

高地应力大型地下洞室的位移 和锚杆应力特性

Rock displacement and load of bolts around large scale cavities with high stress

陈仲先 汤 雷

(南京水利科学研究院材料结构所, 南京, 210024)

文 摘 通过大量的原型监测数据, 研究了大型地下洞室的位移特性、锚杆应力特性以及它们的变化规律, 并分析了对围岩位移和锚杆应力的影响因素。

关键词 地下洞室, 围岩位移, 锚杆应力

中图法分类号 TV 554

文献标识码 A

文章编号 1000-4548(2000)03-0294-05

作者简介 陈仲先, 男, 1941年生, 1965年毕业于兰州大学数学力学系, 高级工程师, 主要从事水工结构和地下洞室的安全监测工作。

Chen Zhongxian Tang Lei

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, 210024)

Abstract According to the large quantity of in situ measured data, the characteristics and variation laws of displacement and load of bolts in the surrounding rock are studied, and the factors which influence the displacement of surrounding rock and the load along bolts are analyzed as well.

Key words underground cavities, displacement of surrounding rock, load along bolt

1 前 言

某水电站位于雅砻江下游, 装机容量 330 万 kW, 是国内即将建成的一座大型水电站, 枢纽区山势险峻, 河谷狭窄, 主要枢纽建筑均置于两岸的山体之中, 其中左岸由引水、发电、泄洪、导流、过木等系统组成复杂的地下洞室群。地下洞室群中的地下厂房、主变室和调压室(称为三大洞室)为典型的大型或巨型断面, 地下厂房长 280.29 m, 宽 30.7 m, 高 65.38 m; 主变室和调压室的尺寸分别为 214.9 m × 18.3 m × 24.6 m (长 × 宽 × 高) 和 203.0 m × 19.8 m × 69.8 m。厂房和主变室相距 35.0 m, 主变室和调压室相距 30.0 m。三大洞室平均埋深在 250 m 以上。基岩主要是正长岩和辉长岩, 岩体新鲜完整, 但在靠第一副厂房约 60.0 m 范围内(0 + 222.0 ~ 0 + 280.3)为蚀变玄武岩, 局部岩体破碎, 裂面呈绿泥石薄膜充填。

三大洞室处于以构造应力为主、自重应力与构造应力联合作用的非各向同性的高地应力区, 最大主应力值 σ_1 为 20 ~ 38 MPa, $\sigma_2/\sigma_1 = 0.52 \sim 0.66$, $\sigma_3/\sigma_1 = 0.27 \sim 0.36$, σ_1 的作用方向基本垂直于河流且倾向河床, 倾角 $10^\circ \sim 30^\circ$, 与岸坡向近于平行^[1, 2]。

综上所述, 三大洞室的特点是: 高地应力、大断面、

高边墙、硬岩与软岩同时存在, 并处于纵横交错的洞室群中。这些特点反映了一般大型水电站地下发电洞室的共同特点。研究其变形特性和锚固效果不仅对该地下工程的稳定具有重要价值, 对于今后开发的类似工程也具有普遍意义。

变形特性和锚固效果是通过安全监测得到的, 安全监测仪器主要是多点位移计和锚杆应力计。在三大洞室中共埋设多点位移计 90 套, 锚杆应力计 82 套, 每套仪器上有 4 个测点。监测仪器主要分布在 5 个断面。图 1 为一典型断面的锚杆应力计布置图, 多点位移计所在的断面与锚杆应力计相距 1 m, 测点相互对应, 高程与锚杆应力计相同, 埋入深度主要有 30 m 和 20 m 两种。锚杆应力计的长度亦分 6 m 和 8 m 两种, 锚杆间距为 1.5 m × 1.5 m, 为系统注浆锚杆。多点位移计和锚杆应力计均采用振弦式仪器, 其中, 多点位移计除国产仪器外, 还采用了美国 GEOKON 生产的 A-6/4450 产品。

仪器埋设紧密配合洞室的开挖进程, 及时埋设, 及时监测, 并及时分析整理测试结果。所有仪器的组装、埋设、监测和监测结果的分析计算均由专业技术人员操作, 所得结果的系统性、规律性和可靠性之好是国内洞室监测中少有的。本文给出的监测结果至三大洞室开挖结束时为止。

* 水利部水利科技重点项目 (No. SZ9808)

