

文章编号: 1006-4710(2011)01-0024-07

软岩的旋转触探诸参数间的内在关系

宋玲^{1,2}, 李宁¹, 刘奉银¹, 李骞¹

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000)

摘要: 为经济快速合理地确定不同地层的旋转触探运行参数, 及进一步研究通过触探诸参数确定岩石力学参数的方法, 必须明确旋转触探软岩样时探头上的负荷、扭矩与探头的转速、钻进速度之间的内在关系。在理论研究分析的基础上, 用角片式探头在笔者研制的“旋进式触探机”上系统地进行砌块的旋转触探试验, 且结合已报道的对石灰岩和砂岩用 PDC 钻头在室内进行的钻进试验数据分析验证了触探岩土体时探头上的负荷、扭矩和其钻进参数间内在关系的正确性。得到了以下结论: 当探头的转速不变, 则扭矩和负荷与钻进速度呈线性关系; 当探头的钻进速度不变时, 负荷和扭矩与转速呈 -1 次曲线关系; 当探头的钻进速度和转速不变时, 扭矩与负荷间呈线性变化关系; 当探头上的扭矩与负荷不变时, 转速与钻进速度呈正比关系。

关键词: 岩土工程; 岩石力学; 旋转触探

中图分类号: TU413.3 **文献标志码:** A

Research on Intrinsic Relationships among Parameters of Rotary Penetration Test in Soft Rock

SONG Ling^{1,2}, LI Ning¹, LIU Fengyin¹, LI Qian¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: To drill or cut rock economically and quickly and rationally to further study of the method of determining rock mechanics parameters in the light of data from drilling and probing, the intrinsic quantitative relationships among axial pressure, torque on the probe, revolution and penetrating rate must be made clear. The intrinsic quantitative relationships are studied theoretically and then tests of penetrating building block samples with angle-flake probe are carried out on the rotary penetrating machine in the laboratory. The intrinsic relationships discovered in the paper are proved according to data about building block samples together with those reported sand and limestone rock drilled with PDC on the boring machine in the laboratory. The important conclusions are drawn for a kind of samples a) that both torque and axial pressure increase linearly with penetrating rate as long as revolution is constant and b) that there is inversely-proportional relationship between torque, axial pressure and revolution when penetrating rate is constant, c) that torque increases linearly with axial pressure when penetrating rate and revolution are constant and d) that there is linear correlation between penetrating rate and revolution if torque and axial pressure are constant.

Key words: geotechnical engineering; rock mechanics; rotary penetration test

岩土层的力学参数是水利水电、交通运输和地下工程等行业工程设计、施工所需的重要参数。目前还没有连续、快速、无扰动地确定较硬土层或软岩力学参数值的现场原位测试方法。为实现较硬土层或软岩的力学指标的快速测定, 有学者在室

内利用 CPT 探头对黄土进行了旋转触探试验研究, 已证实了探头的旋转能够大大降低触探时作用在探头上的总锥尖阻力^[1]。然而即使极软的岩石, 其强度要比黄土高得多, 在相同条件下用圆锥探头旋转探入的难度要比探入黄土的大得多。为了能够

收稿日期: 2010-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(50879068)、国家自然科学基金创新群体基金(40821001)、中科院寒区旱区与环境研究所冻土工程国家重点实验室基金(SKLFSE-ZY-03)联合资助项目。

作者简介: 宋玲(1971-), 女, 河南商丘人, 博士生, 副教授, 研究方向为岩石力学与工程。E-mail: xjsdsl0514@163.com。
李宁(1959-), 男, 陕西耀县人, 教授, 博导, 研究方向为岩体动力学、地下洞室、边坡稳定性分析。E-mail: ningli@xaut.edu.cn。

对较硬土层或软岩进行原位测试, 笔者根据切削原理提出旋进式触探技术, 即前端带切刀的探头在静压和扭矩的作用下切削岩土层, 以保证探头在岩土层中顺利、平稳地探入到预定深度, 从而使触探技术在较硬(或深)土层及软岩中应用成为可能。虽然在岩土层中钻切成孔技术在石油、燃气开采等行业中的应用已十分广泛, 但在岩土工程勘察中也只是起到成孔或取样的作用。

当实施触探的机械设备能够提供足够的动力时, 相同运行参数下触探荷载参数的不同是岩土体物理力学性质差异的体现。当动力不能满足要求, 探入过程无法实现时, 只有通过调整参数以确保触探过程的实现。用不同运行参数下的触探荷载参数值来评价岩土体间的力学性质差异是不具有可比性的。因而要想旋进式触探技术成功地应用于岩土地层的勘察工作中, 必须清楚对同一岩土体进行旋进式触探时各参数间的关系, 以使对比参数具有可比性。同一岩土体触探诸参数间关系的研究不仅对经济合理地钻岩成孔有着科学指导意义, 而且为通过触探参数间的关系进一步揭示岩层的物理力学特性奠定了坚实的基础。

