

# 仰斜钻孔倾角对顶板含水层疏放水影响的数值模拟研究

马亚杰, 刘 莉, 李 悦, 郭世达, 翟俊杰

(华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063010)

**摘要:** 钻孔疏放水是防治煤层顶板水害普遍采用的方法, 在特定的含水层条件下, 钻孔疏水量与疏水降压效率均受结构参数的密切影响, 倾角是重要参数之一。针对不同倾角对仰斜钻孔疏放水量与降压效果的影响, 建立均质各向同性水平含水层疏水模型, 研究倾角为  $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$  及  $90^\circ$  的仰斜钻孔边界设置, 模拟定流量与定水头情况下的钻孔疏水量特点。研究发现: 定流量疏水条件下, 疏水钻孔缓倾斜到陡倾斜过程中, 水位降落漏斗由底部平坦、影响面积大的椭圆形变为底部尖锐、影响面积小的渐圆形; 定水头疏水条件下, 钻孔疏水量随倾角增加锐减。含水层水平时倾角缓的钻孔更利于大面积水位降低及长期保持大水量疏放水。

**关键词:** 顶板含水层; 涌水量; 钻孔倾角; 疏放水

**中图分类号:** TD742

**文献标志码:** A

## Numerical simulation research on influence of inclined borehole angle on drainage of roof aquifer

MA Yajie, LIU Li, LI Yue, GUO Shida, ZHAI Junjie

(College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063010, China)

**Abstract:** Water drilling is the most commonly used way for reducing coal roof water. Under certain aquifer conditions, the drainage volume and pressure reduction efficiency of the drilling are sensitively affected by structural parameters, and dip angle is one of the important parameters. In view of the influence of different inclination angles on the drainage volume and pressure reduction effect of the inclined boreholes, a homogeneous and isotropic horizontal aquifer drainage model was established to study the boundary setting of upside boreholes with inclination angles ( $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $90^\circ$ ). The characteristics of the borehole drainage under constant flow and constant water head conditions were then simulated. The results show that the drop funnel changes gradually from the oval shape with a flat bottom and large influencing area to the round shape with a sharp bottom and small influencing area when the constant flow drainage borehole changes from being gently inclined to being steeply inclined. The drainage volume under the constant head conditions decreases sharply as the dip angle increases. When the aquifer is horizontal, the boreholes with gently inclined dip angles tend to be more effective in reducing large areas of water level and in maintaining large drainage volumes for a long time.

**Key words:** roof aquifer; water inflow; borehole angle; drainage

施工钻孔疏放含水层是顶板水害防治的最常用手段, 特定含水层条件下, 疏放水钻孔涌水量与钻孔结构有关, 包括钻孔孔径、深度、倾向、倾角等因素<sup>[1-3]</sup>。为提高疏放水效果, 研究者们开展了系列研究。马亚杰<sup>[4]</sup>、赵宝锋<sup>[5]</sup>等利用统计学方法找出了影响钻孔疏放水效果的重要参数, 认为钻孔疏放水量与含水层厚度、方位角、仰角、孔深均有关系。为进一步探究钻孔疏放水规律, 研究者们多采用数值模拟的方法, 钻孔常

收稿日期: 2021-08-12

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2020209074)

作者简介: 马亚杰(1975—), 女, 山西吕梁人, 教授, 博士, 主要从事水文地质与工程地质领域的研究. E-mail: 2586345@qq.com

被概化为从地面垂直进入含水层的垂直井<sup>[6-7]</sup>。井下疏放水钻孔开孔位置通常布置在煤矿工作面运输巷和回风巷道所处的煤层或煤层顶底板中,钻孔穿过煤层顶板倾斜进入含水层。因此,将疏水孔概化为直立井会导致钻孔涌水量预测误差较大。赵春虎等<sup>[8]</sup>、刘基等<sup>[9]</sup>、陈实等<sup>[10]</sup>将疏水钻孔概化为倾斜井,探究不同倾角的疏水钻孔的涌水规律,认为钻孔与含水层夹角为疏放水量的重要影响因素,随着钻孔揭露含水层斜长(与仰角相关)的增加,钻孔稳定涌水量增加。

上述研究表明,顶板疏放水钻孔从井下穿过煤层倾斜进入顶板含水层中,其倾斜角度是影响钻孔疏水量的重要参数,但不同仰角对钻孔疏水量及疏水效率的影响程度仍缺乏定量研究<sup>[11-13]</sup>。本研究建立了均质各向同性水平含水层疏水模型,研究钻孔倾角分别为 $10^{\circ}$ 、 $20^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $40^{\circ}$ 及 $90^{\circ}$ 时对疏水量与降压效果的影响,对定流量疏水情况下的疏水降压特征与定水头疏水情况下的钻孔疏水量特点进行对比研究。

