



本章主要对污水处理的基础知识及必备辅助知识进行初步的学习,范围包括油气田污水基本知识、硫化氢气体基础知识、计量知识、视图知识、电气知识、流体力学知识。

1.1 概述

1.1.1 油气田污水的来源

油、气田水(通常简称油田水)是一种深埋地下的地下水,它与石油、天然气的关系极为密切,是油、气田区域的地下水,目前世界上所发现的油、气田几乎都含有水。在油、气藏的形成过程中,水在其中起了很大作用,水经常和油、气在一起,或者离油、气很近,同处于封闭环境之中,所以,水中的各种离子含量高,其中含有很多与油、气有直接关系的特殊化学成分,可以用来与一般地下水相区别。

油、气田水是一种特殊的地下水,它与油、天然气等矿产赋存在地下数百米至数千米的油气藏中,并与石油、天然气一同被开采出来而成为石油,天然气开采过程中的伴生物。一般来讲,在油田的开发初期,采出液(油、气、水混合物)中含水很低,采出的油田水量相对较少。在油田的开发过程中,为了保持地层压力,提高原油采收率,普遍采用注水开发工艺,即注入的高压水驱原油使其从油井中开采出来。经过一段时间注水后,注入水将随原油被带出,随着开发时间的延长,采出原油含水率不断上升,如中原油田目前综合含水已高达85%左右。油田原油在外输之前要求必须进行脱水处理,合格原油含水率应在0.5%以下,因此,油田水存在于地下,在石油、天然气开采过程中被带到地面,形成数量巨大的伴生物,随着油田开发时间的延长,其数量将大幅度上升。

高含硫气田来水主要包括管道凝析水、气井返排液,还包括管道防腐批处理残余物、分离器分离出的酸液、净化厂检修污水、计量化验站和阀门试压站来水。

1.1.2 注入水各项指标超标的危害

1. 悬浮物含量

悬浮物含量是注入水结垢和地层堵塞的重要标志,如果注入水中悬浮物含量超标,就会堵塞油层孔隙通道,导致地层吸水能力下降。

2. 含油量

如果注入水中含油量超标,将会降低注水效率,它能在地层中形成“乳化堵塞”,堵塞油层孔隙通道,导致地层吸水能力下降。且它还可以作为某些悬浮物很好的胶结剂,进一步增加堵塞效果。

3. 溶解氧

溶解氧对注入水的腐蚀性和堵塞都有明显的影响。如果注入水中硫化氢含量超标,它不仅直接影响注入水对注水油套管等设施的腐蚀,而且当注入水中存在溶解的铁离子时,氧气进入系统后,就会生成不溶性的铁氧化物沉淀,从而堵塞油层。在高矿化度的含油污水中,溶解氧由 0.02mg/L 增加到 0.05mg/L,腐蚀速度约增加 5 倍,当溶解氧达到 1.0mg/L 时,腐蚀速度约增加 20 倍;当溶解氧与硫化氢并存时,溶解氧又加剧硫化氢对注水金属设施的腐蚀;因此,溶解氧是注水产生腐蚀的一个重要因素。

4. 硫化物

油田含油污水中的硫化物(主要是硫化氢)有的是自然存在于水中的,有的是由于硫酸盐还原菌产生的。如果注入水中硫化氢含量超标,则注入水中的硫化氢就会加速注水金属设施的腐蚀,生成腐蚀产物硫化亚铁,造成油层堵塞严重。

5. 细菌总数

如果注入水中细菌总数超标,就会引起金属腐蚀,腐蚀物就会造成油层堵塞;油田含油污水中若大量存在细菌,就会加剧对金属设备的腐蚀,造成油层堵塞严重。

6. 钙和镁离子

油田污水中钙离子和镁离子,在一定条件下与水中的碳酸根和硫酸根离子发生化学反应,生成碳酸钙、碳酸镁或硫酸钙沉淀。有的随注入水注入地层,对地层形成堵塞;有的不断沉积形成水垢,牢固地附着在设备和管壁上,当结垢厚度过大时,注水管线内径变小,使注水设备使用寿命缩短,注水系统能效降低,能耗增大。

7. 二价和三价铁离子

油田污水中二价铁离子结构不太稳定,易与水中溶解氧发生反应生成不溶于水的氢氧化铁沉淀或生成硫化亚铁沉淀,从而堵塞油层,导致吸水指数下降。

1.1.3 污水回注的必要性

由于含硫气田污水水质较为复杂,矿化度、重金属、有毒物质尤其是 H_2S 气体含量较高,通过污水站处理后的水质很难达到污水外排标准,为了保证水体环境不被污染,因此处理后的污水必须进行外输回注。如果含硫污水不合理处理回注和排放,不仅使气田地面设施不能正常运作,而且会因地层堵塞而带来危害,同时也会造成环境污染,影响气田安全生产。因此必须合理地处理含硫污水。

1.1.4 硫化氢气体基础知识

1.1.4.1 硫化氢气体的物理性质

硫化氢是一种无色、剧毒、酸性气体,沸点 $-60.2^{\circ}C$,相对密度 1.19,比空气略重,极易在低洼处聚集,其水溶液对金属具有强烈的腐蚀。在 0.13 ~ 1.6ppm 的低浓度时,可闻到有臭鸡蛋气味,当浓度高于 4.6ppm 时,人的嗅觉迅速钝化而感觉不出它的存在,达到 200ppm 时,迅速麻痹人的嗅觉。燃点 $260^{\circ}C$,燃烧时带蓝色火焰,产生有毒的二氧化硫,危害人的眼睛和肺部。毒性较一氧化碳大 5 ~ 6 倍,几乎与氰化氢的毒性相同。

1.1.4.2 硫化氢气体的化学性质

1. 不稳定性



2. 酸性

H_2S 水溶液叫氢硫酸, 是一种二元弱酸。

3. 还原性

H_2S 中 S 是 -2 价, 具有较强的还原性, 很容易被 SO_2 、 Cl_2 、 O_2 等氧化。



4. 可燃性

在空气中点燃生成二氧化硫和水 (火焰为蓝色, 条件是点燃):



若空气不足或温度较低时则生成单质硫和水:



