

鑽井科学原理

苏联 伏·斯·費多洛夫著

石油工業出版社

本書闡明了鑽井技術措施的科学原理；鑽井各參數對於鑽進的進尺指标与質量指标的影响；制訂轉盤鑽或渦輪鑽井時技術措施的方法及在不同鑽進条件下选定鑽頭類型和式样的方法。

本書專供鑽進油井的工程師与技術員，設計工程師和科学工作者參考用。

本書由石油管理總局鑽探局翻譯組李扶同志翻譯，姚文甫同志和李德蛟同志分別作了譯文及技術校訂。

В. С. ФЕДОРОВ

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ РЕЖИМОВ БУРЕНИЯ

根据蘇聯國立石油燃料科技書籍出版社(ГОСТОПТЕХИЗДАТ)

1951年列寧格勒版翻譯

書 号 85

鑽 井 科 学 原 理

石油管理總局鑽探局翻譯組譯

*

石油工業出版社出版 (地址：北京六鋪炕石油工業部大樓)

北京市書刊出版業營業登記證出字第083号

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

*

850×1092 $\frac{1}{16}$ 開本 * 9印張 * 221千字 * 印1,101—2,150册

1955年8月北京第1版第1次印刷

1956年3月北京第1版第2次印刷

定價(9)二角八分

作者序

在1939年由蘇聯國立石油燃料科技書籍出版社出版的「鑽井技術措施與定額的規定法」小冊子中，作者曾簡要地敘述了按照一定的地質條件並照顧到鑽井設備的能力選定技術措施的一些指導原則。在這本小冊子中介紹了斯達哈諾夫工作者工作經驗的研究結果，並總結了這一時期鑽井方面的科學成就。

在過去數年內由於鑽井技術上的改良，特別是由於廣大工人羣衆和石油工程技術人員發揮了高度的勞動創造性、積極性使鑽井技術獲得了極大的改進。著名的鑽井技師——鑽井工作革新者如 А. И. 奧爾洛夫, И. Д. 庫普里雅諾夫, П. П. 巴拉巴諾夫, М. Я. 尼凱勝, Е. 兆也夫, Ф. 米諾索夫，他們以自己的鑽井實際活動證明了採用快速鑽井技術措施工作的合理性，並樹立了合理使用鑽頭的榜樣，使鑽井技術獲得了一系列重大的改變。由於這種情況便使鑽速急劇地提高。

科學工作者、石油工作者和工程師們在確定各種型式鑽頭的使用範圍方面，在探求合理使用鑽頭的方法方面，以及在選定鑽井技術措施各參變數關係間適當配合等方面均進行了艱鉅的研究工作。特別是 Л. А. 什連尼爾、Н. И. 沙佐夫教授，前輩科學工作者 М. М. 格爾賓科, А. С. 斯達尼舍夫斯基，講師 Е. Ф. 愛普什青，А. Ф. 葉蓋列夫，工程師 В. С. 阿弗捷也夫，Н. Н. 格羅梅科夫, Р. А. 約涅夏, М. Т. 古士曼, С. Р. 格羅泊什青等曾在這方面作過重要的研究工作。作者在這方面也與自己的同事們進行過工作。

本書在於簡要地闡明鑽井技術科學領域內現代化科學技術的成就，並把它或多或少作一種完整的系統性的歸納。

鑒於最近有許多介紹斯達哈諾夫快速鑽井工作者工作經驗的小冊子出版，作者毅然放棄了個別鑽井隊工作的零星介紹，而將這一問題的全部資料以歸納的方法加以敘述。

本書原稿承蒙 Н. И. 沙佐夫與 Л. А. 什連尼爾教授校閱，並提出了不少寶貴的意見，作者在此深致謝意。

最後請讀者注意，本書不免有個別缺點，若蒙指正，不勝感謝，並請將信寄至下列地址：

莫斯科特連奇揚科夫斯基 (Третьяковский) 街，1/19，國立石油燃料科技書籍出版社。即：

Москва, Третьяковский проезд, д. 19, Гостелтехиздат.

