

讲 座

气体炮及其常规测试技术(一)

王金贵

(西南流体物理研究所)

绪 言

随着自由飞行器的发展,常规火炮很久以前就变成了一种试验装置,即用于提供高速度弹丸。就一般火炮而言,它仅能提供 $2 \sim 3 \text{ km/s}$ 的高速度弹丸,这个速度上限是由于火药气体分子量太大造成的。如果使用氢气或氦气,由于它们的分子量小,就能得到较高的弹丸速度。

基于这种思想,1946年美国人研制了第一门利用轻质气体作发射气体的炮。以后,以轻质气体为工作介质的各种类型轻气炮装置相继问世。目前这种设备已经发展到可以产生高达 11 km/s 速度弹丸的试验装置^[1]。

气体炮最初是用于飞行物理学研究的。随着材料科学的发展和新型高分辨率测试技术的出现,人们又把气体炮作为高速碰撞下材料动态响应研究的重要设备。特别是60年代以来,美国、英国、加拿大等国相继建造了各种口径的气体炮。1966年美国人利用二级轻气炮进行了状态方程研究^[2]。从此,气体炮又作为材料科学的重要研究手段出现在各国实验室中。我国自60年代以后也建造了各种用途的气体炮。到目前为止,国外已有多部关于气体炮的专著发表^[3,4]。

本文仅就气体炮的工作原理、结构方式、常规弹丸姿态测量等问题作一简单介绍。更深入的了解可参看有关文献^[1,3,4,5]。

一、气炮的优点

冲击压缩技术可以在物质中产生高达几百吉帕的高压。这种技术已广泛地用于确定动载荷下各种材料的动态响应。最初,超高压是利用炸药爆轰或爆轰推动飞片的高速碰撞获得的。但是,利用炸药平面波发生器产生的平面性最好的爆轰波,其波形差也在 30 ns 左右。而利用气体炮弹丸碰撞的平面波波形差仅为几个纳秒。同时,平头弹丸击靶时两者的夹角对于一级炮约为 0.03° ,对于二级炮约为 0.5° ,所以,气炮推动弹丸产生的碰撞具有极好的平面性和很小的碰撞不平行度。换句话说,气炮推动弹丸产生的碰撞具有很好的一维平面性。

炸药爆轰推动飞片时,爆轰波传入飞片后将产生几十吉帕的冲击波,冲击波从自由面反射后,飞片又要受到强烈的稀疏作用,此时飞片内将有一定的遗留温升。因而飞片中的热力学状态将与其初始状态有所不同。相反,推动气炮弹丸的压力对于一级炮约为百分之几个吉帕,对于二级炮约为十分之几个吉帕,弹丸只是由于在炮管内的加速时间长(约毫秒量级)而获得高速度的。因而弹丸前表面的飞片不会产生明显的遗留温升,飞片在击靶时可以严格地保持其初始状态,从而便于实现对称碰撞。

在化爆实验中,调整飞片速度和控制碰撞速度的重复性都是较为困难的;对于气炮则较为容易。对于气炮只要改变装填参数,就可以连续地调整弹丸速度,在不改变装填参数时,弹丸速度的重复性可达 $2\% \sim 3\%$ 。

此外,化爆实验一般都在场外进行,测试电缆要经过较长的地下通道接到测试间,电缆不可能很短,所以在记录仪器上得到的电信号不可避免地要引起波形的严重失真。天然时,由于地面受热引起的气体抖动也会严重地影响光学测试的信号质量。气体炮是实验室内的实验设备,工作环境良好,且弹丸是在足够强度的真空靶室内完成与靶的碰撞的,仪器和样品之间的电缆可以短到3—5米左右,大大提高了电测信号波形的保真度。对于光学测量,也不存在大气抖动的干扰问题。

