅具有风力排渣的高排渣效率,也具有机械排渣处理塌孔事故的能力。综上所述,软煤钻杆的设计思路由原来的单一结构和形式逐渐向多结构、多形式的方向发展。

2) 软煤钻杆认识的发展历程。随着软煤钻杆研究的进行,对于软煤钻杆的认知深度也在不断发展,这也是钻杆设计思路发展的本质原因。地质钻杆外形为圆形,虽然可以利用风力进行排渣,但是圆形的外壁对于夹钻事故基本没有处理能力;螺旋钻杆则恰好相反,其核心是螺旋槽体,螺旋槽体具有处理夹钻事故的能力,但是不能利用风力排渣,其排渣量与转速、螺距、环状间隙等参数有关;三棱钻杆的棱边结构可以搅拌煤粉,使煤粉在钻孔内环向、径向运动,提高风力排渣效果;肋骨钻杆、刻槽钻杆是将圆形外壁结构与螺旋槽体结构结合起来,两者存在

一定冲突,研究的方向在于结构参数的最优化。

2 软煤打钻研究现状分析

2.1 软煤流变研究成果与软煤钻孔理论结合不足

松软煤层打钻成孔的外部环境是 f 普遍小于1(甚至小于0.3~0.5)的松软媒体,其物理力学特性更接近于黏塑性材料,强度较低而流变性较大,在较低应力水平之下即可进入加速蠕变阶段直至破坏。

目前,软煤打钻的研究工作还主要集中在钻杆设计以及钻孔排粉的问题上,并未与软煤流变的研究成果很好地结合起来。孙玉宁教授^[1]提出的“钻穴”概念在软煤打钻领域具有重要意义,首次指出松软煤层成孔深度很大程度上依赖于钻穴位置。然而,钻穴的研究还仅限于定性研究阶段,并未进入到定量研究阶段,更未与软煤流变的定量研究成果相结合。也就是说,软煤岩流变理论中的经典模型,如伯格斯(Burgers)模型、西原模型,以及基于上述模型的修正模型,如广义西原模型、西原加速模型^[23]等并未融入到软煤打钻的理论研究中,也就无法为软煤打钻问题提供足够的理论支持。

软煤打钻问题需要足够的理论支持才能进一步发展,特别是软煤流变理论的支撑,只有将软煤流变研究成果应用于软煤打钻问题上,才能在打钻之前预测钻孔流变情况,为实际打钻作业提供理论指导和相应地保护工作。

2.2 排粉动力学及耦合排粉问题有待进一步研究

排粉动力学是指钻孔排粉过程中的力学分析问题和转矩计算问题,是软煤钻孔排粉问题的基础问题。目前,针对软煤钻杆的排粉动力学分析较少,仅出现在螺旋排渣的力学计算方面,风力排渣的理论及试验研究工作也不够深入,文献较少;不同形式排粉的耦合分析与计算尚属空白,试验与数值模拟工作还停留在单一形式的研究,例如仅对螺旋排渣或风力排渣进行参数优化,这对于钻杆不同排粉结构之间的耦合设计是不利的。

对于排粉动力学的研究以及耦合排粉问题的研究是必然趋势。只有在此基础上,钻杆的设计工作才能够有的放矢,正确选择排粉结构、正确计算和设计结构参数,使排粉过程更加科学。

2.3 钻杆表面降阻问题未受足够重视

钻杆在松软煤层中钻进时,需要克服煤粉颗粒群作用在钻杆表面的转矩,包括垂直于作用面的压应力造成的转矩以及平行于作用面的摩擦力造成的

转矩。例如,刻槽钻杆螺旋槽体应力矩提供煤粉旋转并排出钻孔的动力,而钻杆外壁的摩擦转矩则对排粉过程没有影响,反而增加了钻机的转转负荷,更增加了钻杆断裂的可能性,造成打钻事故。

目前,对于钻杆表面降阻的问题未受到足够重视,理论与试验研究工作开展较少。在石油天然气领域,这方面的研究已经开展,但是在软煤打钻领域基本没有类似文献出现。油气井与煤层钻孔存在很大差距,为了满足软煤打钻的需要,必须开发降阻结构或材料,满足打钻工作需要。