## 1 倾斜钻孔的数值模拟

### 1.1 顶板疏水钻孔倾角统计

对开滦矿区 47 个顶板含水层仰斜疏放水钻孔倾角进行统计,钻孔倾角介于 $2^{\circ}$ ~ $36^{\circ}$ ,平均为 $19^{\circ}$ 。钻孔倾角统计的累积概率曲线如图 1 所示。钻孔倾角在 $10^{\circ}$ ~ $40^{\circ}$ 分布较均匀。因此,选择倾角分别为 $10^{\circ}$ 、 $20^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $40^{\circ}$ 及 $90^{\circ}$ 时进行模型对比研究。

### 1.2 厚含水层中仰斜钻孔的概化设置

在 Modflow 数值模型中,钻孔一般被概化为直立井<sup>[6-7]</sup>。当倾角小于 $40^{\circ}$ 的仰斜钻孔穿过厚含水层时,在水平方向上均跨越相当长的距离,不再适宜将其概化为一口忽略井径的直立井。若将含水层分为若干薄层,倾斜钻孔则沿钻孔倾向上穿过不同薄层,穿过薄层的钻孔段类似于完整井,整个钻孔等同于沿钻孔倾向的一串完整直立井。以穿过 50 m 厚度顶板含水层的 $20^{\circ}$ 倾斜钻孔为例,含水层被划分为层厚为 3.7 m 的 15 个薄层,该钻孔被概化为 15 个位于每一薄层的直立井,沿钻孔倾向排列。

仰斜疏水钻孔涌水量自终孔以后随时间变化而变化,通常呈现阶梯状衰减的特征,即在一段时间内涌水量稳定,为稳定流量边界,持续一段时间后涌水量减小并继续持续一段时间,继而进一步衰减。仰斜钻孔边界为自由边界,孔中无地下水驻留,钻孔边界的水压不低于其位置水头。依据上述特征,将仰斜疏水钻孔边界设置为定流量边界与定水头边界两种情况。定流量疏水条件下,不同倾角钻孔的涌水量相等,将总涌水量 $1\ 440\ \text{m}^3/\text{d}$ 平均分配给各分层直立井,观测各抽水井疏水降压特征。定水头疏水条件下,将各分层直立井的定水头设置为滤水管顶板高度,观测各抽水井疏水量变化特点。以穿过 50 m 厚度顶板含水层的倾角 $20^{\circ}$ 钻孔为例,将其概化为 J1~J15 共 15 个直立井,模型中各直立井参数与边界条件如表 1 所示。

## 2 仰斜钻孔疏放顶板含水层数值模型构建

应用 Visual Modflow 软件建立承压含水层模型。模型自上而下分为 3 层,顶板与底板均为 10 m 厚的隔水层,中间为 50 m 厚的含水层。模型平面范围为 $910\ \text{m} \times 910\ \text{m}$ 的正方形,以 $10\ \text{m} \times 10\ \text{m}$ 网格剖分模拟区,X、Y 方向各划分 91 个网格。基于 Modflow 软件,建立倾角分别为 $10^{\circ}$ 、 $20^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $40^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$ 的疏水钻孔模型,如图 2 所示(图中黄色段即为钻孔抽水段)。

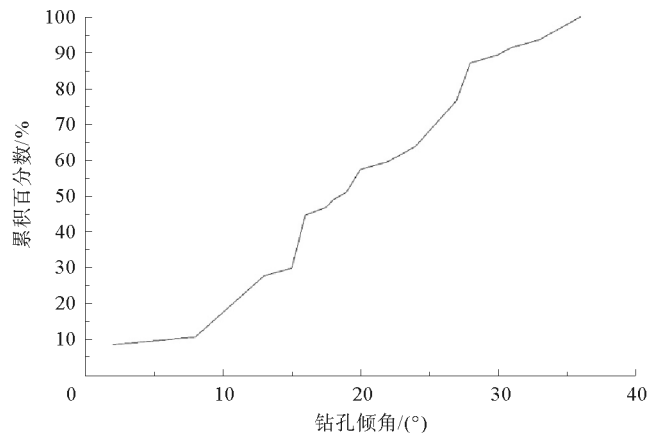


图 1 顶板含水层疏放水钻孔倾角累积概率曲线

Fig. 1 Cumulative probability curve of borehole dip angle for drainage of roof aquifer

表 1 倾角 20° 钻孔概化为分段直立抽水井几何参数与边界一览表

Tab. 1 List of geometric parameters and boundaries of a segmented upright pumping well with an inclination of 20°

