



第一节 概 述

一、启动过程安全经济性

锅炉启停过程是一个极其复杂的不稳定的传热、流动过程。启动过程中，锅炉工质温度及各部件温度随时变化，由于受热不一致，且部件不同部位温度不同，因而产生热应力，甚至使部件损坏。一般说来，部件越厚，在单侧受热时的内、外壁温差越大，热应力也越大。汽包（分离器）、过热器联箱、蒸汽管道和阀门等的壁厚均较大，所以在受热过程中必须妥善控制，尤其是汽包。

启动初期受热面内部工质的流动尚不正常，工质对受热面金属的冲刷和冷却作用是很差的，有的受热面内甚至在短时间内根本无工质流过。如这时受热过强，金属壁温可能超过许用温度。锅炉的水冷壁、过热器、再热器及省煤器均有可能超温。因此，启动初期的燃烧过程应谨慎进行。

炉膛爆燃也是启动过程中容易发生的事故，锅炉启动之初，燃料量少、炉温低、燃烧不易控制，可能会由于燃烧不稳而导致灭火，一旦发生爆燃，将使设备受到严重损害。

启动过程中所用燃料，除用于加热工质和部件外，还有一部分耗于排汽和放水，既造成热损失，也有工质损失。在低负荷燃烧阶段，过量空气和燃烧损失也较大，锅炉的运行效率要比正常运行时低得多。

总之，在锅炉启动中，既有安全问题也有经济问题，二者经常是矛盾的。例如，为保证受热面的安全，减小热应力，启动过程应尽可能较慢地升温升压，燃料量的增加也只能缓慢进行。但是，这样一来势必延长启动时间，使锅炉在启动过程中消耗更多的燃料，降低了经济性。锅炉启动的原则是在保证设备安全的前提下，尽可能缩短启动时间、减少启动燃料消耗量，并使机组尽早承担负荷。

二、单元机组的滑参数启停

国内单元机组均采用锅炉与汽轮发电机组联合滑参数方式启动和停运。滑参数启动的要点是：锅炉与汽轮发电机组同时进行启动，随着锅炉点火、升压和升温，汽轮发电机组进行冲转、升速、并网及带负荷，待锅炉达到额定参数时，汽轮发电机组达到额定功率。

采用滑参数启动，机组能充分利用低压、低温蒸汽均匀加热汽轮机的转子和汽缸，减少了热应力和启动损失，锅炉过热器、再热器的冷却条件亦得到改善。由于锅炉与汽轮发电机组同时启动，缩短了整机启动时间，不仅减少启动能耗量，也可使机组提前发电，增强了机动性。

压力法滑参数启动是最为普遍的滑参数启动方式，它是指待锅炉产生的蒸汽具有一定

的压力和温度后才冲转汽轮机。该方法是在锅炉点火后一段时间内汽轮机主汽阀关闭，调速汽阀全开，锅炉送出的蒸汽通过高、低压旁路进入凝汽器，由旁路阀控制流量。待蒸汽达冲转参数（汽压、汽温）时冲转汽轮机，在汽轮机冲转、升速、暖机、并网过程中，维持蒸汽参数基本不变，多余的蒸汽仍通过旁路排入凝汽器。待主汽阀全开、蒸汽全部进入汽轮机时关闭旁路，机组进入滑压运行。

采用压力法滑参数启动 蒸汽冲转动力大、流量大 易于维持冲转参数的稳定 锅炉可在不增加燃料量、不进行过多调整的情况下 提供足够蒸汽量满足冲转、升速迅速跨过临界转速并达到全速的需要 且有一定的裕量。当然 该法在汽轮机冲转以前 蒸汽全部排入凝汽器 损失较大。

压力法滑参数的冲转参数与机组容量和启动状态有关。我国火电机组的冷态启动冲转参数如下：200MW 及以下机组，多采用低参数冲转，冲转压力为 $0.8 \sim 1.5\text{MPa}$ ，冲转温度为 $200 \sim 250^\circ\text{C}$ ；300MW、600MW 机组，采用中参数冲转，冲转压力为 $5 \sim 8\text{MPa}$ ，冲转温度为 $330 \sim 360^\circ\text{C}$ 。热态启动时，冲转参数由启动前汽轮机高压内缸的金属温度确定。

三、冲转进汽方式

压力法滑参数启动，按照冲动转子时的进汽方式分为高中压缸联合启动和中压缸启动两种方法。高中压缸联合启动是指汽轮机冲转时，蒸汽同时进入高压缸和中压缸冲动转子，是我国目前使用较多的一种；中压缸启动是指在汽轮机启动时，高压缸不进汽，而用压力较低的再热蒸汽从中压缸进汽冲动转子，待并网后才逐渐向高压缸进汽。

采用中压缸启动，在冲转及低负荷运行期间切断高压缸进汽以增加中低压缸的进汽量，有利于中压缸的均匀和较快加热、减小热应力和汽轮机胀差，同时也可以提高再热器压力和流量，有利于启动初期迅速提升再热汽温，但汽轮机系统较复杂。

四、启动状态的划分

按照机组在启动时的状态，锅炉启动分为冷态启动和热态启动。冷态启动是指锅炉在没有压力，且其温度与环境温度接近情况下的启动，通常是新锅炉、锅炉经过检修或较长时间的备用后的启动。热态启动是指锅炉在保持有一定压力，且温度高于环境温度下的启动，根据机组停运时间的不同，大型锅炉又进一步将热态启动划分为温态启动、热态启动和极热态启动三种。具体划分是依据汽轮机在启动时的温度水平进行的。国内外各制造厂所取的温度界限不尽相同，下面是 GEC-ALSTHOM 公司的一种划分方法：以汽轮机高压内缸第一级金属温度的高低为依据，该温度在 $190 \sim 300^\circ\text{C}$ 之间，为温态启动；在 $300 \sim 430^\circ\text{C}$ 之间，为热态启动； 430°C 以上为极热态启动。国外机组也有按停炉时间来大体代表启动初金属温度状态的，如德国的 BABCOCK-2200 型锅炉，机组停用 48h 后的启动为温态，停用 8h 后的启动为热态，停用 2h 后的启动为极热态。

了解启动状态的划分有助于掌握好机组各种状态下的启动特点。比如冷态启动时，机组温度水平低，为使其均匀加热，不至于产生较大的热应力，锅炉升温、升压以及升速、升负荷都应缓慢进行。而热态、极热态启动时，机组各部件处于较高的温度状态，为不使高温部件受到蒸汽冷却，就必须尽快使工作参数达到机组部件的温度水平，此时锅炉进

水、燃烧率控制、升速、升负荷都应明显加快，冲转参数也较高。

第二节 锅炉启停一般程序

一、汽包锅炉启动

(一) 启动系统

启动系统的主要功能是在机组启动、停止和事故情况下，平衡锅炉与汽轮机之间的蒸汽流量，从而与锅炉调节燃烧相配合，起到调节和保护的作用。汽包锅炉的启动系统有锅炉本体汽水系统和疏水系统、过热器旁路系统、汽轮机旁路系统三种型式。图 1-1 为自然循环汽包锅炉典型汽水系统与疏放水系统。

控制循环汽包锅炉的汽水、疏放水系统，除在下降管装置锅水循环泵之外，其余与自然循环汽包锅炉相同。

过热器旁路系统是在垂直烟道包覆过热器下环形集箱接出一根管路至凝汽器，并在管路上装设控制阀构成（见图 1-1 中的过热器旁路）。其设计流量通常为锅炉最大连续负荷的 5%，亦称 5%旁路。我国引进的美国 CE 机组、英国 BEL 机组多采用这种系统。

