

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.01.06

水汽场中气液态水质量比的确定方法

易珍莲¹, 宁立波¹, 尹峰², 赵国红²

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074; 2. 安徽省国土厅公益性地质调查管理中心, 安徽 合肥 230601)

摘要: 包气带中裂隙岩体含水量无法用仪器或者实验的方法获取, 也无法用理论方法计算, 而这部分水对生态复绿和文物保护等的影响不容忽视。为了解决这一问题, 确定岩体内气液态水的质量比(α)是关键。在岩体、气态水和液态水组成的开放系统中, 当系统内相对湿度达到 100%, 系统达到局域平衡态。根据热力学平衡理论, 此时系统内气液态水的密度和质量都相等, 即液态水和气态水的质量之比为一常数。因此, 为了求取 α 值, 文章设计了室内试验, 通过对有效试验数据的分析, 获取计算 α 经验公式。试验研究表明: 质量比 α 跟温度 t 呈指数函数关系; 当气态水达到饱和时, 液态水的质量远大于气态水的质量。此研究不仅为定量评价包气带中岩体内水汽含量提供一种计算方法, 同时对探讨包气带中岩体内气液态水转化规律具有十分重要的参考价值。

关键词: 局域平衡态; 包气带; 气液质量比; 水汽场

中图分类号: P641.136

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)01-0043-07

Determination of the ratio of liquid water mass to gaseous water mass in water vapor field

YI Zhenlian¹, NING Libo¹, YIN Feng², ZHAO Guohong²

(1. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Public & Geologic Survey Center, Department of Land and Resources of Anhui Province, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: Moisture content of the fractured rock mass in the unsaturated zone cannot be measured or calculated up till now, but liquid water in it is very important for ecological greening and preservation of cultural relics (frescoes). Determination of the ratio of liquid water mass to gaseous water mass (α) is the key to solve this problem. In the open system, which consists of rock mass, gaseous water and liquid water, two-phase water moves and transforms each other continuously, it is in a non-equilibrium state. When the humidity of the system reaches 100%, it is in a local equilibrium state. According to thermodynamic balance principle, density and mass of liquid water and gaseous water are the same in this system, so the ratio of mass of liquid water to gaseous water α is constant. In this paper, the main aim is to find a way to get the value of α . Experiment is designed to record large numbers of data, and to get an empirical formula to get the value of α . The results show that the relationship between α and temperature can be expressed as an exponential function, and the mass of liquid water is much greater than the mass of gaseous water when gaseous water is saturated. The results are very useful to quantify moisture content of rock mass, and helpful in discussion of the transformation law of gaseous water into liquid water each other.

Keywords: local equilibrium state; unsaturated zone; value of α ; water vapor field

收稿日期: 2018-06-24; 修订日期: 2018-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572212); 安徽省国土资源厅科技项目(KZ16Z523)

第一作者: 易珍莲(1972-), 女, 副教授, 主要从事水文地质与水资源方面的教学和科研工作。E-mail: Jenny72@cug.edu.cn

通讯作者: 宁立波(1966-), 男, 副教授, 主要从事水文地质与生态地质的教学与科研工作。E-mail: ninglibo200294@163.com

“水汽场”一词借用于气象学,本文水汽场是指在包气带中由裂隙岩体、气态水和液态水三相物质构成的地质实体中水分时空分布与运动的空间,其中液态水以结合水的形式存在,还有极少的过路重力水。裂隙岩体水汽场的研究是指对裂隙岩体内部裂隙中水(气、液)的分布及其运移、相态转化等规律的研究。包气带中的液态水呈不连续状态,无法用达西公式进行刻画,也无法用仪器或者实验方法直接测量或求取,但是这部分水,对边坡复绿、边坡稳定性评价及石窟文物保护等有重要影响。