1 旋转触探测得诸参数间关系的研究思路及研究现状

旋进触探的探头入岩方式为探头的切刀旋压切削破岩。直接获得的数据有: 探头的钻进速度、转速、扭矩和探头所受的轴向负荷。在钻进速度、轴向负荷、转速及扭矩这四个参数之中, 钻进速度和转速为探头的运行参数, 而轴向负荷和扭矩为钻头上的荷载参数。对上述四个参数, 可进行两种相互间的关系研究: ①运行参数和荷载参数间关系的研究, 即钻头的运行参数(钻进速度和转速)变化对钻头上的荷载(轴向负荷和扭矩)的影响, 或者反过来, 钻头上的荷载参数(轴向负荷和扭矩)变化对钻头的运行参数(钻进速度和转速)的影响; ②荷载与运行参数交叉影响的研究, 即一个运行参数和一荷载参数对另一个运行参数及另一个荷载参数的影响研究。

对于第②种参数关系, 也就是研究: 钻进速度和扭矩对轴向负荷及转速的影响; 转速和扭矩对轴向负荷及钻进速度的影响。从测试角度来说, 后一种组合的研究是无法实现的。这是因为无法既控制钻进速度又控制轴向负荷而得到转速、扭矩值或既控制转速又控制扭矩而得到钻进速度、轴向负荷值, 即钻进速度和负荷及转速和扭矩是相关的, 而非彼此独立的量。但是针对其它可实现的控制方

式进行触探试验所得四个参数的数据, 仍可进行这两种交叉参数间的影响关系研究。这种研究是建立岩土体物理力学参数与触探参数间关系的基础, 本文不涉及此方面的研究。

由以上分析可知, 研究钻进速度、钻压、转速及扭矩(相对应于旋进式触探中的钻进速度、负荷、转速和扭矩)这四个参数中的任意两者间的关系都是可行的。

能源开采行业的有关学者为经济合理地高效破岩而进行了这方面的研究: 赵金昌等^[2]对花岗岩在高温高压状态下的切削破碎规律进行了研究, 得出在高温高压环境下, 切削速度随着钻压或转速的增大而增大, 与室温无围压状态下的切削破碎规律基本一致; 卢世红等^[3]根据钻头的机械运动规律得到钻进速度与转速是正比例关系, 比例系数是吃入深度; 并进行了砂岩试样的钻压与吃入深度间的关系试验研究, 用分段拟合的方法得到了钻压对钻进速度的影响规律。张晓东等^[4]对砂岩和石灰岩用两个不同尺寸的探头进行钻进试验, 以研究钻压、扭矩、机械钻进速度之间的相互关系规律, 得出同一钻头在相同种类的岩石钻进时, 相同钻压下, 钻头扭矩基本不随转速发生变化, 仅随钻压而改变的结论。

以上的研究都只是研究了钻进速度、钻压、转速及扭矩四个参数中的两者或三者间的关系, 并且都是在试验结果的基础上得出的。本文笔者在提出的围岩力学参数现场测试系统的思路与技术平台^[5]上, 以旋进式触探机理为指导^[6], 研究探头的运行参数与荷载参数间复杂的内在理论关系, 并进行室内模拟旋转触探试验, 验证所得理论关系的正确性。

2 荷载与钻进参数间内在关系的细观力学分析

根据金属切削机理, 在直角自由切削条件下, 切刀前刀面的切削力为:

$$F_C = \frac{\tau_f a_c b}{\sin\varphi} \cdot \frac{\cos(\beta - \gamma_0)}{\cos(\varphi + \beta - \gamma_0)}$$

岩屑对切刀前刀面的摩阻力为:

$$F_P = \frac{\tau_f a_c b}{\sin\varphi} \cdot \frac{\sin(\beta - \gamma_0)}{\cos(\varphi + \beta - \gamma_0)}$$

由以上两式可以看出, 若同一切刀(宽度 b 、刀前角 γ_0 相同)切削同一岩样(岩样的抗切削强度 τ_f 、岩-刀间的摩擦角 β 、切削角 φ 都相同), 则切削力 F_C 和摩阻力 F_P 只与切削深度 a_c 有关, 而且切削力和

