

— 国外完井技术丛书 —

1

WAN JING

YE

完井液

石油工业出版社

内 容 提 要

随着完井技术的发展，完井液愈来愈引起人们的重视。完井液的好坏直接影响着油井生产能力的大小。本书收集了6篇有关完井液方面的文章，阐述了泥浆失水和泥浆颗粒侵入地层对油井产能的影响；还介绍了几种新型完井液和泥浆设计以及其现场应用结果。

本书可供石油钻井现场技术人员、研究人员以及有关院校师生参考。

国外完井技术丛书1

完 井 液

E. E. 格莱 等著

崔允安 何立新 译

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

北京顺义燕华营印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 32开本 3³/₄印张 71千字 印1—15.00

1986年9月北京第1版 1986年9月北京第1次印刷

书号：15037·2613 定价：0.70元

出版说明

美国石油工程师学会根据其历届会议所发表的论文按照内容收集成册,出版了一套专论丛书,其中完井技术方面有三本(SPE REPRINT SERIES WELL COMPLETION, No.5、5a-I、5a-II)结合我国石油工业的需要,为了方便读者,我们根据这三本书的内容,分册翻译出版了这套《国外完井技术丛书》,其中包括:

- 1.完井液
- 2.固井
- 3.防砂
- 4.完井酸化压裂
- 5.射孔
- 6.完井设备
- 7.完井评价

目 录

油井产能的影响因素 I. 泥浆失水	1
油井产能的影响因素 II. 泥浆颗粒侵入孔隙介质	19
无堵塞乳化液用作完井与修井液	38
新型无损害和酸分解钻井液与完井液	50
水中化学成分对粘土堵塞渗透性的影响	66
减少固相颗粒侵入对地层损害的泥浆设计	83
附录 单位系数换算表	101

油井产能的影响因素

I. 泥浆失水

E. E. Glenn 等著 何立新 译 周惟英 校

引 言

人们发现泥浆滤液进入多孔砂岩的现象已有许多年了(1, 2, 3, 4)。API标准 29 中有一部分内容就介绍了获得泥浆滤液数据的测试方法。有些文章报道了对泥浆造壁性能进行的研究。所谓“造壁”，显然是指形成泥饼的特性。这类研究测量了（或者说至少是考虑了）泥饼的特征参数（厚度、渗透性、韧性）以及泥浆液-固相的分离速率（即通过泥饼的滤失速率，通常称之为失水量）。

从泥浆滤液对油井产能的影响这个观点来看，泥浆滤液进入“纯”亲水产油层（即无粘土矿物的产油层）不一定会产生严重的影响。井眼周围地带含水饱和度的增加将导致油井产能下降。然而，在这种情况下，大部分水可以通过采油而排除。如果滤液进入“脏”产油层中（即含有相当量的粘土矿物的产油层），由于粘土膨胀或其他原因可能导致通过采油无法改善的产能下降。

在旋转钻井初期，泥浆颗粒侵入井内产油层的现象被认为可能是严重的影响因素。当时对泥浆是否会“泥封”以及“堵塞”产油层的问题持有不同的意见。1932年，Rubel⁽⁹⁾、Gill⁽¹⁰⁾以及Parsons⁽¹¹⁾在各自的文章中，根据钻井液侵入产油层引起油井产能降低的室内及现场资料，提出了不同的看

法。这些文章以及对这个问题的讨论为这方面的研究奠定了基础，并且表明了石油技术发展时期人们的想法非常正确。Jones、Bobson⁽⁶⁾及Silent⁽⁷⁾通过试验发现泥浆颗粒侵入水饱和砂岩的深度较小(未超过1/16英寸)。Arnquist于1937年观察到，由于泥浆颗粒侵入水饱和固结砂岩试样而导致水渗透率降低。Williams和Cannon研究了泥浆的失水性能并提到了“污泥”，污泥侵入了水饱和介质(充填砂层)一短距离。Byck得出结论，地层的渗透性对泥浆的造壁性能没有影响，并认为他的数据“令人对使水泥浆或全部泥浆进入均质地层的能力怀疑”；然而在另一篇文章中，他认为“水与细胶体物质进入含油砂岩也许会对其产能造成影响”。近几年发表的一些文章^(2, 14, 15, 16, 17)说明泥浆颗粒侵入固结多孔介质的现象确实存在，并且可造成“有效渗透率”的“永久性大幅度减小”。