1.1.4.3 硫化氢的自然成因

根据硫化氢的成因机理可将自然界中的硫化氢分为 5 种成因类型: 生物降解、微生物硫酸盐还原、热化学分解、硫酸盐热化学还原和岩浆成因。

1. 生物降解

生物降解是在腐败作用主导下形成硫化氢的过程。腐败作用是在含硫有机质形成之后, 当同化作用的环境发生变化, 发生含硫有机质的腐败分解, 从而释放出硫化氢。这种方式出现在煤化作用早期, 生成的硫化氢规模和含量不会很大, 也难以聚集。

2. 微生物硫酸盐还原

微生物硫酸盐还原菌利用各种有机质或烃类来还原硫酸盐, 在异化作用下直接形成硫化氢。在这个作用过程中, 硫酸盐还原菌只将一小部分代谢的硫结合进细胞中, 大部分硫被需氧生物所吸收来完成能量代谢过程。一些菌种的有机质分解产物可能会成为另一些菌种所需吸收的营养, 这会使有机质被硫酸盐还原菌吸收转化效率提高, 从而产生大量的硫化氢。这种硫酸盐还原菌将硫酸盐还原生成硫化氢的方式又被称为微生物硫酸盐还原作用 (BSR)。

该过程是硫化氢生物化学成因的主要作用类型, 由于这种异化还原作用是在严格的厌氧环境中进行的, 故有利于所生成硫化氢的保存和聚集, 但是形成的硫化氢丰度一般不会超过 2%, 且地层介质条件必须适宜硫酸盐还原菌的生长和繁殖, 因此在深层难以发生。

3. 热化学分解

指煤中含硫有机化合物在热力作用下, 含硫杂环断裂形成硫化氢, 又称为裂解型硫化氢。这种方式形成的硫化氢浓度一般小于 1%。硫酸盐热化学还原成因主要是指硫酸盐与有机物或烃类发生作用, 将硫酸盐矿物还原生成 H_2S 和 CO_2 。

4. 硫酸盐热化学还原

是生成高含硫化氢天然气和硫化氢型天然气的主要形式, 它发生的温度一般大于 150°C 。煤和围岩中含硫有机质和硫酸盐岩发生热化学分解 (裂解) 作用和热化学还原作用, 均可生成 H_2S 气体。因煤和围岩中有机质硫含量及煤中硫酸盐硫含量很低, 所形成的 H_2S 含量一般不会超过 2%。若围岩中硫酸盐岩含量较高时, 可产生较多 H_2S 气体。

5. 岩浆成因

由于地球内部硫元素的丰度远高于地壳，岩浆活动使地壳深部的岩石熔融并产生含硫化氢的挥发成分，所以岩浆中常常含有硫化氢。而硫化氢的含量主要取决于岩浆的成分、气体运移条件等，因此岩浆中硫化氢的含量极不稳定，而且也只有特定的运移和储集条件下才能在煤层中聚集下来。

1.1.4.4 硫化氢气体的毒性

1. 毒性

硫化氢是一种神经毒剂。亦为窒息性和刺激性气体。其毒性作用的主要靶器是中枢神经系统和呼吸系统，亦可伴有心脏等多器官损害，对毒作用最敏感的组织是脑和黏膜接触部位。硫化氢极毒，人吸入浓度为 1g/mL 的 H_2S 在数秒钟内即可死亡。低浓度的硫化氢对眼、呼吸系统及中枢神经都有影响。由于硫化氢可溶于水及油中，有时可随水或油流至远离发生源处，而引起意外中毒事故。硫化氢经黏膜吸收快，皮肤吸收甚少。误服含硫盐类与胃酸作用后产生硫化氢可经肠道吸收而引起中毒。

硫化氢的急性毒作用靶器官和中毒机制可因其不同的浓度和接触时间而异。浓度越高则中枢神经抑制作用越明显，浓度相对较低时黏膜刺激作用明显。人吸入 $70 \sim 150\text{mg/m}^3/(1 \sim 2\text{h})$ ，出现呼吸道及眼刺激症状，吸 $2 \sim 5\text{min}$ 后嗅觉疲劳，不再闻到臭味。吸入 $300\text{mg/m}^3/1\text{h}$ ， $6 \sim 8\text{min}$ 出现眼急性刺激症状，稍长时间接触引起肺水肿。吸入 $760\text{mg/m}^3/(15 \sim 60\text{min})$ ，发生肺水肿、支气管炎及肺炎、头痛、头昏、步态不稳、恶心、呕吐。吸入 $1000\text{mg/m}^3/\text{数秒钟}$ ，很快出现急性中毒，呼吸加快后呼吸麻痹而死亡。

2. 中毒表现

1) 中枢神经系统损害

① 接触较高浓度硫化氢后可出现头痛、头晕、乏力、共济失调，可发生轻度意识障碍。常先出现眼和上呼吸道刺激症状。

② 接触高浓度硫化氢后以脑病表现显著，出现头痛、头晕、易激动、步态蹒跚、烦躁、意识模糊、谵妄、癫痫样抽搐可呈全身性强直痉挛发作等；可突然发生昏迷；也可发生呼吸困难或呼吸停止后心跳停止。眼底检查可见个别病例有视神经乳头水肿。部分病例可同时伴有肺水肿。脑病症状常较呼吸道症状的出现为早。可能因发生黏膜刺激作用需要一定时间。

③ 接触极高浓度硫化氢后可发生电击样死亡，即在接触后数秒或数分钟内呼吸骤停，数分钟后可发生心跳停止；也可立即或数分钟内昏迷，并呼吸骤停而死亡。死亡可在无警觉的情况下发生，当察觉到硫化氢气味时可立即嗅觉丧失，少数病例在昏迷前瞬间可嗅到令人作呕的甜味。死亡前一般无先兆症状，可先出现呼吸深而快，随之呼吸骤停。

急性中毒时多在事故现场发生昏迷，其程度因接触硫化氢的浓度和时间而异，偶可伴有或无呼吸衰竭。部分病例在脱离事故现场或转送医院途中即可复苏。到达医院时仍维持生命体征的患者，如无缺氧性脑病，多恢复较快。昏迷时间较长者在复苏后可有头痛、头晕、视力或听力减退、定向障碍、共济失调或癫痫样抽搐等，绝大部分病例可完全恢复。曾有报道2例发生迟发性脑病，均在深昏迷2天后复苏，分别于1.5天和3天后再次昏迷，又分别于2周和1月后复苏。

