



宋汉武 编著

23.3

汽锅炉减温器

科学技术文献出版社重庆分社

内 容 提 要

减温器是用来调节蒸汽锅炉蒸汽温度的重要装置。本书介绍各类减温器的减温原理、结构形式、设计原则、运行准则和试验方法。书中汇总了我国三十年来对减温器的研究成果、设计数据和运行经验,以及事故原因的分析。同时还收集了国外有关减温器的先进技术。

本书可为蒸汽动力专业的设计人员提供减温器的设计依据,有助于运行人员提高运行水平,也可供大专院校有关专业的师生参考。

蒸汽锅炉减温器

宋汉武 编著
责任编辑 胡席儒

科学技术文献出版社重庆分社 出版
重庆市市中区胜利路132号
新华书店重庆发行所 发行
科学技术文献出版社重庆分社印刷厂 印刷

开本:787×1092毫米1/32 印张:5.625 字数:12万
1987年6月第一版 1987年6月第一次印刷
科技新书目:146—300 印数:4000

统一书号:15176·735

定价:1.20元

前 言

减温器是用来调节蒸汽锅炉蒸汽温度的重要装置。在火力发电厂中,如果锅炉不装备减温器,那是不能运行的,因为没有减温器就没法将锅炉出口的蒸汽温度控制在额定范围内,会使锅炉汽轮机等的许多部件因超温而损坏或造成重大事故。减温器也是化工、轻工、医药、食品加工业等一切使用蒸汽的生产工艺流程中必不可少的装置,如不采用减温器,各种工艺流程将遭到破坏,化学反应不能正常进行,许多产品将由于过热而报废。

我国自五十年代设计、制造电站锅炉以来,同时也设计、制造了各种类型的减温器。在中、低压锅炉上大多采用表面式减温器,在高压、超高压和更高压力的锅炉上均采用喷水减温器。这些减温器对调节蒸汽温度、保护蒸汽过热器、保证机组正常运行均起到了重要的作用。但是,在过去三十多年来的运行实践中,减温器也不断出现各种故障,严重时还导致停炉事故。正因为许多工业锅炉用减温器经常发生问题,所以制造和运行部门进行了不少试验研究。国家对某些减温器还下达了课题,进行专题研究,并组织力量对一些新型减温器进行国家鉴定试验。

迄今,我国还没有一本论述减温器的专著。国外的文献中,只是在“蒸汽锅炉”或“蒸汽过热器”一类书籍中附带提及,也未见到论述减温器的专著。本书的问世就是企图填补这方面的不足。

本书介绍各类减温器的减温原理、结构形式、设计原则、运行准则和试验方法。书中汇总了我国三十年来对减温

器的试验研究成果、设计数据和运行经验以及事故原因的分析，同时还介绍了国外有关减温器的先进技术。本书的目的旨在给蒸汽动力专业的设计人员提供减温器的设计依据，帮助运行人员提高运行水平。

本书初稿完成后，曾由张昌煜、董世份同志审阅，他们提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

作者

一九八六年十月

目 录

第一章 蒸汽温度调节的基本要求.....	(1)
第一节 蒸汽温度的稳定性要求.....	(1)
第二节 对蒸汽温度调节设备的基本要求.....	(4)
第三节 蒸汽温度的调节方式.....	(6)
第二章 减温器的基本概念.....	(15)
第一节 减温器的任务.....	(15)
第二节 减温器的布置位置.....	(17)
第三节 减温器的容量.....	(22)
第四节 减温器的分类.....	(24)
第三章 表面式减温器.....	(27)
第一节 表面式减温器的基本原理和传热特性.....	(27)
第二节 调节饱和蒸汽温度的表面式减温器.....	(29)
第三节 调节过热蒸汽温度的表面式减温器.....	(33)
一、以锅水冷却的表面式减温器.....	(34)
二、以给水冷却的表面式减温器.....	(38)
第四节 表面式减温器的结构.....	(44)
一、U形管减温器.....	(44)
二、套管减温器.....	(52)
三、螺旋管减温器.....	(55)
第五节 表面式减温器的运行特性.....	(59)
一、冷却水管的运行工况和常见事故.....	(59)
二、减温器外壳的运行特性和常见事故.....	(65)
三、减温器的端部效应.....	(67)
四、减温器的汽塞和脉动.....	(69)
第六节 表面式减温器的热力计算.....	(75)
第四章 喷水减温器.....	(86)