本文将介绍Magnolia石油公司现场研究实验室在研究钻井液对油井产能的影响和对地层的损害方面所进行的工作。

分析与解释

泥浆在滤纸上的失水特性

有些文献^(5, 6, 8)已充分讨论过钻井泥浆的失水特性。虽然这些论著的作者对泥浆技术发展作出了很大贡献，但对几个基本现象并未加以讨论。本节的目的就是想指出这些基本现象，并对泥饼厚度非均匀期“校正”失水量、瞬时失水、失水量等失水数据的作图法加以讨论。

API标准29中推荐，泥浆失水或造壁性能可认为是标准中规定的30分钟滤失试验所得到的失水量。然而，众所周知，试验的开始几秒钟内，泥浆流量或失水量往往很大。此

失水量大于常压失水过程中所预想的失水量。

可以相信，当隔膜（失水测试仪内的滤纸）被固相颗粒桥堵和开始形成相对非渗透泥饼时，失水量较高。因此，在滤失试验期间似乎在常压失水过程建立之前就已形成两个不同的相。试验开始一段时间内通过过滤介质的液体体积被冠以多种名称：“瞬时失水量”、“桥堵失水量”、“初触失水”、“泥浆总失水量”、“过失水量”等等。

目测确定常压失水前的失水量是办不到的，但可用一种图解法进行估算。这种方法是把失水数据描在直角坐标纸上，表示出累积失水量与累积时间平方根的关系。一般把曲线外推的直线段在失水量轴上的截距看成是“瞬时失水”、“初触失水”等。如果使用API标准3英寸失水测试仪，那么，校正失水量可看成1800秒时的总失水量与失水量轴上的截距值的差。然而此方法并不说明截距是由两个量组成，所以又提出了其他几种失水数据图示法。例如：时间/失水量与失水量，失水量对数与时间对数，失水量与时间。然而，可以相信，没有采用任何一种图示法来研究常压失水前失水试验中形成的不同相。

失水理论

若使用得当⁽¹⁹⁾，方程1对评价钻井泥浆失水特性是一非常有用的指南。

$$\frac{\theta}{V} = mV + n \quad (1)$$

式中 θ ——时间；

V ——时间为 θ 时的失水量；

m ——与泥饼物理特性和失水条件有关的系数；

n ——与隔膜流体流动特性有关的常数，本文假定 n 代

表泥浆污染前隔膜（失水测试仪中的清洁滤纸）对滤液流动的初始阻力。

失水机理提出了当把方程1应用于测定钻井泥浆失水时应该加以考虑的几个因素。试验开始时， θ/V 等于常量 n ，描述了泥浆进入（或通过）滤纸隔膜时的流量。在这个短时期内，由于系统内无泥饼存在，所以 m 为零。一旦孔隙被桥堵（孔内桥堵或孔隙入口表面桥堵），泥饼就开始形成，那么泥浆或滤液通过孔隙的阻力就增大。然而只要桥堵和泥饼附加阻力与隔膜阻力相比可以忽略的话，则 θ/V 值近似等于 n 。 θ/V 基本保持不变的阶段我们称之为瞬时失水期。瞬时失水期间失水测试仪中收集的滤液（或泥浆）体积称为瞬时失水量。

当其他泥浆颗粒通过多孔隙隔膜内（或上）的桥堵颗粒过滤时，流动阻力增大。当初期阶段的泥饼引起的流动阻力相当大时，瞬时失水期结束， θ/V 将随 m 、 n 而变化。

在形成泥饼的初始阶段，由于泥饼厚度的不均匀性（泥饼厚度的不均匀性将在后面介绍），所以泥饼上各处的压力梯度各不相同。 m 值增加非常快，最后基本上保持不变，此阶段，我们称之为泥饼厚度非均匀期。

当泥饼厚度与总厚度相比其非均匀性可以忽略不计时，那么整个泥饼面上的压力梯度基本一致。此期间称为常压失水期。此期间内， m 为常量。由失水试验数据直接计算求得的 m 值并不能准确描述常压失水期，因为在前面说过，在 m 成为常量前，方程1没有对头两个阶段进行校正。

