

国外锻造工业节能技术发展概况

孙承德 李桂元

国外锻造工业节能
技术发展概况

锻造工业是一个消耗能源的主要工业部门。美国把它列为十大主要耗能工业部门之一，是政府要求节能的重点对象。美国政府在节能分配规划中，要求锻造工业1980年节能24%；美国巴特莱研究院指出，要求锻造工业以1972年为基数节能35%。

目前，国外锻造工业中采取的节能措施很多，归结起来，其主要特点是：改造旧炉，设计新型节能炉，采用先进加热方法，提高热效率；回收余热，减少热损失；采用节能新工艺；加强能源管理。这些节能措施，有的已得到较广泛的应用，收到了显著的技术经济效益；有的已初见成效；有的则还处于研究发展阶段。

一、改旧炉，建新炉，采用先进加热方法，提高热效率

锻造加热温度较高，耗热量大；但由于加热方式、炉型结构、炉衬材料、操作技术等方面的原因，热量损失较大，热效率一般都较低，其中尤以罐式炉最为典型。传递到工件上的热能只占12%，而辐射热损失占8%，废气带走的热量则占65%之多。连续炉的热效率虽高，也只有25—40%，所以无论是

兵器工业部第二一〇研究所

一九八二年六月

国外鍛造工业节能技术发展概况

孙 永 德 李 桂 元

从1973年秋出现石油危机以来，各国政府都大力采取节能措施，並研究开发新能源。美、英等国专门设立了能源部，负责制定能源政策和长短期节能规划，加强能源利用的管理工作。

鍛造工业是一个消耗能源的主要工业部门。美国把它列为十大主要耗能工业部门之一，是政府要求节能的重点对象。美国政府在节能分配规划中，要求鍛造工业1980年节能24%；美国巴特莱研究院提出，要求鍛造工业以1972年为基数节能35%。

目前，国外鍛造工业中采取的节能措施很多，归结起来，其主要特点是：改造旧炉，设计新型节能炉，采用先进加热方法，提高热效率；回收余热，减少热损失；采用节能新工艺；加强能源管理。这些节能措施，有的已得到较广泛的应用，收到了显著的技术经济效益，有的已初见成效，有的则还处于研究发展阶段。

一、改旧炉，建新炉，采用先进加热方法，提高热效率

鍛造加热温度较高，耗热量大；但由于加热方式、炉型结构、炉衬材料、操作技术等方面的原因，热量损失较大，热效率一般都很低，其中尤以縫式炉最为典型。传递到工件上的热能只占12%，而辐射热损失占3%，传导热损失占7%，炉体儲热占13%，由废气带走的热量则占65%之多。连续炉的热效率虽高，也只有25—40%，所以无论是改造旧炉，或设计新型加热炉，采用相应的补救措施减少热损失是鍛造

节能中大量采用的简便方法。国外锻造加热炉中，室式炉所占比例相当大。这种加热炉设备陈旧，加热技术落后，工作环境恶劣，但具有结构简单，设备成本低，适应性强，适于多品种小批量生产的特点。例如，英国的缝式炉占整个锻造加热的50%，生产能力占整个锻造加热的23%。这种炉在美国也占很大比例。由于经济上的原因，要完全淘汰这些技术落后、热效率低的加热炉是不可能的。因此，在设计建造新型节能加热炉的同时，通过改造旧炉实现节能仍是锻造节能的主要趋向之一。另外，还不断发展工艺先进的快速加热。