第一节	喷水减温器的基本原理	(86)
第二节	减温水的水质标准和来源	(90)
第三节	喷水减温器的分类和结构	(94)
一、	多孔式喷水减温器.....	(94)
二、	旋涡式喷水减温器.....	(99)
三、	文邱利管喷水减温器.....	(103)
四、	接触式喷水减温器.....	(106)
第四节	减温水的汽化长度	(107)
第五节	自制冷凝水喷水减温装置	(114)
一、	基本原理.....	(114)
二、	喷水压头的建立和分配.....	(117)
三、	喷水速度和减温系统的调节性能.....	(120)
四、	自调节性能.....	(125)
五、	冷凝器的结构、容量、位高和回水管.....	(129)
第六节	喷水调节阀	(134)
一、	喷水调节阀的基本概念.....	(134)
二、	喷水调节阀口径的选取.....	(136)
三、	喷水调节阀阀芯型线的确定.....	(140)
第五章	减温器的试验研究	(149)
第一节	减温器试验的目的	(149)
第二节	表面式减温器的试验研究	(150)
一、	试验内容.....	(151)
二、	试验测点布置.....	(153)
三、	试验方法和测量结果的整理.....	(158)
第三节	喷水减温器的试验研究	(162)
一、	试验内容.....	(163)
二、	试验测点布置.....	(164)
三、	试验方法和测量结果整理.....	(168)
符号说明		
参考文献		

第一章 蒸汽温度调节的基本要求

第一节 蒸汽温度的稳定性要求

在火力发电、化工、食品、轻工、纺织等工业中都需要使用各种参数的蒸汽，并要求有稳定的蒸汽温度，温度的正或负的偏差都将影响到工艺流程的正常进行，甚至产生破坏性的影响。

蒸汽温度的正偏差即超温现象，会使有关的零件过热，从而加速材料蠕变，缩短其使用寿命。在化学工业生产工艺流程中，超温可能使化学反应失效；在食品、轻工生产工艺流程中，超温可能使产品变质，甚至报废。

蒸汽温度的负偏差也是不允许的。在火力发电厂中，蒸汽温度降低，一方面使蒸汽热焓下降，电厂的循环热效率下降；另一方面由于进入汽轮机的蒸汽温度偏低，使末级叶片上蒸汽的湿度增加，汽轮机效率下降。一般来说，蒸汽温度下降 $7\sim 10^{\circ}\text{C}$ ，汽轮机的热耗就要上升1%。在化学工业生产工艺流程中，蒸汽温度偏低可能使化学反应不完全，或根本不能进行。在食品、轻工生产工艺流程中，蒸汽温度偏低都会形成不合格的产品。

因此，各国对蒸汽锅炉出口的蒸汽温度的允许偏差均有明确规定，不允许超过规定的正、负偏差值。我国对电站锅炉和工业锅炉的出口蒸汽温度规定的允许偏差值如表1-1和表1-2所示。

世界各国或有关的制造厂家对蒸汽温度的允许偏差值都

表 1-1 电站锅炉出口蒸汽温度的允许偏差值
(中华人民共和国国家标准GB 753-85)

出口蒸汽额 定压力 (表压)	锅炉负荷变化 范围 (%)	出口蒸汽额定温度 (℃)	温度允许偏差值	
			+	-
25	75~100	400	10	20
39	70~100	450	10	15
100	70~100	540	5	10
140	70~100	540/540	5	10
170	70~100	540/540	5	10

表 1-2 工业蒸汽锅炉出口蒸汽温度的允许偏差值
(中华人民共和国国家标准GB 1921-80)

出口蒸汽额定压 力 (表压)	锅炉负荷变化 范围 (%)	出口蒸汽额定 温度 (℃)	温度允许偏差值	
			+	-
13~16	75~100	350	20	20
25	75~100	400	10	20

