

基于钻孔数据的隧道围岩无侧限抗压强度估算方法

刘云付

(湖南尚上公路桥梁开发有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要:通过自主设计的电钻,采用理论分析手段获取了如何根据该电钻参数得到岩石的无侧限抗压强度(UCS)。目前测定 UCS 方法成本高、耗时长,并且很少考虑真实应力状态。该文基于力和能量平衡的分析模型方法,提出利用实际钻孔资料估算岩石的 UCS。首先,根据钻头在钻孔过程中受力极限平衡建立模型,该模型可根据实际钻孔数据估算岩石的黏聚力和内摩擦角等参数,并在此基础上进一步计算岩石的 UCS;然后,从切割点估算岩石的极限承载力。此外,总结归纳了不同参数对估计强度特性的影响。研制了一台小型的钻孔机,对3种不同强度范围的岩石钻进参数进行了测试。结果表明:该机可通过两台独立的电机对不同强度范围的岩石进行钻孔,并能测量和记录扭矩、推力、压痕率、转速和钻孔深度等主要技术指标;最后将岩石强度参数钻孔试验结果与常规标准试验结果进行了比较验证。

关键词:无侧限抗压强度(UCS);围岩;钻孔数据;能量平衡

1 引言

对隧道等地下工程而言,稳定性评价及设计都不可避免需要事先知道地下开挖围岩的强度参数,如岩石的无侧限抗压强度(UCS)等,如何完整确定岩石(体)的强度参数显得尤为关键。

目前确定岩石 UCS 方法主要有试验法、经验分析法、数值法及地球物理方法等。通过岩体质量评价,运用经验方法获得参数,是当前岩体工程设计中一种常用的方法。早期, Bieniawski 提出岩体分级系统(RMR 法)和 Barton 推出 Q 值岩体质量分级用于评估岩体强度,并被其他学者改进,但无法与岩石(体)强度准则建立联系;Hoek 和 Brown(1980)基于修正的 Griffith 理论,结合大量的实测岩石(体)强度数据提出了节理岩体的经验破坏准则。但随后发现软弱岩体受扰动后其强度大大减小,可见该经验破坏准则存在缺陷;于是, Hoek 在 1994 年引入地质强度指标(GSI),并基于应力比的拟合关系提出了完整岩体的 Hoek-Brown 准则。经过众多学者的努力, Hoek-Brown 强度准则已发展成为岩体力学参数估算方法之一。然而,获得岩石力学参数最精确的方法依然是原位测试法,但是试验法等都无法准确还原岩石在自然界中受到的真实应力状态。因此,该文提出一种可精确用于

原位测试的岩石无侧限抗压强度(UCS)测试方法。

完整岩石的无侧限抗压强度是大多数岩体分类系统的主要参数,也是岩体强度的上限值。为此,人们提出了许多间接方法,如划痕试验、点载荷试验、施密特锤击试验和冲头试验。但上述方法测定 UCS 成本高、耗时长,主要原因是样品制备困难且大范围破坏现场或样本。该文基于力和能量平衡的分析模型方法,提出利用实际钻孔资料来估算岩石的 UCS。该方法可以在钻进过程中连续测量钻进参数和评价岩石强度。除了具有连续测量的优点外,还可以作为一种准无损的现场测量方法。该方法由于原理简单,不需要采样,容易实现。

随着隧道等地下工程开挖施工的发展,旋转钻孔系统由于其高效而被工程界广泛应用。钻孔过程分进料和切割两个阶段进行。在第一阶段,钻头通过推力缩进完整的岩石。由于压痕作用,一部分岩石被压碎和挤压。由于钻头的前角、切削面摩擦和螺旋运动,在钻头前方形成压缩破碎带;第二阶段的旋转钻孔是由钻头的旋转运动引起的。在该阶段,水平力沿旋转钻头传递到岩石上,但与第一阶段不同的是,水平力通过中介传递到岩石上。中间部分是压缩压碎区,它将一部分力作为摩擦力阻尼。研究钻头与岩石的相互作用以及该过程如何实现岩石强度参数的估算是该文的核心技术。

收稿日期:2020-10-19(修改稿)

基金项目:湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(编号:202009)