现将国外采用的有关主要方法介绍如下。

1. 采用低热惯性绝热材料

选择合理的炉衬材料是减少热损失的一种有效途径。锻造加热炉传统的炉衬材料为耐火砖（主要为硅、镁、铝、石灰石以及铬的氧化物），虽然其耐热温度高、制造简单、价格便宜、密度大、强度高；但传热储热损失大，加热效率低。为了改善耐火砖的绝热性能，减少热损失，国外研制应用了绝热耐火砖；其原材料与普通耐火砖相同，特点是砖内含有大量空气，耐火砖孔隙度增大，密度减小，绝热性能大大提高。例如生产率为450公斤/小时的室式加热炉将原来采用普通耐火砖（密度为1840公斤/米³）炉衬改用绝热耐火砖（密度为580公斤/米³）炉衬后，炉衬壁厚减小一半，传热损失减少40%。绝热砖的另一个优点是抗热冲击能力强，可减少普通耐火砖由于快速加热或快速冷却而出现裂纹的现象。但绝热砖的抗机械冲击强度低于普通耐火砖。因此，将普通耐火砖与绝热耐火砖结合使用，在普通耐火砖的表层镶砌一层绝热砖，也可收到显著的节能效果。表1是锻造炉选用的耐火材料性能对比。

表1 锻造炉选用耐火材料的性能比较

类 型	密 度 公斤/米 ³	平均温度为600℃ 时的导热率 瓦/米℃	最高连续 工作温度 ℃
耐火砖	1942	1.38	1400
绝热耐火砖 28级	880	0.36	1540
26级	770	0.33	1425
25级	705	0.24	1370
23级	670	0.20	1260
陶瓷纤维毯			
普通级	96	0.17	1260
	128	0.14	1260
高温级	96	0.14	1425
	128	0.12	1425
硅酸钙绝热材料	234	0.14	950
*Microtherm绝热材料	234	0.04	950

*Microtherm是英国的一种专利绝热材料，由于其孔隙直径小于空气的平均自由路程，导热率极低。

陶瓷纤维是近年来国外研究较多的耐火材料，并在锻造加热炉上得到了不同程度的应用，取得了较明显的节能效果。

陶瓷纤维炉衬的主要优点是：比重小，约为普通耐火砖的8%，为绝热耐火砖的1/3，因而炉体重量大大减轻；比热低，蓄热损失少，约为一般耐火材料的四分之一，因而升温快，工作效率高；导热率低，为普通耐火材料的1/10，因而绝热性能好，炉壁散热损失减少。采用陶瓷纤维炉衬一般可节省15—40%的燃料。

目前国外锻造炉采用的陶瓷纤维材料种类很多，用得较广泛的主要有：二氧化硅纤维（适用于1000℃），硅酸铝（适用于1400℃），氧化铝和氧化锆纤维（适用于1600℃以上），以及用有机粘结剂粘结的硅酸铝和氧化铝的混合纤维，其中以硅酸铝纤维用得最多，其化学成分主要以氧化铝和氧化硅为基体。

陶瓷纤维炉衬的安装方法主要有两种：一种是把陶瓷纤维毯大面积固定在炉壁上，为减少炉衬成本，一般都在陶瓷毯下面加一层价格较低的绝热材料，然后用金属钉固定在钢壳炉体上。大型加热炉和连续

炉(工作温度一般低于 1280°C)采用这种安装方法。另一种方法是把陶瓷纤维毯切成条状,然后再拼合成炉衬,用金属钉固定在炉壁上,这种方法可把固定陶瓷炉衬的金属钉掩埋在炉衬内,减少金属钉受热冲击烧蚀损坏的可能性。后一种安装方法的炉衬比前一种炉衬抗机械撞击能力强,锻造工业用室式炉大都用这种方法安装。为降低成本,也可不更换旧炉衬,直接在现有耐火砖上镶一层陶瓷纤维材料,该法安装速度快,成本低,同样可收到减少热损失,节约燃料的效果。比英国 Sheffield 公司在工作温度为 1350°C 的转底炉上采用镶面陶瓷纤维炉顶,不但节省了燃料,炉顶寿命也比原来的耐火砖延长约 2 倍。一年节省成本 3000 美元,两年内即收回了成本。

陶瓷纤维耐火材料在锻造工业虽然越来越受到重视,但由于其抗机械冲击性能差,成本高,目前多用在炉顶和炉门,炉壁也有少数应用。有的公司在需要经受机械冲击的下壁部仍采用耐火砖,而在上壁部采用陶瓷纤维,也可以使散热损失相对减少。美国现代模锻公司和 Trinity 锻造厂在缝式锻造炉的炉顶、炉门和炉壁上均采用了陶瓷纤维内衬,取得了节省燃料约 30% 的效果。