目 錄

作者序

第一篇 鑽井理論基礎

第一章 鑽井各種速度之間的相互關係	5
小 結	10
第二章 切削型鑽頭鑽進的理論基礎	11
第1節 鑽頭運動的基本情況	11
第2節 用於確定鑽速與鑽頭進尺的各公式的推論	15
第3節 鑽頭工作而各幾何值之間的關係	21
第4節 鑽頭在井底合理的工作時間	22
第5節 鑽頭的單位磨損	24
小 結	25
第三章 碎剝型鑽頭鑽進的理論基礎	26
第1節 牙輪鑽頭運動的基本情況	26
第2節 鑽頭牙輪齒同地層的相互作用	33
第3節 計算鑽速與鑽頭進尺各公式的推論	37
第4節 鑽頭在井底工作的合理時間	42
第5節 鑽頭在井底最經濟最有利的工作時間	43
第6節 鑽頭的單位磨損	47
第7節 鑽井指標各平均數值的計算方法	48
結 論	50

第二篇 選擇鑽頭類型和形式的方法

第一章 刮刀鑽頭與牙輪鑽頭的使用範圍	51
第1節 一些基本理論	51
第2節 評定鑽頭工作效能的標準	58
第3節 關於刮刀鑽頭與牙輪鑽頭工作的經驗資料	63
第4節 使用刮刀鑽頭的特殊場合	64
小 結	66
第二章 各種型式的刮刀鑽頭的使用範圍	67

第1節 刮刀鑽頭合理的幾何形狀	67
第2節 鑽頭的水眼噴嘴	72
第3節 各種型式刮刀鑽頭之工作比較	73
小 結	77
第三章 各種型式牙輪鑽頭的使用範圍	78
第1節 牙輪鑽頭工作面合理的幾何形式	79
第2節 鑽頭水眼的構造	98
第3節 牙輪軸承	101
小 結	104
第4節 關於鑽頭工作的一些補充資料	104
第三篇 為確定鑽井技術措施各參變數對鑽井指標影響的實驗研究	
第一章 鑽頭轉數對於鑽進指標的影響	107
第1節 使用各種刮刀鑽頭鑽進	107
小 結	111
第2節 使用各種牙輪鑽頭的鑽進	112
小 結	123
第二章 鑽頭壓力對於鑽井指標的影響	124
第1節 使用刮刀鑽頭鑽進	125
小 結	137
第2節 使用牙輪鑽頭鑽進	138
小 結	145
第三章 井眼沖洗對鑽進指標的影響	146
第1節 泥漿比重與粘度對鑽進指標的影響	147
第2節 泥漿排量 Q 對鑽速 v_z 與鑽頭進尺 H 的影響	148
第3節 泥漿自鑽頭水眼噴嘴流出速度對鑽速 v_z 的影響	151
第4節 鑽頭水眼噴嘴至井底之距離 l 對鑽速 v_z 的影響	152
小 結	154
第四章 鑽進指標在 P, n 與 Q 同時增大之下的變化	156
第1節 布澤夫石油聯合局的快速鑽井經驗	156
第2節 选定 P, n 與 Q 間相互關係的基本原則	163
第五章 鑽井技術措施各參變數對井斜的影響	165

第1節 鑽井技術措施參變數對井斜角變化的影响	165
第2節 鑽井技術措施各參變數對井斜方位角的影响	171
小 結	172
第六章 鑽井所需之功率	173
第1節 消耗於克服機械傳動阻力的功率	174
第2節 鑽桿柱旋轉所需之功率	174
第3節 消耗於克服鑽頭所遇阻力的功率	179
第4節 循環泥漿所消耗之功率	184
第5節 使用牙輪鑽頭鑽進時有關計算功率公式的分析	186

第四篇 鑽井技術措施

第一章 鑽井技術措施的一般知識	189
第1節 一般概念和定義	189
第2節 鑽井技術措施的發展簡史	191
第3節 蘇聯各礦場上的快速鑽井經驗	200
第二章 快速鑽井措施	205
第1節 鑽井技術措施的制訂	205
第2節 用渦輪鑽鑽井時鑽頭壓力與泥漿排量的選定	206
第3節 轉盤鑽井時鑽頭壓力與轉數的選定	210
第4節 泥漿排量的選定	215
第5節 泥漿性能的選定	221
第6節 鑽頭給進方式	224
第7節 根據所確定的鑽井技術措施選擇設備	227
第三章 合理的(最好的)鑽井技術措施	230
第1節 渦輪鑽井法	230
第2節 轉盤鑽井法	236
第四章 特殊的鑽井技術措施	251
第1節 取岩心時的鑽進措施	251
第2節 防止鑽進中發生各種困難的技術措施	254
第五章 鑽桿的選擇	254
第1節 鑽桿直徑的選擇	255
第2節 使用各種尺寸鑽桿的鑽進深度問題	263
第3節 鑽鉞長度的選擇	267