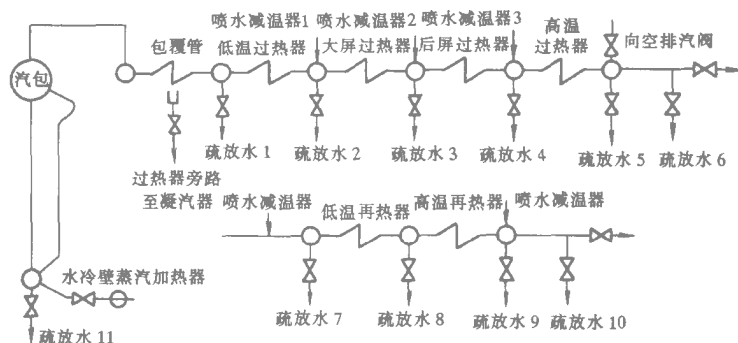


图 1-1 自然循环汽包锅炉典型汽水系统与疏放水系统

过热器旁路系统作为锅炉的旁路，启动时通过改变过热器出口的流量来控制汽压、汽温，满足提高运行灵活性、缩短启动时间的要求。

汽轮机旁路系统如图 1-2 所示。图 1-2(a) 所示为一级大旁路系统。过热器出口蒸汽通过旁路管道经减温减压后，直接排入凝汽器。它的优点是系统简单、运行控制方便、投资也低。若大旁路设计容量达到 100% BMCR，同时装置快速启动的减温减压器，则可取代过热器出口安全阀。一级大旁路的两个主要问题：一是在滑参数启动尤其是热态启动时，再热汽温达到要求值比较困难，这是因为在大旁路情况下，进入再热器入口的只能是汽温较低的高压缸排汽；另一个问题是在机组启停、甩负荷等情况下，再热器内无工质流过，再热器处于干烧状态，故冲转前必须控制燃烧率，以限制炉膛出口烟温，这样势必减缓升温升压速度，延长启动时间。尤其热态启动，要求较快提升参数，一级大旁路不太适应。

图 1-2(b)所示为二级旁路系统。该系统由高压旁路 1(又称Ⅰ级旁路)和低压旁路 2(又称Ⅱ

级旁路)以及相应的旁路阀门所组成。Ⅰ级旁路对汽轮机的高压缸进行旁路,Ⅱ级旁路对汽轮机的中低压缸进行旁路。汽轮机冲转前,蒸汽经Ⅰ级旁路、再热器、Ⅱ级旁路进入凝汽器。这种系统,既可在启动中调节进入汽轮机的蒸汽参数和蒸汽流量,又可保护再热器。如锅炉冷态或热态滑参数启动时,要求主汽温度和再热汽温必须高于相应进汽汽缸的金属温度,并有一定的过热度,为了满足此要求锅炉就必须保持一定的燃料量,此时通过开启Ⅰ级旁路提高再热汽温和冷却再热器。该系统是目前国内、外大型发电机组采用最普遍的一种系统。

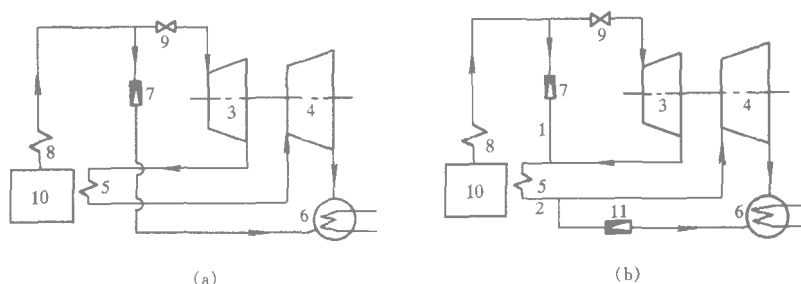


图 1-2 汽轮机旁路系统

(a) 一级大旁路系统; (b) 二级旁路系统

1—高压旁路; 2—低压旁路; 3—汽轮机高压缸; 4—汽轮机中低压缸; 5—再热器; 6—凝汽器;

7—高压旁路减温减压阀; 8—过热器; 9—主蒸汽门; 10—锅炉; 11—低压旁路减温减压阀

(二) 汽包锅炉冷态启动程序

自然循环汽包锅炉的冷态启动包括启动准备、锅炉点火、升温升压、汽轮机冲转升速、并网及带初负荷、机组升负荷至额定值等几个阶段。

1. 启动前准备

启动准备阶段应对锅炉各系统和设备进行全面检查,并使之处于启动状态;为确保启动过程中的设备安全,所有监测仪表、连锁保护装置(主要是 MFT 功能、重要辅机连锁跳闸条件)及控制系统(主要包括 FSSS 系统和 CCS 系统)均经过检查、试验,并全部投入;锅炉上水完成,水位正常;投用水冷壁下联箱蒸汽加热系统直至汽包起压;上水与加热阶段注意监视汽包上、下壁温差;启动回转式空气预热器、投入暖风器或热风再循环以保护空气预热器;开启引、送风机完成炉膛吹扫程序,防止点火爆燃;原煤仓、粉仓已准备好足够煤量;调整炉膛负压,准备点火。

2. 锅炉点火、升温升压

锅炉点火首先点燃油燃烧器(油枪),炉温提升后点燃煤粉燃烧器。油枪的点燃从最下排开始,点火前须将燃油和蒸汽的压力、温度调至规定值。点火后注意风量的调节和油枪的雾化情况。逐渐投入更多油枪,建立初投燃料量(汽轮机冲转前所投燃料量)。点火后即开启各级受热面的疏放水阀,用于暖管和放尽积水,待积水疏尽后即应及时关闭,以免蒸汽短路影响受热面的冷却。过热器出口疏水兼有排放锅炉工质、抑制升压速度的作用,可推迟关闭。过热器出口疏水门关闭后即投入汽轮机旁路,其开启方式和开度视锅炉升压升温控制的需要而定。点火后的一定时期内,过热器和再热器内无蒸汽流量或流量很少,以监视和控制炉膛出口烟温的方法来保护受热面和控制燃烧率。若为一级大旁路,则

这一控制必须保持到汽轮机进汽之前。点火过程中要注意水冷壁回路的水循环，监视汽包水位和汽包上下、内外壁温差，一旦汽包壁温差超过限值，应立即降低升压速度。锅炉停止给水时应开启省煤器再循环阀，保护省煤器。初投燃料量应保证汽轮机冲转、升速、带初负荷所需要的蒸汽量。通过控制燃烧率和投用受热面旁路、汽轮机旁路等手段来控制锅炉出口过热蒸汽的升压、升温速度并匹配冲转参数。

3. 汽轮机冲转升速、并网及带初负荷

随着燃烧率的增加，当锅炉出口汽压、汽温升至汽轮机要求的冲转参数时，汽轮机冲转、升速、并网、带初负荷暖机。这一阶段锅炉的主要任务是稳定汽压、汽温以满足汽轮机的要求。锅炉除控制燃烧外，主要是利用高、低压旁路，必要时可投入减温手段和过热器疏水阀放汽。汽轮机冲转后，旁路门即逐渐关小，将蒸汽由旁路倒向汽轮机，以满足汽轮机冲转直至带初负荷对蒸汽量的需要，避免燃烧作过多调整。通常在初负荷暖机以后，汽轮机调门开启 90% 时，旁路门完全关闭。