目前,陶瓷纤维的主要发展趋势是,改善设计,提高强度,改进安装技术,以便向高温区扩大应用。

英国模锻研究协会还研究了一种由绝热耐火砖和硅线石组成的复合砖做炉衬。这种复合砖用耐火水泥,化学粘结剂或机械结合等方法把两种不同类型的耐火材料组合在一起,这样既可提高炉衬绝热性能,也可降低炉衬重量和改善抗机械冲击性能。模锻研究协会把这种复合砖用在生产率为 450 公斤/小时的低热惯性加热炉的炉壁上做了实验,取得了较显著的节能效果。加热时,升温时间由过去的 2—3 小时缩短到 40 分钟以内。温度变化范围在 $\pm 1.5\%$ 之间。加热炉工作 4000 小时后,

无任何擦伤和变质迹象。与用耐火砖和绝热耐火砖配合使用做炉壁内衬相比，其成本只高12.5%，这很容易通过节省燃料回收。目前已有几台锻造炉采用了这种炉衬。为了进一步延长复合砖硬面寿命，对硬面材料和结合方法还有待进一步研究。

2.改进炉型设计

设计合理的炉膛尺寸，尤其是炉膛高度，使火焰在炉内造成强烈循环，保证火焰和金属最佳接触，增加对流换热和辐射换热，这是提高炉子生产率和降低燃料消耗量的重要措施之一。炉膛太高时，火焰充不满炉膛，则传热不良。苏联一家工厂在装有平焰烧咀的锻造炉上，把原炉膛高度大大降低，炉料与炉顶距离减至450—500毫米，从而减小了炉膛体积和周围表面的热耗损。英国一家公司把一台室式锻造加热炉的炉膛高度由2.2米减小到1.1米，取得了节省燃料达21%的效果。但炉膛太低时，火焰在炉膛内停留时间太短，热损失增大，同时还减少了炉内的热辐射作用。

炉膛几何形状也是必须注意的因素，比如，曲线形加热室与相同尺寸的矩形加热室相比，炉气在曲线形炉膛内更易于循环，流动速度均匀，没有死区，因而热量更容易传递到炉料上，热效率也就相应提高。

在设计加热炉时，还应考虑烧咀的布排位置和方式，设置废热回收装置，确定加热炉的各种最有效参数等因素。此外，由于能源供应随时受到威胁，美国等国家还建造了可烧油又可烧气的多燃料加热炉，或者是在原加热炉的基础上进行改造，以适应能源供应的变化。

3. 采用节能型烧咀

选择烧咀应满足三个基本条件，一是燃料燃烧要充分；二是放热量要高，这样，对于给定的产量，可以采用较小的加热炉，减少燃料消耗；三是烧咀调节比要大，一般应至少大于4:1，以适应广泛的加热要求。从节能和提高加热效率的观点来看，目前国外主要发展了以下几种节能型烧咀。

(1) 环流烧咀

环流烧咀属于带有单个燃烧室的高热应力烧咀装置，其特点是加速燃烧反应，减少炭黑形成和扩大调节范围。这种烧咀在美苏的锻造炉上使用较多。烧咀结构是，在其燃烧室内装有开有环流沟槽的陶瓷环流圈，环流圈与中心管外表面之间形成烧咀内腔。来自炉膛的热气引入环流通道的，经环流圈，进入火焰区。由炉膛回到火焰反应区的环流热气可提高燃烧反应速度，减小火焰体积，提高火焰温度。试验证明，单是采用环流比为100% (1:1) 的烧咀，就可减少5—10%的燃料消耗，并可使生产率提高20%。环流作用还有助于减少对流传热中由于燃料与空气流量比较低而引起的热损耗，通过烧咀的环流作用可强化炉内气体的换热，保证炉内温度均匀。美国海牙国际公司采用的环流烧咀把火焰放在环流圈的出口端，而不放在进口端，因而增大了环流比，与普通环流烧咀相比，其环流比可提高3—4倍，更利于加热炉的换热和节能。图1是此公司采用的陶瓷环流烧咀。