上面的讨论仅限于评价标准失水测试仪内泥浆的失水特性。在这些情况下，形成泥饼后， n 值相对 m 值来说非常小，可以忽略不计而无明显误差。根据假定条件，方程1可简化

为以下形式:

$$\theta/V = mV \quad (2)$$

式中, θ 和 V 都为累积值, 分别包括瞬时失水期时间 θ_s 和瞬时失水量 V_s 。如果方程1中的 θ 和 V 分别减去方程2中的 θ_s 和 V_s , 那么可得到

$$\theta'/V' = m'V' \quad (3)$$

式中 $\theta' = \theta - \theta_s$;

$$V' = V - V_s;$$

m' ——与泥饼失水性能有关的一个数(从零逐渐增至常压失水期的常量)。

利用失水数据作出的 θ'/V' 和 V' 关系曲线通过座标原点, 为简单起见, 泥饼厚度非均匀期可不进行校正。因此当 V' 值较小时, 由于 m' 值变化, 所以方程3为一曲线。随着 V' 值的增大, m' 逐渐增大为常量, 方程3变成直线, 说明进入常压失水阶段。

若进行30分钟失水试验时必须格外小心, 则可方便地将有助于评价泥浆失水性能的几个量确定下来。试验中记下累积值 θ 和 V , 并用 V_{30} 表示30分钟的总失水量。将 $\theta/V-V$ 曲线部分外推至 $\theta/V=0$, 可得到瞬时失水量 V_s , 根据初始数据内推可得瞬时失水时间 θ_s 。测得 V_s 和 θ_s 后, 可求得 V' 和 θ' 值。由 $\theta'/V'-V'$ 曲线可求得常压失水期 m' 值。校正30分钟(1800秒)失水量 v_{30c} 为:

$$v_{30c} = \sqrt{\frac{1800}{m'}} \quad (4)$$

失水试验中由于泥饼厚度不均匀造成的过失水量 v_x 为:

$$v_x = v_{30} - (v_{30c} + v_s) \quad (5)$$

v_s 、 v_{30c} 、 v_x 可用来评价30分钟失水试验期间泥浆的失水性能。

试验结果及其理论解释

图1说明了失水过程中存在泥饼厚度非均匀期，所有的试验都采用5%(重)的膨润土泥浆，滤纸为Whatman 52号滤纸，失水期内保持100磅/英寸²的压差。图1中，A为全部泥浆在滤纸上的照片。B表示在压差100磅/英寸²、温度80°F的条件下在直径3英寸的失水测试仪内经过6秒钟滤失试验后形成的泥饼，失水量为4.5毫升。C的失水时间为15秒，温度、压力条件与B相同，所得失水量为5.5毫升。D的失水时间为7.5分钟，压差为100磅/英寸²，温度为80°F，所得失水量为11.0毫升。泥饼厚度不均匀引起的“桔皮效应”在B

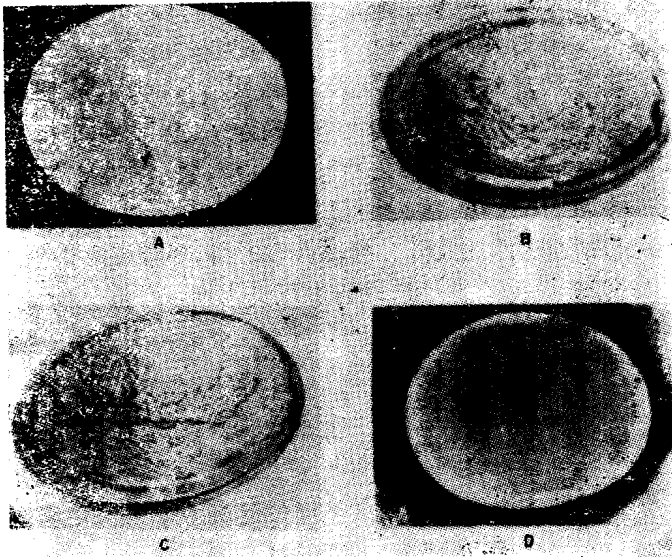


图1 膨润土泥浆形成的泥饼

和C上比较明显。图 1B 的试验在估计的瞬时失水期结束时停止。而图1C的试验在瞬时失水期结束后还继续进行。当滤液开始从失水仪呈滴状流出后，又收集到1毫升的滤液。A和D中无“桔皮效应”。A是因为没有产生“桔皮效应”的条件，而D则是由于泥饼继续淤积，所以其表面较为平整。