最后要指出一点,气体炮的口径,特别是二级炮的口径都很小,样品不能做得很厚,冲击波信号的测量时间都比较短,因此无论是电子学测量还是光学测量,仪器的时间分辨率都要很高才能用于气体炮实验。在现代精密仪器迅速发展的条件下,高分辨率的仪器不断问世,所以这个问题也是不难解决的。

二、一级气体炮的工作原理

典型的一级气体炮结构如图1所示。它由炮主体、支架、靶室和高压气体加注系统、抽真空系统组成。

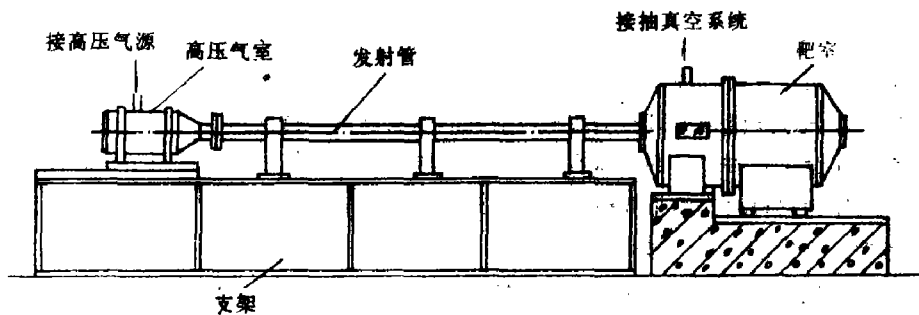


图1 一级炮结构简图

炮主体是整个设备的核心部分。它由储气室、压力释放机构和发射管组成。整个系统装弹后,由抽真空系统对储气室、发射管和靶室抽真空。然后将高压气体注入储气室。在发射弹丸时,将释放机构打开,高压气体立即推动弹丸沿发射管完成加速过程,并在靶室内完成碰撞实验。实测信号由靶室壁上的电缆过渡盘通过靶室外的电缆传输到记录仪器上。

在炮的主体部分,各种炮的发射管和储气室在结构上没有什么不同,唯有压力释放机构具有各种结构形式。

假定不考虑弹丸和发射管之间的摩擦,由牛顿运动方程所表示的弹丸运动方程式如下

$$\frac{dU_s}{dt} = \frac{dU_s}{dX_s} \cdot \frac{dX_s}{dt} = \frac{dU_s}{dX_s} \cdot U_s = \frac{P_s A_s}{m_s}$$

可得

$$U_s dU_s = \frac{P_s A_s}{m_s} dX_s$$

则

$$U_s = \left(\frac{2A_s}{m_s} \int_0^{L_s} P_s dX_s \right)^{1/2}$$

式中 A_s 、 m_s 、 t 、 L_s 、 P_s 、 U_s 分别为发射管截面积,弹丸质量,时间,发射管长度,弹丸受到的驱动压力和弹丸速度。为了简化,假定弹丸在整个发射过程中用不变的弹底压力 P_s 代替,则上式可改写为

$$U_s = \left(\frac{2 A_s \bar{P}_s L_s}{m_s} \right)^{1/2}$$

对于圆柱体弹丸，用无量纲的炮管长度和弹丸长度来表达，上式又可写成

$$U_s = \left(\frac{2 \bar{P}_s}{\rho_s} \frac{L_s/D_s}{l_s/D_s} \right)^{1/2}$$

式中 ρ_s 是弹丸的密度。由此看出，为了获得最大的弹丸速度，应使 \bar{P}_s 和 L_s/D_s 增大，使 ρ_s 和 l_s/D_s 减小。对于给定口径的炮管来说，增加炮管长度 L_s 就能使弹丸速度增加。但是， L_s 长度受实验室面积等条件限制，而且 L_s 增加到一定值以后，弹丸速度的增加并不明显。

上面的讨论是粗浅的，预估一级炮弹丸速度的计算方法目前已经很成熟^[3]，一般约为10%左右的误差。这样的误差无论是对于实验弹速的预报，还是用于指导炮的调试工作都是令人满意的。