2.4 软煤钻孔孔壁固化研究发展缓慢

软煤钻孔孔壁固化问题一直未受到较多重视,主要原因在于软煤打钻问题起步较晚,这个领域的学者有限,研究工作必然会出现主次先后的顺序,同时,软煤钻孔固化问题涉及化学、材料学、流体力学等多方面的交叉,十分复杂。

目前,在石油天然气领域钻井工程中,已经出现了控压钻进技术,其中的工作介质——钻井液具有一定的护壁作用。所不同的是,由于软煤钻孔流变性质非常严重,钻孔固化的主要目的在于钻进过程中以及成孔后利用注浆手段提高孔壁强度,降低孔壁径向位移,保证瓦斯抽采钻孔的持续工作能力。

针对软煤钻孔的固化研究文献极少^[24~25],并且研究的重点还是停留在煤层固化阶段,并未真正意义上与松软煤层力学特性及排渣方式相结合,局限性较大。

2.5 整体式成型技术有待推广

目前,钻杆的成型技术基本局限在焊接成型的模式上。钻杆焊接工艺需要高精度的加工设备以及严苛的加工环境,一旦偏差超过需用范围,则焊接形成的钻杆在形状、强度上均不能满足工作要求^[26]。例如,摩擦焊接作业之后,需要缓冷工艺保证钻杆焊接接缝处冷却硬化,若此时降温速度改变,温度骤降,则接缝处脆性增加,在大转矩作用下,极易发生脆断事故。因此,需要继续研发钻杆加工制造过程的整体式成型技术,并加大对该技术的推广力度,提高钻杆强度,保证成孔质量。

3 软煤钻杆的发展趋势

3.1 多动力耦合设计

多动力耦合是指软煤打钻排渣过程不仅仅依靠一种动力方式,而是将风力、机械力等多种动力同时嵌入到排渣系统中,在不同的打钻环节利用多动力

的相互耦合完成作业,将各自的优势发挥出来,并互相弥补各自不足之处,最终满足软煤打钻要求。

肋骨钻杆与刻槽钻杆排渣动力方式是多动力耦合的最好体现,在正常钻进过程中,双动力同时作用;在遇到塌孔等事故后,机械动力发挥清孔作用,最终实现软煤深孔成孔。

除了风力、机械力之外,高压液体也有很好的应用前景。高压液体(液力排渣)相对风力具有更大动力,对于深孔排渣及成孔具有独特优势。在应用方面,液力排渣已在钻井工程中大量应用,其中包括泥浆、无黏土相冲洗液、乳状液、泡沫等,均取得了很好的效果^[27-28]。在软煤钻孔领域,液力排渣较适用于具有一定力学强度的中软煤层,结合中软煤层的流变研究成果,可以较准确地选择液流参数,保证钻孔稳定;同时,高压液体应尽可能不与煤粉形成煤泥,保证液力排渣通道的顺畅。

多动力耦合是软煤打钻的发展方向之一,当遇到偏硬煤体时,使用液力排渣和机械排渣双动力;当遇到松软煤体时,改为风力排渣和机械排渣双动力;当遭遇塌孔等孔内事故后,改为机械排渣单动力清孔,最终实现软煤深孔成孔,如图10所示。

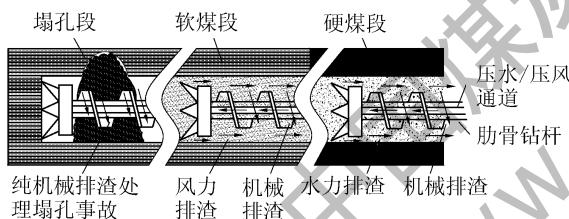


图10 多动力耦合排渣模型

Fig. 10 Cuttings transport model of multi-power coupled

3.2 多结构耦合设计

多结构耦合是指软煤钻杆在设计中嵌入不同的结构,使之具有不同的排渣方式,并完成不同的功能。不同的结构对于排渣动力的应用具有不同的方式和效果,例如,地质钻杆对风力排渣的影响可以忽略,而三棱结构却对风力排渣起到促进作用,效果明显。又如,螺旋叶片结构使钻杆具有机械排渣能力。同时,在钻进过程中,需要一些特殊结构实现更为复杂的操作和功能,例如注浆、固化钻孔等。