作者简介:刘云付,男,大学本科,高级工程师, E-mail:15151449@qq.com

机械工程中,有学者提出基于力平衡和基于能量平衡两种模型来实现钻头与金属之间的相互作用。基于力的平衡,国外学者 Evans 引入的“压痕模型”,用于估算采煤所需的推力;Nishimatsu 将该平衡模型进一步发展为“剪切模型”,并将该模型应用于金属切削模型。此外还有学者陆续提出改进的其他模型,例如 Detournay 等, Gerbaud 等, Chiaia; 基于能量平衡的方法是由 Teale 提出,引入钻削比能,表示钻削单位体积岩石所需的最小能量。而钻削比能的大小近似于岩石的 UCS。因而基于能量平衡的分析模型简单地解决了钻孔过程中的摩擦和破碎带问题。但是,他们没有提出岩石的 UCS 与钻孔参数之间的明确关系。

该文基于钻头在钻孔过程中受力平衡,建立理论分析模型。在该模型中,岩石的黏聚力和内摩擦角是由实际钻孔数据反馈分析估算的,进一步根据摩尔库仑准则计算岩石的 UCS。此外,还分析不同切削角度的钻头对岩石强度的影响。根据实际需求设计了一台可用于获取测量和记录扭矩、推力、压痕率、转速和钻孔深度等参数的钻孔机,并根据岩石强度参数的钻孔试验结果与常规标准试验结果对比来验证该系统的实用性和准确性。

2 设计方案

2.1 电器控制

装置涉及的电器主要为马达、变速箱、数据获取器和电脑,如图 1 所示。马达的动力来源于普通民用电力,变速箱则为了实现钻头以不同转速进行工作,同时采用相关感应器来获取钻机能量等相关数据。电脑是为了方便存储,将 U 盘数据进行导入分析。

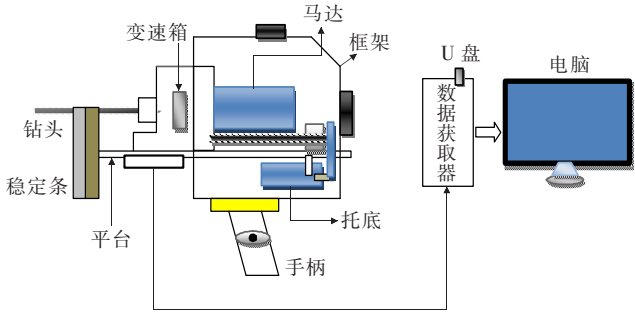


图 1 钻机系统设计

2.2 机械部分

装置涉及的机械主要为钻头、稳定条、平台、手柄、托底和框架,如图 1 所示。钻头用于岩石破碎钻进,钻

头一般都采用硬质合金。一般采用碳化钨和钴以 96 : 6 经加压、烧结而成,其中以碳化钨粉末为基体,以钴粉作黏结剂。稳定条为铁片,主要作用是控制钻头旋转过程的偏心。平台是钻机的主要依托平台,采用钢材制作。手柄是为了人为控制钻机的平衡,方便操作,一般采用聚酯纤维制作。托底是为控制平台上下两部分的力矩平衡,一般采用铁皮叠压。整个机械和电器构建采用铁皮喷漆包装。

3 理论计算

岩石旋转钻进一般分两个阶段进行。在第一阶段,压痕随钻头的轴向转动而运动,包括压痕、压碎和粉碎 3 个过程;第二阶段是切削力,它垂直于轴向运动,只切削岩石。这两个阶段都需要进行钻孔,因为钻头的轴向运动需要保持切削深度和进给量,而垂直于压痕运动的旋转运动需要切削岩石。这两个阶段是一个连续而快速的过程,可以同时考虑。这两种力量的合力有着重要的作用。其中一个合力作用于钻头轴;另一个合力作用于平行井底的力。钻头正面两种力的大小和比例主要取决于钻头的几何形状,特别是前角和接触摩擦。在此基础上,压缩破碎颗粒与岩石之间的摩擦力以及钻头端部(头部)的摩擦力都会影响这些力。考虑到这一条件,如图 2 所示,提出了一个基于负前角 T 形钻头在大气压下的受力极限平衡模型。钝头的截面积为矩形,磨损平面面积为 $l \times D$,其中 D 为钻头直径, l 为磨损平面宽度。当钻头理想锋利时,磨损平面宽度为零。钻头的螺旋运动克服了岩石的强度/阻力,并随着钻头上的推力缩进岩石中。在压痕的同时,破碎的材料被限制和压缩在钻头正面和岩石之间。