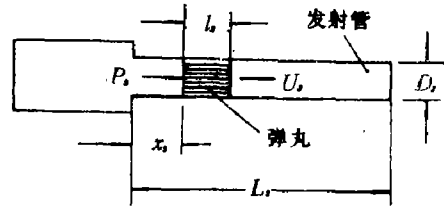


图2 一级炮各参数的图注

三、一级炮的压力释放机构

一级炮本身结构很简单，其中最使设计者感兴趣的部位是压力释放机构，或称阀门。一级炮按释放机构又可分为活塞式，双破膜式和包绕式。

1. 活塞式释放机构

活塞式释放机构的工作原理如图3所示。弹丸及样品安装完毕并抽完真空以后，高压气体自A

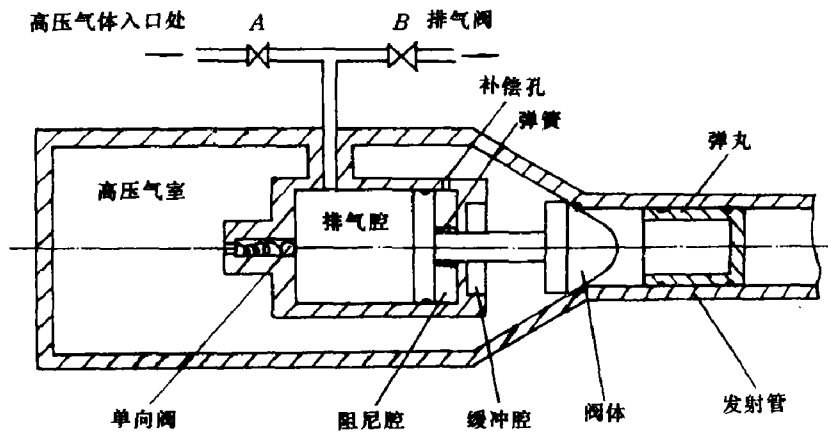


图3 活塞式释放机构

阀进入排气腔。排气腔内的压力不断上升，使得阀体向右移动压紧在发射管的入口上。同时，由于压力上升使单向阀打开，高压气体就这样经过单向阀注入到高压气室。加压完毕后关闭A阀。释放动作是由B阀的快速打开而开始的。B阀打开后，排气腔内的高压气体迅速排出（高压气室内的气体因单向阀关闭不能从排气腔排出）。阀体的活塞左端压力迅速下降，右端的压力由于得到补偿孔进入的高压气体补充，两端在短时间内形成巨大的压差，此压差推动阀体迅速向左运动。阀体离开发射管入口时，高压气室内的高压气体立即进入发射管，并推动弹丸沿发射管运动。在阀体的左端进入缓冲腔时，由于缓冲腔内的气体受到压缩，阻止了阀体对释放机构的直接冲撞。

林俊德^[9]对上述阀体作了很多工作,他们设计的阀体部件可适应20m/s—1400m/s的发射。最快开启时间为2ms。

活塞式释放机构在使用时是很方便的。阀体部件是非消耗性的永久部件。每次发射没有额外的材料消耗。发射频率很高,可以说炮本身不需要多少现场安装工作就可以充气发射。这是一种很好用的释放机构。