有类似的规定。

在规定允许偏差值的同时，一般还规定了在允许偏差值下运行的持续时间。因为在运行过程中，由于操作不当或某些不测因素的影响，蒸汽温度常产生一定的偏差。但偏差值即使在允许范围内，也不允许长时间地处在偏差状态下，因此还需要规定允许偏差值下的允许运行时间。对高压锅炉来说（蒸汽额定参数为100公斤/厘米²、510或540℃），于每次允许偏差值下的运行持续时间不得大于2分钟，在24小时内，于允许偏差值下的运行累计时间不得大于10分钟。

在某些高温蒸汽工作的地方,如高温过热器、高温再热器和各种蒸汽管道中,温度允许差值还取决于蒸汽温度的变化速度。应该使蒸汽温度的变化速度尽可能缓慢,以避免在管道壁和其它连接件上产生较大的热应力。这种热应力将加速受蒸汽加热的零部件材料的热疲劳,对一些特别热敏感的奥氏体钢,就可能产生裂纹。因此对厚壁蒸汽管道和联箱,在蒸汽温度大幅度变化时,均规定了允许的变化速度,一般应控制在 $3^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 以内。

在汽轮机中,如蒸汽温度变化过快,严重时将损坏汽轮机。因为转子和定子对温度的敏感性是不一样的,转子质量小、表面积大,容易随蒸汽温度变化而迅速胀、缩,而定子质量大,热惯性也就大,不易随蒸汽温度而胀、缩。在蒸汽温度骤然变化时,转子和定子的间隙处就会发生摩擦,以至损坏。蒸汽温度过快的变化还可能损坏法兰连接的密封等。

由上可见,蒸汽温度的稳定性是衡量蒸汽质量的重要指标之一。必须通过各种蒸汽温度调节设备,使蒸汽温度尽量保持稳定。

由锅炉产生的过热蒸汽,如果没有蒸汽温度调节设备来控制,那么,蒸汽温度的变化将是很大的。这种变化与锅炉特性和运行方式有密切关系。锅炉运行中影响蒸汽温度的主要因素有:

1. 锅炉负荷;
2. 燃料性质;
3. 给水温度;
4. 各段受热面的沾污程度;
5. 过剩空气量。

其中第4、5项因素与运行操作有密切关系。这些人为因

素所造成的蒸汽温度变化应该通过改进操作来解决，因而不是蒸汽温度调节设备的任务。而第1、2、3项因素是与运行操作无关的，这些因素所造成的蒸汽温度变化就必须由蒸汽温度调节设备来加以解决，这就是蒸汽温度调节设备的工作范围。

第二节 对蒸汽温度调节设备的基本要求

蒸汽温度调节设备是锅炉上的重要装置之一，也是所有使用蒸汽的工业生产工艺流程中的重要部件，它的性能好坏将直接影响到以后的工艺流程。因此，所有使用蒸汽温度调节设备的工业生产工艺流程中均对蒸汽温度调节设备提出了一定的要求。概括起来，基本要求如下：

(1) 结构简单、运行可靠

各种蒸汽温度调节设备的结构必须是最简单的，运行要完全可靠。也不能因装备了蒸汽温度调节设备而影响到其他零部件的可靠性。例如：决不允许装设了蒸汽温度调节设备使其前面的蒸汽温度无限升高，造成前面设备的过热损坏。

(2) 蒸汽温度稳定、波动微小

在锅炉正常运行时，在规定的负荷范围内，必须保持蒸汽温度的稳定性，正负偏差的波动幅度均应在允许范围内，并尽可能最小。

(3) 动作迅速、过程连续

在温度调节过程中，蒸汽温度变化的时间常数要小。也就是说，蒸汽温度调节设备必须是灵敏的。不允许有较大的延迟时间。同时温度的变化过程必须是连续的，不应该有突跳现象。

(4) 调节均匀、偏差最小

蒸汽经过调节设备后的温度应该是均匀的。尤其在其后是一组并联管束时，更要保证各根管子有均匀的进口蒸汽温度，否则就可能造成个别管子的超温和过热。

(5) 不影响系统的效率

锅炉或其他热力系统中装设蒸汽温度调节设备后不允许影响锅炉或工质循环系统的效率，在锅炉上也不应成为增加受热面的理由。

(6) 可以实现自动控制

蒸汽温度调节设备应既可手动操作，也可自动控制蒸汽温度。

(7) 蒸汽温度调节设备要求重量轻、体积小、价格便宜。

蒸汽温度调节设备容量的选择是非常重要的。容量太小，调节幅度不够，可能造成超温等现象；容量太大，造成不必要的资金浪费。因此，调节设备一般按正常的运行条件来确定，必须使调节设备能满足蒸汽温度变化的需要，而不能按特殊工况来确定。