第一篇 鑽井理論基礎

第一章 鑽井各種速度之間的相互關係

鑽井方面的技術成就，通常是依據鑽速來評定的。

爲了評定有關一口井的各種工作方法的好壞，必須先要了解各種鑽速的概念，如機械鑽速，行程鑽速，有效時間鑽速經濟鑽速及鑽機月總合鑽速等。這些鑽速間的相互關係在下面敘述。

採用的符號如下：

v_{cp} ——平均機械鑽速，公尺/時；

v_n ——行程鑽速，公尺/時(一次起下鑽平均鑽速)；

v_T ——有效時間鑽速，公尺/時或公尺/鑽機月；

v_k ——經濟鑽速，公尺/鑽機月；

v_n ——鑽機月總合鑽速，公尺/鑽機月；

T_n ——鑽進時間，包括擴大井眼，割眼時間，小時；

T_{cn} ——起下鑽，換鑽头和接鑽桿時間，小時；

T_{och} ——除 T_n 与 T_{cn} 時間外，鑽井过程中全部生產時間，小時；

T_H ——鑽井过程中非生產時間(各種停工解除事故等)，小時；

T_B ——井架及鑽井設備安裝時間，小時；

L ——井的深度，公尺。

各關係式如下：

$$v_{cp} = \frac{L}{T_n}; \quad (1,1)$$

$$v_n = \frac{v_{cp}}{1 + \frac{T_{cn}}{T_n}}; \quad (2,1)$$

$$v_T = \frac{v_{cp}}{1 + \frac{T'_{cn} + T'_{och}}{T'_H}}; \quad (3,1)$$

$$v_K = \frac{v_{cp}}{\left(1 + \frac{T'_{cn} + T'_{och} + T'_H}{T'_H}\right) c}; \quad (4,1)$$

$$v_{\Pi} = \frac{v_{cp}}{c \left(1 + \frac{T'_{cn} + T'_{och} + T'_H + T'_B}{T'_H}\right)}. \quad (5,1)$$

式中 c ——時間折算係數(把小時折為月)。

上列各式中有幾式可變換如下，即：

$$v_H = \frac{L}{T'_H + T'_{cn}}; \quad (2', 1)$$

$$v_T = \frac{v_H}{c \left(1 + \frac{T'_{och}}{T'_H + T'_{cn}}\right)}; \quad (3', 1)$$

$$v_K = \frac{v_T}{c \left(1 + \frac{T'_H}{T'_H + T'_{cn} + T'_{och}}\right)}; \quad (4', 1)$$

$$v_{\Pi} = \frac{v_K}{c \left(1 + \frac{T'_B}{T'_H + T'_{cn} + T'_{och} + T'_H}\right)} \quad (5', 1)$$

從所列舉的各式中可以很明顯地看出， v_H ， v_T 與 v_K 皆以 v_{cp} 為轉移；同時，後一式之速度的大小都是決定於它的前一式的。

根據高加索各油礦鑽進最成功的25—30口井的資料研究，確定了鑽進深度不同的各井所消耗的時間和時間之間的比(表1)。

從以上各公式與表1各數字的研究中得出一項結論：欲達到快速鑽井，必須在技術上以快速的方法進行有關鑽井的各項必要的工作。

假使對各項鑽井工程都能堅決的以快速方法進行，那麼所需工作時間即可比原來應費的時間縮減二分之一，自然，機械鑽速

与經濟鑽速也就可以提高到兩倍，但若僅在進尺上採用快速技術措施，而对其他工程仍以舊方法進行，那麼經濟鑽速就不会有顯著的提高。

表 1

	井 深， 公 尺			
	1000以內	1000—2000	2000—3000	3000以上
$T_{\text{д}}$, %	48—53	49—47	50—45	49—38
$T_{\text{сп}}$, %	8—10	9—18	18—19	19—22
$T_{\text{осн}}$, %	38—55	39—28	25—28	24—31
$T_{\text{н}}$, %	6—2	3—7	7—8	8—9
$v_{\text{д}}$, % (視 $v_{\text{сп}}$ 定)	0.82	0.77	0.73	0.69
$v_{\text{к}}$, % (視 $v_{\text{сп}}$ 定)	0.40	0.48	0.46	0.44