切刀上的摩阻力也是相关的,这一点也被郭恒等于1997年在室内用单个切削齿对单轴抗压强度为 689 kg/cm^2 ,硬度为 90.1 kg/cm^2 的红砂岩进行的切削力与切削深度间的关系试验研究中得出的结论证实^[7],即切削岩样时切刀上的切削力 F_C 、摩阻力 F_p 与切削深度 a_c 有以下关系:

$$F_C = \alpha a_c + \beta$$

$$F_p = c(\alpha a_c + \beta)$$

式中 α 和 β 均为切刀切削岩土体的切削力系数, c 为前刀面上摩阻力系数。

被切岩体对切刀后刀面上的约束作用,可分解为垂直于后刀面的法向力 F_{hm} 和平行于后刀面的切向力 F_{hf} ,两者间的关系为 $F_{hf} = \mu F_{hm}$, μ 为探头与岩土体的摩擦系数。

带切刀的探头旋切岩土体时,切刀也受到两个力的约束,一个是被切除部分的岩土体对切刀的阻抗作用,即切屑作用于前刀面上的力(见图1中的 F_{xy} 、 F_n);另一个就是被切削的岩土体对切刀的约束作用,即岩土体作用于后刀面上的力(见图1中的 F_{hm} 、 F_{hf})。若仍沿用切刀切削岩土体时的切削力表达式的形式和符号来表示具有 n 个切刀的探头切削岩土体时荷载与钻进参数间的关系,则探头的等效切削力 F_C 和等效摩阻力 F_p (即图1中2个切刀的 F_n 和 F_{xy} 分别等效成一个切刀时切削岩土体的切削力 F_C 和摩阻力 F_p)表达式为:

$$F_C = \alpha d + \beta \quad (1)$$

$$F_p = c(\alpha d + \beta) \quad (2)$$

而等效法向力 F_{hm} 和等效切向力 F_{hf} 间的关系为:

$$F_{hf} = \mu F_{hm} \quad (3)$$

式中, d 为每转进给量,即探头的钻进速度与转速之比。

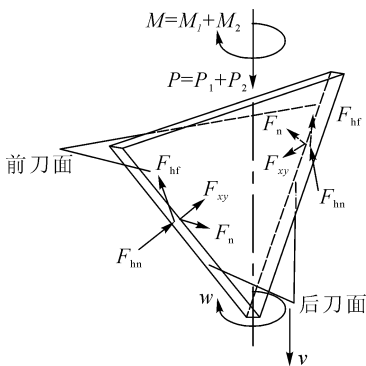


图1 角片式探头探入岩土体时受力示意图

Fig.1 Force analysis of probe penetrating into the rock

为保证探头能够以恒定的转速 w 和钻进速度 v 顺利地探入岩土体内,必须通过探杆对探头施加一定的轴向负荷和扭矩。探头上的扭矩 M 大部分用于

克服被切除部分的岩土体对探头的阻抗作用,而探头上的轴向负荷 P 主要用于克服正切削面下部岩体对探头的约束作用,两种作用对钻头上的扭矩和负荷的贡献各不相同。即:

$$M = M_1 + M_2 \quad (4)$$

$$P = P_1 + P_2 \quad (5)$$

式中,下标1、2分别代表岩土体对探头的阻抗作用和约束作用。

探头的扭矩是由等效切削力 F_C 和部分切向力构成,而轴向负荷是由等效轴向力 F_p 和部分法向力构成。即:

$$M_1 = ARF_C \quad (6)$$

$$M_2 = BRF_{hf} \quad (7)$$

$$P_1 = CF_p \quad (8)$$

$$P_2 = DF_{hm} \quad (9)$$

式中, R 为钻头的半径, A 、 B 、 C 和 D 均为系数。

根据式(1)~(9),可建立钻头的等效扭矩、等效轴向力和每转进给量三者间的理论关系式:

$$M = (AR\beta - Cc\beta BR \frac{\mu}{D}) + BR \frac{\mu}{D} P +$$

$$(A - B \frac{\mu}{D} Cc) R\alpha d$$

用同一探头触探同一岩样时的每转进给量为 $d = v/w$,将其代入上式并化简,得:

$$M = K_0 + K_1 P + K_2 v/w \quad (10)$$

式(10)表明,钻头上的扭矩、轴向负荷和每转进给量三者呈线性关系。式(10)也是在由每转进给量、负荷和扭矩组成的三维坐标系中法向量为 $(K_2, K_1, -1)$ 的平面的方程。进一步可得扭矩、负荷、转速和钻进速度四个量间的变化关系:①当探头的转速不变,则扭矩和轴向负荷与钻进速度呈线性关系;②当探头的钻进速度不变时,轴向负荷和扭矩与转速呈 -1 次曲线关系;③当探头的钻进速度和转速不变时,扭矩与轴向负荷间呈线性变化关系;④当探头上的扭矩与轴向负荷不变时,转速与钻进速度呈线性关系。

3 内在关系的试验验证

笔者利用角片式探头,在WCSR-50微机控制旋进触探仪上对尺寸为 $600 \text{ mm} \times 240 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 墙体填充砌块进行钻进速度 v 为6水平(5、15、30、75、150、300 mm/min),转速 w 为5水平(5、20、35、50、60 r/min)的全组合旋转触探试验,并对结果进行分析以验证旋转触探诸参数间内在关系的正确性。