| 抽水井名称 | X 坐标/m | Y 坐标/m | 滤管底板高程/m | 滤管顶板高程/m | 定流量抽水量/(m <sup>3</sup> /d) | 定水头抽水各孔水头/m |
|-------|--------|--------|----------|----------|----------------------------|-------------|
| J1    | 465    | 455    | -33.2    | -29.5    | 96.0                       | -29.5       |
| J2    | 475    | 455    | -29.5    | -25.9    | 96.0                       | -25.9       |
| J3    | 485    | 455    | -25.9    | -22.3    | 96.0                       | -22.3       |
| J4    | 495    | 455    | -22.3    | -18.6    | 96.0                       | -18.6       |
| J5    | 505    | 455    | -18.6    | -15.0    | 96.0                       | -15.0       |
| J6    | 515    | 455    | -15.0    | -11.3    | 96.0                       | -11.3       |
| J7    | 525    | 455    | -11.3    | -10.0    | 96.0                       | -10.0       |
| J8    | 455    | 455    | -36.8    | -33.2    | 96.0                       | -33.2       |
| J9    | 445    | 455    | -40.5    | -36.8    | 96.0                       | -36.8       |
| J10   | 435    | 455    | -44.1    | -40.5    | 96.0                       | -40.5       |
| J11   | 425    | 455    | -47.7    | -44.1    | 96.0                       | -44.1       |
| J12   | 415    | 455    | -51.4    | -47.7    | 96.0                       | -47.7       |
| J13   | 405    | 455    | -55.0    | -51.4    | 96.0                       | -51.4       |
| J14   | 395    | 455    | -58.7    | -55.0    | 96.0                       | -55.0       |
| J15   | 385    | 455    | -60.0    | -58.7    | 96.0                       | -58.7       |

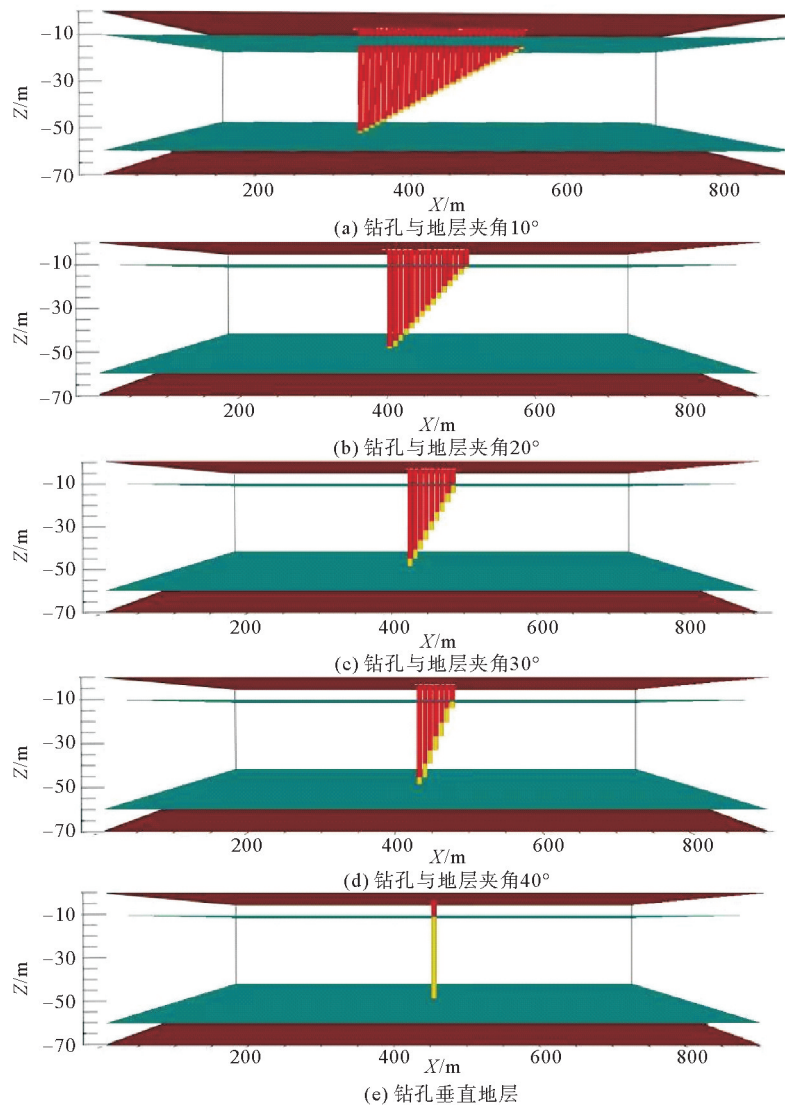


图 2 倾斜钻孔概化示意图

Fig. 2 Generalized schematic diagram of inclined boreholes

将承压含水层概化为各向同性均质渗流场,含水层四周边界接受地下水补给,设置模型四周为补给流量边界。含、隔水层的水文地质参数如表 2 所示。

表 2 含、隔水层水文地质参数分布表  
Tab. 2 Distribution of hydrogeological parameters of water-bearing and aquifer

| 层位  | 渗透系数 $k_x/(m/s)$ | 渗透系数 $k_y/(m/s)$ | 渗透系数 $k_z/(m/s)$ | 贮水率 $(1/m)$ | 给水度  |
|-----|------------------|------------------|------------------|-------------|------|
| 含水层 | 0.000 010 0      | 0.000 010 0      | 0.000 010 0      | 0.000 007 0 | 0.25 |
| 隔水层 | 0.000 000 1      | 0.000 000 1      | 0.000 000 1      | 0.000 000 2 | 0.15 |

模拟承压含水层顶板承压高度 40 m、底板承压高度 90 m,全区水位初始标高 30 m。模型区内,遵循对称原则,在 X、Y 方向上每隔 50 m 布置水位观测井,定流量模拟观察地下水数值模型的水位变化,观测井布置位置如图 3 所示。