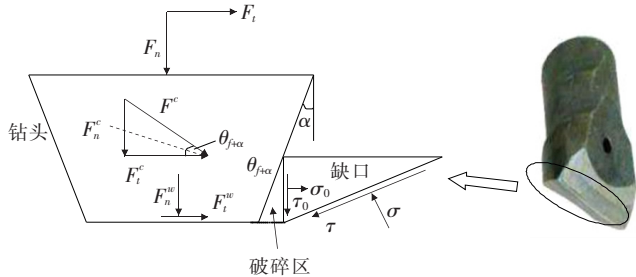


图 2 计算模型力学分析

控制破碎带的形成和钻头前方的压实因素包括钻头的前角、钻头的连续向下运动、切削面摩擦角,以及在钻孔内存在一个封闭空间,不允许钻头前方的岩屑材料向上移动。事实上,压缩破碎带作为原始压头进入完整岩石。压缩破碎带还将钻头的一部分作用力转

移到完整岩石上。换言之,由于钻头施加的力(F^c),破碎带将部分力沿垂直截面积传递给完整岩石,该截面积等于切割深度乘以钻头直径;另一部分力通过压缩破碎带传递到井底。需要指出的是,考虑围岩具有各向异性,该文假设围岩为均质围岩,具有各向同性。

压缩破碎带与完整岩石和钻头的不同强度接触。由于钻头前方形成压缩破碎带,钻头切削面和岩石受到均匀(静水)应力(σ_0)。当压缩破碎带向岩石中传递足够大的水平力时,岩石以 Ψ 的角度进行破坏,形成碎屑。

由于静水压条件在压缩压碎区占主导地位,在不同方向上的应力量是相同的。钻头切削面与钻头端部磨损面接触摩擦角相同,均为 θ_f ,因为两者材料(碳化钨)相同,且与破碎岩石的边界层接触。在这种情况下,钻头、压缩破碎带和破坏完整岩石3种不同介质接触。

$$F_n = F_n^c + F_n^w \quad (1)$$

$$F_t = F_t^c + F_t^w \quad (2)$$

式中: F_n 为正应力; F_t 为切应力; F_n^c 、 F_t^c 、 F_n^w 和 F_t^w 分别为切向力的正应力和切应力、摩擦力的正应力和切应力。具体计算公式如下:

$$F_n^c = F_t^c \tan(\alpha + \theta_f) \quad (3)$$

$$F_n^w = F_t^w \tan\theta_f \quad (4)$$

$$\tau_0 = \sigma_0 \tan\varphi' \quad (5)$$

$$A = dD \quad (6)$$

式中: α 、 θ_f 、 φ' 、 τ_0 、 σ_0 分别为钻头刀具前角、钻头端面磨损面接触摩擦角(或钻头切削面接触摩擦角)、压缩破碎带与完整岩石的摩擦角、压缩破碎带与完整岩石的抗剪强度和压缩破碎区内正压力; A 、 d 和 D 分别为切削的有效垂直截面积、切削深度和钻头直径。

对于压缩破碎带进行力学分析,存在:

$$F_t^c = A\sigma_0 + A\tau_0 \tan\alpha \quad (7)$$

$$F_n^c = A\tau_0 + A\sigma_0 \tan\alpha \quad (8)$$

同样在楔形体存在一个潜在破坏面,对应的剪应力 τ 和法向正应力 σ ,表达式为:

$$\sigma = \sigma_0 \sin^2\psi - \tau_0 \cos\psi \sin\psi \quad (9)$$

$$\tau = \sigma_0 \cos\psi \sin\psi + \tau_0 \sin^2\psi \quad (10)$$

根据摩尔库仑准则,有:

$$\tau = c + \sigma \tan\varphi \quad (11)$$

式中: c 、 φ 为岩石的黏聚力和内摩擦角。

将式(9)、(10)代入式(11),可得:

$$(\sigma_0 \sin\psi \cos\psi + \tau_0 \sin^2\psi) = c + (\sigma_0 \sin^2\psi - \tau_0 \sin\psi \cos\psi) \tan\varphi \quad (12)$$