到稿日期: 1999-08-18

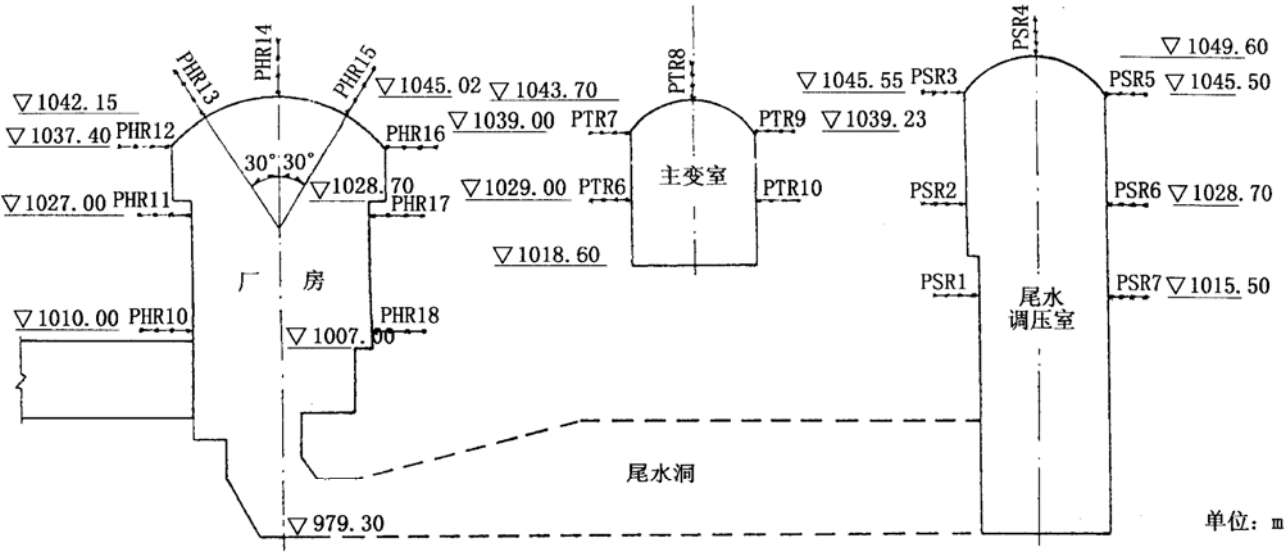


图 1 锚杆应力计布置图

Fig. 1 Layout of load measuring bolts

2 围岩的变形特性

围岩的变形和岩石的种类、构造、性能、深度、地应力、蠕变、洞室形状和开挖方式等多种因素有关。工程三大洞室的监测结果表明,围岩的变形主要有以下特性。

2.1 不同深度的位移变化

图 2 为同一测孔不同深度测点的岩石位移变化曲线,图中的 P1、P2、P3、P4 点距围岩表面的深度分别为 16.5、6.5、4.0、1.5 m,它说明各测点具有相同的变化规律,但是距围岩表面越近的点位移越大。这种变化规律具有普遍性,只是不同深度的各点之间的位移比例不尽相同。

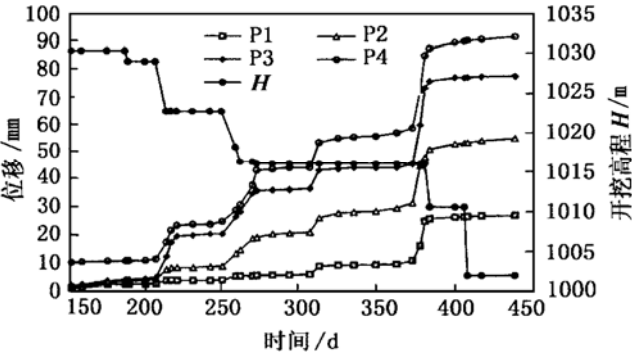


图 2 PHM14 位移曲线

Fig. 2 Displacement curve of PHM14

2.2 围岩位移沿洞周的分布

围岩位移沿洞周的分布极不均衡,表 1 为三大洞室沿洞周表面测点的位移值,为概括位移分布的一般性,表中位移值取各观测断面相应点的平均值。各部位测点高程与图 1 中的锚杆应力计相同。