国内外学者对岩体内气态水的研究主要包括岩体表面水汽转化以及岩体内水汽扩散这两方面。国内主要研究石窟文物保护中水汽扩散问题,有学者认为岩体内部与洞窟之间的湿度差,导致岩体深处的水汽不断带动盐分向洞窟表面运移,岩体内部水汽向外运移是导致盐分在洞窟壁面表面聚集的主要因素^[1-3];还有学者认为,岩体内温度差是水汽运移驱动力,水汽总是朝着温度降低的地方运移,石窟壁面凝结水生成的主要因素为气温与地温之间的温差和外界的空气湿度^[4-6]。国外学者采用室内试验的手段研究岩体气态水的相关规律,如 Bonnie Sjöberg Dobchuk 等研究了废石中气态水扩散的机理^[7],Lefebvre 等在研究水汽扩散与矿山废石酸性水产生关系时,认为废石表面酸性废水产生的主要影响因素是温度、空气流动、相对湿度^[8]。李华翔等讨论了包气带中水的气液相态转化规律^[9],朱晔亭等分析了裂隙岩体内凝结水随着季节气温变化呈现不同的水分分布和运移规律^[10]。总体来看,目前关于包气带中裂隙岩体内液态水的研究结果较少,这些成果主要集中于岩体表面气态水的研究,未涉及岩体内水分(气、液)转化及其分布的探索,并且只考虑了岩体内水汽向外扩散的现象,而未提及外界水汽向岩体内扩散的情况,与岩体水汽的实际情况存在较大差异,且较难反映 4 个季节期间岩体水汽的相关规律。目前的研究中,未见利用绝对湿度这一概念对水汽进行描述,而绝对湿度能描述水汽的运移方向,是岩体水汽场研究中必不可少的重要参数;而且目前的研究多为岩体液态水的定性研究,在定量计算方面还未见涉及。

基于以上问题,本研究以系统科学和热力学理论为基础,探索了一种定量计算裂隙岩体水汽场内水分含量的可行方法。

1 研究的理论基础

裂隙岩体水汽场具有明显的耗散结构特征^[9],其

中的气态水、结合水等的运动并不符合达西定律,温度势是其运动、相态转化的主要动力。因此,研究水汽场中的水分变化必须以热力学理论为基础。根据热力学原理,水的气、液二相体系中存在着两种热力学状态,一是非平衡态,二是平衡态。这两种状态既可出现在孤立系统中,也可在开放系统的某一局部空间和某一时段内发生。

在水汽场中,裂隙岩体、气态水和液态水组成一个开放系统,水汽的蒸发和凝结同时进行,即气态水和液态水在不断相互转化,系统内的湿度和温度也在不断变化。当蒸发和凝结速度不同时,系统处于非平衡状态,系统内气态水和液态水的密度和质量都在变化。当某个时段、系统的某个局域内二者速度相等时,此时系统处于该温度下的局域平衡状态,即此局域内温度湿度均相等,且相对湿度达到 100%,气态水和液态水的密度和质量都为定值。根据热力学平衡理论,此时气态水和液态水的密度和质量之比为常数,即:

$$\frac{\rho_l}{\rho_g} = c_1 \quad (1)$$

$$\frac{m_l}{m_g} = c_2 \quad (2)$$

式中: ρ_l 、 m_l ——分别为液态水的密度和质量;

ρ_g 、 m_g ——分别为气态水的密度和质量。

在固、气、液组成的三相体系中,当热平衡发生时,三相之间的相互作用不再进行,体系内温度相等,相互之间的作用“力”平衡,化学势相等,由此,在局域平衡时,由于化学势相等,则水汽转化与赋存介质性质无关,为研究水汽场中气液二相转化规律、液态水的赋存特征及液态水质量的计算提供了重要途径。

严家骅^[11-12]根据气态水、液态水二相物质热平衡原理,在流体统一热物性方程的基础上,提出了 H_2O 流体统一热物性方程(式(3)),并通过计算机计算出各种温度水汽饱和状态下的各种物理参数,包括水汽分压(P_c)、水汽密度 $\rho_{\text{汽}}$ (或比容),液态水密度 $\rho_{\text{液}}$ 以及比焓、比焓等。

$$P_r = \frac{8}{3} \left[\frac{T_r}{\frac{V_r}{A} - \frac{1}{3}} - \frac{9/8}{T_r \left(\frac{V_r}{A} \right)^2} \right] \quad (3)$$

$$A = \frac{B(3V_r C + 1)}{2(BC + C - 1)} = \frac{\sqrt{B^2(3V_r - 1)^2 + 12V_r B(1 - C)}}{2(BC + C - 1)}$$

$$B = \frac{1}{2} T_r^{\text{exp}} \left(1 - \frac{1}{T} \right)$$

$$C = \frac{8}{3} Z_c$$

式中: P_r ——对比压力(p/p_c);

P_c ——临界压力;

V_r ——对比比容(v/v_c);

T_r ——对比温度(T/T_c);

T_c ——临界温度;

Z_c ——临界压缩因子($Z_c = \frac{P_c V_c}{RT_c}$);

R ——气体常数;