事實上，假如機械鑽速由於採用快速措施而提高了到兩倍，鑽頭進尺提高到一倍半，那麼經濟鑽速在鑽淺井時只不过會提高到1.3—1.4倍，在鑽深井時提高到1.45—1.50倍。

同時由表1資料中可以明顯的看出，在鑽進深井与中等深井時，鑽頭在井下有效的工作時間与起下鑽作業所耗費的時間約佔65—70%。

因之，欲对上述不同深度的各井加速鑽進，首先須設法減少時間 $T_{\text{д}}$ 与 $T_{\text{сп}}$ 。

試問如何才能達到這一點呢？

从公式(1,1)得出

$$T_{\text{д}} = \frac{L}{v_{\text{сп}}}.$$

因此，只有提高機械鑽速才能達到減少鑽進的時間。

起下鑽作業時間(包括接鑽桿和換鑽頭)隨井深增加而延長，這是因為不論換鑽頭的次數增加，或起下鑽時間都延長了的關係。

我們以 L_1 表示第一個鑽頭鑽過之後的井深，以 L_2 表示第二個鑽頭鑽過之後的井深， L_m 表示第 m 個鑽頭鑽過之後的井深。

以 l 表示鑽桿立根長度。

於是起下鑽作業時間 $T_{\text{起}}$ 的計算公式爲：

$$T_{\text{起}} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^m L_i t_i + m t_n + \frac{2L}{l} t_H. \quad (6,1)$$

式中 L, L_i, l 以公尺計算；

t_n ——換鑽頭時間，小時；

t_H ——接鑽桿、雙立根時間，小時。

在公式(6,1)內，

$$\frac{1}{l} \sum_{i=1}^m L_i t_i = \frac{L_1}{l} t_1 + \frac{L_2 t_2}{l} + \dots + \frac{L_m}{l} t_m, \quad (a)$$

式中 $L_1, L_2, \dots, L_i$ 爲第一個鑽頭，第二個鑽頭以至第 i 個鑽頭用過之後的鑽柱長度；

$t_1, t_2, \dots, t_m$ 爲每一立根在各種深度起下時所需的時間。

當闡明影響 $T_{\text{起}}$ 值的各種因素時，爲了把問題具體化，應研究鑽井過程中常遇到的兩種極普通的情況。

第一種情況 在鑽進中井內岩石抗壓強度保持不變。鑽井提昇設備是多速度的。

對於類似這種情況下的鑽進，當然每個鑽頭在整個井深的進尺中是保持不變的，即

$$H_i = H = \text{常數}.$$

起鑽速度隨井深增加逐漸變慢，即從淺的深度提起鑽具速度爲 n ，其後，井加深時速度爲 $(n-1)$ 與 n ，再後，速度爲 $(n-2)$ ， $(n-1)$ 與 n 等。

在此情況下，正確的時間關係爲：

$$t_i = t_0 + \alpha L_i, \quad (6)$$

式中 t_i ——從井深 L_i 處起下一個立根所需的時間；

t_0 ——以最高速度起下一個立根所需的時間；

α ——決定於提昇設備速度與各速度之比；並表示由於井

深增加後，起下一立根作業減慢速度之係數。

如此，(a)式中之 $L_1, L_2, \dots, L_m$ 如以其相当的 $H, 2H, \dots, mH$ 值來代替，而 $t_1, t_2, \dots, t_m$ 如以 $(t_0 + aL_1), (t_0 + aL_2) \dots (t_0 + aL_m)$ 的相当數值來代替，則(a)式可改寫為如下：

$$\frac{1}{l} \sum_{i=1}^m L_i t_i = \frac{L}{2l} (m+1) \left[t_0 + \frac{aL}{3} \left(2 + \frac{1}{m} \right) \right],$$