同时,在 WDT-1500 多功能材料试验机上测定墙体填充砌块的力学参数值:抗压强度约为 3.5 MPa,而弹性模量为 483 MPa。

3.1 试验结果

在各转速、不同钻进速度时探头的负荷与探头

进入试样的位移间的关系曲线见图 2。探头上的扭矩与探头进入试样的位移间的关系曲线与图 2 中所示的曲线形状相似。从图 2 可以看出:相同转速下,钻进速度越大,相同位移对应的负荷值越大。扭矩与位移间也有类似的关系。

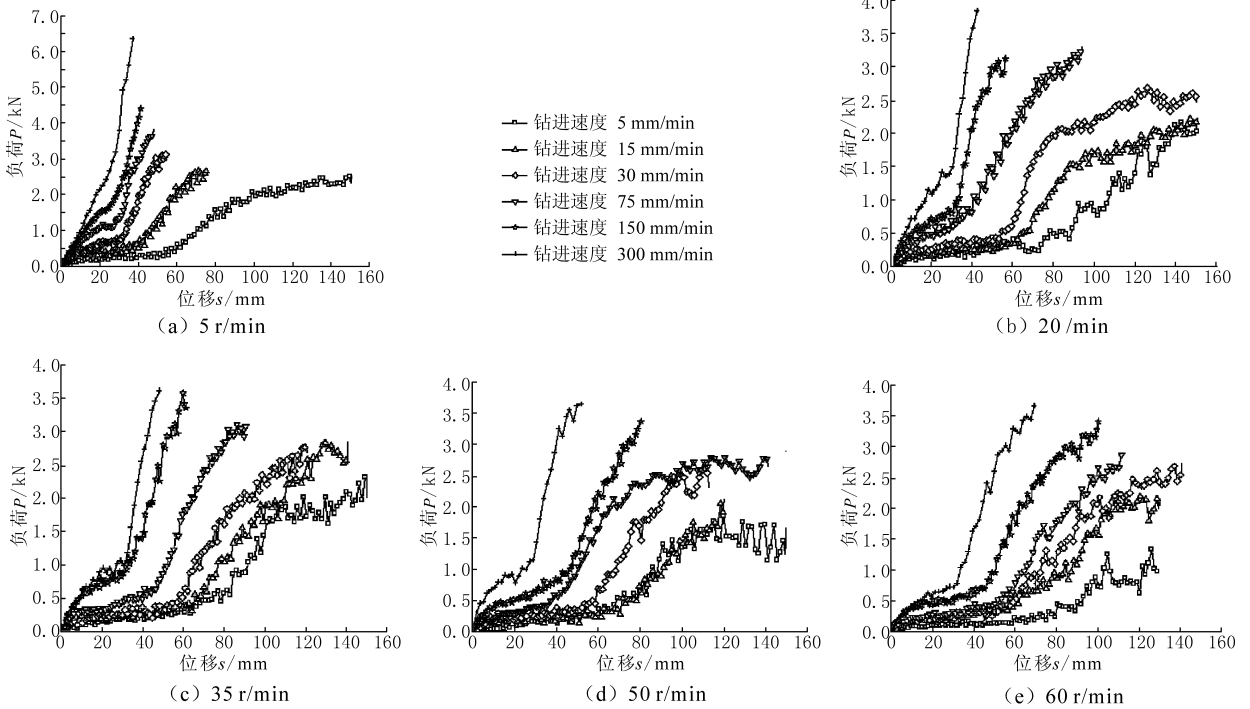


图 2 各运行参数下探头轴向负荷与位移间的关系

Fig. 2 Relationships of axial load and displacement at different revolution and penetrating rate

3.2 结果分析

3.2.1 钻进速度和转速均不变时扭矩与轴向负荷间关系

根据本文的触探诸参数间关系的研究思路可知,无法实现转速和钻进速度不变,而仅改变负荷或扭矩以获得扭矩或轴向负荷的试验过程。但由于本文试验过程中采用的探头为角片式探头,在试验过程中,探头遇到的岩屑作用的阻力会越来越大,即为克服岩屑阻力又确保探头的转速和钻进速度不变,必须增加负荷或扭矩,如图 2 中完整典型的“S”形曲线的初探阶段和上升段所示,轴向负荷随探入位移的增加而增大,这是由于排屑能力不足所致。从某种意义上说,用角片式探头触探墙体填充砌块间接地实现了转速和钻进速度都不变,而只改变轴向负荷,测得扭矩值的试验过程。探头在各运行参数下探入试样过程中探头所受的扭矩与轴向负荷间的关系见图 3。