(对于水,对比温度的指数 n 取值为 2.25,取 0.2~0.5)

利用文[11]可以计算出各种水汽饱和温度的气—液态水密度组分比值:

$$\beta = \frac{\rho_l}{\rho_g} \quad (4)$$

式中: ρ_l ——单位体积液态水的质量即液态水密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$

ρ_g ——单位体积气态水的质量即气态水密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$

在气态、液态水二相体系的热平衡状态下:

$$\alpha = \frac{m_l}{m_g} = \frac{\rho_l V_l}{\rho_g V_g} = \beta \frac{V_l}{V_g} \quad (5)$$

式中: m_l ——此二相体系中液态水的总质量/kg;

m_g ——此二相体系中气态水的总质量/kg;

V_l ——此体系中液态水所占体积/ m^3 ;

V_g ——此体系中气态水所占体积/ m^3 。

当水汽达到饱和,即相对湿度为 100% 时,此时气、液态水占据的总体积为:

$$V_T = V_l + V_g \quad (6)$$

对于裂隙岩体:

$$V_T = K \times V \quad (7)$$

式中: V ——单位岩体的体积/ m^3 ;

K ——岩体体裂隙率(野外现场实测)/%。

考虑到不同温度下水汽达到饱和时, α 值不同,因此式(5)变为:

$$\alpha_{(t)} = \frac{m_l}{m_g} = \frac{\rho_l V_l}{\rho_g V_g} = \beta_{(t)} \frac{V_l}{V_g} = \beta_{(t)} \frac{V_{T(t)} - V_{g(t)}}{V_{g(t)}} \quad (8)$$

$$V_{g(t)} = \frac{\beta_{(t)} V_{T(t)}}{\alpha_{(t)} + \beta_{(t)}} \quad (9)$$

二相体系中气态水和液态水的质量为:

$$m_{l(t)} = (V_{T(t)} - V_{g(t)}) \rho_{l(t)} = \left(V_{T(t)} - \frac{\beta_{(t)} V_{T(t)}}{\alpha_{(t)} + \beta_{(t)}} \right) \rho_{l(t)} \quad (10)$$

$$m_{g(t)} = \rho_{g(t)} V_{g(t)} = \rho_{g(t)} \frac{\beta_{(t)} V_{T(t)}}{\alpha_{(t)} + \beta_{(t)}} \quad (11)$$

若 α 值已知,气态水和液态水质量可以用式(10)、(11)计算出。

当岩体体积取单位体积时,即 $V = 1 \text{ m}^3$,式(10)和(11)可以简化为:

$$m_{l(t)} = \left(1 - \frac{\beta_{(t)}}{\alpha_{(t)} + \beta_{(t)}} \right) K \rho_{l(t)} = \left(\frac{\alpha_{(t)}}{\alpha_{(t)} + \beta_{(t)}} \right) K \rho_{l(t)} \quad (10)'$$

$$m_{g(t)} = \rho_{g(t)} V_{g(t)} = \rho_{g(t)} K \frac{\beta_{(t)}}{\alpha_{(t)} + \beta_{(t)}} \quad (11)'$$

$$W_{v(t)} = \frac{m_{l(t)}}{\rho_{l(t)}} = \frac{\alpha_{(t)}}{\alpha_{(t)} + \beta_{(t)}} K \quad (12)$$

式中: $W_{v(t)}$ ——单位岩体中水的体积。

由此,在岩体、气态水和液态水组成的系统中,气液二相达到平衡时,气态水和液态水的密度都可以通过查《水和水蒸气热力性质图表》获取,只有 $\alpha_{(t)}$ 值未知。因此计算包气带中裂隙岩体水汽含量的关键就是推求 $\alpha_{(t)}$ 值。

2 α 值的确定

由推导可知,计算包气带中裂隙岩体含水率及含水量的关键参数是不同饱和温度的值 $\alpha_{(t)}$ 。关于 $\alpha_{(t)}$ 值,目前国内外均无理论公式,也没有可供参考的经验公式。因此本次采用实验的方法推求 $\alpha_{(t)}$ 值。

根据固、气、液三相体系热力学平衡理论,即体系处于热力学平衡时,内部温度相等,固、液、气之间没有热交换,彼此之间作用力相等,化学势相等,化学反应终止,体系处于静止状态。因此, $\beta_{(t)}$ 值、 $\alpha_{(t)}$ 值只与平衡态时的温度 t 有关,与介质的结构、物理、化学性质无关,即此时二相态水的赋存介质类型对气液质量比没有影响。