(2) 平焰烧咀

平焰烧咀的火焰呈扁平形状，不直接冲击工件。其工作原理见图2，空气进入烧咀后，沿燃烧器体内壁螺旋槽旋转向前运动，煤气经中央喷咀喷到强烈旋转的空气中。点火后在压差作用下，火焰不断沿燃烧

表面和炉衬表面向前扩散，将炉衬烧成炽热的辐射源。工件由炉衬辐射加热。平焰烧咀是做焰加热的最新发展之一。

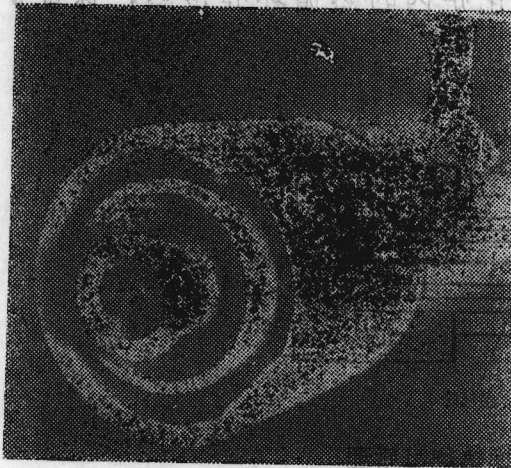


图1 陶瓷环流烧咀

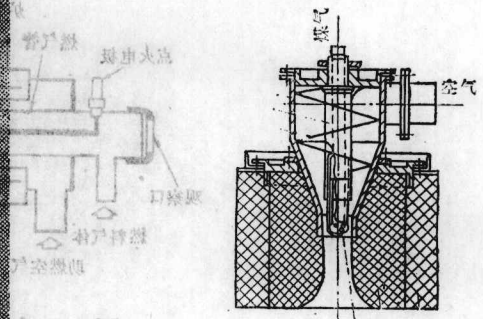


图2 平焰烧咀原理

试验表明，加热炉如由喷射式烧咀改装为平焰烧咀，可显著降低燃料消耗量，提高热效率。苏联一家工厂在室式炉上安装平焰烧咀后，热效率从9.6%提高到21.2%。苏联在双室式加热炉采用平焰烧咀后，比一般引射烧咀除氧化减少30%左右外，还可节省40%的天然气。美国1973年已有8台加热炉采用这种烧咀，並已成功地在弹体锻造生产中应用。捷克、匈牙利、东德、波兰等国还采用了双层炉衬的加热炉（内层炉衬带孔），以便进一步提高平火焰烧咀的热效率。

（3）自换热烧咀 自换热烧咀是英国目前发展的最成功的节能型烧咀之一，其主要类型有英国煤气公司发展的以煤气为燃料的换热烧咀，和英国热工发展公司研制的以煤气和油为燃料的换热烧咀。自换热烧咀的主要特点是把高速烧咀、换热器和烟道的功能集为一体，並配有辅助自动控制系统。加热炉废气通过烟道，与助燃空气一起进入一个镍铬合金的同心管热交换器，废气和助燃空气对向流动，这样助燃空气被预热，预

热后的助燃空气温度可达 600°C ，可节省燃料45%。经预热的空气和煤气在高速烧咀的喷口混合后，由烧咀的陶瓷坑道出来的燃烧产物，其速度可达76米/秒，因而可强化炉内的热循环和传热，保证炉内温度均匀。自换热烧咀原理见图3。