4. 机组升负荷至额定值

机组继续升压升温直至带满负荷。锅炉燃烧主要完成从投粉到断油的过渡。汽轮机带初负荷后，锅炉产汽量已可全部进入汽轮机，炉膛温度和热风温度也已提升到较高数值，易于维持煤粉稳定着火，因此可相机投入制粉系统和煤粉燃烧器，逐渐增加燃料量加快提升负荷。该阶段中，锅炉燃烧调整是按照升负荷速率控制的要求以及升压、升温曲线进行的。但升负荷速率和升温速率受制于汽轮机而不是锅炉。由于是滑参数启动，所以控制升负荷速率（即燃烧率）也就基本上控制了升压、升温过程。这一阶段 锅炉燃烧率、减温水量（或烟气挡板开度）是改变升压、升温过程的基本手段。当负荷达到 60% ~ 70% 时可根据着火情况，逐渐切除油枪。汽温比汽压可能较早地达到额定值，汽压比负荷也可能较早地达到额定值，后者取决于滑参数增负荷时汽轮机调速汽阀的开度。若汽压先于负荷达额定值，则应逐渐开大调速汽阀，锅炉继续增加燃料量，在定压情况下将负荷提升到额定值。

（三）冷态启动曲线

某 660MW 机组的德国 BABCOCK-2208t/h 自然循环锅炉冷态滑参数启动曲线示于图 1-3 由曲线可以看出，冷态启动过程经历时间很长（7h），它大致可分为三个阶段：

第一阶段从点火开始逐渐升温、升压直到冲转。从点火到起压用去 100min。从起压到冲转用去 150min。在升压的初始阶段，升压速度很低，1h 内汽压升高仅为 1.1MPa，此阶段升压率只有 0.018MPa/min，以后逐渐加快，冲转前 1h 内汽压升高为 3.6MPa，升压率为 0.06MPa/min。当压力升到 6.4MPa，主蒸汽、再热蒸汽温度按不变速率升到 350℃、320℃ 时，开始冲转汽轮机。这一阶段，饱和温度的变化率维持 1.3℃/min 左右。

第二阶段是从汽轮机开始冲转到并网（即同步），再继续暖机一段时间。此时高压旁路转为定压控制方式，汽压、汽温维持在稳定值 6.4MPa、350℃/320℃。锅炉燃料量增至 389t/h 后维持不变，汽轮机调门渐渐开大增加进汽，高压旁路调阀开至最大开度的 50% 后逐渐减小、关闭（图中阴影线部分为旁路流量，阴影线以下部分为汽轮机进汽量），机组进行滑压升负荷。这一阶段，汽轮机主要是升速和暖机，需要 1h 左右。但在实际上，根据汽轮机的要求，这一阶段需要的时间可能会长一些。

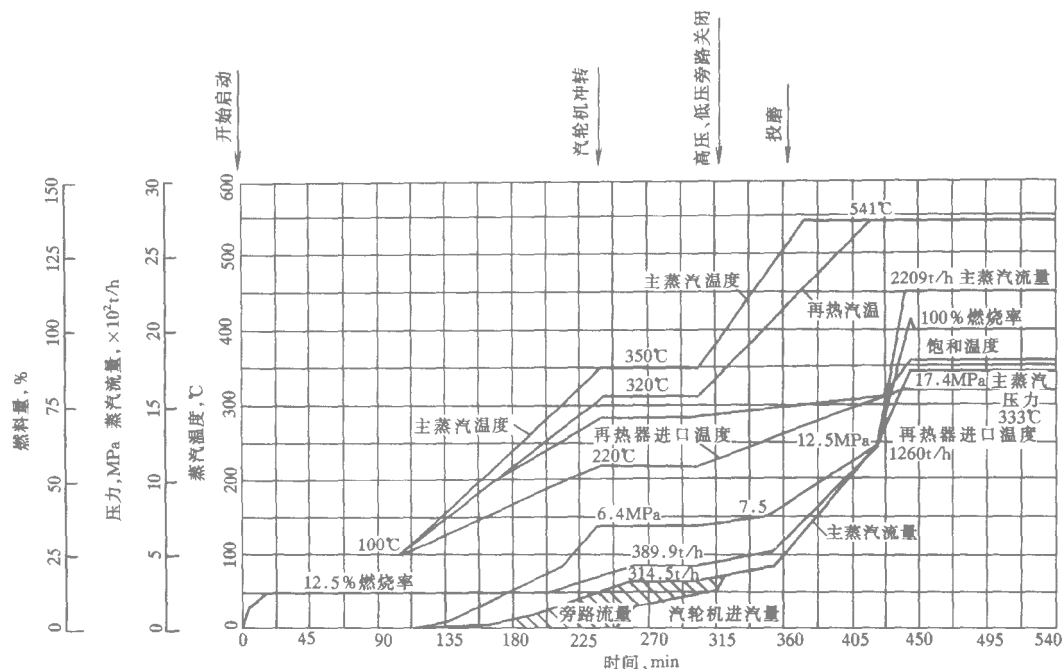


图 1-3 德国 BABCOCK-2208t/h 自然循环锅炉冷态滑参数启动曲线

第三阶段是继续升温升压并增加负荷。汽温比汽压提前达到额定值，汽压与负荷同时达到额定值。这一阶段中，虽然锅炉和汽轮机都要求限制温度变化率，但后者的限制更严，所以在时间要求上起了决定作用。这段时间为 2h，占启动总时间 $1/3 \sim 1/4$ 。

控制循环锅炉的冷态启动，除点火前就投入锅水循环泵，保持着水冷壁良好循环流动外，其余启动过程与自然循环锅炉基本相同。

（四）汽包锅炉热态启动一般程序

锅炉的热态启动过程与冷态启动过程基本相同，但热态启动时锅内存有锅水，只需少量进水调整水位。蒸汽管道与锅内都有余压与余温，升压升温与暖管等在现有的压力温度水平上进行，因而可更快些。锅炉点火后要很快启动旁路系统，以较快的速度调整燃烧，避免因锅炉通风吹扫等原因使汽包压力有较大幅度降低。冲转时的进汽参数要适应汽轮机的金属温度水平；冲转前须先投入制粉系统运行，以满足汽轮机较高冲转参数的要求。冲转时锅炉应达到较高的燃烧率，以保证能使汽轮机负荷及时带至与汽轮机缸温相匹配的水平上，避免因燃烧原因使热态启动的机组在冲转、并网、低负荷运行等工况下运行时间拖延，从而造成汽缸温度的下降。机组极热态启动时必须谨慎，启动过程的关键在于协调好锅炉蒸汽温度和汽轮机的金属温度，尽可能避免负偏差，减少汽轮机寿命损耗。

汽轮机启动前后，要采取一切措施防止疏水进入汽轮机。过热器与再热器的出口联箱，后井下联箱及一、二次蒸汽管道上的疏水阀一直保持开启，再热器紧急喷水门则关闭。上述保持开启的阀门有的在冲转以后，有的则在带初负荷以后才能关闭。在此之前视情况可以关小。并网后，当负荷增加到冷态滑参数启动时汽轮机汽缸壁温所对应的负荷工