### 3 倾角对钻孔疏放顶板承压含水层影响模拟结果分析

#### 3.1 定流量抽水模拟结果分析

模拟结果显示,钻孔的倾向为 X 负方向时,各观测点的水位以 X、Y 为对称轴的对称型,模型区的水位动态可以用对称型的一角来反映,即通过 GJ11、GJ13、GJ66、GJ31、GJ17、GJ35、GJ69 动态显示。

观测孔水位随模拟时间推移经历下降至稳定的过程。如图 4 所示,中心单元观测孔 GJ11 水位稳定最快、下降幅度最大,在抽水 2~3 天后即达到稳定。随着钻孔倾斜角度的增加,水位下降幅度增加,稳定后倾角 10°、20°、30°、40°、90° 的钻孔中心点水位下降至 17.2、13.7、11.1、9.8 及 -0.2 m。在距离钻孔中心点较近的位置,倾角 10° 钻孔与倾角 40° 钻孔、竖直钻孔动态具有显著差别,在观测井 GJ31 中钻孔倾斜角度越缓稳定水位越低,在两观测井 GJ13 和 GJ66 中钻孔倾斜角度越缓稳定水位越高,倾角 10° 钻孔在 GJ31 和 GJ13 两观测点具有最大的水位差值,达到 3.2 m。在距离钻孔中心点较远的 GJ17、GJ35 与 GJ69 孔在抽水 5 天后均达到稳定水位,不同倾角钻孔的稳定水位十分接近。这表明倾角越小钻孔中心点水位降深越小,但在钻孔延伸方向与垂直钻孔方向或斜交钻孔方向上的水位的降深差值最大。

直立孔在水平含水层中抽水时形成以井为中心点的圆形水位等值线,倾斜钻孔为椭圆形的水位等值线,如图 5 所示。钻孔缓倾斜时,稳定后的地下水降落漏斗中心区水位较高,中心区等值线稀疏,形成较大面积内相对较小的水位降低;钻孔陡倾时,稳定后的地下水降落漏斗中心区水位低,中心区等值线密集,形成相对较小面积内较大的水位降低。当钻孔中心区水位强烈下降时,在中心区形成干枯单元,该单元内的直立井流量边界失效,钻孔总流量下降。因此,陡倾斜钻孔不具有长期稳定流量,缓倾斜钻孔更适宜长期疏放水。

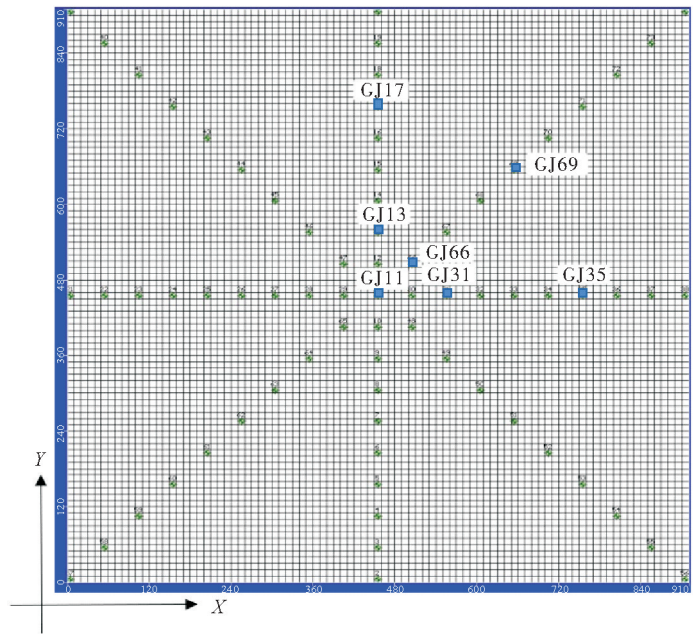


图 3 观测井布置示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of observation well layout