表 1 洞周位移值

Table 1 Displacement around cavities		mm		
部 位		厂房	主变室	调压室
拱 部	上游拱座	33.0	131.8	103.3
	拱 顶	3.0	1.8	1.9
	下游拱座	3.3	19.6	12.2
上游墙	中(上)部	80.0	98.3	120.0
	中下部	31.6	—	43.1
下游墙	中(上)部	42.6	24.9	29.5
	中下部	76.9	—	29.8

表中结果表明:

(1) 三大洞室的位移都有相似的规律:上游拱座和上游墙的中部(或中、上部)位移最大,其次是下游墙和上游墙的中、下部,再其次是下游拱座,拱顶的位移最小(最大者仅 3 mm)。

(2) 上、下游墙位移随高度的变化正好相反,上游墙的中、上部位移大于中、下部位移,下游墙则中、下部位移大于中、上部位移。

(3) 上游拱座位移显著大于下游拱座的位移,且相差悬殊,而同属上游拱座处,厂房的位移又较主变室和尾调室小很多。这是由于拱座处于应力既集中又复杂的区域,上游拱座部位曾多次发生岩爆,主变室和尾调室的岩爆更为严重,而下游拱座则少有发生。

(2)和(3)中,上、下游位移变化的差异除岩爆的影响外洞室交叉也有较大影响,如厂房的下游墙和主变室的上游墙之间有 6 条母线洞,交叉部位正好是厂房边墙的中下部和主变室的整个上游墙。此外,地应力的方向和岩石的产状也可能是影响的因素。

2.3 不同围岩的位移变化特性

图 2 代表了完整的正长岩位移变化曲线,图 3 则

代表了较为破碎的蚀变玄武岩(裂面绿泥石化)位移变化曲线,前者随着开挖高程的变化呈阶梯形的增加,每开挖一层,位移就有一次突变;后者则随着高程的变化呈指数曲线增长,位移曲线为连续的光滑曲线。另外,统计结果表明,前者的位移总量普遍大于后者,大者可超过一倍以上。

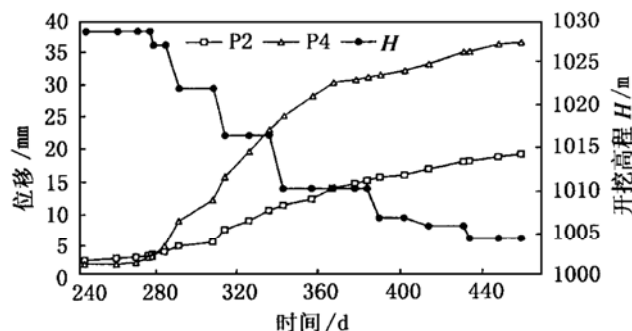


图3 PHM41 位移曲线

Fig. 3 Displacement curve of PHM41

2.4 影响位移变化的主要因素

洞室开挖后,洞周初始应力释放,产生卸载效应——“释放荷载”,引起地应力重新分布,形成二次应力场,同时伴随着岩体的变形,使岩体达到新的平衡。但是,卸载效应引起的岩体变形和变形速度又和多种因素有关,监测结果表明影响位移变化的主要因素有:

(1) 开挖

从图2、图3看出,开挖是引起位移增长的主要因素,这里的开挖主要是指测点所在断面的开挖。同一断面内,开挖与测点的相对位置又有很大关系。对于好的岩石而言,测点所在层及下层的开挖引起的位移最大,如图2中,210 d和260 d的位移增长。对于破碎的蚀变玄武岩而言,除测点所在层及下层外,再下面的两层开挖也能引起较大的位移增加(图3)。其余的层次的开挖引起的位移就很小了。

(2) 岩爆

岩爆是引起围岩位移的另一主要因素,位移的大小依岩爆的严重程度及距岩爆处的远近而异,大的岩爆可在很大范围内(甚至波及到相邻的洞室),引起大的位移,其量值可接近或超过开挖引起的位移值。图2中381 d的位移值突增主要就是由于岩爆引起的。

(3) 其他

引起围岩位移的其他因素主要指岩石的蠕变,沿洞轴线的开挖及相邻洞室的开挖,这就是一般所指的“时空效应”。时空效应中,时间效应(蠕变)更为显著,空间效应则较小。在施工期内由于二者始终交织在一起,难以把它们分离开来,但在洞室开挖结束后,一般只剩下蠕变位移,可从此后的一段时间内看出蠕变的影响。一般情况下,开挖结束后的围岩蠕变还要延续