而

$$T_{cn} = \frac{L}{2l} (m+1) \left[t_0 + \frac{aL}{3} \left(2 + \frac{1}{m} \right) \right] + m t_n + \frac{2L}{l} t_n. \quad (7,1)$$

第二种情况 鑽進中岩石抗压强度隨井深增加而增高。

鑽井提昇設備是多速度的。

在这种情况下，鑽頭進尺隨井深增加而逐漸減低。

H_i 的變化規律可由下式說明：

$$H_i = \frac{H_0}{1 + \gamma_0 L_i}, \quad (B)$$

式中 H_i ——鑽到深度 L_i 時的鑽頭進尺；

H_0 ——在極淺處時鑽頭的進尺；

γ_0 ——隨井深增加而岩石機械性能變化的係數。

其次對於多速度提昇設備來說也和第一種情況中所採用的速度一樣，我們將採用(6)式的關係。在这种情况下，与第一種情況比較推出

$$T_{cn} = \frac{t_0}{l} \sum_{i=1}^m L_i + \frac{a}{l} \sum_{i=1}^m L_i^2 + m t_n + \frac{2L}{l} t_n.$$

在上述情況下完成一口井所需之鑽頭數，我們利用下列方程式可以求出

$$m = \int_0^L \frac{1 + \gamma_0 L}{H_0} dL = \frac{L}{H_0} + \frac{\gamma_0 L^2}{2H_0},$$

由上式得出

$$L = \frac{1}{\gamma_0} \sqrt{1 + 2H_0 \gamma_0 m} - \frac{1}{\gamma_0}.$$

$\sum_{i=1}^m L_i$ 可以下列近似的形式表示:

$$\sum_{i=1}^m L_i = \int_0^m f(m) dm + \frac{1}{2} L_m$$

与

$$\sum_{i=1}^m L_i^2 = \frac{2H_0}{\gamma_0} \cdot \frac{m(m+1)}{2} - \frac{2}{\gamma_0} \sum_{i=1}^m L_i.$$

解上列各式後得出計算起下鑽時間的公式爲:

$$\begin{aligned} T_{\text{cn}} = & \left(\frac{t_0}{l} - \frac{2a}{l\gamma_0} \right) \left[\left(\frac{1}{2} + \frac{2}{3}m + \frac{1}{3H_0\gamma_0} \right) \right. \\ & \times \left(\frac{1}{\gamma_0} \sqrt{2H_0\gamma_0 m + 1} - \frac{1}{\gamma_0} \right) - \frac{1}{3\gamma_0} m \Big] \\ & + m(m+1) \frac{H_0 a}{\gamma_0 l} + m t_n + \frac{2L}{l} t_H. \end{aligned} \quad (8,1)$$

由以上公式中得出結論: 起下鑽作業時間的長短決定於鑽桿立根的長度(井架高度), 井的深度, 捲揚設備的類型与鑽頭消耗數目(或鑽頭進尺)。

小 結

1. 欲縮短鑽進時間 T , 只有一個办法, 就是提高机械鑽速 v_{cp} ;

2. 減少總的起下鑽時間 T_{cn} , 最有效的办法是增加鑽頭進尺 H 。

当 $m=1$ 時, T_{cn} 可得到最小數值, 或者当 $H=L$ 時, 也是同樣的, 可獲得最小數值。

本章闡明了影响机械鑽速 v_{cp} 与鑽頭進尺 H 的全部基本因素,

而且提出提高鑽進速度的办法。

第二章 切削型鑽頭鑽進的理論基礎

第 1 節 鑽頭運動的基本情況

在鑽進過程中鑽頭有兩種運動，就是自上向下運動與旋轉運動。根據第一種運動，鑽頭在每一轉之下應吃入一定的深度；而第二種運動——旋轉運動——進行破壞岩層。

由於鑽頭同時作兩種運動，所以刮刀刃是以正螺旋面的軌跡進行。

我們設想點 $A(x, y, z)$ 是與刮刀刃永遠相聯，且該點距旋轉軸心的距離為 e ，當鑽頭刀刃運動時，此點即成為一條螺旋綫，螺旋綫之各點座標可以下式說明：

$$\left. \begin{aligned} x &= e \cos \omega t \\ y &= e \sin \omega t \\ z &= \frac{e\delta}{2\pi} \omega t \end{aligned} \right\} \quad (9,1)$$