2.1 实验装置和实验过程

实验装置由填满砂土(中砂)的有机玻璃箱和测量砂土内部水汽温度、相对湿度和含水率的仪器组成(由于平衡状态时,温度势,化学势等相等,水赋存的介质对气液质量比无影响,故本次采用中砂替代裂隙岩体)。实验使用的仪器为温湿度仪(DS1923)(温度量程 $-20^\circ \sim 85^\circ$,误差 $\pm 0.5^\circ \text{C}$,相对湿度误差 $\pm 5\%$)、便携式土壤水分/盐分/温度计(温度误差 $\pm 1.5^\circ \text{C}$,体积含水率误差 $\pm 3\%$)。

有机玻璃箱长、宽、高均为 30 cm,箱的底面等间距分布 121 个 5 mm 的小孔(图 1),箱的填充材料选用

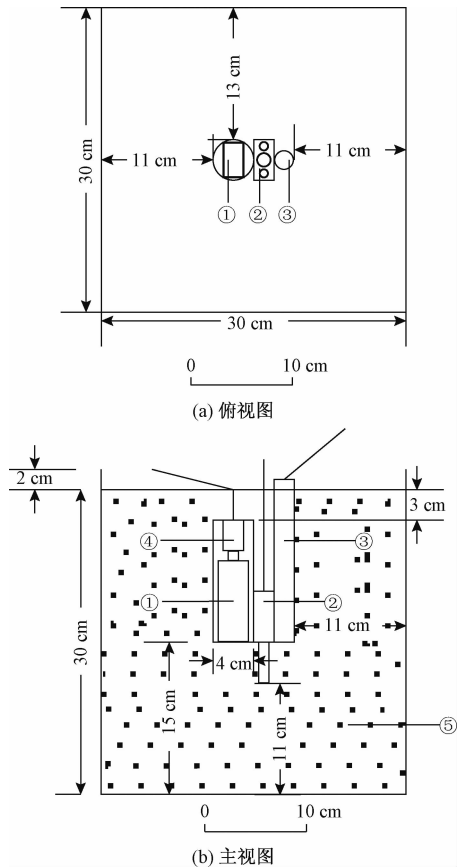


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Diagram showing the experimental apparatus

①—U 盘温湿度仪;②—土壤温湿度仪;③—数字温湿度;
大气压计;④—usb 延长线;⑤—中砂

中砂,填充前先将砂土放入另一盛有水的容器中,然后将砂从水中捞出,逐层填入箱中,并不断压实,填砂工作完成后,在砂土表面缓慢均匀洒水,使箱内砂土再次饱和使之自然压实。当箱底有水流出现,停止灌水,静置 24 h 直至箱底不再有水滴下落为止。

实验数据采集时间为 2017 年 3 月 9 日—6 月 14 日,历时 98 d,共获得有效数据 142 组(表 1)。水汽相对湿度达 100% 时刻对应的土内温度值 $t(^{\circ}\text{C})$ 和含水率值,称为有效数据。除此之外,实验结束后,在箱内不同深度取原状土样 4 个,测试其物理指标(表 2)。

2.2 实验数据分析

岩土体的体积含水率是指单位岩土体的体积(含裂隙体积)与其所含水分体积的比值,这里讲的“水分”,严格地说应是包括岩土体中的气态水和液态水,水分总体积应为气态水占的体积与液态水占的体积之和。但是,在实际计算时“所含水分的体积”并不是气态水真实体积与液态水真实体积之和,而是将两者的质量之和统一除以液态水的密度。由于常温条件下,

表 1 实验实测温度(T)和体积含水率(W_v)