如果 τ_0 替换为 $\sigma_0 \tan\varphi'$ [从式(5)开始],经过计算

化简可得:

$$\sigma_0 \left[\frac{1}{2} \sin(2\psi) + \tan\varphi' \sin^2\psi - \sin^2\psi \tan\varphi + \tan\varphi \tan\varphi' \frac{1}{2} \sin(2\psi) \right] = c \quad (13)$$

为获取 σ_0 的最小值,对式(13)的 ψ 进行求导:

$$\frac{\partial \sigma_0}{\partial \psi} = 0 \quad (14)$$

可得:

$$\psi = \frac{\pi}{4} - \left(\frac{\varphi' - \varphi}{2} \right) \quad (15)$$

因此 σ_0 的最小值为:

$$\sigma_0 = \frac{2c \cos(\varphi' - \varphi)}{1 + \tan\varphi \tan\varphi'} \times \frac{1}{\cos(\varphi' - \varphi) - \sin^2(\varphi' - \varphi) + \sin(\varphi' - \varphi)} \quad (16)$$

进一步,考虑到钻头和方程式中的作用力。结合式(1)、(2)、(4)、(5)、(7)、(8),有:

$$F_n = (\sigma_0 A \tan\alpha + \sigma_0 A \tan\varphi') + F_n^w \quad (17)$$

$$F_t = (\sigma_0 A + \sigma_0 A \tan\varphi' \tan\alpha) + F_n^w \tan\theta_f \quad (18)$$

联合式(17)、(18),可得:

$$F_t = \sigma_0 A [1 + \tan\varphi' \tan\alpha - (\tan\varphi' + \tan\alpha) \tan\theta_f] + F_n \tan\theta_f \quad (19)$$

将式(16)代入式(19),可得:

$$F_t = F_n \tan\theta_f + A \left[\frac{2c \cos(\varphi' - \varphi)}{1 + \tan\varphi \tan\varphi'} \times \frac{1 + \tan\varphi' \tan\alpha - (\tan\varphi' + \tan\alpha) \tan\theta_f}{\cos(\varphi' - \varphi) - \sin^2(\varphi' - \varphi) + \sin(\varphi' - \varphi)} \right] \quad (20)$$

若将式(20)两边同时除以 A ,则 F_t/A 和 F_n/A 分别表示钻孔能和钻孔强度。令 $\epsilon = F_t/A$, $\xi = F_n/A$ 。

因此,式(20)可以写成:

$$\epsilon = \xi \tan\theta_f + \left[\frac{2c \cos(\varphi' - \varphi)}{1 + \tan\varphi \tan\varphi'} \times \frac{1 + \tan\varphi' \tan\alpha - (\tan\varphi' + \tan\alpha) \tan\theta_f}{\cos(\varphi' - \varphi) - \sin^2(\varphi' - \varphi) + \sin(\varphi' - \varphi)} \right] \quad (21)$$

ϵ 和 ξ 都可以通过钻机内置感应器转换和获取,若将式(21)中的 ϵ 和 ξ 看作自变量和因变量,则该式可看作一次线性函数。 $\tan\theta_f$ 为斜率,余项为截距,是一个常数。可通过绘制曲线获取相关数据。获取岩石的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 后,则有:

$$UCS = \frac{2c \cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (22)$$

因此,可根据式(22)进行岩石强度估算。

4 工作原理及性能分析

如前文所述,冲击电钻通电后以马达为动力,通过变速箱等构件,实现齿轮变速。马达内部的电磁旋转式或电磁往复式小容量电动机的电机转子做磁场切割做功运转,通过传动机构驱动作业装置,带动齿轮加大钻头的动力,从而使钻头刮削物体表面,更好地钻击破碎物体。工作原理除了电钻工作原理,需配以式(1)~(22)的计算,并采用相关感应器来获取钻孔能和钻孔强度等相关数据,数据存储于数据器并可采用 U 盘将数据导出分析。