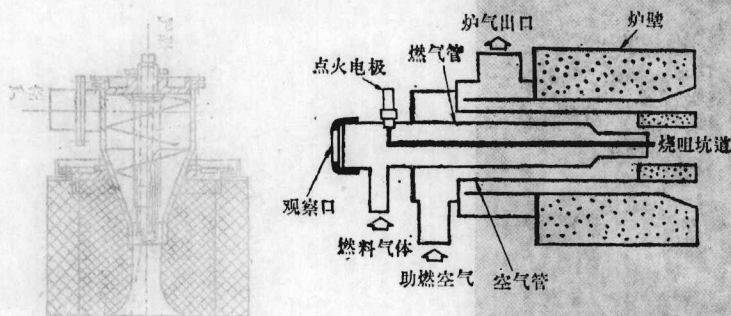


图3 自换热烧咀原理

目前英国生产的换热烧咀的热输入范围为100—900千瓦 (3.5 therm/小时—30 therm/小时)，可在100%的过剩空气下进行工作，烧咀调节比大于10:1。这种烧咀特别适用于高温加热炉，国外大小锻造炉均有采用。比如，英国一家锻造公司有一台供自由锻加热的小型室式炉，原来采用两个功率为350千瓦的燃油烧咀进行加热，热效率很低；在改用两个英国煤气公司生产的225千瓦自换热烧咀，同时炉膛高度减小一半后，总共节省燃料达51%。其中仅使用换热烧咀一项就可节省30%的燃料。英国钢铁公司River Don钢厂在一台230吨容量的大型锻造炉上采用了英国热工发展公司的自换热烧咀，可节能25%，并配合采用陶瓷纤维绝热，可再节能6%。美国国家锻造公司从英国热工发展公司购买了14个自换热烧咀装在一台200吨的锻造炉上，取代了原来的26个普通烧咀，同时炉门采用了轻型的陶瓷纤维，总共节能达58%。美国Schlosser锻造公司是生产大型环形件的厂商，也采用了英国热工发展公司的换热烧咀。该公司最初对两台装有不同烧咀的同等能力加热炉进行了四个月的对比试验，结果表明，采用换热烧咀可

节约高达60%的燃料消耗，同时还提高了加热速度，改善了坯料加热质量。因此，该公司后来又增购了14个这种烧咀。

从节能观点来看，自换热烧咀是最有发展前途的烧咀。英国发展的这两种换热烧咀，其原理和结构大同小异；但热工发展公司的换热烧咀，由于具有可用油或煤气为燃料的特点，适用性强，在能源供应随时都可能受到限制的今天，生产厂商可随时根据燃料价格的变化选用廉价的燃料进行生产。为了选择适用的燃料，美国一家公司还试验了用50%油混合50%煤粉的悬浮液做锻造加热燃料，取得了节省燃料12%的效果。但目前还存在一些问题，尚需进一步研究。

4. 发展快速加热

快速加热就是以尽可能快的速度加热金属。因加热时间短、热效率高，可显著节省燃料。快速加热有两种，一种是通过提高加热炉温度头的途径来提高加热速度，实现高温装炉，多面加热。即在较大幅度地提高炉温后，把室温下的钢料直接放入炉中，以加速钢料的加热。炉温一般升高到 $1400\sim 1500^{\circ}\text{C}$ ，有的甚至达到 1600°C ，由于温度头超过一般3—4倍，加热时间大大缩短。美国采用这种方法比英国多。另一种是通过高速烧咀形成的强烈高温喷射能使坯料直接快速加热。这种加热方法传热速度快，热效率高，燃料消耗只为一般敞焰加热炉的46%，氧化和脱碳现象大大减少。其加热设备，结构紧凑，易于实现自动化，可以把加热和成形联成自动生产线，这也是金属加热目前的发展趋势，以下主要介绍几种这种类型的快速加热法。

(1) 快速局部加热

快速局部加热，是将坯料端部放入高速坑道烧咀的燃烧坑道内进行加热(图4)。这种加热器是使空气-煤气经汇流腔混合后，通过混

混合气口，在烧咀坑道的进气口开始燃烧。在燃烧产物向坑道出气口流动时，同时把热量传到工件上（主要为对流传热）。为了加速热气循环流动，烧咀坑道为锥形，并可消除或减小纵向温度梯度。这种加热器结构简单，热惯性极低，因而升温快，烧咀点火5分钟后，就可把坯料加热到所需温度。