多结构耦合的研究重点有2点:①结构创新,即更多的结构形式;②耦合优化,即同一系统中不同结构的最优解。例如,肋骨钻杆存在螺旋结构,螺旋结构对风流有阻滞和扰动作用,影响风力排渣,但又无法取消螺旋结构,因此螺旋结构的参数优化是肋骨

钻杆排渣能力的关键点。

经分析可知,地质钻杆与三棱钻杆是目前最基本的钻杆杆体形式,基于圆形或三角形杆体,可以设计并加工高螺旋、低螺旋、刻槽等结构,实现多结构耦合。

3.3 高强度钻杆

高强度钻杆是指具有极高抗压、抗剪、抗冲击强度的钻杆。高强度钻杆通过以下2种途径实现:一是整体式制造成型工艺,保证钻杆整体的强度,避免因为焊缝质量问题造成断钻事故;二是发展新型材料,目前国内使用的钻杆材料已开始向42CrMo合金材料发展,深孔成孔方面依然存在强度问题,未来的发展趋势极有可能向复合材料、钛合金、超高强度钢等新材料发展,这些材料的最小屈服强度普遍在600 MPa以上,有的甚至接近1 000 MPa,对于提高钻杆强度具有重要意义。

通过对大量断钻事故分析结果可知,钻杆主要断裂点出现在钻杆连接处,尤其是外螺纹处。这一区域的集中应力非常高,在大转矩下,螺纹连接处的失效率很高。若在这一区域采用强度更高的新型材料,将会大幅增加钻杆可承载转矩,提高钻进深度。

因此,新型高强度材料势必要被引入软煤钻杆制造领域。将来,钻杆整体强度会进一步增强,配合大转矩钻机和高效排渣设计,真正实现松软煤层深孔成孔。

3.4 智能钻杆

智能钻杆早在20世纪就已经在石油领域提出,主要是为了解决钻井过程中井下复杂环境的参数信息获取、传递、处理、反馈技术难题。目前,智能钻杆技术已在石油领域得到商业化应用^[29]。

由于松软煤层流变性强、力学性能差、瓦斯含量高,软煤成孔难度非常大;特别地,当钻进一定深度后,内部钻进环境会在地应力、瓦斯压力、煤体力学性质、风流和钻具扰动作用的综合作用下变得更加复杂,极有可能出现事故。常规钻杆无法实现孔内参数信息的实时获取、传递,使得打钻人员的钻进操作具有一定的滞后性,无法满足软煤打钻的需求。

智能钻杆是未来煤矿井下钻进作业的发展需求,对于实时监测、控制、反馈钻进操作具有重要意义,可以使操作者及时根据孔内环境修正操作,保证钻孔顺利成孔。

4 结 论

1) 软煤钻杆的设计及选择主要根据地质条件、

煤层赋存条件、排渣需求而定。软煤打钻常规钻杆包括地质钻杆、螺旋钻杆、三棱钻杆、肋骨钻杆及刻槽钻杆,各种钻杆具有不同的外形结构和排渣方式。

2) 软煤钻杆经历了从借鉴地勘、硬煤钻杆,到针对松软煤层特点而设计的软煤专用钻杆的发展过程,在设计方面,逐渐由单一结构形式向多结构形式方向发展;在认识方面,逐渐了解不同结构对于排渣的影响,并合理优化各种排渣结构。

3) 软煤钻杆的研究工作仍存在如下问题:软煤流变研究成果与软煤钻孔理论结合不足;排粉动力学及耦合排粉问题研究工作亟待深入;钻杆表面降阻问题未受足够重视;软煤钻孔孔壁固化研究发展缓慢;整体式成型技术需要进一步推广。这些研究工作可以为软煤打钻提供更多的理论支撑,可以为钻杆设计优化提供思路及参数支持,具有重要意义。

4) 软煤钻杆的发展趋势会向着多动力耦合、多结构耦合、高强度钻杆、智能钻杆等方向发展,通过借鉴石油行业的已有技术工艺,分别从钻进排渣动力、方式、强度、反馈等方面解决软煤排渣及钻进难题,实现松软煤层深孔成孔。

参考文献(References):