2. 双破膜式释放机构

该结构的工作原理如图4所示。高压气室预充压为 P_0 。首先将排气室充以 $P_0/2$ 压力,然后再

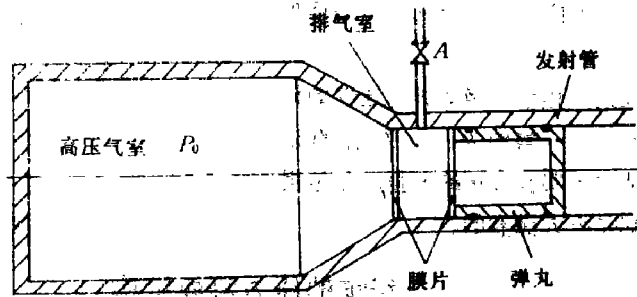


图4 双破膜式释放机构

将高压气室充到 P_0 压力。两个膜片的强度大约分别可承受 $3P_0/4$,此时膜片不致破裂。释放是由于迅速打开A阀排掉排气室内压力而完成的。由于排气室突然排气,其压力迅速下降,左端的膜片强度不能承受 P_0 压力而立即破裂,高压气室的气体进入排气室后又使右端膜片破裂。此时高压气体进入发射管推动弹丸作高速运动。

这种释放机构释放的瞬时性较好,常在大口径的炮上使用,但是其结构和安装工作比较复杂。为了与高压气室的充气压力 P_0 匹配,必须用实验方法确定多种强度规格的膜片。每次实验必须消耗两个加工精致的膜片。从直观上看,弹丸速度的连续可调性也不如活塞式。发射前炮本身的复杂安装密封工作也限制了它的发射频率。

从弹速的计算工作来看,这种结构提供的气体流动模型是最简单的,是近似性最好的一维流动,且气体流动过程中设有其它复杂几何形状物体的阻挡,因此在激波管中大都采用这种释放机构。

3. 包绕式释放机构

该机构的工作原理见图5。首先将弹丸定位在泄压孔的合适位置上,利用它的两个密封圈封住

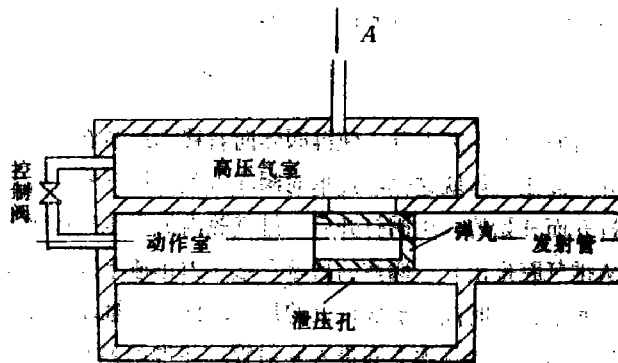


图5 包绕式释放机构

泄压孔, 然后将弹丸两端同时抽真空, 在此期间弹丸位置不能移动。高压气体自A进入高压气室, 它从各个径向方向上加压在弹丸上。此时由于两个密封圈的作用不能使高压气体作用到弹丸的轴向上。发射时打开控制阀, 一部分高压气体进入动作室, 使弹丸轴向受压并向右移动。当弹丸左端密封圈向右越过泄压孔时, 高压气室内的高压气体直接从泄压孔作用到弹丸轴向上, 使其沿发射管作高速运动。

这种释放机构, 由于把弹丸作为一个密封件, 所以弹丸的材料必须能完成密封作用并能承受气体的径向压力。阀门的开启速度取决于弹丸最初的起动的速度。用这种机构每次发射时没有额外的消耗件, 安装工作也很简单。但是, 由于结构上的原因, 既限制了弹丸材料的选择, 又限制了弹丸的最小长度, 从而又最终地限定了弹丸的最小重量。前两种压力释放机构没有这些限制。

四、二级炮的工作原理

在一级炮的弹丸加速过程中, 高压气室的容积不断增加, 故作用在弹底的驱动气压也不断下降, 所以弹丸难以达到更高的速度。为了解决提高弹丸速度的问题, 人们又发展了二级轻气炮装置。

二级轻气炮有两个气室(见图6)。第一级里的储能气体推动活塞压缩第二级里的轻气, 第二级里的轻气再加速弹丸。通常用火炮的火药气体作为第一级的推进气体, 也就是说把固体火药点火后, 二级轻气炮就开始工作了。当火药气体产生的压力超过某一压力值时, 膜片I破裂, 大质量的