况时，可按冷态滑参数启动曲线进行，直到带满负荷。

图 1-4 示出了德国 BABCOCK-2208t/h 锅炉热态和极热态滑参数启动曲线。由图可见，

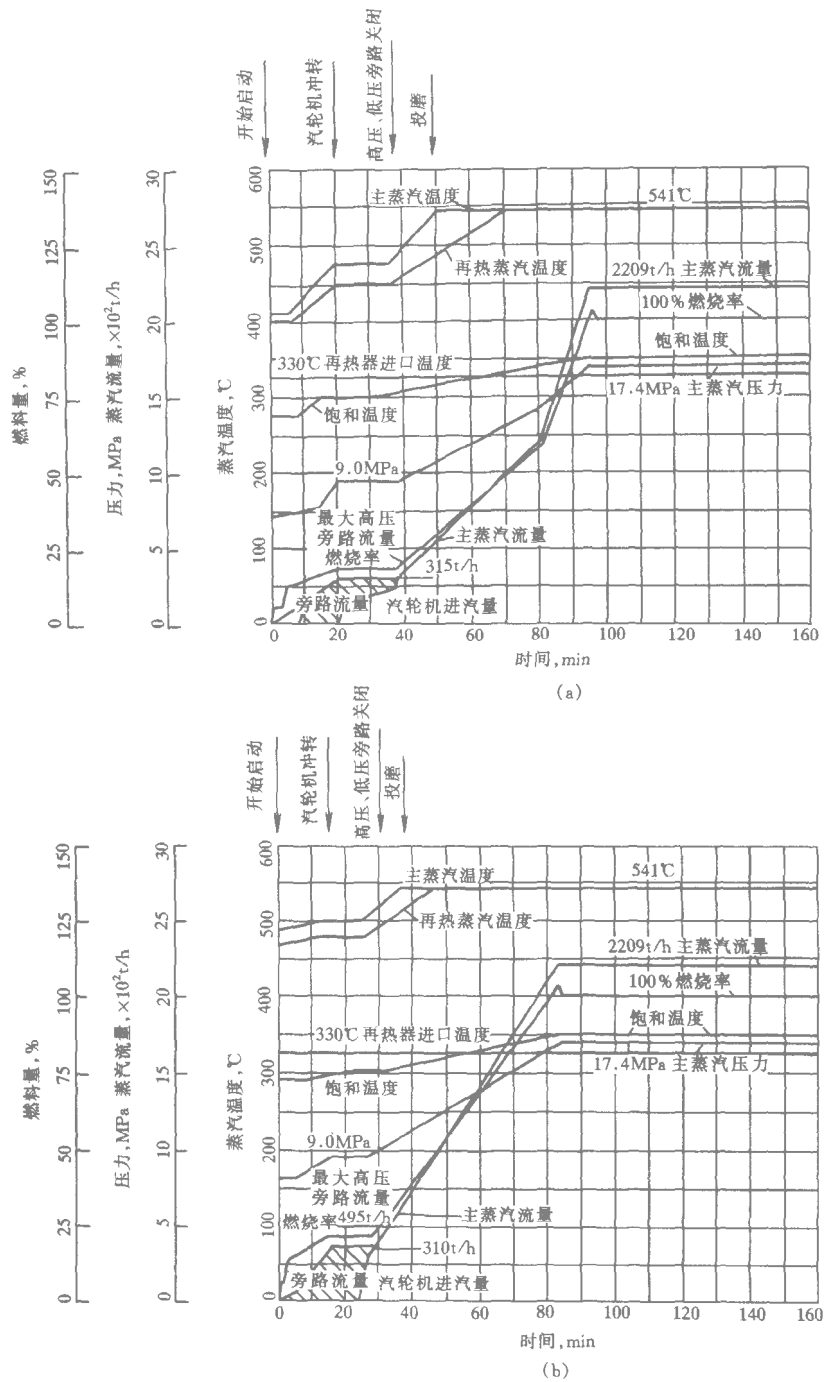


图 1-4 德国 BABCOCK-2208t/h 自然循环锅炉热态和极热态启动曲线

(a) 热态启动；(b) 极热态启动

不同启动状态选定了不同的冲转参数。由于热态启动时锅炉部件温度较高且温升幅度较小，故允许的升压、升温速度比冷态启动快得多，且整个启动时间大为缩短。热态、极热态的启动时间分别为 1.5h 和 1.2h。

二、直流锅炉冷态启动

（一）直流锅炉启动特点

1. 启动前清洗

与汽包锅炉不同，直流锅炉给水中的杂质不能通过排污加以排除，其去向有两个：一部分溶解于过热蒸汽带出锅炉，其余部分则都沉积在锅炉的受热面上。因此直流锅炉除了对给水品质要求严格以外，启动阶段还要进行冷水和热水的清洗，以便确保受热面内部的清洁和传热安全。

2. 启动流量的建立

直流锅炉启动时，由于没有自然循环回路，所以直流锅炉水冷壁冷却的唯一方式是从锅炉开始点火就不断地向锅炉进水，并保持一定的工质流量，以保证受热面良好的冷却。该流量应一直保持到蒸汽达到相应负荷（称启动流量），然后随负荷的增加而增加。启动流量的选择，直接关系到直流锅炉启动过程中的安全经济性。启动流量越大，则工质流过受热面的质量流速越大，这对受热面的冷却、水动力的稳定以及防止汽水分层等都是有利的。但启动流量越大，启动时间越长，启动过程中的工质损失和热量损失都增加；同时，启动旁路系统设计容量也要求增大。相反，如果启动流量过小，则受热面的冷却和水动力的稳定难以得到保证。因此在保证受热面可靠冷却和工质流动稳定的前提下，启动流量应尽可能小一些。超临界直流锅炉的启动流量通常为额定蒸发量的 30% ~ 35%。

3. 启动中的工质膨胀

直流锅炉点火以后，随着炉膛热负荷的增加，水冷壁的工质温度逐渐升高，在不稳定加热过程中，中部某点工质首先汽化，体积突然增大，引起局部压力突然升高，急剧地将后面的工质推向出口，造成锅炉排出量大大超过锅炉给水量，这种现象（称工质膨胀）将持续一段时间，直至出口为湿饱和蒸汽时为止。

直流锅炉的工质膨胀现象对启动时的安全带来不利影响。如膨胀量过大，将使锅炉内的工质压力和启动分离器水位都一时难以控制。影响工质膨胀的因素主要有启动流量、给水温度、燃料的投入速度等。启动流量越大，膨胀量越大；给水温度越低，膨胀到来越迟，膨胀量越小；投入的燃料量大，投燃料速度快，工质先达到沸点的位置在炉膛下辐射区，膨胀点后的存水量就多，总的膨胀量大；同时局部压力升高快，因而瞬时的最大排出量也愈大。

（二）启动系统

直流锅炉的汽轮机旁路系统与汽包锅炉单元机组相同。但锅炉旁路系统则完全是针对直流锅炉的启动特点（主要是建立启动流量、汽水分离和工质膨胀等）而专门设计的。它的关键设备是启动分离器。启动分离器的作用是在启动过程中分离汽水以维持水冷壁启动流量的循环，同时向过热器系统提供蒸汽并回收疏水的热量和工质。

1. 外置式启动系统

按照直流运行时分离器是否退出系统，直流锅炉旁路系统分为外置式和内置式两种。

图 1-5 为 1000t/h 亚临界压力直流锅炉外置式启动旁路系统的示意。这种系统的启动分离器放在低温过热器和高温过热器之间。机组启动时，低温过热器出口门 25、26 关闭，工质经水冷壁、包覆管、低温过热器之后，进入启动分离器，也可以提前经启动调节门 21 进入启动分离器。在分离器中汽、水分离。汽的出路有：去过热器、去再热器、去高压加热器、去除氧器、去凝汽器。水的出路有：去除氧器、去凝汽器、去地沟。水的回收途径与水质指标有关：水含铁量小于 $80\mu\text{g/L}$ 可回收入除氧器水箱，回收热量和工质；水中含铁量大于 $80\mu\text{g/L}$ 回收入凝汽器，回收工质，但热量损失了；水中含铁量大于 $1000\mu\text{g/L}$ 排入地沟不回收。回收入除氧器水箱与回收入凝汽器比，前者水阻力小得多，节省给水泵电耗。