各图所表现的共性为:在相同转速、钻进速度下探头完全探入试样的过程中探头上作用的扭矩与轴向负荷间的关系曲线均呈线性,而相同转速、

不同钻进速度下探头完全探入试样的过程中扭矩与轴向负荷间关系线是相互平行。

这表明,用同一类型的钻头,对相同试样,采用不同的每转进给量进行触探,探头完全探入到试样后,所测得的扭矩与轴向负荷均是线性关系。虽然各钻进速度相差较大,但所有数据点均集中于狭窄的带状区域内。

3.2.2 扭矩和负荷与转速或钻进速度间的关系

图 2 中表示的不同转速、不同钻进速度下轴向负荷与位移间关系的典型完整曲线近似呈“S”形。这主要是由探头型式、试样性质等综合因素确定。因而,为了消除排屑能力和切削的切刀长度的增加的影响,取探头恰好完全探入试样时的扭矩和轴向负荷值来进行扭矩、负荷与转速、钻进速度间的试验结果关系分析。

1) 转速恒定,扭矩、负荷与钻进速度间的关系见图 4。在同一转速情况下,随着钻进速度的增加,负荷和扭矩都是线性增加的。其原因为相同的钻进速度下,转速越小,探头的每转进给量值越大,钻头切除的岩屑厚度越大,即对切刀的阻抗作用也越

大,所需的扭矩和轴向负荷均越大。而这与由理论关系式得出的转速一定,扭矩和轴向力分别与钻进速度呈线性关系的结论一致。转速较小时,相同钻

进速度增量对应的负荷和扭矩的增幅较大,转速在20~60 r/min的范围内时,相同钻进速度增量引起的负荷和扭矩的增幅较小。

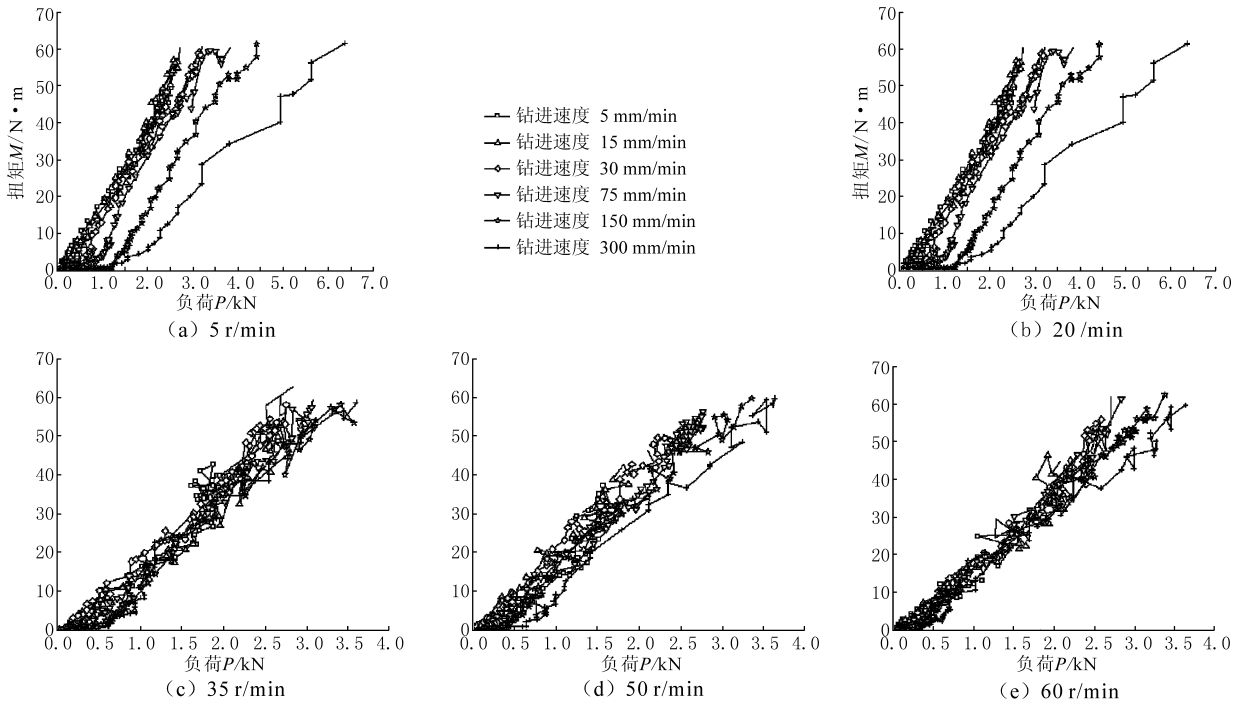


图3 各运行条件下探头扭矩与负荷间的关系

Fig. 3 Relationships of torque and axial load at different revolution and penetrating rate