相当长一段时间,长者可达一年以上。蠕变引起的位移,随测点的位置和岩石的性能而异,对于总位移较小的测点而言,蠕变引起的位移值可达30%以上,对较差的岩石比例则更大。

表2统计了多点位移计PHM14测到的各种因素产生的位移,从中可以了解各种位移在总位移中所占的比例。表中开挖1为测点所在层及相邻下层的开挖,开挖2为除这两层外的其他层的开挖。蠕变栏中的位移是施工结束后完全由蠕变引起的位移。

上述围岩的变形说明高地应力大型洞室的变形特性与小型洞室是不相同的。主要表现在:

a) 文献[3,4]表明,小型洞室的空间效应是指沿洞轴线方向的开挖,影响范围为洞径的1.5~2.0倍,该工程的监测结果则说明,空间效应的影响主要是该层及其以下1~3层的开挖,明显的影响范围一般还不到洞径的0.5倍。

b) 此类大型洞室的位移主要表现在侧墙和拱座,拱顶的位移是非常小的。

c) 岩爆是大型洞室产生位移的重要因素之一。

d) 文献[5]等认为,在巷道开挖中,围岩愈好,变形量愈小。该工程的监测结果则说明,在同一工程中,好的岩石变形量不一定就小。

表2 各种因素引起的位移值

Table 2 Displacement induced by some factors

影响因素	开挖1	开挖2	岩爆	蠕变	其他
位移/mm	28.9	10.3	43.5	17.8	16.4
与总位移之比/%	24.7	8.8	37.2	15.2	14.0

3 锚杆的应力特性

3.1 锚杆应力的一般变化规律

与围岩位移相比,锚杆应力的规律性较差,无论从同一锚杆上的不同测点或是从不同位置的锚杆,均难寻求一致的变化规律,但是综合所有锚杆测点应力的变化过程均可归结为以下几种变化形式。

(1) 锚杆应力随着下层的开挖而呈台阶式增加,随后有的变为平缓的增加,再逐渐趋于稳定,如图4中的 P_1 、 P_2 。有的则继续增大,如图4中的 P_3 。

(2) 应力随着下层开挖而呈抛物线增大,以后或者逐渐趋于稳定(如图5中的PHR29-3),或者继续增大。

(3) 锚杆安装后不久,应力则因下层开挖或岩爆产生突变(骤增),随即超过仪器量程(240 MPa)或逐渐增至超过仪器量程(图5中的PSR1-2和PSR1-3)。

上述三种情况的应力主要发生在边墙上,锚杆应

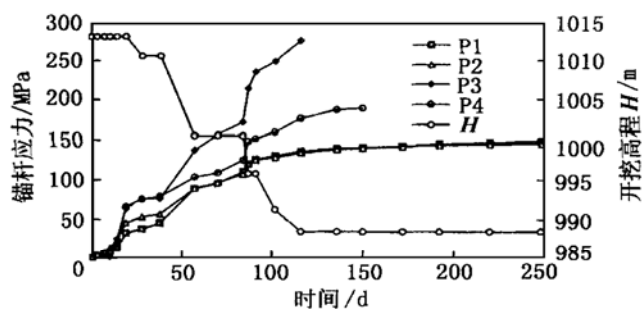


图4 PSR14 应力曲线

Fig. 4 Stress curve of PSR14

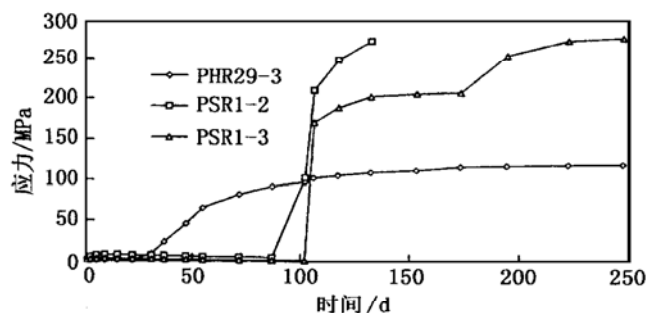


图5 不同的锚杆应力曲线

Fig. 5 Stress curve of different bolts

力一般都比较小(小于 100 MPa), 以下两种情况则主要发生在拱座和拱上。

(4) 在同一锚杆的 4 个测点中, 紧靠洞壁的点, 应力随下层的开挖而增大, 最后趋于稳定, 而靠岩体内部的 3 个测点, 应力变化都很小 (< 10 MPa) (图 6), 此种情况均出现在拱部。说明只有浅层的锚杆应力变化。