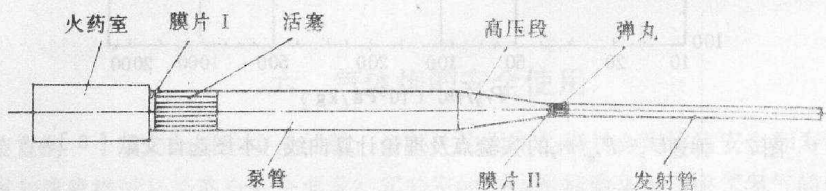


图6 二级轻气炮结构简图

活塞以较低的平稳的速度压缩泵管内预先充入的轻质气体, 使其压力和温度不断上升。当泵管内膜片II左端压力达到某预定值时, 该膜片破裂, 就开始驱动弹丸运动。在弹丸以高速运动过程中, 活塞仍然不断地向轻质气体传递能量, 使得作用到弹底的压力保持平稳不变, 并使弹丸以近似匀加速度在发射管内被加速到高速。最后, 活塞被高强度的高压段耗尽最后的能量, 停止在高压段内。从上面的发射过程可以看出, 在弹丸运动的一段时间里, 对弹底的加压过程是一直平稳地持续着的。

为了使弹丸飞行时不致被弹底压力破坏, 必须使加到弹丸上的压力不超过弹丸材料的强度极限。同时, 若使弹丸获得高速度, 既要求有较高的平稳弹底压力, 又要求作用时间尽可能长。所以, 二级轻气炮的活塞运动速度都较低, 运动路程很长, 以使泵管内的气体不致产生强冲击波而导致弹丸的破坏。可见, 对二级轻气炮泵管内的轻气, 在其压缩过程中必须是相当平滑上升的压力曲线, 这一点是非常重要的(还有一种利用高速活塞在轻气体中产生强冲击波实现气体压缩的二级轻气炮, 它称为二级冲击波压缩轻气炮^[1], 在此不作介绍)。

利用低速运动的重活塞沿较长的泵管对轻气体压缩问题, 实质上就是实现对轻气的等熵压缩问题。实现等熵压缩的一个重要好处是作用在弹丸底部上的峰值压力较低, 而且压力的变化很慢。

就结构而言, 图6所示二级轻气炮是目前最为典型的形式。压力释放时间都由两个膜片的强度调整。强度好尺寸大的高压段, 是连接泵管和发射管的核心部件。活塞进入高压段后开始变形, 由

锥形壁的摩擦和气体压力的上升而产生的阻滞力,使其不断减速直至停止运动。锥形高压段提供的缓冲作用使二级轻气炮的寿命大大延长,成为可以长期重复使用的实验设备。并且,锥形高压段还为进入发射管的气体提供了平滑流动的过渡区。

二级轻气炮各部件承受的压力远大于一级轻气炮,所以各部件的强度和材料比一级炮的要求高得多,其造价比一级炮也贵得多。

五、气体炮的调试

气体炮在设计,制造和安装以后,就进入到实际发射的调试阶段。对于一级炮,可以把工作气体种类看成是一个参数,以气体的充填压力 p_0 与弹丸质量 m_s 的比值 P_{r_0}/m_s 作为无量纲自变量,实验测出的弹速 $U_s \sim P_{r_0}/m_s$ 曲线如图7所示。这条曲线随着实验点的不断补充,精度会越来越高。一级

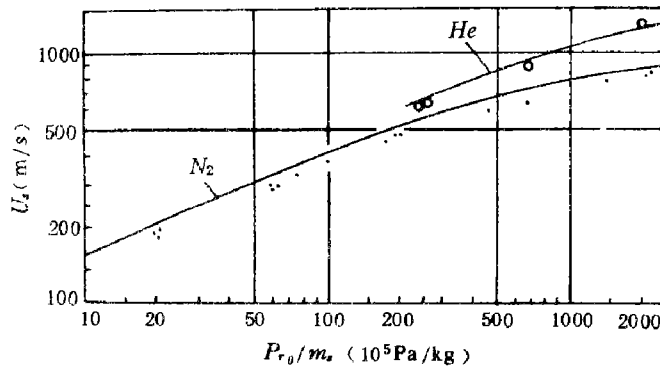


图7 弹速 $U_s \sim P_{r_0}/m_s$ 的实验点及理论计算曲线(本图选自文献[6])