如果把滤纸压在8和70目的筛网上，那么，滤纸上就会留下图2所示的痕迹。图2中阴影部分是滤纸与筛网相接触的地方。

所用的8目筛网的过滤孔的面积约为总面积的一半，而70目的筛网则约为34%〔20〕。此图直观地说明，所用筛网不同，过滤面积相差较大。

滤纸与筛网接触部分对滤液（或泥浆）流动的阻力大于其他部分引起的阻力，因而形成的泥饼厚度不一致。如果与泥饼对滤液的流动阻力相比，筛网与滤纸接触处所引起的阻力可以忽略不计，那么整个过滤面上的泥饼厚度的非均匀性也可以忽略。对此曾经用8目和70目的筛网在标准失水测试仪上进行过验证。

试验使用5%（重量）的膨润土泥浆、Whatman52号滤纸，温度为80°F，压力差为100磅/英寸²。表1给出了使用两种不同筛网所得失水量的对比数据。不出所料，使用8目筛网时的失水量较大，这是因为滤纸与8目筛

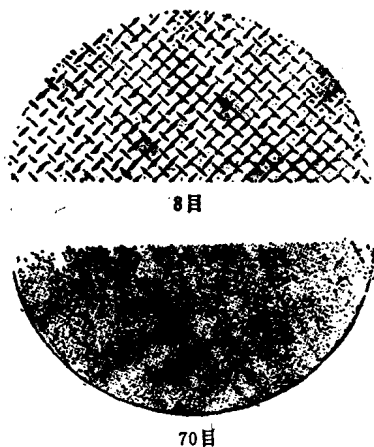


图2 滤纸与筛网的接触痕迹

网的面积以及由此面积引起的流动阻力比与70目筛网接触时的小。泥饼厚度非均匀期内，70目筛网所得到的失水量较大，因为该期间，被泥饼所覆盖的接触面积较大。在泥饼厚度非均匀期（如 $\theta/V-V$ 关系曲线所示）之前，两种筛网的总失水量相等。这是未曾预料到的，因为泥饼必须在整个过滤面积上淤积，并且在常压失水前，泥饼对滤液的流动阻力应该比滤纸筛网接触处引起的阻力大得多，以致后者可以忽略不计。注意一下每次试验的头6毫升失水量所需的时间非常有趣：当用8目筛网时，失水时间为27秒，而采用70目筛网时则为65秒。这就进一步强调了筛网与滤纸的接触面积在失水试验初期的重要性。

表1 失水仪筛网筛孔尺寸对失水量的影响^①

	8目筛网 ^②	70目筛网 ^③
瞬时失水	3.6毫升	2.6毫升
泥饼厚度非均匀期失水量	4.4毫升	5.4毫升
泥饼厚度非均匀期过失水量	1.0毫升	1.0毫升
30分钟总失水量	17.2毫升	16.5毫升
校正后的30分钟失水量	12.6毫升	12.9毫升

① 试验使用标准失水仪、Whatman52号滤纸、5%（重量）的膨润土泥浆，试验温度为80°F，压差为100磅/英寸²；

② 筛网与滤纸的接触面积百分比为50%；

③ 筛网滤纸接触面积百分比为66%。

为更直观地说明如何分析失水数据，下面举例加以说明。使用Whatman52号滤纸和70目筛网在标准失水仪中，在温度为80°F、压力差为100磅/英寸²的条件下测试5%（重量）的膨润土泥浆。试验数据如表2所示，并用图3表示。图形的曲线外延交于V轴（方程1中的n假定为零）。交点值2.6毫升可视为瞬时失水量 V_s 。根据所记录的 θ 和V值，内插可求

出瞬时失水时间 θ_s 为3秒。计算出 θ'/V' 值并用图3中的EC曲线表示 θ'/V' 与 V' 的函数关系。由图可知，当 V' 为零时， θ'/V' 的值等于零。 θ'/V' 和 V' 值较大的点大部分都落在直线CD上。通过数据点作曲线EF并与直线相交。该交点值为5.4毫升，作为 m 为常量时的 V' 值。图中直线部分的斜率 m' 求得为10.8秒/厘米⁽⁶⁾。根据方程4求得校正后的失水量为12.9毫升。由于泥饼厚度不均匀引起的过失水量