(5) 处于拱座部位的部分锚杆中有的测点经历某次岩爆之后, 应力由正值变为负值, 但其绝对值都不大, 一般小于 50 MPa, 如图 7 中的 P_3, P_4 , 保持为正应力的测点 P_1, P_2 , 其值则继续增加。由此也说明拱座部位岩石应力的复杂性。

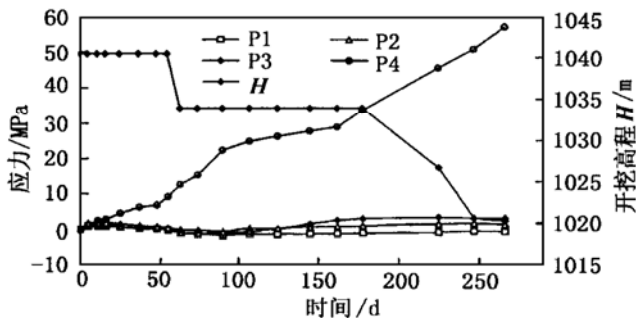


图6 PSR4 应力曲线

Fig. 6 Stress curve of PSR4

上述锚杆应力的变化形式都是在龄期 250 d 之内的变化。至于此后仍再连续增长的锚杆应力, 有的在 一定龄期后逐渐趋稳定; 有的则增长至超过仪器量程。超量程的应力可能会超过锚杆的强度极限, 也可能在

强度极限之内趋于稳定。锚杆应力计量程不足是目前国产锚杆应力计的不足之处。

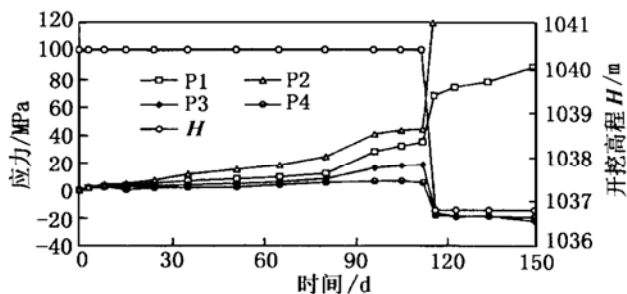


图7 PSR12 应力曲线

Fig. 7 Stress curve of PSR12

3.2 锚杆应力沿锚入深度的变化

锚杆应力沿锚杆的分布对于每根锚杆都各不相同, 没有规律可循。每根锚杆上有 4 个应力测点, 厂房锚杆长度为 8 m, 两端测点距端部为 0.7 m, 中部测点等距布置, 间距为 2.2 m。主变室和调压室锚杆长度为 6 m, 两端测点距端部 0.75 m, 中部测点亦等距布置, 间距为 1.5 m。锚杆上 4 个测点的编号由洞壁端到深处分别为 P_4, P_3, P_2, P_1 。对三大洞室中 75 根锚杆上的最大应力点进行统计, $P_1 \sim P_4$ 各为最大应力点的比例分别为 17.3%, 17.3%, 29.6%, 36.0%。该结果说明:

(1) 锚杆中的最大应力可以发生在锚杆中的任何一点。

(2) 靠洞壁端越近出现最大应力的概率越大。但在超过锚杆长度 60% 以上的范围, 最大应力出现的概率则可能相同。

3.3 沿洞周的锚杆应力分布

表 3 统计了三大洞室不同部位的锚杆应力平均值, 表中各部高程如图 1 所示。

表3 锚杆应力统计值

		Table 3 Load of bolts			
		MPa			
部	位	厂房	主变室	调压室	平均
拱 部	上游拱座	127.9	183.2	173.3	161.5
	拱 顶	33.7	13.4	32.8	26.7
	下游拱座	67.7	47.5	45.7	53.6
上游墙	中(上)部	139.9	175.2	105.4	140.2
	中下部	125.1	—	182.7	153.9
下游墙	中(上)部	137.6	130.8	108.4	125.6
	中下部	150.1	—	120.2	135.2