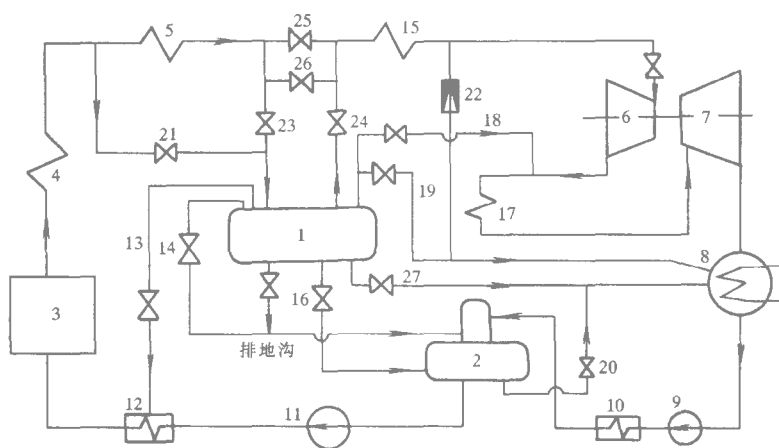


图 1-5 1000t/h 亚临界压力直流锅炉外置式启动旁路系统

1—启动分离器；2—除氧器；3—锅炉；4—水冷壁、顶部过热器、包覆过热器；5—低温过热器；6—汽轮机高压缸；7—汽轮机中低压缸；8—凝汽器；9—凝升泵；10—低压加热器；11—给水泵；12—高压加热器；13—分离器至高压加热器的汽管路；14—分离器至除氧器的汽管路；15—高温过热器；16—分离器至除氧器的水管路；17—再热器；18—分离器至再热器的汽管路；19—分离器至凝汽器的汽管路；20—除氧器至凝汽器的放水门；21—启动调节门；22—大旁路；23—低温过热器出口入分离器的调节门；24—分离器出口入高温过热器的通汽门；25—低温过热器出口门；26—低温过热器出口门的旁路门；27—分离器至凝汽器的水管路

借助分进调节门 21 或 23 的节流，可使启动分离器的压力低于锅炉本体（指分离器之前的受热面）的压力，这样，本体保持高的启动压力有利于水动力稳定并减小工质的膨胀量，而启动分离器内的压力（即输出蒸汽的压力）则可灵活地根据汽轮机进汽参数要求和工质排放能力加以调节。

2. 内置式启动系统

图 1-6 为 1900t/h 超临界压力直流锅炉内置式启动旁路系统的示意。启动分离器布置

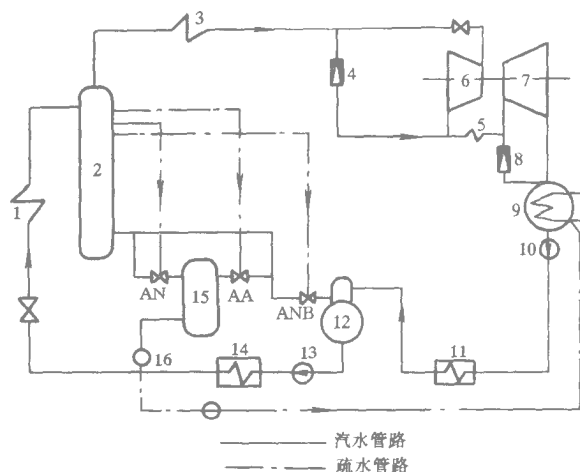


图 1-6 1900t/h 超临界压力直流锅炉内置式启动旁路系统

1—水冷壁；2—启动分离器；3—过热器；4—高压旁路减温减压阀；5—再热器；6—汽轮机高压缸；7—汽轮机中低压缸；8—低压旁路减温减压阀；9—凝汽器；10—凝升泵；11—低压加热器；12—除氧器；13—给水泵；14—高压加热器；15—疏水扩容器；16—疏水箱

在炉膛水冷壁出口，分离器与水冷壁、过热器之间的连接无任何阀门。一般在（35%~37%）MCR 负荷以下，由水冷壁进入分离器的为汽水混合物，分离器出口蒸汽直接进入过热器，疏水通过疏水扩容器回收工质或通过除氧器回收工质和热量。当负荷大于（35%~37%）MCR 负荷时，分离器中全部是蒸汽，呈干态运行。此时内置式分离器相当于一个蒸汽联箱，必须承受锅炉全压，这是与外置式分离器的最大不同点。

疏水控制阀（AA、AN、ANB 阀）

用于控制分离器的水位和疏水的流向。

锅炉湿态运行时，分离器水位由 ANB 阀自动维持，当水位高于 ANB 阀的调节范围时（如工质膨胀），再相继投入 AA、AN 阀参与水位调节。AA 阀的通

流量设计可保证工质膨胀峰值流量的排放。

（三）直流锅炉的冷态启动

直流锅炉的冷态滑参数启动，由于具体条件和设备的不同，不可能制定标准的程序，现以 1900t/h 超临界参数直流锅炉为例，说明直流锅炉采用压力法滑参数启动的大体程序：

1. 循环清洗

点火前先进行冷态循环清洗。锅炉进水至分离器内有水位出现，控制清洗水量为启动流量。清洗分低压系统和高压系统两步进行。低压系统清洗路线为凝汽器—凝结水泵—低压加热器—除氧器—凝汽器（或地沟）；高压系统清洗路线为凝结水泵—低压加热器—除氧器—给水泵—高压加热器—省煤器—水冷壁—启动分离器—扩容器—疏水箱—凝汽器（或地沟）。分离器出口水质含铁量大于 $500\mu\text{g/L}$ 时进行排放，小于 $500\mu\text{g/L}$ 时进行回收利用，含铁量小于 $100\mu\text{g/L}$ 时结束清洗，锅炉点火。

2. 锅炉点火、升温升压

维持启动流量为 35% MCR，锅炉总风量大于 35%，高压旁路控制方式置启动位置，锅炉可点火。零压点火后，启动分离器内最初无压，随着燃料量的增加，当启动分离器中有蒸汽时，即开始起压。随着继续增加投入燃料量，分离器内的压力逐渐升高，由启动分离器 and 高温过热器出口集箱的内外壁温差控制直流锅炉的升压速度。

3. 工质膨胀控制

锅炉点火后，水冷壁内某位置的工质温度升至相应压力下的饱和温度，膨胀就开始

了。工质膨胀过程中分离器水位升高，疏水量增大。此时必须控制燃料投入速度不宜过快、过大，调节分离器各排放通道的排放量，以防止水冷壁超压和启动分离器水位失控。

对外置式分离器的系统，冷态启动时水冷壁压力高出分离器压力许多，工质膨胀时燃烧率已较高，分离器的产汽量超过冲转所需要的耗汽量，故汽轮机冲转在膨胀之前进行（但热态启动仍是膨胀后冲转）。这样既有利于协调蒸汽参数、减小启动热损失，又可避免低温再热器因旁路容量限制了蒸汽流量而引起管子超温。

4. 汽轮机冲转、暖机带初负荷

调节燃料量，锅炉继续升温升压。当汽压、汽温均达到冲转参数时便可冲转汽轮机、并网、带初负荷。此过程锅炉的汽压由高压旁路控制保持不变，再热汽压力由低压旁路控制。在高压、低压旁路全关以后，锅炉的蒸发段仍为湿态，继续增加燃料量将使分离器进汽量增加，分离器水位下降。在原来保持定压（冲转压力）运行时，分离器的 AA、AN 阀已全关。只有 ANB 阀还可继续用于维持水位。随着燃料量的继续增加，分离器水位继续下降，ANB 阀继续关小，直到全关为止。此时分离器完成从湿态至干态的转变，成为一个微过热蒸汽的通道。

5. 升负荷至额定值

在负荷升至 37% MCR 后，转入纯直流运行。分离器切换到干态运行后，自动控制由分离器水位控制转变为工质温度（中间点温度）控制。此后，进入分离器的流量随燃烧率的逐渐增大而不断增加，蒸汽压力、温度不断提高，在约 70% MCR 后转入超临界压力运行，直至 MCR 负荷，启动过程结束。