中枢神经症状极严重，而黏膜刺激症状不明显，可能因接触时间短，尚未发生刺激症状；或因全身症状严重而易引起注意之故。

2) 呼吸系统损害

可出现化学性支气管炎、肺炎、肺水肿、急性呼吸窘迫综合征等。少数中毒病例以肺水肿的临床表现为主，而神经系统症状较轻。可伴有眼结膜炎、角膜炎。

3) 心肌损害

在中毒病程中，部分病例可发生心悸、气急、胸闷或心绞痛样症状；少数病例在昏迷恢复、中毒症状好转1周后发生心肌梗死样表现。心电图呈急性心肌死样图形，但可很快消失。其病情较轻，病程较短，预后良好，诊疗方法与冠状动脉粥样硬化性心脏病所致的心肌梗死不同，故考虑为弥漫性中毒性心肌损害。心肌酶谱检查可有不同程度异常。

3. 泄漏应急处理

迅速撤离泄漏污染区人员至上风处，并立即进行隔离，小泄漏时隔离150m，大泄漏时隔离300m，严格限制出入。切断火源。建议应急处理人员戴自给正压式呼吸器，穿防毒服。从上风处进入现场。尽可能切断泄漏源。合理通风，加速扩散。喷雾状水稀释、溶解。构筑围堤或挖坑收集产生的大量废水。如有可能，将残余气或漏出气用排风机送至水洗塔或与塔相连的通风橱内。或使其通过三氯化铁水溶液，管路装止回装置以防溶液吸回。漏气容器要妥善处理，修复、检验后再用。

4. 防护措施

呼吸系统防护：空气中浓度超标时，佩戴氧气呼吸器或正压式空气呼吸器。

眼睛防护：戴化学安全防护眼镜。

身体防护：穿防静电工作服。

手防护：戴防化学手套。

其他：工作现场严禁吸烟、进食和饮水。工作毕，淋浴更衣。及时换洗工作服。作业人员应学会自救互救。进入罐、限制性空间或其他高浓度区作业，须有人监护。

5. 急救措施

(1) 现场抢救极为重要，应立即使患者脱离现场至空气新鲜处。有条件时立即给予吸氧。对呼吸或心脏骤停者应立即施行心肺脑复苏术。在施行口对口人工呼吸时施行者应防止吸入患者的呼出气或衣服内逸出的硫化氢，以免发生二次中毒。

(2) 高压氧治疗对加速昏迷的复苏和防治脑水肿有重要作用，凡昏迷患者，不论是否已复苏，均应尽快给予高压氧治疗，但需配合综合治疗。对中毒症状明显者需早期、足量、短程给予肾上腺糖皮质激素，有利于防治脑水肿、肺水肿和心肌损害。控制抽搐及防治脑水肿和肺水肿。

(3) 较重患者需进行心电监护及心肌酶谱测定，以便及时发现病情变化，及时处理。

(4) 对有眼刺激症状者，立即用清水冲洗，对症处理。皮肤接触者，脱去污染的衣着，用流动清水冲洗。就医。

(5) 灭火方法：消防人员必须穿戴全身防火防毒服。切断气源。若不能立即切断气源，则不允许熄灭正在燃烧的气体。喷水冷却容器，可能的话将容器从火场移至空旷处。灭火剂可选用雾状水、泡沫、二氧化碳、干粉。

1.2 油气田污水基础知识

1.2.1 油气田污水的分类

1.2.1.1 地层水

油、气田水的化学成分非常复杂，所含的离子种类甚多，其中最常见的离子有：

阳离子： Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ；

阴离子： Cl^- 、 SO_4^{2-} （硫酸根）、 CO_3^{2-} （碳酸根）、 HCO_3^- 。

其中以 Cl^- 、 Na^+ 最多， SO_4^{2-} 较少。在淡水中 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 占优势，在盐水中 Cl^- 、 Na^+ 居首位。在油、气田水中以 NaCl 含量最为丰富，其次为 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 、 MgCl_2 和 CaCl_2 等。

油、气田水中还常含有 Br^- 、 I^- 、 Sr^{2+} 、 Li^+ 等微量元素以及环烷酸、酚及氮、硫的有机化合物等有机质。表 1-1 给出了国内部分油田一些油田水的水质组成。

表 1-1 国内部分油田水的水质组成

井号		组成/(mg/L)							pH 值	水型
		$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	总矿化度		
中原	W92	103706	2042	2042	582	3757	201711	33.4×10^4	6.0	CaCl_2
	W13-75	33651	7796	641	314	1221	66469	11.0×10^4	6.0	CaCl_2
	P17	86131	1585	305	350	2707	134451	22.6×10^4	6.2	CaCl_2
	P1-9	105536	4985	816	318	1184	173092	28.6×10^4	6.0	CaCl_2
长庆	南 75	34926	6558	6558	199	0	68787	11.3×10^4	—	CaCl_2
	北 67	37650	5340	961	178	1707	70457	11.7×10^4	—	CaCl_2
	中 12	4820	564	134	1331	5251	4264	16.2×10^4	—	Na_2SO_4
	岭 69	13874	43	29	5097	336	17971	37.7×10^4	—	Na_2SO_4

1.2.1.2 油田污水

油（气）田水与石油、天然气一同被开采出来后，经过原油脱水工艺进行油水分离形成原油脱出水，天然气开采过程分离出游离水，这两部分共称为产出水。产出水保持了油（气）田水的主要特征，由于其具有高含盐（矿化度）、高含油的特性，直接外排将会造成环境污染，因此，产出水又通常叫做油田污水。实际上，油田污水不仅仅是油田产出水，还包括了石油天然气勘探、开发、集输等生产作业过程中形成的各类污水，如钻井污水、油田酸化、压裂等作业污水以及注水管线、注水井清洗排污水等，但油田污水以产出水为主。