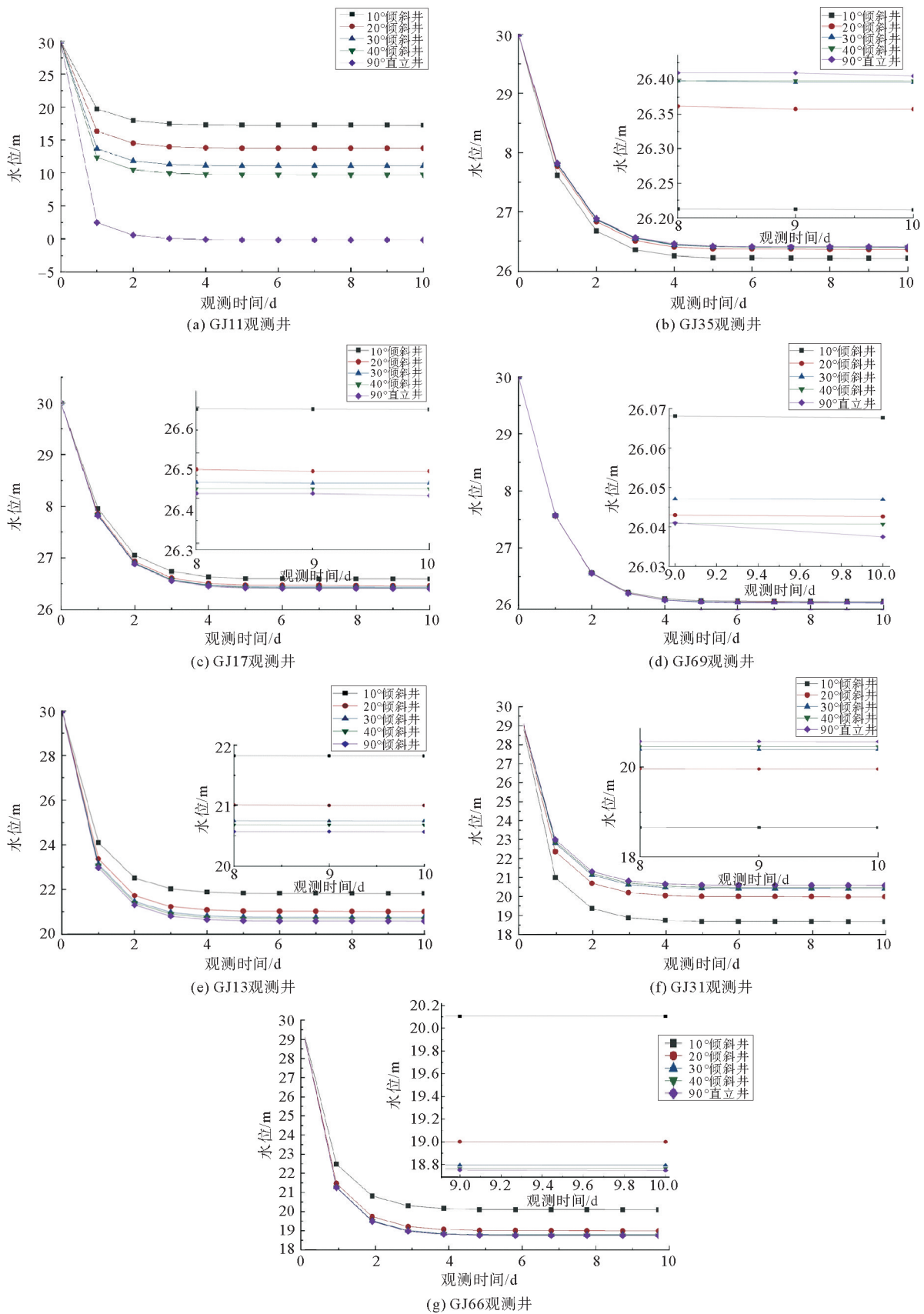


图 4 定流量抽水模型观测井水头变化图

Fig. 4 Head changes of the observation well of the constant flow pumping model

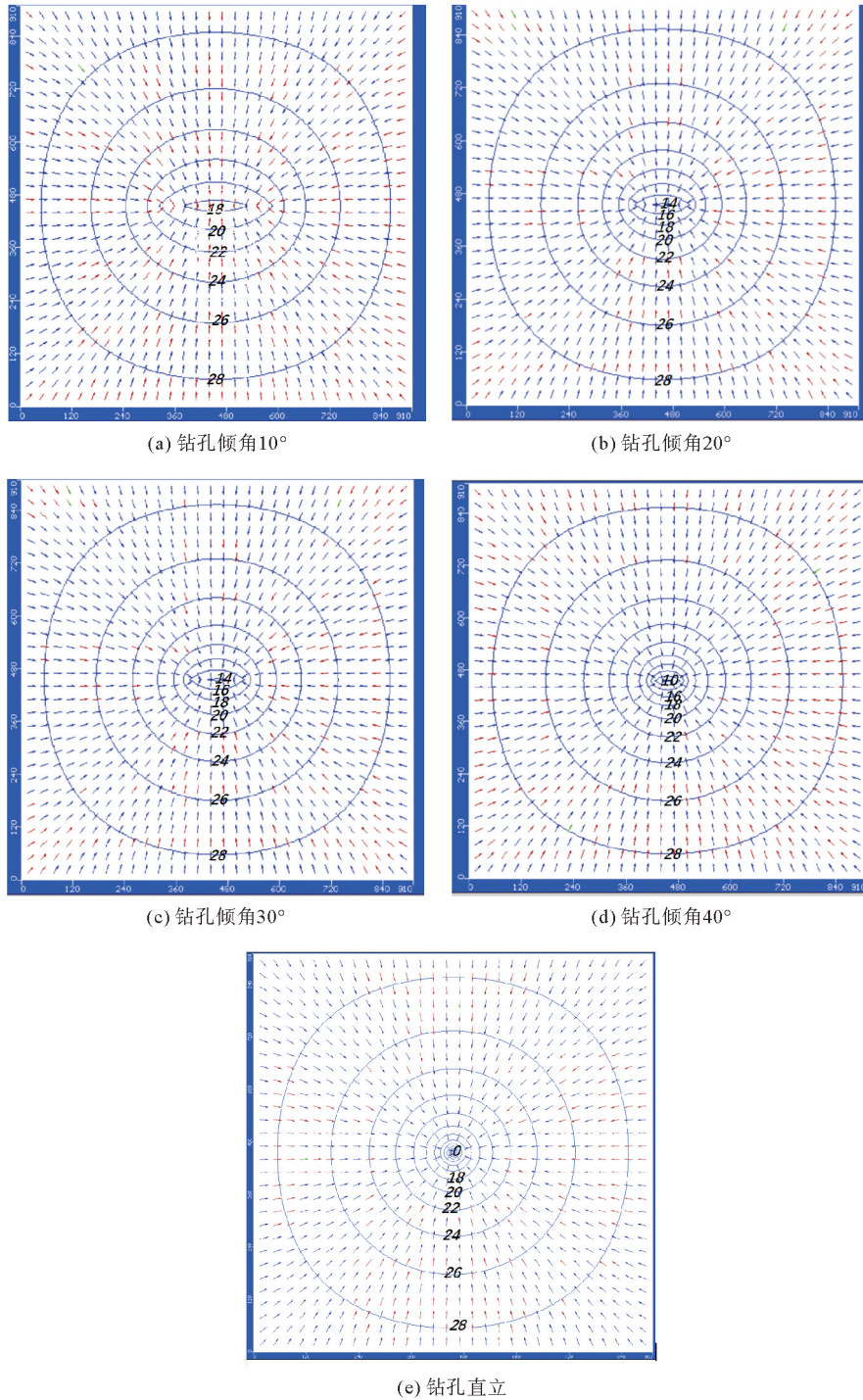


图 5 定流量抽水条件下第 10 天含水层水位等值线与水位漏斗图

Fig. 5 Aquifer water level contour and water level funnel diagram under constant flow pumping conditions on the tenth day

### 3.2 定水头抽水模拟结果分析

定水头钻孔边界条件下,采用水均衡法,求解各倾角钻孔各抽水段的水量及钻孔总水量。以倾角  $20^{\circ}$  钻孔为例,分析各抽水段水量与总水量随时间的变化,如表 3 所示。抽水段由含水层底向顶的顺序依次是 J15、J14、J13、J12、J11、J10、J9、J8、J1、J2、J3、J4、J5、J6、J7,其中 J8 为含水层最中间抽水段。各抽水段水量随时间推移涌水量减少,钻孔总水量减小。在初始抽水时从底板到顶板各段涌水量先增大后减小,其中 J11 涌

表3 倾角20°钻孔各抽水段水量变化数据表

Tab. 3 Data of water volume changes in each pumping section of borehole with an inclination angle of 20°