对外置式分离器系统，转入纯直流运行时要进行切除分离器的操作，切除分离器应遵循“等焓切分”原则，即保持低温过热器出口的工质焓与分离器出口饱和蒸汽焓在数值上相等，以保证主蒸汽温度的稳定和前屏过热器安全。切分后分离器退出运行，锅炉继续升温升压升负荷至额定值。

三、锅炉的停运

锅炉停止运行，一般分为正常停炉和事故停炉两种情况。有计划的停炉检修和根据调度命令停掉部分机组转入备用的情况属于正常停炉；由于事故的原因必须停止锅炉运行时，叫做事故停炉。根据事故的严重程度，需要立即停止锅炉运行时，称为紧急停炉；若事故不甚严重，但为了设备安全又必须在限定时间内停炉时，则称为故障停炉。

正常停炉又分为检修停炉和热备用停炉两种。前者预期停炉时间较长，是为大小修或冷备用而安排的停炉，要求停炉至冷态；后者停炉时间短，是根据负荷调度或紧急抢修的需要而安排的，要求停炉后炉、机金属温度保持较高水平，以便重新启动时，能按热态或极热态方式进行，从而缩短启动时间。

根据停炉过程中蒸汽参数是否变化，又分为滑参数停炉和额定参数停炉两种。滑参数停炉的特点是机、炉联合停运，利用停炉过程中的余热发电和强制冷却机组，这样可使机组的冷却快而均匀。对于停运后需要检修的汽轮机，可缩短从停机到开缸的时间。额定参数停炉的特点是停炉过程中锅炉参数不变或基本不变，通常用于紧急停炉和热备用停炉。

不论采用哪一种停炉方式，汽轮机和发电机也都随之停止运行。

（一）正常停炉至冷态

1. 汽包锅炉

正常停炉至冷态多采用滑参数停炉。其一般步骤包括停炉前准备、减负荷、停止燃烧和降压冷却等几个阶段。

停炉前准备：对锅炉各级受热面进行一次彻底吹灰；中储式制粉系统要控制粉仓粉位，使在停炉过程中能把煤粉烧光；检查、启动燃油系统，油温、油压正常；检查有关阀门及旁路系统的状况，做好准备工作。

减负荷：逐步降低锅炉的燃烧率，按照一定的速率（如 $1.5\% \text{ MCR/min}$ ）降低机组负荷。随着负荷的降低，汽压和汽温也逐渐下降。各煤粉燃烧器或磨煤机按照拟定的投停编组方式减弱燃烧。在减弱燃烧的同时可投入相应层的油枪，以防止灭火和爆燃，最后完成从燃煤到燃油的切换。随着燃料量的不断减少，送风量也应当减少，但最低风量不应少于总风量的 30% 。当机组负荷降至某一较低负荷时，启动旁路系统继续降负荷，锅炉可暂停调节燃烧。借助汽轮机调节汽门和旁路汽门的配合调节，汽轮机逐渐降低负荷而机前汽压和汽温保持基本不变，主蒸汽和再热蒸汽都保持有 50°C 以上的过热度。锅炉负荷减至 5% 左右即可停止燃烧，汽轮机打闸停机。或可继续利用锅炉余热所产蒸汽发一小部分电之后停机。

锅炉停止燃烧后，即进入降压与冷却阶段。这一阶段总的要求是要保证锅炉设备的安全，所以要控制好降压与冷却速度。关闭一、二级旁路系统，将过热器、再热器出口联箱各疏水门打开一段时间后关闭，以防止汽压、汽温回升并控制降压与冷却速度。在维持 $5 \sim 10\text{min}$ 的炉膛吹扫后，停掉送、引风机，并关严炉门和各烟风道风门、挡板，以避免停炉后降压冷却过快。何时恢复通风，依停炉目的而定。对停炉热备用的锅炉，不需要通风冷却；正常停炉至冷态时，可进行自然通风；对于需紧急抢修的锅炉，应强制通风。回转式空气预热器须待烟温降至规定值以下后才能停止运转。停止上水后，开启省煤器再循环门。根据放水时的压力和温度要求，当锅水温度降至一定值后，可将锅水放掉。

2. 直流锅炉

直流锅炉的正常停炉至冷态，也经历停炉前准备、减负荷、停止燃烧和降压冷却等几个阶段。与汽包炉相比，主要的不同是，当锅炉燃烧率降低到 30% 左右时，由于水冷壁流量仍必须维持启动流量而不能再减，因此在进一步减少燃料、降负荷过程中，包覆管出口工质由微过热蒸汽变成汽水混合物。为了避免前屏过热器冲水，锅炉必须投入启动分离器运行，使进入前屏过热器的仍是干饱和蒸汽，多余的水则疏掉，保证前屏过热器的安全。

启动分离器投入运行的停炉方法，对于外置式分离器（见图 1-5），是开启“分出”阀 24，逐渐开大“分调”阀 23，关小“低出”阀 25，锅炉本体及分离器压力维持不变，直至“低出”全关，过热器全部由启动分离器供汽；对于内置式分离器（见图 1-6），是开启 ANB、AN、AA 阀，分离器形成水位。

锅炉熄火后，保持高、低压旁路开度在 $10\% \sim 20\%$ ，锅炉主蒸汽及再热蒸汽系统降

压；降压速率应控制在不大于 $0.3\text{MPa}/\text{min}$ ，当压力降至 0.5MPa 时，可打开过热器空气门，当压力降至 0.2MPa 以下，关闭高、低压旁路阀门。

（二）热备用停炉

对于自然循环汽包炉，热备用停炉时应尽量维持较高的锅炉主蒸汽压力和温度。减负荷过程汽轮机调门逐渐关小以维持主蒸汽压力不变。汽温将随锅炉燃烧率的降低而降低，但应始终保持过热汽温有不低于 50°C 的过热度，否则应适当降低主蒸汽压力。机组负荷降至一定值后锅炉熄火，主蒸汽阀关闭。熄火后应紧闭炉门和各烟风道风门、挡板，以免锅炉急剧冷却。但由于熄火时蒸汽参数较高，应监视受热面金属壁温，防止超温。对于分离器外置式直流锅炉，热备用停炉时不必投入启动分离器，其余则与停炉至冷态一样。

锅炉降低燃烧率的方法与停炉至冷态基本相同。

第三节 启停过程参数控制与调节



启动冲转参数的选择

1. 冷态启动

冲转参数是指汽轮机冲转时的主蒸汽压力和温度，对于高、中压缸联合冲转，还应包括再热蒸汽压力和温度。冷态启动时汽轮机的金属温度等于或接近室温，所以冲转温度不受汽轮机的金属温度限制，而主要取决于冲转压力。冲转时主蒸汽压力的选择，主要考虑从便于维持冲转参数的稳定出发，在锅炉不增加燃烧率，不进行过多燃烧调整的情况下，蒸汽产量应能满足冲转、升速、满速、带初负荷的需要，且有一定的裕量。旁路系统在该气压下有足够的通流能力。由此要求主蒸汽压力要高一些；但是，较低的冲转压力有利于增加汽轮机进汽的容积流量并利于金属均匀加热，故又希望启动冲转压力低一些。我国在役机组冲转压力的范围较宽，中小机组的冲转压力为 $1.0 \sim 1.5\text{MPa}$ ，大型机组及引进机组由于汽轮机结构的完善，在热应力允许的情况下，采用 $5 \sim 8\text{MPa}$ 的较高冲转压力。