式中 $e\delta$ ——鑽頭每轉一圈鑽進深度，公厘；

e ——鑽頭刮刀刃數（魚尾鑽頭 $e=2$ ，三翼鑽頭 $e=3$ ，四翼鑽頭 $e=4$ ，而各鑽頭刮刀接觸井底係在一個平面上）。

所研究之點 A 在時間 T 內所經過之軌跡為：

$$S = \int_0^T \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}.$$

因為點 A 是：

$$dx = -e\omega \sin \omega t \cdot dt;$$

$$dy = e\omega \cos \omega t \cdot dt;$$

$$dz = \frac{e\delta\omega}{2\pi} \cdot dt,$$

所以

$$S = \int_0^T \sqrt{(\varrho\omega)^2 + \left(\frac{e\delta\omega}{2\pi}\right)^2} \cdot dt = T \sqrt{(\varrho\omega)^2 + \left(\frac{e\delta\omega}{2\pi}\right)^2} \quad (10,1)$$

由於

$$T = \frac{60H}{e\delta n} = \frac{2\pi H}{e\delta\omega},$$

我們得出:

$$S = \frac{2\pi H}{e\delta\omega} \sqrt{(\varrho\omega)^2 + \left(\frac{e\delta\omega}{2\pi}\right)^2} = H \sqrt{\left(\frac{2\pi\varrho}{e\delta}\right)^2 + 1}. \quad (10',1)$$

顯然, 當

$$\varrho = 0 \quad \text{時} \quad S = H;$$

$$\varrho = \frac{D}{2} \quad \text{時} \quad S = \frac{H}{e\delta} \sqrt{(\pi D)^2 + (e\delta)^2};$$

$$\delta = 0 \quad \text{時} \quad S = \varrho\omega T.$$

鑽頭鑽進螺旋面的方程式與方程式(9,1)相類似, 在此方程式中 ϱ 的可變數如下:

$$\left. \begin{aligned} x &= \varrho \cos \omega t \\ y &= \varrho \sin \omega t \\ z &= \frac{e\delta}{2\pi} \omega t + U \end{aligned} \right\} \quad (11,1)$$

在一般情況下 $U = f(\varrho)$; 在這裏是 $\frac{dU}{d\varrho} = 0$.

由公式(11,1)中前兩式求得

$$\frac{y}{x} = \operatorname{tg} \omega t,$$

$$\omega t = \operatorname{arctg} \frac{y}{x}.$$

將 $\omega t = \operatorname{arctg} \frac{y}{x}$ 代入公式(11,1)中第三式, 則

$$z = \frac{e\delta}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y}{x} + U. \quad (12,1)$$

刮刀刃之運動方向決定於接觸面在 M 點 (x_0, y_0, z_0) 上與 XOY 面所成之傾斜角。

在此種情況下，切面方程式為：

$$(x-x_0)\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_M + (y-y_0)\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_M + (z-z_0)=0, \quad (13,1)$$

式中 $\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_M$ 與 $\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_M$ 是在 M 點 (x_0, y_0, z_0) 上求出 z 對 x 和 y 的偏微商。

在這裏

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{e\delta}{2\pi} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{y}{x}\right)^2} \cdot \frac{-y}{x^2} = -\frac{e\delta y}{2\pi x^2};$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{e\delta}{2\pi} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{y}{x}\right)^2} \cdot \frac{1}{x} = \frac{e\delta x}{2\pi x^2}.$$

將上項所得的結果代入公式(13,1)中，即得

$$(x-x_0)\left(-\frac{e\delta y}{2\pi x^2}\right) + (y-y_0)\frac{e\delta x}{2\pi x^2} + (z-z_0)=0. \quad (13',1)$$

現在可以求出決定鑽頭刮刀刃運動方向的對我們有益的一個角。

很明顯，這個角是刀刃兩面間的夾角，即：

$$A_1x + B_1y + C_1z + D_1=0$$

和

$$A_2x + B_2y + C_2z + D_2=0$$

計算公式如下：

$$\cos\psi = \frac{A_1A_2 + B_1B_2 + C_1C_2}{\pm \sqrt{(A_1^2 + B_1^2 + C_1^2)(A_2^2 + B_2^2 + C_2^2)}}. \quad (14,1)$$