1. 采油污水

1) 来源

在油田的开发过程中，为了保持地层压力，提高原油采收率，普遍采用注水开发工艺，即注入的高压水驱动原油使其从油井中开采出来。经过一段时间注水后，注入的水将和与原油天然伴生的地层水一起随原油被带出，随着注水时间的延长，采出流体含油率在不断下降，而含水率不断上升，这样便产生了大量采油污水。

2) 特点

由于采油污水是随着原油一起从油层中被开采出来的, 又经过原油收集及初加工整个过程, 因此, 采油污水中杂质种类及性质都和原油地质条件、注入水性质、原油集输条件等因素有关, 这种水是含有固体杂质、溶解气体、溶解盐类等多种杂质的废水。这种废水具有以下特点:

① 水温高。一般污水温度在 50°C 左右。个别油田有所差异, 如北方有油田为 $60 \sim 70^{\circ}\text{C}$, 西北有油田为 30°C 左右。

② 矿化度高。不同油田及同一油田不同污水处理站其矿化度有很大差异, 低的仅有数百毫克每升, 高的达到数十万毫克每升。

③ pH 值在中性左右, 一般都偏碱性, 但有的油田偏酸性, 如中原油田采油污水的 pH 一般在 $5.5 \sim 6.5$ 之间。

④ 溶解有一定量的气体。如溶解氧、二氧化碳、硫化氢、烃类气体等, 以及溶有一些环烷酸类等有机质。

⑤ 含有一定量的悬浮固体。如泥沙, 包括黏土、粉沙和细沙; 各种腐蚀产物及垢; 包括 Fe_2O_3 、 CaO 、 FeS 、 CaCO_3 、 CaSO_4 等; 细菌: 包括硫酸盐还原菌 (SRB)、腐生菌 (TGB) 及铁细菌、硫细菌等; 有机物: 包括胶质沥青类和石蜡类等。

⑥ 含有一定量的原油。以乳化油、分散油和原油的形式存在, 以及一定量的胶体物质。

⑦ 残存一定数量的破乳剂。

2. 采气污水

1) 来源

在天然气开采过程中随天然气一起被采出的地层水称为采气污水。

2) 特点

与采油污水相比, 采气污水较为“洁净”, 量也较少。水中主要含有较高的氯离子和一些溶解气体。

3. 钻井污水

1) 来源

在钻井作业中, 泥浆废液、起下钻作业产生的污水、冲洗地面设备及钻井工具而产生的污水和设备冷却水等统称为钻井污水。

2) 特点

钻井污水所含杂质和性质与钻井泥浆有密切的关系, 即不同的油气田, 不同的钻探区, 不同的井深, 不同的泥浆材料, 在钻井过程形成的污水性质就不尽相同。一般钻井污水中的主要有害物质为悬浮物、油、铬和酚等。

4. 洗井污水

1) 来源

专向油层注水的注水井, 经过一段时间运行后, 由于注入水中携带有未除净的或在注水管网输送过程中产生的悬浮固体 (腐蚀产物、结垢物、黏土等)、油分、胶体物质以及细菌等杂质, 在注水井吸水端面或注水井井底近井地带形成“堵塞墙”, 从而造成注水井注水压力上升, 注水量下降。需通过定期反冲洗, 以清除“滤网”上沉积的同体及生物膜等堵塞物, 使注水井恢复正常运行, 从而产生洗井污水。

2) 特点

洗井污水是一种水质极度恶化的污水，表现为悬浮物浓度高、铁含量高、细菌含量高、颜色深，而且含有一定量的原油和 H₂S。

5. 油田作业废水

1) 来源

在原油、天然气的生产过程中，为提高原油、天然气的产量，通常要采用酸化、压裂等油田作业措施，在这过程中也会形成一定量的废液或污水。

2) 特点

这类废液或污水在油田污水中所占的比例不是很大，但由于其水质极为特殊、恶劣，因而，处理起来十分棘手。这类废液具有以下特点：

① 悬浮物含量高，颜色深。

② 含有一定量的残酸，水体呈酸性。

③ 铁含量高。

④ 胶体含量高。

⑤ 油分含量高。

⑥ 含有多种化学添加剂。

表 1-2~表 1-5 给出了部分地区油田产出水、注水井环形空间水、洗井回水及钻井、压裂混合废液的水质特性。

从数据表中可看出：不同油田、不同地区、不同的油田污水其性质差别较大，钻井废水、压裂废水水质最为恶劣，其次为注水井环形空间水以及洗井回水。

表 1-2 中原油田部分注水井环形空间水水质分析表

注水井	组分/(mg/L)							SRB 个/mL	pH 值
	总矿化度	ΣFe	Fe ²⁺	悬浮物	含油	含硫	CO ₂		
M47	6.4×10 ⁴	21.6	16.1	50	504	80.5	—	10 ⁴	6.5
PI-8	2340	22.4	1.0	—	120	10.0	—	10 ⁴	6.5
W145	3.6×10 ⁴	54	—	409	—	92	—	10 ⁴	—
W95-40	6.0×10 ⁴	22	—	1918	—	130	—	10 ⁴	—

表 1-3 国内油田部分污水站产出水水质分析表

污水站		组分/(mg/L)							SRB 个/mL	pH 值
		总矿化度	ΣFe	Fe ²⁺	悬浮物	含油	含硫	CO ₂		
中原	文一污	12.7×10 ⁴	30.9	24.0	61.0	35.6	1.8	85	10 ³	6.5
	文二污	8.5×10 ⁴	67.5	60.0	73.0	37.5	2.3	130	10 ⁴	6.0
	文三污	11.2×10 ⁴	48.3	42.5	54.0	55.5	1.5	—	10 ²	6.0
	濮一污	11.8×10 ⁴	27.0	23.2	35.2	38.1	1.0	114	10 ²	6.0
	濮二污	17.8×10 ⁴	32.0	29.0	25.6	10.0	0.5	71	10 ²	6.5
	濮三污	12.7×10 ⁴	26.1	22.7	113	30.9	2.1	—	10 ²	6.0
	明一联	10.2×10 ⁴	25.6	21.7	34.0	56.4	3.5	—	10 ²	6.0
	明二联	5.5×10 ⁴	1.93	1.0	12.0	23.8	17.5	—	10 ²	6.0