冲转时的主蒸汽温度，主要考虑在保证主蒸汽压力下，要有足够高的过热度，以防止末几级叶片蒸汽湿度过大，同时防止启动时因锅炉操作不当而使蒸汽进入饱和区，形成汽缸的热冲击（带有湿度的饱和蒸汽的放热系数比过热蒸汽大得多）。但是若冲转温度过高，蒸汽与汽缸内壁传热温差大，也会产生热冲击影响汽轮机寿命。此外，有一定的过热度也可以减少水滴对金属的腐蚀。一般要求蒸汽至少有 50°C 的过热度，若以上两个原则兼有困难时，首先应满足过热度的要求，因为湿蒸汽引起放热系数增大的后果比蒸汽与金属温度失配所引起的后果更严重。大机组的冲转温度目前多为 $330 \sim 360^{\circ}\text{C}$ 。

启动时再热蒸汽冲转参数的选取原则与主蒸汽基本相同。

2. 温态、热态、极热态启动

锅炉温态、热态、极热态启动的关键是根据汽轮机高、中压缸金属温度来控制锅炉的过热蒸汽和再热蒸汽温度，使之互相匹配的。运行人员确定主蒸汽温度的原则是：先根据汽轮机高压内缸进口处的金属温度，增加 $20 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 后确定冲转温度，然后由冲转温度根

据保持不低于 30°C 过热度的原则确定冲转压力。确定再热蒸汽温度的原则与此相仿。进入中压缸的再热蒸汽温度要比中压缸进口处的金属温度至少高出 20°C ，并保证有不低于 20°C 的过热度。

以上原则应理解为：在较高的汽轮机壁温下，若冲转时的蒸汽温度低于金属温度，转子和汽缸先受到蒸汽冷却，而后又被加热，转子和汽缸经受一次交变热应力循环，寿命损耗增加。但若汽温高于汽轮机壁温太多，又会形成热冲击。因此，只要保证冲转蒸汽的温度经调节级后仍高于高压缸壁温就可以了。至于锅炉出口的过热蒸汽温度，由于启动初期管道温度低，蒸汽流量小，相对散热较多，应较汽轮机要求的主蒸汽温度再高出 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 。维持一定的蒸汽过热度选择冲转压力，则主要是为防止蒸汽在汽缸内冷凝放热。

温态、热态和极热态启动时，因为启动时中压缸进汽处的金属温度与高压缸调节级温度相近，所以要求过热汽温与再热汽温接近。以保护中压缸不受低温蒸汽的冲击。对于高中压缸合缸的机组，主蒸汽、再热蒸汽温度的接近对减小接合部的热应力也是完全必要的。

二、启停过程压力、温度变化率控制

1. 冷态启动过程的升压、升温速度控制

锅炉冷态启动点火后，由于燃料燃烧放热，锅炉各部分逐渐受热，蒸发受热面和其中锅水的温度也逐渐升高。水开始汽化后，汽压也逐渐升高。从锅炉点火直至汽压升至工作压力的过程，称为升压过程。升温过程与升压过程同时进行，升温过程包括汽包（分离器）内饱和温度（汽包壁温）的升高和锅炉出口的过热、再热汽温升高这两个升温过程。这两个升温过程实际上分别是汽轮机冲转前、后控制锅炉升压速度的基本因素。

对于汽包锅炉，升压过程中汽包金属温度的变化速度取决于锅炉的升压速度，这是因为水和蒸汽在饱和状态下，温度和压力之间存在着一定的对应关系。因此对于蒸发设备而言，升压过程就是升温过程，通常就以控制升压速度来控制汽包的升温速度，这样便可控制汽包热应力在允许值以内。

压力越低，升高单位压力时相应饱和温度的增加越大。如表 1-1 所示，在低压阶段压力的不大变化会引起饱和温度较大的变化，因而造成壁温差过大使热应力过大。因此，开始的升压应比较缓慢。另一方面，在升压初期，由于只有少数燃烧器投入运行，燃烧较弱，炉膛火焰充满程度较差，对蒸发受热面的加热不均程度较大；同时由于水冷壁和炉墙温度较低，故水冷壁内的产汽量少，水流动微弱且不均匀，也不能从内部促使受热面均匀受热，因而，蒸发设备的受热面，尤其是汽包，容易产生较大的热应力。所以，升压过程的开始阶段，其变动速度应特别缓慢。

表 1-1 不同压力下饱和温度对压力的变化率

绝对压力 (MPa)	0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 0.5	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 4.0	4.0 ~ 10.0	10 ~ 14	14 ~ 21
饱和温度平均变化率 ($^{\circ}\text{C}/\text{MPa}$)	205	105	56	23	10	6.4	5.0

在升压的后阶段，虽然汽包的上下壁和内外壁温差已大为减小，升压速度可以比低压阶段快些，但由于压力升高产生的机械应力已很大，因此后阶段的升压速度也不应超过规定的升压速度。对于单元机组，由于采用的是机炉联合启动，因此汽轮机的暖管、暖机、升速和带负荷也限制了锅炉的升压速度，例如通入蒸汽量（与压力相应）的快速变化将会导致对汽轮机转子的强烈加热，使差胀值超限。

由以上分析可知，在锅炉升压过程中，升压速度太快，将影响汽包和各部件的安全，但如果升压速度太慢，则又将延长机组的启动时间，这是不经济的。因此，对于不同类型的锅炉，应根据其具体条件，通过试验确定启动过程的升温升压曲线，用于指导锅炉启动时的操作。

对锅炉升温过程的控制，可以汽轮机冲转为界，划分为三个阶段。在冲转以前，通常未投煤粉，由于燃烧较弱，烟气量少，过热汽温超过饱和温度的数值（过热度）不大，且过热度的变化也不大。所以过热汽温基本上受升压速度控制，汽温控制的原则只是要求冲转时满足冲转压力、冲转温度的匹配即可。若冲转时汽温还达不到规定值，则应联系汽轮机开大旁路，并加强燃烧，以提高汽温。

冲转升速过程中，锅炉基本不调整燃烧，同时锅炉压力维持恒定即过热器进口温度不变，易于维持机前主蒸汽温度的稳定，这有利于冲转升速过程中对汽轮机较缓和、均匀的加热。带初负荷后，由于给水加热系统的投入，给水温度逐渐升高，过热汽温可能会稍有增加。

冲转带初负荷以后，锅炉燃烧率大幅度增加，汽温上升较快，过热度也逐渐增大。此时的升温速度主要受汽轮机要求的限制而与汽包安全无关（汽包安全仍取决于升压速度）。过大的汽温变化速度将使汽轮机产生过大的热应力及胀差。

近代大型锅炉的平均升温速度通常为 $1.5 \sim 2.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，主要是通过调整燃料的投入量进行控制的，此时若升压过快，升温速度将超过上述规定值。机组达到某一负荷（如 70% MCR）时，汽温升至额定值，此后按照滑压方式升负荷，汽温利用正常调温装置（如减温水）维持设计值。

对于直流锅炉，启动分离器是厚壁部件，其对升温升压过程的影响与汽包相似。但由于壁厚比汽包小，且启动初水冷壁安全较好（建立了启动流量），所以升压速度可比汽包炉快一些。

2. 热态启动过程的升压、升温速度控制

热态启动的特点是启动前机组金属温度水平高；汽轮机进汽的冲转参数高；启动时间短。因此锅炉点火后，应尽可能加大过热器、再热器的排汽量，迅速增加燃料量，在保证安全的前提下尽快提高高压、汽温并增加升负荷的速度，以防止机组部件继续冷却。同时，由于被加热部件的温度高、温升幅度小，因此也允许经受大的压力温度变化率。再热蒸汽管道容积比主蒸汽管道大，疏水多；再热蒸汽压力也比主蒸汽压力低，排汽、疏水能力差，因此当主蒸汽温达到冲转要求时，再热蒸汽温度往往还没达到要求，此时可能不得不采用负温差启动。锅炉应迅速提高主蒸汽温度和再热蒸汽温度，减少金属壁面的温降幅度。为缩短启动时间，尽快达到汽轮机冲转的要求，可采取以下方法加快提升再热汽温：