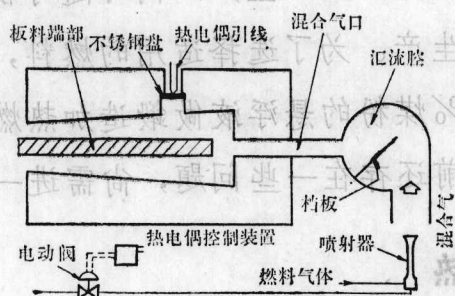


图4 快速局部加热器

英国煤气公司与一家加热炉生产厂研制了一台加热棒料端部长度为254毫米的加热器。加热器长456毫米，最大输入热量为146千瓦，加热温度为950℃，每小时可加热直径15.9毫米的棒料400根。这台加热器取代了以前的炉膛长2.42米的普通加热炉。生产实践表明，采用这种快速局部加热器，燃料消耗可减少66%，同时，加热器的投资费用也比普通加热炉低得多。

(2) 快速整料加热

整料加热是用加热器一端烧咀的高速热气流加热金属，加热坯料则由加热器另一端的推杆系统并排向烧咀方向进料（图5）。加热器可将坯料加热至1250℃，不同型号的加热器生产率可达173公斤—6吨/小时。英国煤气公司甚至还为用户成功地生产了每小时可加热20吨钢料的快速整料加热器。大型加热器适用于加热轧制钢坯，小型加热器可用于模锻加热。

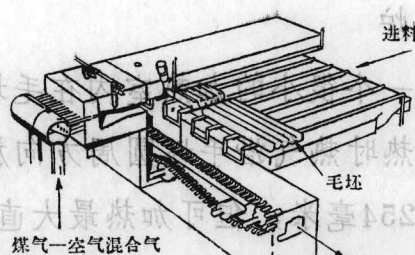


图5 快速整料加热器

英国煤气公司与英国模锻研究协会共同研制了一台生产率为820公斤/小时的整料快速加热器，可加热直径19—38毫米，长152—914毫米的钢棒。加热器装有4个烧咀，根据加热坯料长度的不同，可使用不同数量的烧咀进行加热。加热器占地面积仅为1.5米×2.9米，並配有温度控制装置。

另一台用于加热轧制棒材的快速加热器，可加热127毫米见方，长2.5米的棒材至1200℃。加热器的加热室长度为2.5米，根据坯料尺寸的不同加热室高度可自由调节，以获得最佳加热效率。加热器装有9个烧咀，废气用抽风机由加热室抽出。进出料、点火熄火、炉温炉压控制均为自动化。氧化皮损失不到0.4%（普通加热炉为2.5%），加热炉点火20分钟后，就可开工轧制，加热炉关停均很方便。

（3）连续对流加热

连续对流快速加热炉实际上是由绝热耐火砖砌筑成的圆筒体，烧咀安装在垂直于圆筒体中心线接近预热炉膛的一端，坯料由推杆系统与废气流动相反的方向推过预热炉膛，当坯料通过烧咀区时即被加热到锻造温度；废气经预热炉膛用抽气机由另一端抽出（见图6）。这种加热炉适于加热长度在0.6米以下的坯料，加热温度最高可达1350℃，主要用于加热黑色金属毛坯，点火后45分钟即可加热到锻造

温度，生产率可达1730公斤/小时。

(4) 单室加热炉

这种加热炉是在一个很小的加热室内在毛坯的上下方安装预混合气烧咀进行加热，加热时热气沿毛坯圆周方向旋转流动（图7）。加热炉直径很小，仅为254毫米，但可加热最大直径达228毫米，长712毫米的坯料。英国一家钢管厂安装了一台单室加热炉，用于加热旋转锻造管件所用的心棒坯料（2—5米长的合金钢棒），加热温度为1150℃。原来用普通加热炉时，要同炉加热几根心棒坯料，由于加热速度缓慢，锻锤往往要空等几个小时，而且氧化皮多，光洁度差。单室加热炉的加热速度显著提高，点火15分钟即可开工锻造，氧化皮显著减少，光洁度提高。