续表

污水站		组分/(mg/L)							SRB 个/mL	pH 值
		总矿化度	ΣFe	Fe^{2+}	悬浮物	含油	含硫	CO_2		
	胡状污	17.7×10^4	56.0	48.2	90.0	57.7	0.8	69	10^4	6.5
	胡二污	14.2×10^4	31.9	25.6	46.0	39.3	1.1	203	10^2	5.5
	桥口污	4.4×10^4	21.3	17.2	22.0	96.5	1.5	—	10^5	6.0
	马厂污	4.1×10^4	11.1	7.0	20.7	116	1.6	140	10^5	6.0
胜利	坨四	1.1×10^4	0.48	—	—	—	0.08	—	10^4	8.0
	辛一	3.6×10^4	6.24	—	—	—	0.02	—	0	7.1
	滨二首站	4.2×10^4	1.23	—	—	—	0.26	—	10^2	6.7
	临盘首站	2.1×10^4	0.80	—	—	—	0.06	—	10^4	7.8
	孤一联	0.5×10^4	0.61	—	—	—	0.00	—	10^2	8.1

表 1-4 中原油田注水井洗井回水水质分析表

地点	组分/(mg/L)					SRB 个/mL	pH 值
	总矿化度	ΣFe	CO_2	HCO_3^-	Ca^{2+}		
濮二污洗井水进口	8.0×10^4	41.5	154	171	1578	10^2	5.5
文明污井水进口	6.0×10^4	5.7	154	142	952	$>10^4$	6.0
文二污井水进口	3.7×10^4	23.7	110	305	3900	$>10^4$	6.0
文三污井水进口	7.3×10^4	31.9	119	313	4900	10^2	6.0
胡状污井水进口	11×10^4	22.8	110	399	3925	10	6.0
桥口污井水进口	4.0×10^4	6.8	40	354	2050	10^2	6.5

表 1-5 中原油田钻井、压裂混合废液水质特征

外观	pH	滤膜系数	悬浮物/(mg/L)	Fe^{3+}	$\Sigma \text{Fe}/(\text{mg/L})$
黑浆状	6.0	测不出	500	15	50

1.2.2 油气田污水的物理性质

含油污水通常带色(视水的成分不同而异),浑浊不清;矿化度高,如中原油田污水矿化度在 1×10^5 以上,常以测定氯化物或氯根离子的含量(即含盐量)代表水的矿化度,单位为 mg/L;有硫化氢、汽油等特殊气味;密度多大于 $1\text{g}/\text{cm}^3$;黏度大于 $1\text{mPa} \cdot \text{s}$,导电性强。

1.2.3 油气田污水的化学性质

含油污水化学成分复杂,所含离子、元素种类甚多,其中常见的离子为:

阳离子: Na^+ (钠)、 K^+ (钾)、 Ca^{2+} (钙)、 Mg^{2+} (镁)、 H^+ (氢)、 Fe^{2+} (二价铁)、 Fe^{3+} (三价铁)等。

阴离子: Cl^- (氯根)、 SO_4^{2-} (硫酸根)、 CO_3^{2-} (碳酸根)、 HCO_3^- (碳酸氢根)。

其中常以 Na^+ (K^+)、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 几种离子为主,以 Na^+ 和 Cl^- 最多, SO_4^{2-} 含量很少。故其中以氯化钠含量最丰富,其次为碳酸钠 (Na_2CO_3)、

碳酸氢钠（NaHCO₃）、氯化镁（MgCl₂）、氯化钙（CaCl₂）等。钙、镁的碳酸盐含量不大，碳酸盐的含量很少。

此外，含油污水中还含有一些特殊的化学成分，有机物质、烃类气体、微量元素、硫化氢、溶解氧等。

1.2.4 污水回注水质标准

1. 注水水质基本要求

注水水质必须根据注入层物理指标进行优选确定。通常要求：在运行条件下注入水不应结垢；注入水对水处理设备、注水设备和输水管线腐蚀性要求；注入水不应携带超标悬浮物，有机淤泥和油；注入水注入油层后不使黏土发生膨胀和移动，与油层流体配伍性良好。如果油田含油污水与其供给水（如浅层地下水、地面净化污水和地面江河湖泊水等）混注时，必须具备完全的可能性，否则必须进行必要的处理改性后方可混注。考虑到油藏孔隙结垢和喉道直径，要严格限制水中固体颗粒的粒径。

2. 注水水质标准

由于各油田或区块油藏孔隙结构和喉道直径不同，相应的渗透率也不相同，因此注水水质标准也不相同，目前全国主要油田都制定了本油田的注水水质标准，尽管各油田标准差异较大，但都要符合注水水质基本要求。现将石油天然气行业标准《碎屑岩油藏注水水质推荐指标》SY/T 5329—1994 水质主控指标示于表 1-6。由于净化水主要用于回注油层，所以污水处理工艺必须设法使净化水达到有关注水水质标准。

表 1-6 推荐水质主要控制指标

注水层平均空气渗透率/ μm^2		<0.10			0.1~0.6			>0.6		
标准分级		A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
控制指标	悬浮固体含量/(mg/L)	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 3.0	≤ 3.0	≤ 4.0	≤ 5.0	≤ 5.0	≤ 7.0	≤ 10
	悬浮物颗粒直径中值/ μm	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 2.0	≤ 2.0	≤ 2.5	≤ 3.0	≤ 3.0	≤ 3.5	≤ 4.0
	含油量/(mg/L)	≤ 5.0	≤ 6.0	≤ 8.0	≤ 8.0	≤ 10.0	≤ 15.0	≤ 15.0	≤ 20	≤ 30
	平均腐蚀率/(mm/a)	<0.076								
	点腐蚀	A1、B1、C1 级；试片各面都无点腐蚀； A2、B2、C2 级；试片有轻微点蚀； A3、B3、C3 级；试片明显点蚀								
	SRB 菌/(个/mL)	0	<10	<25	0	<10	<25	0	<10	<25
	铁细菌/(个/mL)	$n \times 10^2$			$n \times 10^3$			$n \times 10^4$		
	腐蚀菌/(个/mL)	$n \times 10^2$			$n \times 10^3$			$n \times 10^4$		

注：a. $1 < n < 10$ ；
b. 清水水质指标中去掉含油量；
c. 新投入开发的油田、新建污水处理站，注水水质根据油层渗透率高低下要分别执行相应分级（A1、B1、C1）标准。