炮的实验调试工作是比较容易完成的。低速段和高速段在整个调试过程中要花费较多的时间和精力。

二级炮的实验调试要复杂的多,理论计算的指导作用很强,正式发射实验前的实验工作量也很大。同时,二级炮的工作压力高,弹丸速度大,调试阶段必须充分讨论,以免损坏部件。二级炮安装以后,各部分几何尺寸已经确定,这时可以调节的参数有以下五个:1.初始充气压力 p_0 ;2.活塞速度 u_p ;3.膜片破裂压力 p_e ;4.活塞质量 m_p ;5.弹丸质量 m_s 。

人们所希望的最佳条件组合,是使弹丸底部的压力小,而且弹底压力平稳,高压段内压力要控制在轻气炮强度的允许范围之内。全面地研究上述各参量对炮性能的影响要花费许多人力,物力和时间。实验时首先从低参数状态开始发射,将监测的数据和计算值比较。目前可以在泵管的若干点上监测气体压力,也可以监测活塞和弹丸的速度过程,还可以由实验确定膜片的破裂压力。但是我们最为关心的高压段内压力分布情况是很难进行监测的。理论计算表明,此处最大压力可达到几吉帕量级的水平。在把监测数据和计算结果比较后,可以用于修正计算程序,使计算值逐步符合每次实验的监测值,此时也就逐步提高了高压段内压力分布计算的精度。文献^[1]中在计算和实验的基础上,对各参量进行了深入的研究。本文因篇幅所限,不能详细介绍。

二级轻气炮的最终调试目标也是得到如图7所示的一系列曲线。不过,横坐标表示的是火药质量。调试参数是上述五个参数。这样,在弹速~火药质量平面上就围成了一个安全发射区域。然而经过理论和实验的深入研究以后,1,3,4这三个参量最多可按速度范围划分为两种档次,即在低速段和高速段分别将这三个参数取为两组固定值,只以弹丸质量为参数,以火药质量为自变量(活塞速度不是最终使用量),得出弹丸速度和火药质量的变化曲线,如图8所示。

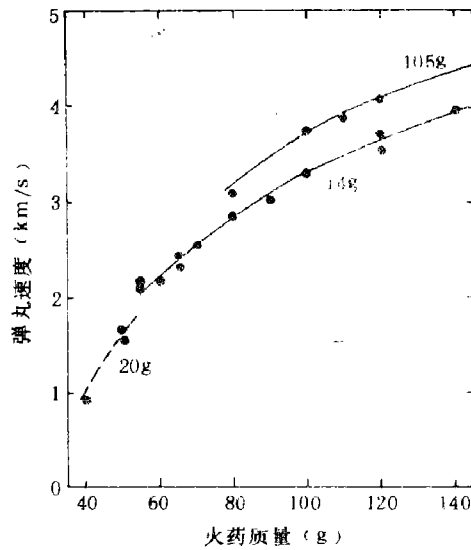


图8 弹丸速度和火药质量的关系曲线 (此图选自文献[7])

为了考核计算结果和保证炮的安全发射, 要将每次发射实验时所取的各项数值对炮性能的影响一一描绘在各个坐标系里。实验次数越多, 积累的资料就越多, 对炮的总体性能和安全性也就有更详细的了解。