| 时间<br>/d | 各抽水段流量/(m <sup>3</sup> /d) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | J15                        | J14   | J13   | J12   | J11   | J10   | J9    | J8    | J1    | J2    | J3    | J4    | J5    | J6    | J7    |
| 1        | 354.3                      | 654.1 | 872.5 | 967.3 | 991.0 | 971.6 | 923.4 | 854.1 | 768.4 | 669.9 | 561.9 | 449.0 | 336.2 | 231.2 | 561.9 |
| 2        | 338.1                      | 609.9 | 777.2 | 818.9 | 802.7 | 761.7 | 708.2 | 646.7 | 579.3 | 507.2 | 431.5 | 352.1 | 268.1 | 168.6 | 441.2 |
| 3        | 329.6                      | 581.5 | 720.7 | 736.3 | 702.8 | 654.2 | 601.4 | 546.6 | 490.1 | 431.5 | 370.4 | 305.7 | 233.7 | 144.0 | 403.7 |
| 4        | 323.8                      | 562.2 | 683.9 | 684.9 | 642.9 | 591.6 | 540.5 | 490.5 | 440.5 | 389.7 | 336.8 | 279.9 | 214.9 | 130.9 | 385.5 |
| 5        | 319.4                      | 548.3 | 658.4 | 650.5 | 603.8 | 551.6 | 502.2 | 455.5 | 409.9 | 364.0 | 316.2 | 264.3 | 204.0 | 123.2 | 374.6 |
| 6        | 315.9                      | 537.7 | 639.7 | 626.0 | 576.5 | 524.1 | 476.1 | 431.9 | 389.3 | 346.7 | 302.2 | 253.5 | 196.0 | 117.0 | 365.8 |
| 7        | 313.2                      | 529.5 | 625.5 | 607.8 | 556.7 | 504.3 | 457.5 | 415.1 | 374.8 | 334.6 | 292.5 | 246.0 | 190.3 | 113.1 | 359.8 |
| 8        | 311.3                      | 523.1 | 614.6 | 593.9 | 541.7 | 489.5 | 443.6 | 402.6 | 364.0 | 325.5 | 285.1 | 240.2 | 185.8 | 109.6 | 354.7 |
| 9        | 309.6                      | 518.2 | 606.1 | 583.2 | 530.2 | 478.2 | 433.1 | 393.2 | 355.8 | 318.6 | 279.5 | 235.7 | 182.1 | 106.6 | 350.5 |
| 10       | 308.2                      | 514.2 | 599.3 | 574.9 | 521.3 | 469.6 | 425.1 | 386.0 | 349.4 | 313.2 | 275.0 | 232.0 | 179.1 | 104.1 | 347.0 |
| 11       | 307.0                      | 510.9 | 594.0 | 568.2 | 514.3 | 462.8 | 418.8 | 380.3 | 344.5 | 309.0 | 271.5 | 229.1 | 176.7 | 102.1 | 344.2 |
| 12       | 306.0                      | 508.2 | 589.6 | 562.9 | 508.8 | 457.5 | 413.9 | 375.9 | 340.6 | 305.6 | 268.6 | 226.7 | 174.8 | 100.4 | 341.8 |
| 13       | 305.1                      | 505.9 | 585.9 | 558.6 | 504.3 | 453.1 | 409.9 | 372.3 | 337.4 | 302.9 | 266.3 | 224.8 | 173.2 | 99.0  | 339.8 |
| 14       | 304.4                      | 504.0 | 582.9 | 555.0 | 500.6 | 449.6 | 406.6 | 369.4 | 334.9 | 300.7 | 264.5 | 223.2 | 171.9 | 97.9  | 338.2 |
| 15       | 303.8                      | 502.5 | 580.4 | 552.0 | 497.5 | 446.7 | 403.9 | 367.0 | 332.8 | 298.9 | 262.9 | 221.9 | 170.8 | 96.9  | 336.7 |
| 16       | 303.3                      | 501.1 | 578.3 | 549.5 | 495   | 444.3 | 401.7 | 364.9 | 331.0 | 297.4 | 261.6 | 220.8 | 169.8 | 96.1  | 335.5 |
| 17       | 302.8                      | 500.0 | 576.5 | 547.4 | 492.8 | 442.2 | 399.8 | 363.3 | 329.5 | 296.1 | 260.5 | 219.9 | 169.1 | 95.4  | 334.6 |
| 18       | 302.4                      | 499.0 | 575.0 | 545.6 | 491.1 | 440.5 | 398.2 | 361.8 | 328.3 | 295.0 | 259.6 | 219.1 | 168.4 | 94.8  | 333.8 |
| 19       | 302.1                      | 498.1 | 573.7 | 544.1 | 489.5 | 439.0 | 396.9 | 360.6 | 327.2 | 294.0 | 258.8 | 218.4 | 167.8 | 94.2  | 332.8 |
| 20       | 301.8                      | 497.4 | 572.5 | 542.8 | 488.2 | 437.8 | 395.7 | 359.6 | 326.3 | 293.2 | 258.1 | 217.8 | 167.2 | 93.8  | 332.3 |

水量最大,这是因为各段涌水量的大小受到承压高度与顶底板的影响。随着抽水影响,承压高度的影响成为主导。J7为最靠近顶板的抽水段,承压高度最小,但该段只单侧受抽水孔影响,与J6段相比,其涌水量更大。随着抽水时间的延长,靠近顶板的抽水段将率先被疏干,水量趋于零。到第20天,各段水量趋于稳定。

对比不同倾角钻孔涌水量,如图6所示。钻孔倾角对涌水量具有显著的影响,倾角10°钻孔涌水量显著高于倾角90°钻孔涌水量。这表明倾角越缓钻孔涌水量越大,倾角越陡涌水量越小。

#### 4 结论

1) 当限定抽水量相同时,缓倾斜钻孔疏水形成底部中心区平坦、面积大的宽缓降落漏斗,随倾角增大,钻孔疏水形成中心区底部尖锐、面积小的陡立降落漏斗。钻孔越陡,中心区越容易形成疏干区,钻孔水量锐减,不易长期疏水。

2) 当以定水头抽水时,受到承压高度与隔水顶底板的影响,同一倾角各钻孔段涌水量的大小与动态均有差异。初始抽水时中间段水量最大,随着抽水时间的延长,越靠近顶板的抽水段水量下降越快,甚至被

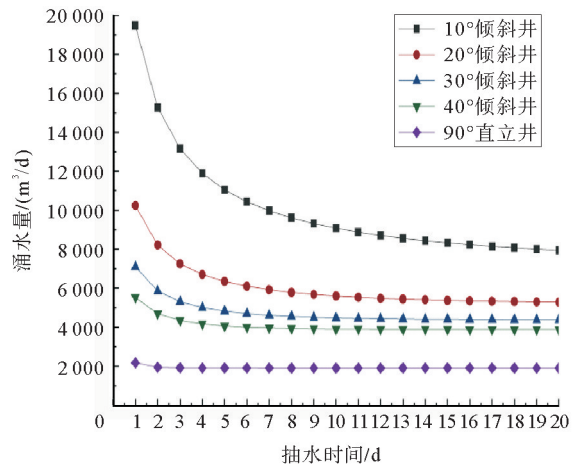


图6 定水头抽水条件下不同倾角钻孔涌水量动态曲线  
Fig. 6 Dynamic curves of water inflow from boreholes with different inclination angles under constant head pumping conditions