3. 注水水质辅助性指标

除了上述对注水水质的主要控制指标外，SY/T 5329—1994 还对注水水质的辅助性指标作出指导性规定。辅助性指标主要包括溶解氧、硫化氢、侵蚀性二氧化碳、铁、pH 值等。

1) 溶解氧

水中含溶解氧时可加剧腐蚀，当腐蚀率不达标时，应首先检测溶解氧浓度。一般情况要

求, 油田污水溶解氧浓度小于 0.05mg/L , 特殊情况不能超过 0.1mg/L 。清水中的溶解氧含量要小于 0.50mg/L 。

2) 硫化氢

如果原水中不含硫化物, 或发现污水处理和注水系统硫化物含量增加, 说明系统细菌增生严重。硫化物含量过高的污水, 可引起水中悬浮物增加, 通常清水中不应含硫化物, 油田污水中硫化物含量应小于 2.0mg/L 。

3) 侵蚀性二氧化碳

水中侵蚀性二氧化碳含量等于零时, 稳定; 大于零时, 可溶解碳酸钙垢, 并对设施有腐蚀作用; 小于零时, 有碳酸盐沉淀析出。一般要求侵蚀性二氧化碳含量为: $-1.0 \sim 1.0\text{mg/L}$ 。

4) pH 值

水的 pH 值应控制在 7 ± 0.5 为宜。

5) 铁

当水中含亚铁离子时, 由于铁细菌作用可将二价铁离子转化为三价铁离子, 生成氢氧化铁沉淀, 当水中含硫化物 (H_2S) 时, 可生成 FeS 沉淀, 使水中悬浮物增加。

1.3 计量知识

1.3.1 计量的含义

《中华人民共和国计量法》于 1985 年 9 月 6 日第六届人大常委会第十次会议通过, 于 9 月 6 日中华人民共和国主席令第十八号公布。1986 年 7 月 1 日正式执行。该法共分六章, 包括: 总则、计量标准器具和计量检定、计量器具管理、计量监督、法律责任及相关附则等内容。

1. 量与量值的概念

1) 量的概念

在计量科学领域, 凡可以定性区别并能定量确定的现象或物体的属性, 称为可测的量, 统称量。

“量”是计量科学研究的基本对象。随着生产、生活的不断发展, 科学技术的进步和人民生活的需要, “量”的种类不断增多, “量”的含义不断丰富。

2) 量值的概念

量值是由数值和计量单位的乘积所表示的量的大小。

要知道一个未知量的数值, 就必须与另一个已知的定为标准的同类量 (即计量单位) 进行比较, 从而以计量单位的多少倍或几分之几来定量确定该量的值。由于采用计量单位不同, 同一量可得到不同的量值, 但是量本身的大小并未变化, 所以量的大小和量值的概念是有区别的。

2. 计量的含义

目前对计量的含义比较一致的意见是: 计量是利用技术和法制的手段实行单位统一和量值准确、可靠的测量。

测量是指为确定被测对象的量值而进行的全部操作过程。测量是形成计量的前提, 测量是固定化和成熟化的测试。

测试是具有测验性质的测量。测试的测量的先导、扩展和外延，是测量的一种特殊形式。测试为计量开拓新的领域，提供新的技术手段和方法。

计量是测量的一种特殊形式。计量是做好测量的保证，是开展测试工作的基础，为测试研究提供基础条件。

总之计量、测量、测试三者的共性都是解决“量”的问题，均属于测量的范畴。但三者又不尽相同，各具特点。当测量是为了实现统一，旨在使量值溯源到计量标准器具，计量基准器具时，那种测量就是计量。当测试已经具有确定的方法和途径，那种测试就已转变成测量；当要求测试方法和量值进行统一并相应建立了标准，那种测试就已转变成为计量。计量为测量和测试提供保障，使单位统一，量值准确可靠一致。

计量与其他学科不同，它具有自然科学和社会科学两重性质。因此，计量具有下列四个特征：

(1) 统一性：是指保证测量的统一，包括计量单位制的统一，单位量值的统一。统一性是计量的本质特性，计量失去统一性就失去了存在的意义。计量的这种统一性不应局限于一个国家，而应遍及全世界。

(2) 准确性：即计量准确可靠。它是计量工作的核心，是计量实现统一的基础。一切计量科学技术研究的目的，最终是要达到所预期的某种准确度，只有在准确的基础上才能达到真正的统一。

(3) 法制性：为了保证计量的统一性和准确性，国家对统一使用的计量单位，复现单位量值的计量基准工具，以及进行量值传递的手段、方法等都运用法律做出规定，作为各行各业遵循的原则。如果没有法制性，计量的统一性、准确性就是一句空话。国际上也成立了国际法制计量组织。

(4) 社会性：计量涉及的范围极为广泛，它与国民经济各部门，人们生活各方面都有密切的关系，对维护社会经济秩序起着重要的作用。从直接关系来看，正是计量的社会性决定了计量的法制性。

1.3.2 法定计量单位

法定计量单位是国家法令形式允许使用的计量单位。它是统一计量单位制和单位量值的依据和基础。

1.3.2.1 我国法定计量单位的构成与特点

1. 我国法定计量单位的构成

我国的法定计量单位包括以下6类。

(1) 国际单位制的基本单位，如表1-7。

表 1-7 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m	时间	秒	s
质量	千克	kg	电流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K	物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	cd			

注：方括号中的字，在不引起混淆、误解的情况下，可以省略。去掉方括号中的字即为其名称的简称。下同。

(2) 国际单位制的辅助单位，如表 1-8。

表 1-8 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
平面角	弧度	rad	立体角	球面度	sr