Table 1 Values of T and W_v monitored in the laboratory

$T/^{\circ}\text{C}$	$W_v/\%$	$T/^{\circ}\text{C}$	$W_v/\%$	$T/^{\circ}\text{C}$	$W_v/\%$	$T/^{\circ}\text{C}$	$W_v/\%$	$T/^{\circ}\text{C}$	$W_v/\%$
13.5	39.7	16.4	39.8	19	38.8	22.9	36.3	30.5	37.7
13.6	39.8	16.4	39.1	19.4	38.2	23.1	38.1	31.1	37.7
13.7	39.6	16.43	40.1	19.4	38.1	23.1	38.2	31.15	37.3
14	39.7	16.5	39.7	19.4	38.4	23.3	36.8	31.25	37.4
14.1	40.1	16.75	38.2	19.45	37.9	23.3	36.8	31.3	36.3
14.5	39.8	16.8	39.7	19.6	38.4	23.3	38.2	31.3	34.7
14.7	39.2	17	39.8	19.7	37.7	23.5	36.7	31.35	37.8
15	39.2	17.1	39.7	19.8	37.1	23.6	37.6	31.85	36.2
15.1	39.9	17.2	39.7	19.95	37.1	23.6	36.6	32.65	36.5
15.2	39.2	17.3	39.8	20.1	38.4	23.9	37.6	32.65	36.5
15.4	40.2	17.3	39.7	20.15	37.6	23.9	37.1	33.35	37.3
15.5	39.1	17.3	39.7	20.2	37.1	23.95	38.1	33.4	35.1
15.61	40	17.4	39.8	20.3	37	24.2	38	33.45	35.7
15.74	40.2	17.4	39.7	20.3	38.7	24.4	38	33.55	36
15.75	40.1	17.5	39.7	20.45	38	24.55	35.6	33.9	35.4
15.8	39	17.5	39.1	20.6	38.2	25.5	38.1	34.15	36.3
15.87	40.1	17.7	39.6	20.65	37.7	25.75	36.6	34.8	36.4
15.9	39.8	17.7	39.6	20.7	37.9	25.8	37.3	34.9	35.7
15.9	39	17.7	38.6	20.9	38.1	25.9	37.4	35.75	36.2
16	39.8	17.9	39.7	21.2	38.3	26.55	36.4	36.3	36.3
16.08	40.1	17.9	39.6	21.4	37.7	27.1	36	36.4	30.9
16.1	39.1	18.35	37.8	21.5	37.6	27.45	36.2	36.8	29.4
16.2	40.2	18.5	39.4	21.5	38.2	27.75	36.8	38.2	30.8
16.2	39.8	18.65	37.7	21.8	38	28.35	37.8	38.5	35.8
16.3	39.8	18.65	37.4	21.9	38	28.7	37.8	39	29.5
16.3	39.8	18.7	38.9	22.2	36.5	29.1	36.6	39.7	35.8
16.3	39.9	18.7	38.4	22.4	36.3	30	35.3		
16.3	38.9	18.9	38.4	22.5	36.4	30.4	36.7		
16.3	38.9	18.9	37.7	22.6	38.3	30.4	36.2		

表 2 土样的物理参数

Table 2 Physical parameters of soil

采样编号	重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$		比重	孔隙比	孔隙度
	天然	干			$/\%$
1	13.7	12.8	2.65	1.077	51.9
2	15.6	14.5	2.65	0.823	45.1
3	14.6	12.8	2.65	1.067	51.6
4	15.2	13.5	2.68	0.992	49.8

气态水的真实密度仅为液态水密度的数万到数十万分之一,用液态水密度折算出的气态水体积占水分总体积的比例极其微小。因其值远低于实测精度的下限,所以实际计算时忽略不计。因此实测岩土体体积含水率所涉及的水分体积实际是液态水的体积:

$$V_{l(t)} \approx W_{v(t)} \times V \quad (13)$$

$$m_{l(t)} = V_{l(t)} \rho_{l(t)} \quad (14)$$

$$m_{g(t)} = (n - W_{v(t)}) \rho_{g(t)} \quad (15)$$

$$\alpha_{(t)} = \frac{m_{l(t)}}{m_{g(t)}} \quad (16)$$

式中: n ——箱子中中砂的孔隙度。

可以利用式(13)、(14)、(15)和(16)计算气态水和液态水的质量以及对应温度下的 α 值(表 3)。

表 3 不同温度饱和状态下气态水和液态水的质量(m_l 、 m_g)及 α 值

Table 3 Values of in the equilibrium state under different temperatures

温度/℃	$m_l/(kg \cdot m^{-3})$	$m_g/(kg \cdot m^{-3})$	α_l	温度/℃	$m_l/(kg \cdot m^{-3})$	$m_g/(kg \cdot m^{-3})$	α_l
13.50	396.710 4	0.001 2	337 351.49	20.30	386.261 1	0.001 9	204 270.34
13.60	397.704 1	0.001 2	339 749.81	20.45	379.262 5	0.002 0	186 897.84
13.70	395.700 1	0.001 2	329 436.95	20.60	381.246 7	0.002 0	189 581.08
14.00	396.682 7	0.001 2	328 062.92	20.65	376.252 6	0.002 1	178 737.97
14.10	400.673 9	0.001 2	343 397.80	20.70	378.244 6	0.002 1	182 247.55
14.50	397.654 0	0.001 2	323 097.32	20.90	380.224 7	0.002 1	184 322.88
14.70	391.648 3	0.001 3	296 537.01	21.20	382.195 1	0.002 1	185 432.71
15.00	391.631 9	0.001 3	291 610.81	21.40	376.190 4	0.002 2	171 396.69
15.10	398.618 9	0.001 3	316 465.29	21.50	375.184 0	0.002 2	168 572.08
15.20	391.619 3	0.001 4	288 371.07	21.50	381.171 0	0.002 1	180 275.86
15.40	401.596 8	0.001 2	323 552.86	21.80	379.149 2	0.002 2	173 307.64
15.50	390.601 6	0.001 4	280 161.55	21.90	379.140 5	0.002 2	172 341.04
15.61	399.585 4	0.001 3	311 559.70	22.20	364.149 4	0.002 5	144 144.38
15.74	401.575 0	0.001 3	317 465.82	22.40	362.137 4	0.002 6	139 628.21
15.75	400.575 4	0.001 3	313 167.69	22.50	363.126 7	0.002 6	140 286.75
15.80	389.583 9	0.001 4	272 208.66	22.60	382.072 3	0.002 2	171 467.00
15.87	400.567 7	0.001 3	311 075.49	22.90	362.095 8	0.002 7	135 777.63
15.90	397.569 0	0.001 3	298 795.62	23.10	380.033 2	0.002 3	162 982.88
15.90	389.577 7	0.001 4	270 692.34	23.10	381.030 7	0.002 3	164 844.08
16.00	397.562 7	0.001 3	297 131.21	23.30	367.048 6	0.002 6	139 860.11
16.08	400.554 3	0.001 3	307 533.37	23.30	367.048 6	0.002 6	139 860.11
16.10	390.563 7	0.001 4	270 927.03	23.30	381.012 4	0.002 3	163 010.11
16.20	401.544 7	0.001 3	309 411.66	23.50	366.033 7	0.002 7	136 859.06
16.20	397.549 2	0.001 4	293 829.56	23.60	375.001 0	0.002 5	149 890.59
16.30	397.542 4	0.001 4	292 192.51	23.60	365.027 6	0.002 7	134 680.74
16.30	397.542 4	0.001 4	292 192.51	23.90	374.974 1	0.002 5	147 396.14
16.30	398.541 3	0.001 3	295 946.53	23.90	369.987 7	0.002 6	139 618.65
16.30	388.552 8	0.001 5	261 563.96	23.95	379.955 9	0.002 4	155 414.65
16.30	388.552 8	0.001 5	261 563.96	24.20	378.934 4	0.002 5	151 535.77
16.40	397.535 7	0.001 4	290 564.59	24.40	378.914 8	0.002 5	149 849.26
16.40	390.543 8	0.001 5	266 423.88	24.55	354.969 5	0.003 1	115 346.80
16.43	400.530 5	0.001 3	301 578.14	25.50	379.803 6	0.002 7	142 502.69
16.50	396.530 1	0.001 4	285 308.43	25.75	364.827 1	0.003 1	119 414.75
16.75	381.531 7	0.001 6	235 099.56	25.80	371.799 8	0.002 9	128 265.19
16.80	396.509 9	0.001 4	280 566.25	25.90	372.787 0	0.002 9	128 939.68
17.00	397.495 2	0.001 4	280 985.77	26.55	362.756 3	0.003 2	111 841.54
17.10	396.489 3	0.001 4	275 902.61	27.10	358.716 5	0.003 4	104 104.61
17.20	396.482 2	0.001 4	274 365.17	27.45	360.674 2	0.003 5	104 184.03
17.30	397.473 7	0.001 4	276 314.61	27.75	366.621 5	0.003 4	109 028.95
17.30	396.475 1	0.001 5	272 836.30	28.35	376.519 7	0.003 2	117 469.59
17.30	396.475 1	0.001 5	272 836.30	28.70	376.481 7	0.003 3	115 190.05
17.40	397.466 6	0.001 4	274 774.87	29.10	364.487 4	0.003 7	98 995.67
17.40	396.467 9	0.001 5	271 315.95	30.00	351.551 6	0.004 3	82 557.96
17.50	396.460 8	0.001 5	269 804.07	30.40	365.339 9	0.003 9	93 011.62
17.50	390.469 0	0.001 6	250 542.06	30.40	360.362 5	0.004 1	88 321.13
17.70	395.448 0	0.001 5	263 472.15	30.50	375.283 1	0.003 6	102 996.59
17.70	395.448 0	0.001 5	263 472.15	31.10	375.329 4	0.003 8	99 623.62
17.90	396.432 3	0.001 5	263 840.34	31.15	371.341 4	0.003 9	95 094.51
17.90	395.433 7	0.001 5	260 544.00	31.25	372.210 6	0.003 9	95 564.60