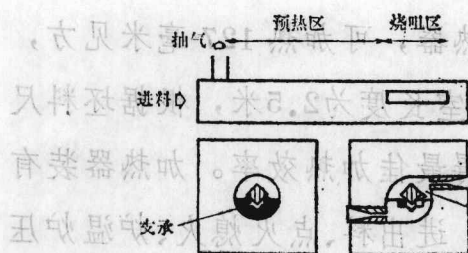


图6 连续对流加热

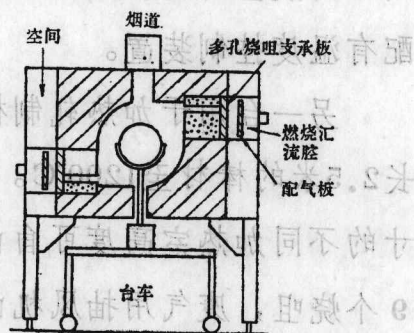


图7 单室快速加热炉

(5) 喷气冲击式加热

这种加热方法的主要特点是通过多孔坑道烧咀输出的高速热气流，而不是燃烧火焰进行加热，热气流可直接传到工件上。由于加热室热惯性低，加热效率较高。连续炉采用这种加热方法在配合采取热回收措施的情况下，热效率可达40—50%。另外，由于喷气冲击式加热实际上是无氧化加热，因而氧化皮极少，废品率很低。但由于其传热速度快，需要准确控制加热时间和温度，以避免过烧。这种快速加热方法在世界范围得到了较广泛的应用，仅1968—1978这十年间，就

安装了几百台，用于黑色金属和有色金属坯料的加热。

概括说来，快速加热的主要优点是：

(1) 加热炉起动快，燃料消耗低，热效率高。

(2) 脱碳或氧化皮少，坯料加热质量好。同时还节省了原材料，提高了锻模的寿命。

(3) 加热装置关停方便，灵活性强，易于组成自动线。

(4) 生产率高，占地面积小。

(5) 减少了烟气和热应力，改善了锻造厂环境。

主要缺点是如控制不当会出现过烧和热应力裂纹，影响锻件质量。

5. 电加热

电加热实际上是快速加热的一种，具有加热速度快，热效率高，氧化皮少等优点。但电加热的设备投资费用和电能价格都较高，应用受到一定限制。近年来，由于出现石油危机，电能价格与天然燃料价格的差异显著缩小，电加热在不少国家的锻造工业部门受到了极大的重视。英国模锻工业中，电加热已占整个锻造加热的19%，其中在压力机模锻生产线中，电加热所占比例高达80—85%。美国的电加热应用范围也在扩大。从当前看来，虽然有少数厂家认为，在一定的生产条件下，电加热成本比火焰加热成本低，或大致相当；而多数厂家还是认为，电加热成本一般都比火焰加热成本高。但由于电加热具有加热温度均匀、速度快、脱碳和氧化皮少、热效率高、便于实现自动化操作等优点，在综合考虑的情况下，某些坯料选用电加热还是合适的。比如，美国在大弹生产中有半数以上的工厂均采用了感应加热，其热效率可达50—70%。有些工件的加热，在适当的加热条件下，总热效率甚

至可高达90%以上。由于热效率高,能源浪费相对减少,同时,由于氧化皮少(一般只有0.5%),既节省了原材料,又使模具寿命可提高约30%。

目前国外的锻造电加热主要有两种:感应加热和接触电加热,其中以感应加热应用最多。电阻炉和红外加热也有一定应用。

6. 加热炉的炉内控制

加热炉的炉内控制主要包括炉温、炉压以及过剩空气比的控制。

炉温控制可减小炉内温度的波动范围,提高炉温的均匀性。最简单的炉温控制方法是两级控制。采用这种控制方法时,由于输入热量时断时续,炉内温度波动较大。连续加热时,可采用比例控制法,即根据所要求炉温偏差大小配比热量,这样炉温偏差可逐步减小。另外,还有采用积分控制法,以及比例控制和积分控制联合控制的自动控制方法,使炉温控制取得了很精确的效果。

从目前对炉温控制的研究来看,自动控制炉温的节能效果不很明显,也很难用确切的数字来表示。但与手动控制相比,自动化控制提高了炉温控制的可靠性,减少了人工操作技术,同时,由于避免了出现过烧和大量氧化皮,提高了坯料加热质量,延长了模具寿命。