(1) 高压旁路后汽温在允许范围内尽量提高,从而达到提高再热汽进、出口温度的目的;

(2) 汽轮机冲转前即应投入制粉系统,以满足汽轮机较高冲转参数的要求;

(3) 采取提高再热汽温的措施,如投用位置较高的燃烧器,将燃烧器摆角上调,适当增大过量空气系数,开大再热器烟气调温挡板或开大旁路提高再热汽温。过热汽温则用减温水调节。并网后当负荷增加到冷态滑参数启动时汽轮机汽缸壁温所对应的负荷工况时,升温升压可按冷态滑参数启动曲线进行,直到带满负荷。

某 600MW 汽包炉的冷态、热态和极热态启动升温升压曲线的对比如图 1-7 所示。由图可见,冲转时的参数越高,升温、升压速度越快,启动过程越短。

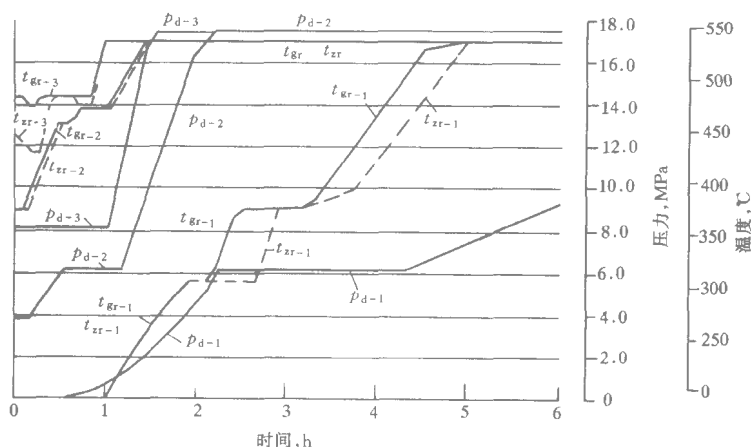


图 1-7 FW-2020t/h 锅炉不同启动状态的参数变化

1—冷态启动; 2—热态启动; 3—极热态启动; p_d —压力;

t_{gr} —过热汽温; t_{zr} —再热汽温

3. 停炉过程压力温度变化速度控制

滑参数停炉过程中,为使汽包壁温差不超过规定数值,要求汽包内工质温度以 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 左右的速度下降,相应的降压速度视蒸汽压力不同为 $0.05 \sim 0.15\text{MPa}/\text{min}$,开始时汽压较高,降压速度可较大,后阶段的汽压较低,降压速度应较小。主要由燃烧率控制降压速度。在汽压下降的同时汽温也会下降,汽温下降速度取决于汽轮机冷却的要求,通常过热蒸汽的降温速度大约为 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$,再热蒸汽降温速度大约为 $2.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。要控制再热汽温与过热汽温变化一致,不允许两者温差过大,同时应始终保持过热汽温有不低于 50 的过热度,以确保汽轮机的安全。为此,除用燃料量和使用减温水调节汽温外,还可通过汽轮机增加负荷的办法共同进行控制。

三、高低压旁路的控制

(一) 高压旁路控制方式

高压旁路(见图 1-2)将锅炉过热器出口的主蒸汽引入冷段再热系统。在启动阶段中,

它不仅是蒸汽的通道，而且也是控制升压过程的一个重要装置。在启动过程中高压旁路按三种不同的控制方式自动动作实现对汽压的调节，即启动方式、定压方式和滑压方式。

1. 启动方式（阀位方式）

这是锅炉点火到汽轮机冲转前的高压旁路运行方式。锅炉点火前，应先将高压旁路的最小阀位 $Y_{\min}$ 和最大阀位 $Y_{\max}$ 设置好。例如可设置最小阀位 $Y_{\min} = 20\%$ 最大阀位 $Y_{\max} = 50\%$ 。最大阀位 $Y_{\max}$ 的设置与高压旁路的通流能力有关，即当主蒸汽压力达到冲转值时，高压旁路的通流量恰能满足锅炉启动时的 $35\% \text{ MCR}$ 的流量需要。此外，还要设定一个最低设定压力 $p_{\min} = 0.4 \text{ MPa}$ ，以供开足高压旁路阀位之用。点火后，由于主蒸汽压力 p_s 小于 $p_{\min}$ 高压旁路阀门被强制打开，并保持开度 $Y_{\min} = 20\%$ 这就保证了再热器中有足够的蒸汽流量进行冷却，而不致使再热器金属过热（见图 1-8）。

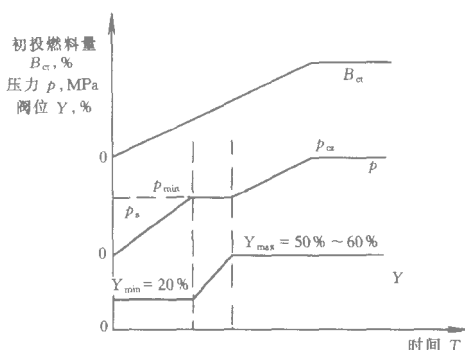


图 1-8 高压旁路启动方式

当主蒸汽压力上升到 $p_s = p_{\min}$ 时，高压旁路门将逐渐开大以保持 $p_{\min}$ 不变，直到高压旁路门的开度达到 $Y_{\max}$ 时为止。此后随着燃料量的增加，主蒸汽压力在最大开度 $Y_{\max}$ 下升至冲转压力，此过程中压力给定值以一定的梯度（压力变化率）跟踪实际值，一旦升压速度超过控制允许值，高压旁路门会自动开启，以防止过大的热应力。由于锅炉的初投燃料量一般都自然限制升压率不超过允许值，所以启动方式下高压旁路门通常不会自动开启。

2. 定压方式

当主蒸汽压力上升到汽轮机冲转压力时，高压旁路控制系统即自动转为定压控制方式，如图 1-9 (a) 所示。在该方式下，高压旁路门开度的大小受主蒸汽压力的控制，冲转升速过程中，汽轮机调门逐渐开大使进汽量增加，机前汽压下降；此时高压旁路门相应关小开度，以维持机前的主蒸汽压力恒定，实现定压启动。显然，由于提前将阀位开大至最大位置 $Y_{\max}$ ，因而可避免在冲转至带初负荷期间追加燃料量，而只靠关闭高压旁路阀位即可满足汽轮机启动用汽量。采用这种方式，运行人员在主蒸汽压力接近和达到冲转压力

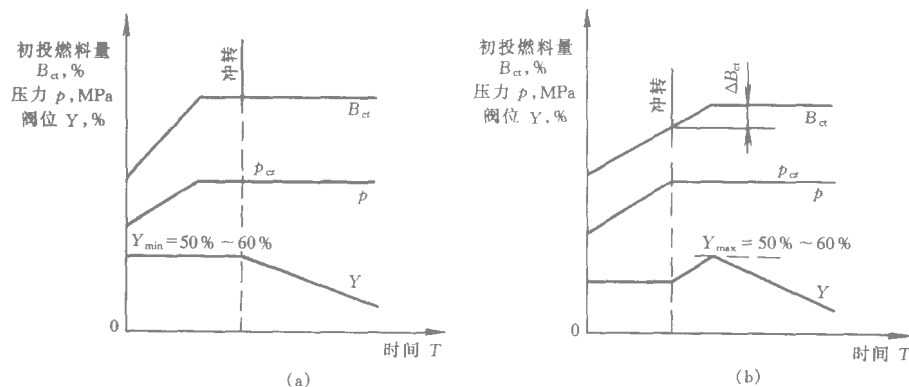


图 1-9 高压旁路定压方式