钻头分为有锥角和无锥角两种,图 3 为对应不同钻头直径、不同锥角情况下的钻孔区能量和钻孔强度曲线图。

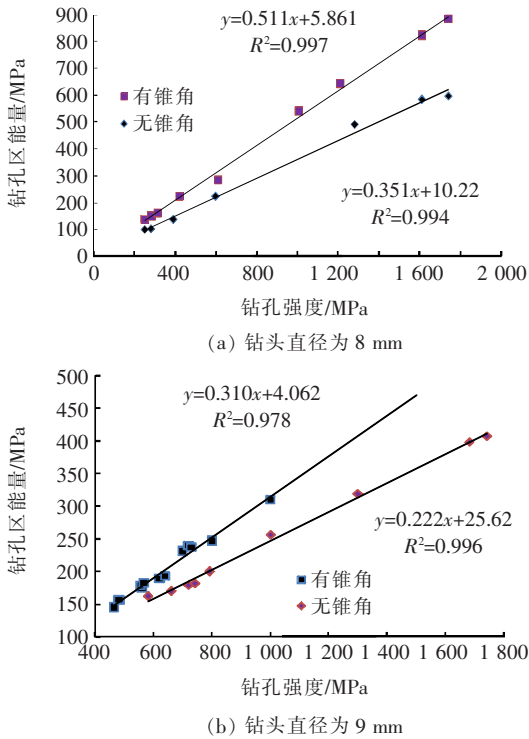


图 3 无锥角和有锥角情况下钻机钻孔区能量和钻孔强度关系

由图 3 可知:有锥角情况下的钻孔区能量和钻孔强度均高于无锥角情况下的钻孔区能量和钻孔强度;钻孔强度一定时,有锥角情况下钻头的钻孔区能量普遍高于无锥角的钻孔区能量;当钻头的直径变大,钻孔强度明显增加。

5 结论

采用自主研发电钻,基于钻孔过程获取的钻孔数

据估算岩石强度 UCS,存在以下突出的节能减排技术:

(1) 无需进行室内试验,现场钻孔即可获取岩石强度,与传统测试方法相比,节约了岩石取芯、装运需耗费的各项人力财力物力投入。

(2) 该技术可与地下工程钻爆法结合,因为各种地下工程开挖均需要进行掘进打孔,而通过打孔获取的数据可直接利用,可有效降低相关施工建设经费的投入。而传统岩石室内测试试验,需室内场地、人员和仪器的投入,以及直接和间接耗材等投入。

(3) 节约施工工期,带来巨大经济效益。

参考文献:

[1] 钱七虎,陈志龙. 21 世纪地下空间开发利用展望[C]. 中国土木工程学会第八届年会论文集,1998.

[2] Esamaldeen A. 基于岩石微组构采用多元回归和人工智能技术估算岩石抗压强度[D]. 西南交通大学博士学位论文,2014.

[3] 徐海清. 贵州省鱼简河水库坝基岩体力学参数研究[D]. 中国地质大学硕士学位论文,2004.

[4] 贾志欣,汪小刚,赵宇飞,等. 岩石钻孔原位测试技术的应用与改进[J]. 岩石力学与工程学报,2013(6).

[5] Hoek E. Strength of Rock and Rock Masses [J]. ISRM News Journal,1994,2(2).

[6] Hoek E, Brown E T. The Hoek-Brown Failure Criterion - a 1998 Update[J]. Journal of Heurs,1988,16(2).

[7] 苏永华,封立志,李志勇,等. Hoek-Brown 准则中确定地质强度指标因素的量化[J]. 岩石力学与工程学报,2009(4).

[8] Evans I. A Theory on the Basic Mechanics of Coal Ploughing[C]. In: Proceedings of International Symposium on Mining Research. London: International Council on Mining,1962.

[9] Nishimatsu Y. The Mechanics of Rock Cutting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1972,9(3).

[10] Detournay E, Defourny P. A Phenomenological Model for the Drilling Action of Drag Bits[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science,1992,29(2).

[11] Gerbaud L, Menand S, Sellami H. PDC Bits: All Comes from the Cutter Rock Interaction[C]. In: Proceedings of the IADC/SPE Drilling Conference Held in Miami, Florida, USA: Iadc/Spe Drilling Conference,2006.

[12] Chiaia B, Borri - Brunetto M, Carpinteri A. Mechanical Modelling of the Mechanics of Core Drilling in Geomaterials [J]. Machining Science and Technology,2013,17(1).