- [1] 孙玉宁,王永龙,翟新献,等.松软突出煤层钻进困难的原因分析[J].煤炭学报,2012,37(1):117-121.
Sun Yuning, Wang Yonglong, Zhai Xinxian, et al. Analysis on reasons of drilling difficulty in soft and outburst coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 117-121.
- [2] Sahara D P, Schoenball M, Kohl T, et al. Impact of fracture networks on borehole breakout heterogeneities in crystalline rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 71(10): 301-309.
- [3] 代志旭,陈寒秋,郑尚超.突出松软煤层深孔打钻工艺的创新与应用[J].煤矿安全,2007,38(5):20-21.
Dai Zhixu, Chen Hanqiu, Zheng Shangchao, et al. Innovation and application of deep-hole drilling technology in outburst soft coal seam [J]. Safety in Coal Mines, 2007, 38(5): 20-21.
- [4] Islam M R, Shinjo R. Numerical simulation of stress distributions and displacements around an entry roadway with igneous intrusion and potential sources of seam gas emission of the Barapukuria Coal Mine, NW Bangladesh [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 78(4): 249-262.
- [5] Zhang Jincai. Borehole stability analysis accounting for anisotropies in drilling to weak-bedding planes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 60(6): 160-170.
- [6] You Lijun, Kang Yili, Chen Zhangxin, et al. Wellbore instability in shale gas wells drilled by oil-based fluids [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 71(12): 294-299.
- [7] Zou Jie, Chen Liyi, Wang Sheng, et al. Analysis on rock properties based on exploration of hole wall's stability [J]. Procedia Engineering, 2014, 73: 110-117.
- [8] 王海峰,李增华,杨永良,等.钻孔风力排渣最小风速及压力损失研究[J].煤矿安全,2005,36(3):4-6.
Wang Haifeng, Li Zenghua, Yang Yongliang, et al. Study on lowest wind speed and pressure loss of drilling dust extraction with wind force for borehole [J]. Safety in Coal Mines, 2005, 36(3): 4-6.
- [9] 杨永良,李增华,高文举,等.煤层钻孔风力排渣模拟实验研究[J].采矿与安全工程学报,2006,23(4):415-418.
Yang Yongliang, Li Zenghua, Gao Wenju, et al. Simulative experiment of pneumatic slagoff for boreholes in coal seams [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(4): 415-418.
- [10] Lavrov A, Taghipour A, Ytrehus J D, et al. Numerical and experimental study of the stability of non-circular boreholes in high-permeability formations [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 68(6): 128-135.
- [11] 牛国庆,张伟.顺煤层钻孔风力排渣临界风速及压力损失研究[J].中国安全科学学报,2013,23(11):60-65.
Niu Guoqing, Zhang Wei. Study on critical air velocity and pressure loss of pneumatic coal dust removal for boreholes along coal seams [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(11): 60-65.
- [12] Meier T, Rybacki E, Reinicke A, et al. Influence of borehole diameter on the formation of borehole breakouts in black shale [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 62(9): 74-85.
- [13] 王东霞.螺旋输送机的数值分析及优化设计的研究[D].郑州:河南工业大学,2012.
Wang Dongxia. Research on numerical analysis and optimization of screw conveyor [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2012.
- [14] 张东海.螺旋输送机的优化研究[D].大连:大连理工大学,2006.
Zhang Donghai. Research on optimization of screw conveyor [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [15] 王永龙,翟新献,孙玉宁.刻槽钻杆应用于突出煤层钻进的合理参数研究[J].煤炭学报,2011,36(2):304-307.
Wang Yonglong, Zhai Xinxian, Sun Yuning. Reasonable parameters study on grooved drill pipe used in drilling outburst coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 304-307.
- [16] 叶根飞.水平螺旋钻进钻杆排粉机理实验[J].煤田地质与勘探,2010,38(5):71-76.
Ye Genfei. Cuttings discharge mechanism of spiral rod in horizontal auger drilling [J]. Coal Geology and Exploration, 2010, 38(5): 71-76.
- [17] 赵万里,李岗欣,路金萍.松软煤层瓦斯抽采高强螺旋钻杆的研制与应用[J].煤炭工程,2013,45(1):113-116.
Zhao Wanli, Li Guanxin, Lu Jinping. Development and application of high-strength spiral drill pipe for gas extraction in soft coal seam [J]. Coal Engineering, 2013, 45(1): 113-116.