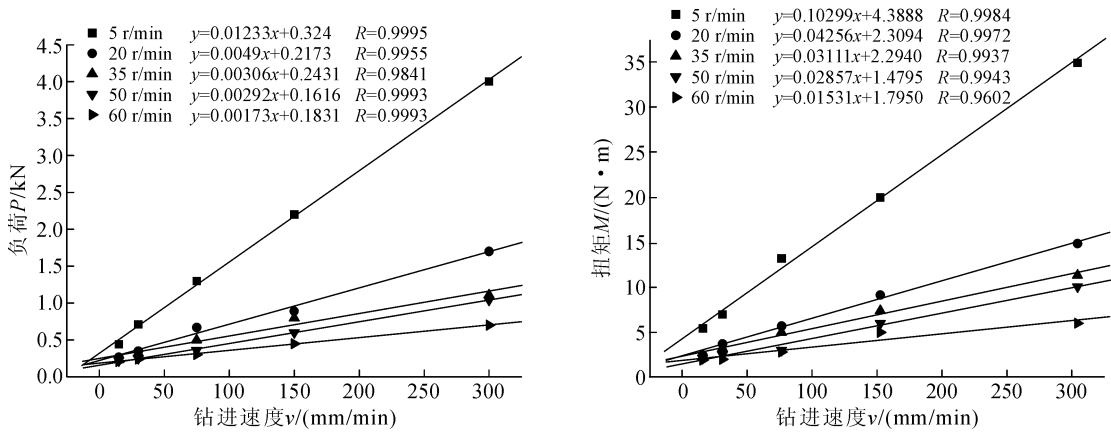


图4 各转速下轴向负荷和扭矩与钻进速度的关系

Fig. 4 Relationships between torque, axial load on probe and penetrating rate at different revolution rate

2) 钻进速度恒定下,扭矩、负荷与转速间的关系见图5。在钻进速度相同情况下,扭矩、负荷都随着转速的增加呈反比函数的趋势递减。钻进速度越大时,转速对负荷和扭矩的影响越显著。相同转速增量情况下,钻进速度越大,则负荷和扭矩的降低值越大。其原因也是钻进速度不变,转速增加,钻头的每转进给量减小从而使所需扭矩、负荷的值减小。钻进速度越大,则负荷和扭矩与转速间的关系曲线都离原点越远。

3) 探头上的扭矩与负荷不变时,分析转速与钻

进速度的关系。由于本试验机控制条件的限制,无法控制扭矩,虽可控制负荷,但是在轴向负荷和转速不变的条件下,探头达到一定深度后只转不进。所以本文用已有文献的试验数据资料来论证本文所提出的论点。

张晓东等用 $8 \frac{1}{2}$ in PDC 钻头在室内对两种典型岩样——嘉陵江石灰岩和香溪砂岩进行不同转速和负荷下的钻切试验,获得了扭矩和机械钻进速度的数据,见原文表1^[4]。初步分析试验数据发现:针对同一种岩样,在不同的转速和相同的负荷控制

下,得到的钻进速度不同,但是扭矩却相同。根据本文触探诸参数间关系的研究思路的内容可知,针对上述控制条件下的试验结果也可进行相同负荷和扭矩下的转速和钻进速度间的关系研究。而砂岩样和石灰岩样在相同负荷和扭矩下的转速和钻

进速度间的关系见图6。在相同扭矩和负荷下,钻切砂岩和石灰岩试件的钻头上的转速随着钻进速度的增加而增加,两者呈显著的线性关系。负荷或扭矩越大,则转速与钻进速度的关系直线斜率越小,即每转进给量值越大。

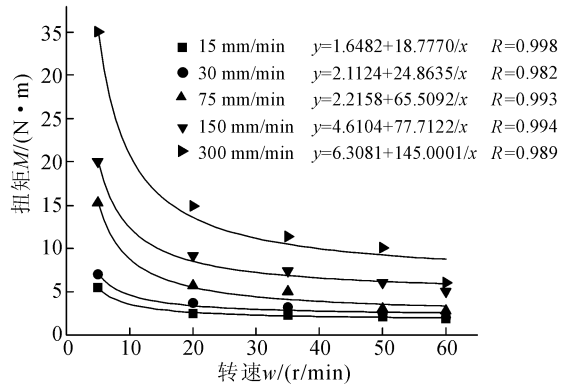
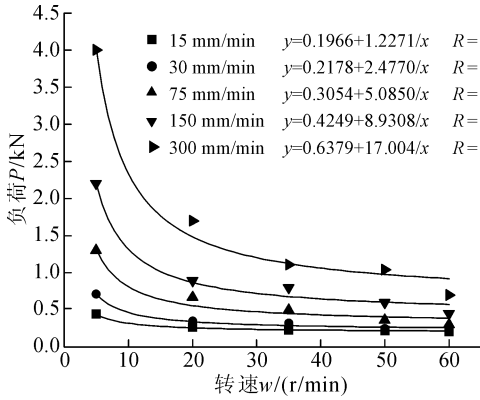