在锅炉上影响选择蒸汽温度调节设备容量的因素如下：

首先是过热器的结构形式，主要是其受热特性。一些中、高压锅炉上采用纯对流的过热器系统时，要求较大容量的蒸汽温度调节设备；在现代大型锅炉上，均采用辐射-对流复合型的过热器系统，这种系统使蒸汽温度随锅炉负荷的变化比较平稳，因此，蒸汽温度调节设备的容量可以小些。

其次，炉膛型式和煤质对蒸汽温度调节设备的容量的选择也有影响。当燃用多灰份燃料时，必须考虑到炉膛可能的严重沾污，因此需要有较大容量的蒸汽温度调节设备。液态

排渣炉膛中若燃用灰熔点变化很大的煤质时，也需要较大容量的蒸汽温度调节设备。对于燃用两种燃料（例如煤粉和高炉煤气）的锅炉，就需要容量特别大的蒸汽温度调节设备。

再次，在设计新型锅炉时，一般蒸汽温度调节设备的容量要选得大一些，要备有一定的裕量，以便在锅炉投运后，对某些受热面布置不当进行调节。

第三节 蒸汽温度的调节方式

总的来讲，蒸汽温度的调节方式可分为两大类，即烟气侧调节和蒸汽侧调节，两者各有利弊。

在蒸汽侧对蒸汽温度进行调节就是用减温器来降低蒸汽的热焓，此时，从烟气输入蒸汽过热器的热量是不减少的，而且有少量增加，因为烟气与减温后的蒸汽之间的温压有所变大。若蒸汽在减温器中放出的热量被锅水或给水带走，则锅炉的饱和蒸汽产量将有所增加，这也促使蒸汽温度下降。

在蒸汽侧调节蒸汽温度的主要优点是精确度高。同时，只要减温器的结构合理，就可使过热器各单管中得到温度均匀的蒸汽。这种调节方式要求锅炉具有较大尺寸的蒸汽过热器，以便使锅炉在低负荷时能达到额定的出口蒸汽温度。较大的过热器尺寸意味着钢材耗量增加，这是这种调节方式的缺点。

在烟气侧调节蒸汽温度时，一般有两种方式，就是改变经过蒸汽过热器的烟气量或改变进入过热器的烟气温度。常见的方法有摆动式燃烧器、烟气再循环和烟气调节挡板。在改变旧式锅炉烟气量时，常用减少烟气量的办法，即烟气旁通，这是不经济的办法，因为增加了锅炉的排烟损失。目前

采用的办法是增加烟气量，即烟气再循环。采用烟气侧调节时，锅炉负荷对各级过热器后的蒸汽温度影响不大。

烟气侧调节时，蒸汽温度可以按需要升高或降低，而蒸汽侧调节时只能降低蒸汽温度。烟气侧调节时，蒸汽温度的调节精度较差，而蒸汽侧调节时，可调得十分精细。

在现代大容量锅炉上，一般均同时采用两种调节方式。其中烟气侧调节作为蒸汽温度的主要调节方式，或称为粗调节；蒸汽侧调节则利用其调节的精确性，作为辅助调节，或称为细调节，最终达到调节锅炉出口的蒸汽温度。国产锅炉常用的蒸汽温度调节方式见表1-3。

表 1-3 国产锅炉上常用的调温方式

调温方式		无再热器的锅炉 炉汽温 调节	有再热器的锅炉				
			过热汽 温调节	再热汽温调节			
				无烟 煤、低 质煤	烟煤	褐煤	油、气
蒸汽侧	表面式减温器	√					
	喷水减温器	√	√	√		√	
	汽-汽热交换器			√		√	
烟气侧	摆动式燃烧器	√	√				
	烟气再循环				√		√
	烟气调节挡板	√		√	√		