疏干。倾角越缓钻孔涌水量越大,倾角越陡涌水量越小。

3) 均质各向同性水平含水层条件下,倾角对钻孔涌水量具有显著的影响,倾角缓的钻孔出水量大,适宜长期疏放水。

#### 参考文献:

- [1] 刘基.复合含水层疏放水钻孔与工作面涌水量预测方法研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2020:15-27.  
LIU Ji.Study on the prediction method of water inflow of drainage boreholes and working faces in compound aquifers[D]. Beijing:China Coal Research Institute,2020:15-27.
- [2] 赵春虎,王皓,王世东.煤矿井下仰斜群孔疏水数值模型构建与涌水分析[J].采矿与安全工程学报,2021,38(4):687-694.  
ZHAO Chunhu,WANG Hao,WANG Shidong.Numerical model construction and analysis of water inflow from drainage of the inclined group holes in underground coalmine[J].Journal of Mining and Safety Engineering,2021,38(4):687-694.
- [3] 邹德山,朱同祥.洼里煤矿综合防治水技术研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2004,23(3):23-25.  
ZOU Deshan,ZHU Tongxiang.Study on synthetic water prevention and control techniques in Wali colliery[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2004,23(3):23-25.
- [4] 马亚杰,王东,孙海威.ANN采煤工作面最大涌水量预测与指标优化[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2013,32(7):869-873.  
MA Yajie,WANG Dong,SUN Haiwei.ANN-based mining face maximum inflow forecasting and predicting index optimization[J].Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2013,32(7):869-873.
- [5] 赵宝峰.灰色关联度在井下钻孔疏放水效果分析中的应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2013,32(3):289-292.  
ZHAO Baofeng.Application of gray correlation in the effect analysis of underground drilling water drainage[J].Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2013,32(3):289-292.
- [6] 李洋,王文学,肖航,等.非承压含水层底部单孔疏放水渗流特征[J].煤田地质与勘探,2019,47(3):154-159.  
LI Yang,WANG Wenxue,XIAO Hang,et al.The seepage characteristics of a single well dewatering from an unconfined aquifer bottom[J].Coal Geology & Exploration,2019,47(3):154-159.
- [7] 李悦.开滦东欢坨矿3085工作面涌水量数值模拟[D].唐山:华北理工大学,2020:56-71.  
LI Yue.Numerical simulation of water inflow in the 3085 working face of Donghuantuo mine,Kailuan[D].Tangshan:North China University of Science and Technology,2020:56-71.
- [8] 赵春虎,董书宁,王皓,等.采煤工作面顶板含水层井下疏水钻孔涌水规律数值分析[J].煤炭学报,2020,45(增1):405-414.  
ZHAO Chunhu,DONG Shuning,WANG Hao,et al.Analysis of water inrush from boreholes for drainage of confined aquifer by upward boreholes in underground coal mining face[J].Journal of China Coal Society,2020,45(S1):405-414.
- [9] 刘基,靳德武,王皓.基于含水层-钻孔水量交换的疏放水钻孔涌水量计算及参数优化[J].煤炭学报,2021,46(9):2995-3005.  
LIU Ji,JIN Dewu,WANG Hao.Water yield calculation and parameter optimization of drainage boreholes based on water exchange between aquifers and boreholes[J].Journal of China Coal Society,2021,46(9):2995-3005.
- [10] 陈实,董书宁,李竞生,等.煤矿工作面顶板倾斜钻孔疏放水井流计算方法[J].煤炭学报,2016,41(6):1517-1523.  
CHEN Shi,DONG Shuning,LI Jingsheng,et al.Analytical solution for slanted well in the roof of coal mine working face [J].Journal of China Coal Society,2016,41(6):1517-1523.
- [11] 武强,董东林,武钢,等.水资源评价的可视化专业软件(Visual Modflow)与应用潜力[J].水文地质工程地质,1999(5):23-25.  
WU Qiang,DONG Donglin,WU Gang,et al.Professional visualization software for water resources evaluation and its application potential[J].Journal of Hydrogeology and Engineering Geology,1999(5):23-25.
- [12] 马亚杰,冯玉,章之燕,等.煤层底板强含水层超前疏放分析与应用[J].煤炭学报,2014,39(4):731-735.  
MA Yajie,FENG Yu,ZHANG Zhiyan,et al.Analysis and application on the advanced discharge of water-rich aquifer of coal floor[J].Journal of China Coal Society,2014,39(4):731-735.
- [13] 马莲净.顶板巨厚砂岩含水层水文地质特征与危害防治技术研究——以麦垛山煤矿为例[D].西安:长安大学,2020:73-105.  
MA Lianjin.Study on hydrogeological characteristics and water hazard control technology of roof thick sandstone aquifer:A case study of Maiduoshan coal mine[D].Xi'an:Chang'an University,2020:73-105.

(责任编辑:吕海亮)