结果说明, 同一洞室中, 除拱顶和下游拱座外, 各部的锚杆应力较为均衡, 一般都在 120~ 180 MPa。下游拱座和拱顶的锚杆应力则要小得多, 下游拱座的锚杆应力只有上游拱座的 1/2~ 1/4, 拱顶的锚杆应力则只有上游拱座的 1/4~ 1/13。在厂房拱部, 还监测了

距拱顶上、下游各 30° 处的锚杆应力, 这两处锚杆的平均应力分别是 38.5, 23.5 MPa。上述结果说明, 位于侧墙和上游拱座的锚杆都较好地发挥了各自的锚固作用, 而在顶拱部分(除上游拱座及相邻部位外)锚杆尚有大部潜力未能发挥。因此, 该部分可以考虑应用截面积较小的锚杆来代替。同时, 根据 3.1(4) 中所述顶拱部分锚杆应力沿锚杆深度的分布特点, 顶拱部分锚杆的长度也可减小。

3.4 影响锚杆应力的主要因素

根据图 4~ 图 7 和 3.1 中所述, 下层开挖和岩爆是引起锚杆应力增加的主要因素, 这和影响围岩位移的因素是一致的。但是从图 4~ 图 7 也可同时看到时间效应的重要作用, 多数锚杆应力总是随时间而不断增加, 而且这部分应力在总应力中占有相当的比例。同时, 在施工过程中一部分未及时安装的锚杆应力明显偏低, 也说明了时间因素的影响。依据时间效应, 我们可以调整锚杆的安装时间, 使其既能充分发挥锚固作用又不至于使锚杆应力过大而遭破坏。此外, 处于拱座部位的锚杆中, 约有 40% 的锚杆处于拉压同时作用的状态, 其中一段为拉应力, 另一段又为压应力, 这可能是拱座处于复杂应力区, 岩体处于剪切状态的结果。这种状况应该引起设计工程师的注意。

4 结 论

(1) 对于高地应力大型地下洞室, 测点所在层及下层开挖和岩爆是引起围岩位移和锚杆应力增长的两主要因素, 这两种因素引起的位移可达总位移的

60% 以上。因此, 合理的开挖程序和对岩爆的有效防治对于围岩稳定将具有突出作用。

(2) 大型地下洞室的变形和锚杆应力, 随部位而明显不同, 如上、下游拱座的位移最大可相差 9 倍, 上、下游墙的位移最大可相差 3 倍, 拱顶的位移和锚杆应力都极小, 甚至不到上游拱座的 $1/10$ 。据此, 若能借鉴类似工程的监测结果并结合具体工程的监测, 合理调整支护措施, 对确保工程安全和节省投资都会有显著效果。

(3) 大型地下洞室的变形和锚杆应力特性和一般隧洞是有区别的, 若在大型洞室中直接借鉴一般隧洞的监测结果和规律性是不合适的。

(4) 由于高地应力大型地下洞室的监测结果还不多, 更缺乏全面系统的监测成果。该工程的监测结果是否能反映同类工程普遍规律还有待于今后类似工程中进一步研究和检验。

参 考 文 献

- 1 王洪炎, 楼叔英. 二滩水电站的地下工程. 见“隧道与地下工程国际学术报告会”论文集, 成都: 1990
- 2 李杰, 程志华等. 二滩水电站地下厂房设计. 水力发电, 1997 (8): 31~ 34
- 3 黄仁福, 吴铭江. 地下洞室原位观测. 北京: 水利电力出版社, 1990. 134~ 149
- 4 JTJ042- 94 公路隧道施工技术规范. 北京: 人民交通出版社, 1995. 190~ 196
- 5 段振西. 地下岩石工程锚固技术——论变形量与支护的关系. 见: 中国岩土锚固工程协会主编. 岩土工程中的锚固技术. 北京: 地震出版社, 1992. 145~ 150

量、单位及名词术语字母大写体规则

1. 来源于人名的计量单位符号的首字母;
2. 化学元素符号的首字母;
3. 量纲符号;
4. 等于、大于 10^6 的 SI 词头符号;
5. 科技名词术语外文缩写;
6. 外国人姓名首字母;
7. 国家组织、机关、报刊、会议名称首字母;
8. 地质时代及地层单位首字母。