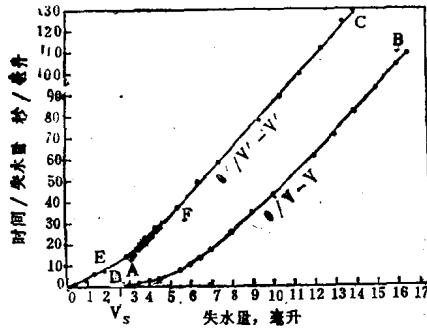


图3 30分钟失水试验，累积失水时间与累积失水量关系曲线可由方程5求得，为1.0毫升。

30分钟失水试验结果综述如下：

30分钟校正失水量 (V_{30c}) 12.9 毫升

瞬时失水量 (V_s) 2.6 毫升

泥饼厚度不均匀引起的

 过失水量 (V_x) 1.0 毫升

30分钟总失水量 (V_{30}) 16.5 毫升

由于泥饼厚度不均匀引起的过失水量也可用下面方法求得。图3中，曲线EF在 V' 等于5.4毫升处与直线CD相交，交点处 $\theta'/V' = 38$ 。由此可求出 $\theta' = 204$ 秒。设 $m' = 10.8$ 秒/厘米⁽⁶⁾，而 $\theta' = 204$ ，由方程4， $\theta'/V' = m'V'$ 得 $V' = 4.35$

毫升。将此值计入图3，那么则得出泥饼厚度非均匀期的过
失水为1.05毫升，与用方程5计算出的1.00毫升基本吻合。

分析水泥浆失水特性至少有三种方法，每一种方法都把
失水数据标于笛卡尔直角坐标纸上，但是每种方法对滤失方

表2 膨润土泥浆30分钟失水试验数据^①

V (毫升)	θ (秒)	θ/V (秒/毫升)	V' (毫升)	θ' (秒)	θ'/V' (秒/毫升)
3.0	3.5	1.17	0.4	0.5	1.25
3.5	6.0	1.72	0.9	3.0	3.34
4.0	12	3.00	1.4	9.0	6.41
4.5	8	4.00	1.9	15	7.89
5.5	46	8.37	2.9	43	14.8
6.0	65	10.8	3.4	62	18.2
6.5	92	14.2	3.9	89	22.8
7.0	125	17.9	4.4	122	27.7
8.0	206	25.8	5.4	203	37.6
9.0	317	35.2	6.4	314	49.0
10.0	436	43.6	7.4	433	58.5
12.0	737	61.4	9.4	734	78.1
13.0	932	71.6	10.4	929	89.3
14.0	1150	82.0	11.4	1147	100
15.0	1392	93.0	12.4	1389	112
16.0	1668	104	13.4	1665	124
16.5	1800	109	13.9	1797	130

① 试验使用标准失水仪、5% (重量) 的膨润土泥浆、Whatman52号
滤纸以及70目筛网，试验温度80°F，压差100磅/英寸²。

程进行了不同修正。第一种方法正是本文所详细讨论的方
法。第二种方法将方程1变换成如下形式：

$$V = m \theta^{\frac{1}{2}} + b \quad (6)$$

式中 V——时间 θ 时的累积失水量；

θ ——时间；

m ——取决于泥饼物理特性和失水条件的系数；

b ——取决于泥浆物理性能、失水条件和隔膜特性的数。

当用方程6解释失水试验结果时,可使用 $V-\theta^{1/2}$ 关系曲线。通过数据点可作一条直线。并延伸至 $\theta=0$ 处。 b 则等于 V 轴上的截距,该值通常解释为瞬时失水。当然,此截距值必须等于30分钟失水量减去由图上确定的“校正”后的30分钟失水量。

第三种方法的失水方程是方程1的微分形式:

$$\frac{d\theta}{dV} = 2mV + n \quad (7)$$

利用绘在直角坐标纸上 $\Delta\theta/\Delta V-V$ 关系曲线可以象第一种方法那样把整个失水过程分为三个阶段。用方程7分析失水数据比前面介绍的两种方法花费的时间要长得多。