(3) 国际单位制中具有专门名称的导出单位，如表 1-9。

表 1-9 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示示例
频率	赫 [兹]	Hz	s^{-1}
力	牛 [顿]	N	$\text{Kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$
压力，压强，应力	帕 [斯卡]	Pa	N/m^2
能 [量]，功，热量	焦 [耳]	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
功率，辐射能，通量	瓦 [特]	W	J/s
电荷 [量]	库 [仑]	C	$\text{A} \cdot \text{s}$
电压，电动势，电位，(电势)	伏 [特]	V	W/A
电容	法 [拉]	F	C/V
电阻	欧 [姆]	Ω	V/A
电导	西 [门子]	S	Ω^{-1}
磁通 [量]	韦 [伯]	Wb	$\text{V} \cdot \text{s}$
磁通 [量] 密度，磁感应强度	特 [斯拉]	T	Wb/m^2
电感	亨 [利]	H	Wb/A
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$	
光通量	流 [明]	lm	$\text{cd} \cdot \text{sr}$
[光] 照度	勒 [克斯]	lx	lm/m^2
[放射性] 活度	贝可 [勒尔]	Bq	s^{-1}
吸收剂量	戈 [瑞]	Gy	J/kg
剂量当量	希 [沃特]	Sv	J/kg

(4) 国家选定的非国际单位制单位，如表 1-10。

表 1-10 国家选定的非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分	min	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$
	小时	h	$1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$
	日，(天)	d	$1 \text{ d} = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$
平面角	角秒	($''$)	$1'' = (\pi/64800) \text{ rad}$
	角分	($'$)	$1' = 60'' = (\pi/10800) \text{ rad}$
	度	($^{\circ}$)	$1^{\circ} = 60' = (\pi/180) \text{ rad}$
旋转速度	转每分	r/min	$1 \text{ r/min} = (1/60) \text{ s}^{-1}$

续表

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
长度	海里	n mile	1n mile = 1852m
速度	节	kn	1kn = 1n mile/h = (1852/3600) m/s
质量	吨	t	1t = 1000kg
	原子量单位	u	1u ≈ 1.660540 × 10 ⁻²⁷ kg
体积	升	L, (l)	1L = 1dm ³ = 10 ⁻³ m ³
能	电子伏	eV	1eV ≈ 1.602177 × 10 ⁻¹⁹ J
级差	分贝		
线密度	特克斯	tex	1tex = 10 ⁻⁶ kg/m

- (5) 由上述单位构成的组合形式的单位。
- (6) 由词头和以上单位构成的十进倍数和分数单位，如表 1 - 11。

表 1 - 11 用于构成十进倍数和分数单位的词头

所表示的因数	词头名称	词头符号	所表示的因数	词头名称	词头符号
10 ¹⁸	艾 [可萨]	E	10 ⁻¹	分	d
10 ¹⁵	拍 [它]	P	10 ⁻²	厘	C
10 ¹²	太 [拉]	T	10 ⁻³	毫	M
10 ⁹	吉 [咖]	G	10 ⁻⁶	微	μ
10 ⁶	兆	M	10 ⁻⁹	纳 [诺]	n
10 ³	千	k	10 ⁻¹²	皮 [可]	p
10 ²	百	h	10 ⁻¹⁵	飞 [母托]	f
10 ¹	十	da	10 ⁻¹⁸	阿 [托]	a

2. 法定计量单位的特点

我国法定计量单位具有以下特点：

- (1) 国际单位制是我国法定计量单位的基础
- (2) 只提出可以构成组合形式单位的 43 个单位，而不提出哪些组合形式单位属于法定计量单位。组合形式的单位是指由两个或两个以上的单位用相乘、除的形式组合而成的新单位，也包括分母只有一个单位，而分子为 1 的情况。组合形式的单位可简称为组合单位。
- (3) 不列出要废除的单位及其时间。有一些国家的法令列出了应废除的使用较广泛的某些单位，有些国家以国家标准的形式列出了这类单位。事实上，各行各业的情况十分复杂，特别是英制在某些领域中的使用，如毫米汞柱在医疗诊断中的使用较为广泛。我国只在《全面推进我国法定计量单位的意见》中做出了一些原则规定，单独提出了市制计量单位最后废除的时间；土地面积单位“亩”的改革另外公布。
- (4) 国际上有争议或只为部分国家所采用的单位不列为我国的法定计量单位。法定计量单位由各国自主决定。在采用非国际单位制的单位作为法定计量单位这个问题上，各国不可能一致。我国在处理这个问题时遵循凡国际上有争议或只为部分国家所采用的单位则不列

为我国的法定计量单位的原则,所以我国选定的非国际单位制单位作为法定计量单位的数目只有15个,在国内有争议的单位没有列入。

(5) 考虑了我国人们的习惯。

1.3.2.2 法定计量单位的定义和使用方法

1. 法定计量单位的定义

我国法定计量单位的定义是参照国际计量大会、国际计量局和国际标准化组织有关的规定拟定的,一共公布了43个法定计量单位的定义。详细介绍请参考《适用计量全书》。

2. 法定计量单位的使用方法

原国家计量局于1984年6月9日发函公布了《中华人民共和国法定计量单位使用方法》,其主要内容如下。

1) 单位和词头的名称

① 凡单位名称来源于人名,原则上都给予音译的中文名称。

② 单位名称中圆括号内的字为前者的同义语。

③ 单位名称和词头名称中方括号内的字被省略时即成为其简称,没有方括号的名称为全称,简称在不混淆的情况下可等效它的全称使用,习惯上只使用简称的单位可继续使用。

④ 组合单位的中文名称与其符号表示的顺序一致。符号中的乘号没有对应的名称,除号的对应名称为“每”字,无论分母有几个单位,“每”字只出现一次。读法从左到右、先分子后分母。

⑤ 乘方形式的单位名称,其顺序应是指数名称在前,单位名称在后。相应的指数名称由数字加“次方”二字构成。当长度的“二次幂”和“三次幂”是特指面积和体积时,则相应指数的名称称为“平方”和“立方”。

⑥ 指数是负1的单位或分子为1的单位,其名称以“每”字开头。

⑦ 书写单位名称时不加任何表示乘或除的符号或其他符号。

⑧ 词头的名称永远紧接单位名称而不得在其间加入其他词。

⑨ 在书写中作词头用的八个数词(兆、千、百、十、分、厘、毫、微),如带来混淆有必要明确区别时,可采用圆括号。

2) 单位和词头的符号

① 单位和词头的符号,不论用拉丁字母或希腊字母,一律用正体,不附省略点,且无复数形式。

② 单位符号的字母一般为小写体(但升的符号L例外);来源于人名者,符号的第一个字母为大写体;来源于人名且两个字母构成者,则第一个字母正体大写,第二个字母正体小写。