图5 各钻进速度下轴向负荷和扭矩与转速的关系

Fig. 5 Relationships between torque, axial load on probe and revolution rate at different penetrating rate

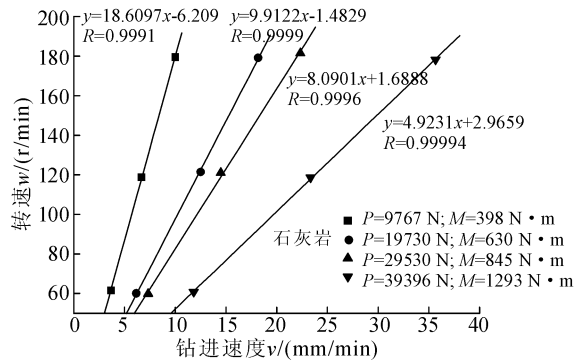
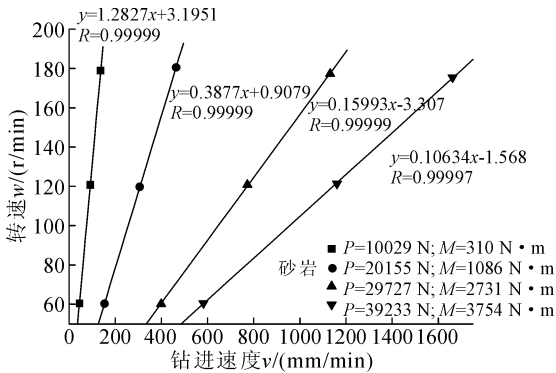


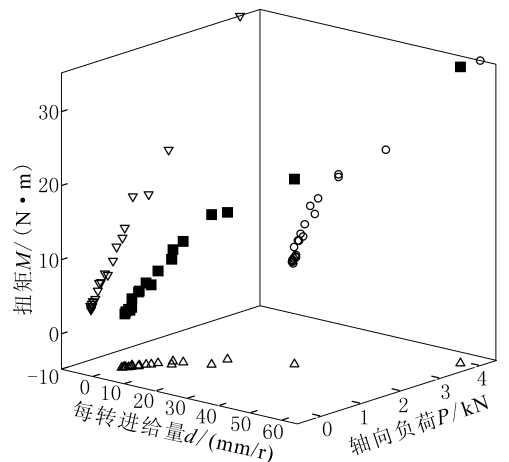
图6 相同负荷和扭矩下钻头转速与钻进速度间的关系

Fig. 6 Relationships between rotational rate and penetrating rate of the PDC bit with the same pressure-on-bit and torque

3.2.3 扭矩、轴向负荷和每转进给量三者间的关系

扭矩、轴向负荷和每转进给量三者间的关系见图7。扭矩、轴向负荷和每转进给量在三维坐标系中,是一条由两段直线构成的空间曲线。而并非是式(10)所表达的空间平面。但是,由前文得出的扭矩与轴向负荷间是线性关系,所以钻切同一岩土体得到的数据点集也只能是法向量为 $(k_2, k_1, -1)$ 的平面内的一条曲线。

已有文献的试验研究结果似乎相悖于本文所得结论。如文献2的图3和图4所展示的不同岩石、不同转速下负荷与钻进速度两者间的关系并非线性关系。但用理论关系式(10)仍能很好地解释:根据式(6)~(9),针对某一确定直径的某种材料、类型的钻头在钻切某一类岩样,在仅改变运行参数的钻切试验过程中,式(6)~(9)中的钻头半径、岩样与钻头间的摩擦系数和A、B、C和D系数均不变。 M_1 、 P_1 是由切削引起的,只随切削深度的增加而线



■: 三维点; △: 三维点在 P-d 面内的投影;
○: 三维点在 M-d 面内的投影; ▽: 三维点在 M-P 面内的投影

图7 试样的扭矩 M-轴向负荷 P-每转进给量 d 三者间的关系图

Fig. 7 Relationship among torque M, pressure-on-bit P and cutting depth per revolution d to the samples