表3是用三种方法分析同一失水试验数据所得的值。第二种方法不能分开泥饼厚度非均匀期的过失水量与瞬时失水量,但是两者之和似乎还是正确的。在图解精度范围内,第一种方法和第三种方法所得结果是吻合的。

当只需要分析“校正的”30分钟失水量时,最简单的方

表3 三种方法分析失水数据所得值的比较①

方法	图形	校正的30分钟失水量(毫升)	瞬时失水(毫升)	泥饼厚度不均匀引起的过失水量(毫升)
1	$\theta/V-V$	12.9	2.6	1.0
2	$V-\theta^{1/2}$	12.9	3.6	3.6
3	$\Delta\theta-\Delta V-V$	12.6	2.8	1.1

① 试验装置为标准失水仪,使用5% (重量) 膨润土泥浆、Whatman52号滤纸和70目筛网,试验温度80°F,压差为100磅/英寸², 30分钟失水量为16.5毫升。

法是利用 $V-\theta^{1/2}$ 曲线求得。然而，作时间的平方根同时容易造成一种假像，即在试验进入常压失水期之前，就好像已经进入了常压失水期。第一种方法和第三种方法适于用来进行较完整的失水试验数据分析。第三种方法可以放大任何误差和错误，但是计算所花费的时间比第一种方法长得多。因此大多数情况下推荐采用第一种方法。

瞬时失水期固结孔隙介质

上面提到过，当隔膜（滤纸）被固相颗粒桥堵而开始形成泥饼时，标准失水试验会出现高流量。而且说明过瞬时失水期时间相当短。当固结多孔介质在一定压差下接触泥浆时，似乎也会发生同样的现象。因此曾做过多孔介质试样在一定压差下接触泥浆的试验。对于这种体系的失水特性已进行过评价并且对接触泥浆后多孔介质的渗透率作过比较。

试验步骤

试验所用的泥浆是在蒸馏水中加入5%（重量）的商用膨润土配制而成的。

所用的多孔介质试样是一些直径为1英寸、厚为1/4英寸的刚铝石圆片，其渗透率不等（从50至500毫达西），用无菌并且经过过滤、除气的蒸馏水饱和。接触泥浆之前，先确定了每一多孔介质试样的水渗透率。除非特别说明，各试样一般是在室温、10、100或200磅/英寸²的压差下接触泥浆30分钟，然后用蒸馏水回流冲洗。并比较接触泥浆前后和回流冲洗多孔介质的渗透率。

数据、结果及讨论

图4为三次静态泥浆造壁试验的 $\theta/V-V$ 关系曲线。图4表

明：(1) 试验初始阶段“流”量相当高。(2) 存在一个阶段，其间的“流”量变化率随时间而减小。(3) 试验后期“流”量变化率为一常量（实际上代表阶段(3)的曲线不是一条直线，但是如果减去瞬时失水量和时间而对失水数据进行校正后，则得到一条直线了。这些阶段对应于前面讨论过的滤纸隔膜的那些阶段，即代表：(1) 瞬时失水期；(2) 泥饼厚度非均匀期；(3) 常压失水期。

这些现象表明，在瞬时失水阶段泥浆颗粒桥堵孔隙并开始形成泥饼。此阶段每一试样的流出物呈混浊状，这表明某些泥浆颗粒（可能是粘土颗粒）特别小，能够穿过试样随水流出。此阶段必定发生颗粒桥堵现象，否则泥浆便会通过试样不断流出。

随着试验的进行，流出物逐渐由混浊变清，流量随时间非线性地下降。其特性具有试验第二阶段——泥饼厚度非均匀期的特征。以上现象表明泥浆颗粒在桥堵颗粒上不断淤积，从而很快就形成了泥饼。

当泥饼对流动的阻力与原来隔膜引起的阻力相比非常大时，流出物流量不再随时间而变化，成为常量，这就是说，在直角坐标纸上， θ' / V' 随时间呈线性变化。流量随时间线性变化是常压失水期的一个特征，并将描述试验后期所得到的数据。

为了描述失水初期的孔隙桥堵情况，用多孔刚铝石试样进行过几次试验。试验中，接触时间相当短（10~30秒）。在这么短的试验时间内只能得到有限的几组失水量和时间的测试数据。下面为一组典型的数据。

失水量 (毫升)	失水时间 (秒)
0.85	3