炉压控制对节能有直接的影响。炉压过高,排出的废热会带走大量热量;炉压过低,大量冷空气则会倒灌进炉内,既消耗燃料,又会由于氧气过多而影响炉内气氛。对于多数中小型锻造炉和炉门需要经常开关的室式炉来说,实现适当的炉压控制是比较困难的。英国模锻研究协会对此做了一些研究,他们通过调节控制废热气闸与燃料输入控制阀,取得了节省燃料约10%的效果。

过剩空气比(又称空气过剩系数)是指实际空气供给量与理论燃

烧用空气量之比。正确控制过剩空气比不但能减少燃料消耗，还可减少氧化、渗碳和脱碳现象。过剩空气一般都控制在5~15%之间，(过剩氧气含量一般为1—3%之间)。一般说来，废气温度愈高，空气比控制则愈重要。国外有的公司，采用了由炉温调节装置，燃料流量调节装置和空气流量调节装置组成的燃烧控制系统控制炉内燃烧气氛。采用这种控制系统，不管炉子负荷一定或变动时，都能将过剩空气控制在5—10%范围内。

例如，有一座烧重油的锻造加热炉，出口烟气温度为1300℃，将原过剩空气40%控制为10%后，节约燃料达35.9%之多。

另外，通过改善炉门的设计安装方式，减少炉门的开启次数，缩短开门时间，还可以减少辐射热损失。比如，美国一家公司在加热炉装了四个使控制辐射平衡的炉门，因而减小了炉缝的尺寸。炉子在需要装料时，炉缝可随时打开。炉缝尺寸减小到1/4名义尺寸，燃料消耗降低近30%。

二、回收余热，减少热损失

前面已提到过，加热炉内燃料燃烧产生的热量，很大一部分通过烟气由烟道和烟囱白白跑掉，因此，国外对余热的回收利用问题日益重视。美国在1977年10月锻造工业协会召开的《维修与工厂管理会议》上确定了26个锻造发明授奖项目规划，其中有关节能的三个授奖项目，都是关于废热利用的。其他一些工业发达国家也采取了积极的鼓励措施。国外目前发展的废热回收装置种类很多，但大部分用于大型加热炉，适用于中小型锻造炉的还不多。主要的余热回收利用方式包括：预热助燃空气、预热坯料、余热锅炉和余热热处理。

1. 预热助燃空气

利用废气预热助燃空气是一种减少燃料消耗、提高热效率的有效方法。经预热的助燃空气，可直接供烧咀燃烧使用。因而使部分被烟气带走的热量，又通过预热空气带回炉内。英国模锻研究协会对空气预热的节能效果做过估算，以生产率为270公斤/小时的加热炉为例，如果废气温度为1200℃，助燃空气预热到300℃，可节省20%的燃料。如助燃空气预热到600℃，则可节省37%的燃料，同时还可提高20—30%的生产率。美国海牙国际公司在一家锻造厂的缝式炉上安装了陶瓷换热器，取得了节省38%燃料的显著效果。

预热助燃空气主要有两种方法，一种是采用蓄热器，另一种是采用换热器。蓄热器的原理是利用由耐火材料组成具有多通道的格砖预热空气。当废热气通过砖格通道时，蓄热器被加热。在格砖热到一定程度时，切断废气热源，废气则流向邻近的另一个蓄热器。与此同时，将冷空气送入第一个蓄热器，当冷空气变热后，再引入炉内供燃料燃烧使用。为了保证能够连续供给加热炉预热空气，一台加热炉至少需要两个蓄热器进行交替工作。国外还发展了可逆式蓄热器和旋转式蓄热器，旋转式蓄热器属于低温蓄热器，目前主要用于环流供暖。蓄热器的优点是预热空气温度比较高，缺点是装置粗笨，成本高。目前应用不多。

采用换热器是目前预热空气的主要方法，其原理是通过换热器壁面传热而预热空气。换热器形状有针状、管状和整体等多种形式。其材料有金属型、陶瓷型以及其他绝热材料型。金属型换热器主要在低于1200℃的废气温度下使用，空气预热温度不超过650℃，陶瓷型换热器具有耐高温，寿命长的特点，空气预热温度可达850—1000℃。