性增加,而 M_2 、 P_2 是由钻体下部的岩体对其约束而引起的。在法向约束力 F_n 较小时,即在研磨阶段 M_2 、 P_2 随切削深度增加也线性增加,但当 F_n 增大到某一值时,即钻切是在压碎阶段,即使切削深度再增加, F_n 变化不大(见图8),切削力随着每转进给量的增加线性增大,而约束力则先随每转进给量的增加而线性增大,而后并不随每转进给量的增加而改变。两部分累积叠加为总的扭矩或总的负荷,即扭矩或负荷与每转进给量的曲线中,研磨阶段的斜率比压碎阶段的大。更何况大多数岩样并非都具有明显的分界点,而是在研磨阶段和压碎阶段之间有个过渡阶段。由于砌块的抗压强度和弹性模量均较小,研磨阶段所对应轴向压力和扭矩数值较小,且过渡阶段不明显,所以与按压碎阶段直线方程计算的轴向压力和扭矩值比较接近。所以试验所得扭矩、轴向负荷与钻进速度呈线性关系,与转速呈-1次曲线关系。而文献2中图3和图4恰好证实了本文所得到的扭矩、轴向负荷和转速、钻进速度四者间内在关系的正确性。

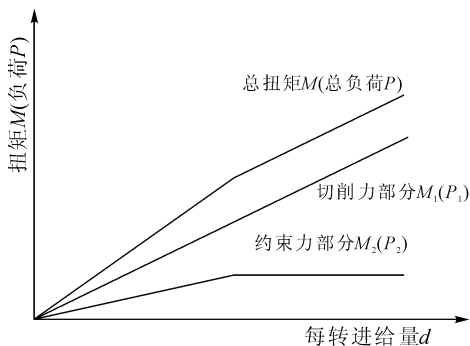


图8 扭矩或轴向负荷及各组成部分与每转进给量间的关系
Fig.8 Relationship between each part of torque or pressure-on-bit and amount of feed per revolution

4 结论

当探头的转速不变,则扭矩和轴向负荷与钻进速度呈线性关系;当探头的钻进速度不变时,轴向负荷和扭矩与转速呈-1次曲线关系;当探头的钻进速度和转速不变时,即每转进给量相同,扭矩与轴向负荷间呈线性变化关系;当探头上的扭矩与轴向负荷不变时,转速与钻进速度呈正比关系。从而证明了旋进式触探过程中诸参数间是呈线性相关的。

另外,依据触探四大参数间的内在关系,合理地解释了一些已报道的相同转速下钻压与钻进速度间并非非线性关系的现象,即扭矩、负荷和每转进给量任意两者间即使是非线性关系,但三者间仍呈

线性关系。即以另一种方式验证了理论分析得到的荷载参数与运行参数间内在关系的正确性。

本文所引用的数据均来自室内试验,试样也较均匀,控制条件相对简单,正面论证探头上的运行参数与荷载参数间的关系所采用的三种试样的数据范围是有限的,但其验证的理论关系能够较好地解释钻切同一种岩样每转进给量变化范围较大时(即遍及岩样的两种破坏时)负荷与转速间的关系。

参考文献:

- [1] 刘奉银,罗士梅,李宁. 西安黄土的新型旋转触探室内试验研究[J]. 西安理工大学学报, 2008, 24(3): 316-319.
Liu Fengyin, Luo Shimei, Li Ning. The lab experimental research on Xi'an loess with a new apparatus of rotary penetration[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(3): 316-319.
- [2] 赵金昌,万志军,李义,等. 高温高压条件下花岗岩切削破碎试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1432-1438.
Zhao Jinchang, Wan Zhijun, Li Yi, et al. Research on granite cutting and breaking test under conditions of high temperature and high pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1432-1438.
- [3] 卢世红,胡湘炯,陈庭根. 刮刀钻头磨损规律的初步研究[J]. 石油大学学报, 1984, 6(1): 65-72.
Lu Shihong, Hu Xiangjiog, Chen Tinggen. Preliminary study of drilling rate law for drag bit[J]. Journal of China University of Petroleum, 1984, 6(1): 65-72.
- [4] 张晓东,易发全,张强,等. PDC钻头与岩石相互作用规律试验研究[J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(增刊): 64-66.
Zhang Xiaodong, Yi Faquan, Zhang Qiang, et al. Experimental study of interacting laws of PDC bit with rock[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2003, 25(Sup.): 64-66.
- [5] 李宁,宋玲,刘奉银. 围岩力学参数现场测试系统: 中国, 200810236566.9 [P]. 2008-12-31.
- [6] 宋玲,李宁,刘奉银. 旋进式触探机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊2): 3519-3525.
Song Ling, Li Ning, Liu Fengyin. Research on the mechanics of rotary penetration test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup. 2): 3519-3525.
- [7] 郭恒,曹俭,艾池,等. PDC钻头切削深度与切削力之间关系的试验研究[J]. 大庆石油学院学报, 1997, 21(2): 23-25.
Guo Heng, Cao Jian, Ai Chi, et al. Study of the relationship between PDC drilling bit's cutting depth and cutting load[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1997, 21(2): 23-25.