③ 词头的符号字母,当表示的因数小于 10^6 时一律用小写体,大于或等于 10^6 时为大写体。

④ 由两个以上单位相乘构成的单位时,其符号可以用两种形式表示。

⑤ 相乘形式的组合单位次序无原则规定,一般不能使用词头的单位不应放在最前面,另外,若组合单位符号中某单位符号同时又是词头符号并有可能发生混淆时,则应尽量将它置于右侧。

⑥ 由两个以上单位相除所构成的组合单位,其符号可以采用三种形式如: kg/m^3 , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, kgm^{-3} 表示。当可能发生混淆时,应当用居中圆点表示乘号或用斜线表示除号。

⑦ 在初中、小学课本和普通书刊中有必要时,可将单位的简称(包括带有词头的单位简称)作为符号使用,这样的符号称为“中文符号”。

⑧ 由两个以上单位相乘所构成的组合符号,其中文符号的写法只用一种形式,即采用居中圆点作为乘号。

⑨ 由两个以上单位相除所构成的组合符号,其中文符号可采用两种形式表示。

⑩ 在进行运算时,组合单位中的除号,可以用水平线表示。

⑪ 分子为1的组合单位称号,一般不用分式而用负数幂表示。

⑫ 在用斜线表示相除时,单位符号的分子和分母与斜线处于同一水平内则不宜使分子高于分母。

⑬ 当分母中包含两个以上单位相乘时,整个分母一般应加圆括号。

⑭ 在组合单位的符号中,表示除号的斜线不应多于一条,在复杂情况下可用负数幂或括号以避免混淆。

⑮ 词头与单位之间不得有空隙,也不加表示相乘的其他符号,它们的符号也不应加括号。

⑯ 单位和词头的符号按其名称或简称读音,不得按字母读音。

⑰ 非物理量的单位(如人、元等)可用汉字与符号构成组合形式的单位。

3) 单位和词头的使用规则

① 单位和词头的名称和简称,一般只宜在叙述性文字中使用。

② 单位的名称或符号必须作为一个整体使用,不得拆开。

③ 单位的名称或符号应置于整个数值之后。

④ 十进制单位一般在一个量中只应使用一个单位。

⑤ 选用SI单位的倍数或分数单位,一般应使数值处于0~1000范围内。

1.3.3 计量国际单位制

计量国际单位制是我国法定计量单位的基础,为我国国民经济、文化教育事业的发展以及推进科学技术进步和扩大国际经济、文化交流提供了有利条件。

国际单位制的显著优点是它的统一性、简明性、科学性、实用性和先进性。

国际单位制的统一性,表现在国际时间的统一,科学技术之间的单位的统一,各行各业之间相同物理量的单位的统一。

国际单位制的简明性,体现在它简化了物理量的表达方式和计算方法,省略了旧杂单位制之间的繁琐换算。这不仅节省人力物力,同时也避免了因单位换算而产生的错误。在科学研究和计量测试中,节省换算时间更为显著。

国际单位制的科学性,是它对各单位都做了明确的科学规定。我国法定计量单位以国际单位制为基础,这就澄清了过去在单位方面的模糊概念。

国际单位制的实用性表现在国际单位制的全部基本单位和大多数导出单位的大小都很适用,而且还有词头供选用构成十进倍数单位和分数单位,以适应人们生活需要和科学技术发展的需要。同时国际单位制是在米制基础上发展起来的,继承了米制的精华,克服了米制的不足之处,使之更加完善。米制在我国甚至全世界均已得到广泛应用,这样人们对国际单位制的基础单位和大多数导出单位是熟悉的,有利于推行的。

1.3.4 计量仪表

计量仪表是指天然气的压力(差压)、温度和流量等其中一个参数或全部参数在测量过程中转换成可直接观测的示值或等效信息的计量器具。

1. 组成

一般情况下, 计量仪表根据组成主要分为以下四个部分。

1) 检测部分

检测部分又叫传感器, 是把被测量转换成相应的机械的、电的或其他形式易于观察、传递、测量的信号, 以供传输与变换环节使用。如玻璃水银温度计其检测元件是水银泡, 它利用热胀冷缩原理把温度转换成相应的水银柱高度。

2) 变换部分

变换部件是测量仪表的中间环节, 它的作用是将检测元件的输出信号进行放大、处理或转换成标准统一的信号输出, 以供给显示部件进行显示。如在弹簧管压力表中, 变换部分是齿轮与杠杆传动机构, 它将弹簧管的微弹簧形变转换并放大为指针的偏转。

3) 显示部分

显示部件是人机联系的主要环节, 作用是向观察者显示被测量数值的大小。也是将转换放大后的信号与被转换了的测量单位用人们易于观察的形式相比较, 指示出被测量的大小。

4) 传输部分

传输部件是联系仪表的各个部件, 给其他环节的输入输出信号提供通路。

2. 性能指标

1) 准确度

表示测量结果与真值的一致程度。随机误差与系统误差都小。例如一台测量范围 0 ~ 1000kPa 的压力表, 其最大绝对误差 10kPa (在整个量程范围内), 仪表准确度为 $10/1000 = 0.01 = 1\%$ 。

2) 线性度

线性度也叫非线性误差, 指计量仪表的输出量与输入量之间的关系曲线与理论参考直线的最大偏差与满量程的百分比。用来表征仪表的输出量和输入量的实际对应关系与理论直线的吻合程度。

3) 允许误差

仪器仪表的允许误差是指仪器仪表在规定的工作条件下允许的最大相对误差的百分数。

$$\varepsilon = \frac{\Delta_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 ε ——最大绝对误差, %;

$x_{\max}$ ——仪表最大量程;

$x_{\min}$ ——仪表最小量程。

1.4 视图知识

1.4.1 投影的基本原理

1.4.1.1 投影法简介

1. 投影法及概念

日光或灯光照射在物体上, 在墙上或地面上产生影子。在投影法中, 与这种投影现象类似。如图 1-1 所示, 光线从点 S 发出照射平面 $\triangle ABC$, 在一平面 P 上产生图像 $\triangle abc$ 。点 S