摆动式燃烧器就是利用其喷口的上下摆动来改变火焰的中心位置，也就是改变炉膛受热面积，使炉膛出口的烟气温 度（即过热器的进口烟气温 度）变化，从而调节蒸汽温度。

图1-1为摆动式燃烧器的示意图。上下摆动 $20\sim 30$ 度，炉膛出口的烟气温度可变化 $110\sim 140^{\circ}\text{C}$ ，蒸汽温度可调节 $40\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。用摆动式燃烧器调节蒸汽温度是非常灵敏的，因为烟气温度的变化是同时作用在整个过热器的所有受热蛇形管上，因此延迟很小。此种蒸汽温度调节方式不需要增加额外的受热面，也不需要其他的功率消耗。

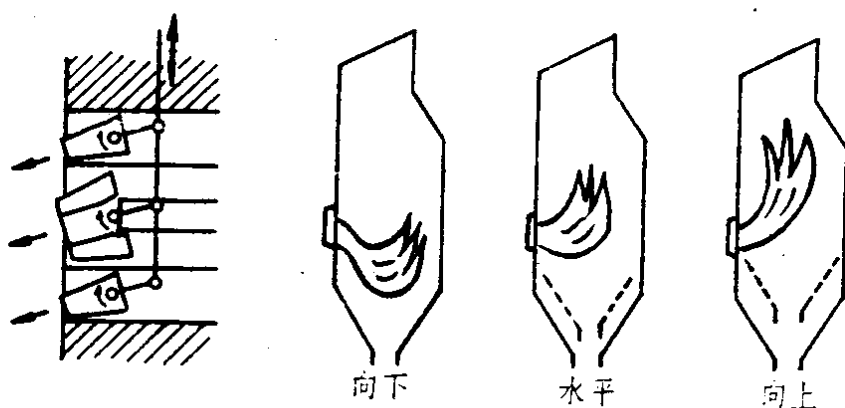


图1-1 摆动式燃烧器示意图

与摆动式燃烧器的原理相同，依靠上下排燃烧器负荷的变化，也可改变炉膛火焰的中心位置，从而调节蒸汽温度。锅炉满负荷时，全部燃烧器投入运行，负荷下降时逐步停用下排燃烧器，使火焰没有受到炉膛下部蒸发受热面的冷却，炉膛出口的烟气温度就能与满负荷时相接近，烟道中各级受热面处烟气温度的下降也将相当缓慢。这对于满负荷时排烟温度较低的锅炉是有利的，低负荷时空气预热器中的烟气温度也不会低于露点。

烟气再循环是利用锅炉尾部烟道中的一部份烟气 ($250\sim 350^{\circ}\text{C}$)，通过再循环风机从炉膛下部送入，以改变锅炉的辐射和对流受热面的吸热比例，从而调节蒸汽温度。烟气

再循环时,炉膛中的平均烟气温度下降,烟气在炉膛中的停留时间缩短,炉膛四壁的吸热量减少,而流经蒸汽过热器的烟气量增加,从而使蒸汽温度升高。图1-2表示各级受热面的吸热量与再循环烟气量的关系,纵座标为有烟气再循环和无烟气再循环时的吸热量之比,横座标为烟气再循环率 r ,即再循环烟气量与总烟气量之比。图中可以看到,再循环烟气量增加,炉膛吸热量减少(曲线1),而烟道中的各受热面吸热量增加(曲线2、3、4、5、6、7)。