在這裏已由公式(13,1)得出一個平面，而另一個平面—— XOY ——由方程式 $z=0$ 得出，在此情況下

$$A_1 = -\frac{e\delta y_0}{2\pi x_0^2}; \quad A_2 = 0;$$

$$B_1 = \frac{e\delta x_0}{2\pi\varrho^2}; \quad B_2 = 0;$$

$$C_1 = 1; \quad C_2 = 1.$$

將 $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$ 各值代入公式(14,1), 並作適當的合併, 即得

$$\cos\psi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{e\delta}{2\pi\varrho}\right)^2}}$$

或者

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{\sin\psi}{\cos\psi} = \frac{\sqrt{1 - \cos^2\psi}}{\cos\psi} = \frac{e\delta}{2\pi\varrho},$$

而

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{e\delta}{2\pi\varrho}. \quad (15,1)$$

這就是所求的未知角的公式。

根據下式確定鑽頭刮刀刃各部分運動的速度:

$$v = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}$$

或以 公式(9,1) 得

$$v = \sqrt{(\omega\varrho)^2 + \left(\frac{e\delta\omega}{2\pi}\right)^2}, \quad (16,1)$$

或

$$v = \frac{dz}{dt} \sqrt{\left(\frac{2\pi\varrho}{e\delta}\right)^2 + 1}.$$

速度是向量方向以角 ψ 確定, 若將此角引用於速度公式中, 即得

$$v = \frac{\omega\varrho}{\cos\psi} = \frac{\frac{dz}{dt}}{\sin\psi}. \quad (17,1)$$

因之，刮刀刃各點不僅具有不同的半徑 ϱ ，而且具有不同的角 ψ 。

鑽頭軸心各點之速度最小；其沿軸心運動之速度為 $v_t = \frac{e\delta\omega}{2\pi}$ 。速度之增加從軸心處按照雙曲線規律進展。

假定角速度 $\omega = \frac{n}{10}$ ，並將其化為計算 v_t 的一般採用之單位公尺/時，則成為

$$v_t = 0.06 e n \delta_t; \quad (18,1)$$

式中 v_t ——通常稱為機械鑽速。

第2節 用於確定鑽速與鑽頭進尺的各公式的推論

在使用實驗設備，鑽各種岩石時，我們曾確立許多重要關係，茲將其中的一部分列述如下：

(1) 鑽頭工作部分切入岩石的深度 δ ，依鑽頭壓力 P 增加的程度可以區分為三個階段：岩石被壓擠階段，岩石開始變形階段及岩石被有效地破碎階段(圖1)。

第一階段 a 是當 P 由 0 增至某種數值 P_1 時的一段時間，它說明岩石在鑽頭工作部分的壓力下面變得更緻密，表面孔隙縮小。在此階段 $\delta = f(P)$ 表示為直線關係。

第二階段是當 $P_1 < P < P'_{kp}$ 的階段，此時岩石在鑽頭壓力下表面呈現變動，因此直線關係 $\delta = f(P)$ 遂為 (b) 破壞，且 δ 值之增長快於 P 值。

第三階段表現岩石被有效的破壞。此時 $P \geq P'_{kp}$ 。由圖1得出結論是： $P > P'_{kp}$ 的增加，結果會使 δ 急劇增長。

很明顯， P'_{kp} 可以叫做臨界壓力，而臨界壓力與鑽頭同岩石的最初接觸面積 F_t (鑽頭的支承面積) 的比叫做岩石的極限應力或極限強度 σ 。 σ 的大小是表示岩石抗拒鑽頭工作部分切入的強

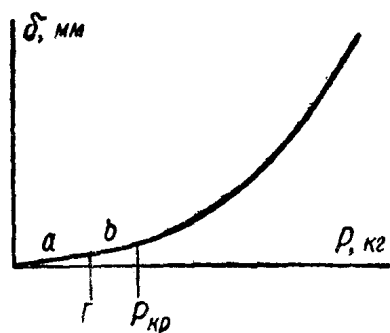


圖1