续表

温度/℃	$m_l/(kg \cdot m^{-3})$	$m_g/(kg \cdot m^{-3})$	α_t	温度/℃	$m_l/(kg \cdot m^{-3})$	$m_g/(kg \cdot m^{-3})$	α_t
18.35	377.426 3	0.001 8	205 528.44	31.30	361.257 7	0.004 3	84 844.57
18.50	393.390 2	0.001 6	245 763.08	31.30	345.334 5	0.004 8	72 395.62
18.65	376.405 3	0.001 9	199 881.89	31.35	376.179 9	0.003 8	99 303.07
18.65	373.410 0	0.001 9	193 415.30	31.85	360.201 3	0.004 4	81 431.90
18.70	388.382 5	0.001 7	228 734.16	32.65	363.208 8	0.004 5	80 331.70
18.70	383.390 4	0.001 8	215 714.04	32.65	363.092 1	0.004 5	80 305.89
18.90	376.386 5	0.001 9	197 107.98	33.35	371.086 9	0.004 4	84 069.64
18.90	383.375 1	0.001 8	213 315.80	33.40	349.194 0	0.005 2	66 920.31
19.00	387.360 9	0.001 7	222 274.73	33.45	355.040 7	0.005 0	70 780.41
19.40	381.340 3	0.001 9	202 735.53	33.55	358.012 5	0.004 9	72 542.07
19.40	380.342 0	0.001 9	200 446.51	33.80	361.836 2	0.005 1	70 458.12
19.40	383.336 8	0.001 8	207 436.21	34.15	360.923 8	0.005 0	72 323.66
19.45	378.341 7	0.001 9	195 438.84	34.80	354.865 5	0.005 4	65 256.36
19.60	383.321 5	0.001 9	205 130.00	35.75	359.702 4	0.005 5	65 441.13
19.70	376.326 4	0.002 0	188 487.56	36.30	360.627 8	0.005 6	64 108.43
19.80	370.329 7	0.002 1	175 599.99	36.40	306.972 8	0.008 0	38 596.40
19.95	370.318 6	0.002 1	174 133.75	36.80	292.041 0	0.008 8	33 243.36
20.10	383.282 9	0.001 9	199 475.84	38.20	305.995 1	0.008 8	34 618.07
20.15	375.293 9	0.002 1	181 789.85	38.50	355.400 3	0.006 6	53 867.62
20.20	370.299 4	0.002 2	171 716.83	39.00	292.804 0	0.009 9	29 632.96
20.30	369.293 5	0.002 2	168 947.60	39.70	355.238 7	0.007 1	50 361.91

根据表 3 绘制成 α 随温度变化散点图(图 2),其拟合曲线表达式为:

$$\alpha_t = 1 \times 10^6 e^{-0.081t} \quad (17)$$

拟合曲线的相关系数 $R^2 = 0.981$, 拟合方程的剩余标准差与 α_t 取值范围(50 000 ~ 350 000)中的值比较,前者仅为后者的 8.1%,说明方程式的拟合精度较高,函数和散点图拟合良好,可以利用式(17)表达 α 随温度变化规律,因此不同饱和状态下的 α 值可采用式(17)近似计算出来。

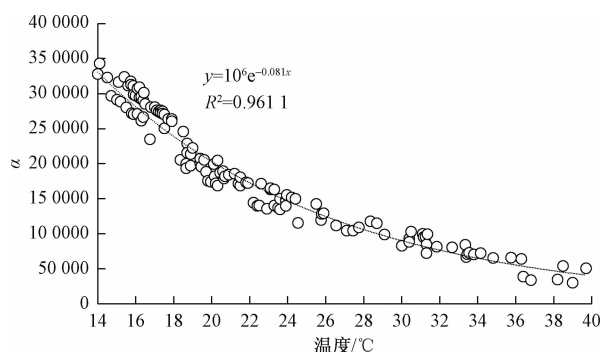


图 2 液—气组分比(α)随温度变化

Fig.2 Change of with temperature

3 结论

包气带中裂隙岩体内气液质量比是定量计算裂隙岩体含水量的关键,本次研究主要讨论了一种水汽场中确定气液质量比的方法。通过对大量实验监测数据分析,得出的主要结论如下:

(1)固、气、液三相体系热平衡状态下,液态水与气态水的质量组分比与温度 t 呈指数函数关系。水汽饱和温度高时,两者的质量百分比小,反之,两者质量组分比大。这一统计规律与热平衡理论相吻合。

(2)在常温的水汽饱和状态下,单位体积岩土体中的液态水质量远大于水汽的质量,前者为后者的数万至数十万倍。

参考文献:

- [1] 郭青林,王旭东,薛平,等.敦煌莫高窟底层洞窟岩体内水汽与盐分空间分布及其关系研究[J].岩石力学与工程学报,2009,25(8): 3769-3775. [GUO Q L, WANG X D, XUE P, et al. Research on spatial distribution and relations of salinity and moisture content inside rock mass of low-layer caves in

- Dunhuang Mogao Grottoes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 25 (8): 3769–3775. (in Chinese)]
- [2] 柴利杰. 云冈石窟水分来源控制因素[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011. [CHAI L J. Controls of water movement and transform in Yungang Grottoes [D]. Beijing: China University of Geosciences (beijing), 2011. (in Chinese)]
- [3] 万力, 曹文炳, 王旭升, 等. 云冈石窟水汽转化特征的初步研究[J]. 工程勘察, 2012, 40 (2): 6–11. [WAN L, CAO W B, WANG X D, *et al.* Preliminary investigation on water-vapor transfer in Yungang Grottoes[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40 (11): 6–11 (in Chinese)]
- [4] 林波, 王旭东, 郭青林, 等. 敦煌莫高窟第108窟西壁岩体内温湿度变化规律研究[J]. 敦煌研究, 2013 (1): 86–91. [LIN B, WANG X D, GUO Q L, *et al.* A study on the variation laws of temperature and relative humidity in the rock of the west wall in Mogao Cave 108[J]. Dunhuang Research, 2013 (1): 86–91. (in Chinese)]
- [5] 杨善龙, 王旭东, 郭青林, 等. 敦煌莫高窟崖体中水分分布初步分析[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36 (6): 94–97. [YANG S L, WANG X D, GUO Q L, *et al.* Preliminary analysis of moisture distribution in cliff rocks of the Mogao Grottoes in Dunhuang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36 (6): 94–97. (in Chinese)]
- [6] 黄继忠, 万力, 彭涛, 等. 云冈石窟水分来源探查工程及若干成果[J]. 工程勘察, 2012, 40 (2): 1–5. [HUANG J Z, WAN L, PENG T, *et al.* Survey on water sources in Yungang Grottoes and some results [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40 (2): 1–5. (in Chinese)]
- [7] LEFEBVRE, LAMONTAGNE, WELS. ARD production and water vapor transport at the Questa mine [J]. International Conference on Tailings and Mine Waste, 2002 (6): 27–30.
- [8] BONNIE S D, S LEE B, ZHOU J. Prediction of water vapor movement through waste rock [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004 (11): 293–303
- [9] 李华翔, 宁立波, 黄景春, 等. 裂隙岩体水汽场内温湿度分布及汽液转化规律研究——以河南省宜阳锦屏山为例[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44 (6): 9–14. [LI H X, NING L B, HUANG J C, *et al.* A study of the distribution of temperature-humidity and vapor-liquid transformation in the water vapor field of fractured rock mass; a case study in the Jinping Mountain of Yiyang county in Henan [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44 (6): 9–14. (in Chinese)]
- [10] 朱晔亭, 黄景春, 宁立波, 等. 裂隙岩体内凝结水时空分布规律——以宜阳锦屏山为例[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45 (4): 1–6. [ZHU X T, HUANG J C, NING L B, *et al.* Temporal and spatial distribution of condensate water in fractured rock mass; a case study in the Jinping Mountain of Yiyang County [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45 (4): 1–6. (in Chinese)]
- [11] 严家騄, 王永春. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. [YAN J L, WANG Y C. Engineering thermodynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005. (in Chinese)]
- [12] 严家騄, 余晓福, 王永青, 等. 水和水蒸气热力学性质图表[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. [YAN J L, YU X F, WANG Y Q, *et al.* Diagrams of thermal properties of water and water vapor [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)]

编辑: 张若琳