- tion of high strength auger drilling rod for gas drainage in soft seam [J]. *Coal Engineering* 2013, 45(1): 113–116.
- [18] Liu Chun Zhou Fubao, Yang Kangkang, et al. Failure analysis of borehole liners in soft coal seam for gas drainage [J]. *Engineering Failure Analysis* 2014, 42(7): 274–283.
- [19] 马沈岐, 汪芸. 煤矿瓦斯地质钻探用钻杆工作机理探讨 [J]. *探矿工程* 2008, 35(9): 11–15.
Ma Shenqi, Wang Yun. Research on working mechanism of drilling pipe for geological drilling of coal mine gas [J]. *Exploration Engineering* 2008, 35(9): 11–15.
- [20] 李建平, 张永忠, 杜长龙. 螺旋钻采煤机钻杆的结构参数优化设计 [J]. *煤炭科学技术* 2006, 34(8): 8–10.
Li Jianping, Zhang Yongzhong, Du Changlong. Optimized design of drilling rod structure parameter for screw miner [J]. *Coal Science and Technology* 2006, 34(8): 8–10.
- [21] 彭腊梅, 李光, 蒲天一. 松软突出煤层整体式三棱螺旋钻杆中试研究 [J]. *煤炭科学技术* 2013, 41(8): 133–136.
Peng Lamei, Li Guang, Pu Tianyi. Study on pilot test of integrated triangular helix drilling rod in soft and outburst seam [J]. *Coal Science and Technology* 2013, 41(8): 133–136.
- [22] 张宾. 肋骨钻杆中风压钻进技术在顾桥矿的应用 [J]. *西部探矿工程* 2011, 23(7): 34–36.
Zhang Bin. Application of middle air pressure of rib-like drill pipe in Guqiao Coal Mine [J]. *West – China Exploration Engineering* 2011, 23(7): 34–36.
- [23] 杨逾, 李盈, 周小科. 基于西原加速模型的煤岩蠕变试验研究 [J]. *煤炭学报* 2014, 39(11): 2190–2194.
Yang Yu, Li Ying, Zhou Xiaoke. Study on the coal creep test based on the improved Nishihara model [J]. *Journal of China Coal Society* 2014, 39(11): 2190–2194.
- [24] 翟成, 李全贵, 孙臣, 等. 松软煤层水力压裂钻孔失稳分析及固化成孔方法 [J]. *煤炭学报* 2012, 37(9): 1431–1436.
Zhai Cheng, Li Quangui, Sun Chen, et al. Analysis on borehole instability and control method of pore-forming of hydraulic fracturing in soft coal seam [J]. *Journal of China Coal Society* 2012, 37(9): 1431–1436.
- [25] 路桂英. 井下煤层气抽采钻井松散段随钻注浆护壁关键技术研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
Lu Guiying. A dissertation submitted to China University of Geosciences for the doctor degree of geological engineering [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [26] 王清峰, 陈松林. 煤矿用坑道钻机钻杆断裂原因分析及采取的措施 [J]. *煤矿机械* 2007, 28(6): 148–150.
Wang Qingfeng, Chen Songlin. Analysis on cause and prevention measures of drilling pipe rupture of coal roadway drilling machine [J]. *Coal Mine Machinery* 2007, 28(6): 148–150.
- [27] 王中华. 国内外钻井液技术进展及对钻井液的有关认识 [J]. *中外能源* 2011, 16(1): 48–60.
Wang Zhonghua. Advances on drilling fluid technology and understanding of the relevant fluid at home and abroad [J]. *Sino-Global Energy* 2011, 16(1): 48–60.
- [28] 王中华. 国内外油基钻井液研究与应用进展 [J]. *断块油气田* 2011, 18(4): 533–537.
Wang Zhonghua. Advances on research and application of oil-based drilling fluid at home and abroad [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field* 2011, 18(4): 533–537.
- [29] 岳春宏. 智能钻杆: 将引发一场井下信号传输技术革命 [J]. *石油科技论坛* 2008, 27(4): 34–36.
Yue Chunhong. Intelligent drill pipe: revolution on underground information transmission [J]. *Oil Forum* 2008, 27(4): 34–36.