六、气体炮的安全使用

气体炮装置的一个重要问题是安全问题。各部件的强度是否符合炮体的安全和寿命要求? 使用氢气时的密封和排放措施是否符合安全要求? 实验室的整体布局中是否考虑了氢气的储存、输送和泄漏报警措施? 火药的储存、装药以及搬运路线是否合适? 等等。对炮身所用材质要首先进行严格检验, 然后才能进行机械加工。在正式投入使用时, 要建立严格的操作程序, 对操作人员预先进行培训。发射以后要严格按照排放程序排放, 在确认炮体内已无氢气后方可拆开擦拭。经过认真擦拭后还要仔细检查炮的各部件磨损情况, 特别是发射管的磨损情况, 如有损坏只能在修复以后才能继续实验。

参 考 文 献

- [1] Berggren, R. E., Reynolds R. M., AD-713915
- [2] Jones, A. H. et al., *J. Appl. Phys.* 37 (1966), 3193.
- [3] Seigel, A. E., AD-475660 (1965).
- [4] Lezard, Jean-Michel, CEA-R-4762.
- [5] Mitchell, A. C., Nellis, W. J., *Rev. Sci. Instr.* 52 (3) (1981), 347.
- [6] 林俊德, 爆炸与冲击, 5 (3) (1985)。
- [7] Yasuhiko Syono, Tsuneaki Goto, (Sci. Rep.), *Res. Inst. Tohoku Univ.*, 29 (1) (1980), 17

GAS GUN AND ITS ORDINARY MEASURING TECHNIQUES (I)

Wang Jingui

(South-west Institute of Fluid Physics)

《爆炸与冲击》征稿启事

一、本刊为中国力学学会主办的学术刊物，现按季刊定期出版。本刊主要宗旨是反映爆炸力学学科领域内国内外科研成果、学术水平，促进学术交流，发现从事本学科领域内中青年科技人才，以推进我国爆炸力学学科的发展。

二、本刊征稿内容包括：爆轰、燃烧、冲击波、爆炸驱动、高速碰撞现象、动高压技术、材料动态性能研究，爆炸加工、工程爆破，抗爆结构与设计、激光与粒子束高能密度动力学、计算方法和实验测试技术，爆炸器材及爆炸安全技术等。

三、征稿要求：

1) 论点明确、数据可靠、情况真实、文字简练易懂。每篇论文（包括图表、公式、表格和文献）不得超过八千字，简报不得超过五千字（包括图表所占篇幅）。来稿用方格稿纸缮写清楚，外文字母一律采用现行的书写小楷。

2) 本刊一律使用我国法定计量单位。

3) 插图宜小，要用绘图纸墨汁描制，图线清晰而细，图中文字用铅笔书写，照片要黑白对比清晰、便于制版。

4) 参考文献不宜过多，尚未正式公开发表的资料，请用私人通讯发表，注明年月。参考文献书写格式如下：

a、特刊：作者姓、名（中文姓名连写），特刊号（年份）。

b、期刊：作者姓、名，期刊名，卷（期）（年份），页。

c、书（或会议文集）：作者姓、名，书名（或会议论文集名），出版社（出版地名）（年份），页。

5) 不要一稿两投，来稿如在某会议上宣读过，请予注明。

6) 来稿请一律附上不超过300字的中、外文摘要，并写出作者工作单位和标引3~5个中英文关键词。作者姓名按汉语拼音方案拼写。

7) 来稿应注明真实姓名和详细通信地址，如作者用笔名发表亦请另加说明。

8) 稿件自收到日期起，编辑部将于一年内将处理结果通知作者，若超过一年未给答复的，作者有权另行处理。

四、来稿由编辑部组织审定，刊登与否由编辑部确定。对采用的稿件，编辑有权作必要的删减或修改。来稿一经发表，即付稿酬，并赠送登载来文之期刊一份，论文加送抽印本20份。不刊登的稿件，一般不予退回。

五、来稿请寄“四川成都523信箱12号编辑部”。

六、本刊系公开发行的学术刊物，文中如有涉及国家机密及违反所在单位保密制度的，均由作者本人负责。