烟气再循环对蒸汽温度的作用与增加过量空气相同,但烟气再循环较为经济,因为没有增加锅炉的排烟损失。

烟气再循环仅用在蒸发受热面和蒸汽过热器依次排列的锅炉上,而不能用在炉膛中有辐射过热器的锅炉上。

应用烟气再循环时,即使锅炉在很低的负荷下也能保持出口蒸汽温度达到额定值。烟气再循环也允许锅炉有较高的启动速度,而不必担心蒸汽过热器被烧坏。

烟气再循环的缺点是需要配备再循环风机,此时的烟气温度在 300°C 左右,又含有飞灰,因此风机的磨损将是突出的问题,此外还增加了工厂用电量。再循环风机的容量一般

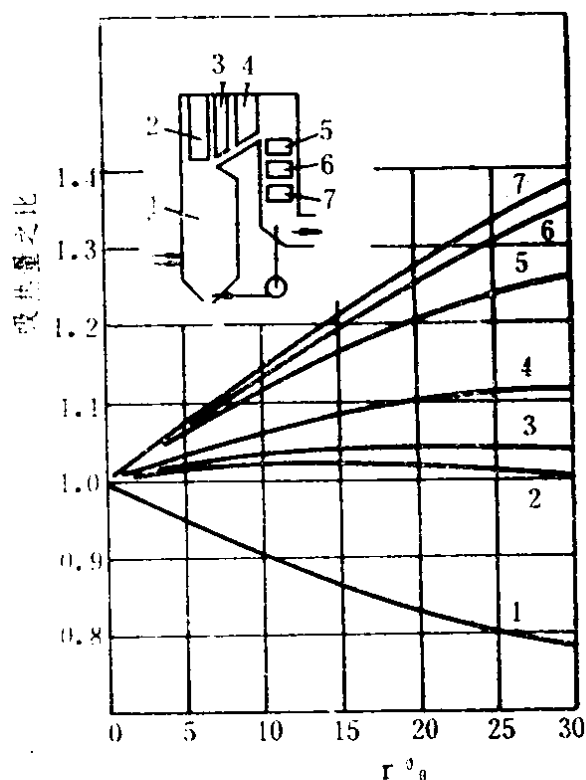


图1-2 各级受热面吸热量与再循环烟气量的关系

按锅炉满负荷时烟气量的20%计。采用烟气再循环使烟道中的阻力增大，因此也增大了风机所需的压头。

也有将再循环烟气从炉膛上部送入，以降低炉膛出口烟气温度。改变送入炉膛的热风温度，也可调节蒸汽温度，其作用与烟气再循环相同。

烟气调节挡板是利用改变烟气流量来调节蒸汽温度。在较早期的锅炉上，常采用过热器和省煤器并列布置的方式，在两种受热面后设置烟气调节挡板，以调节两烟道的烟气量。

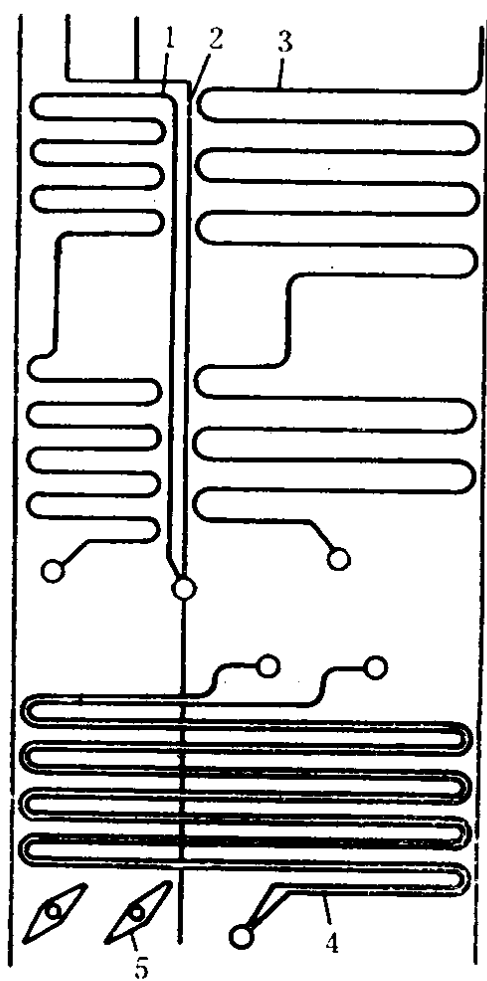


图1-3 烟气调节挡板

- 1.过热器， 2.烟道隔墙
3.再热器， 4.省煤器
5.烟气调节挡板

在锅炉低负荷时，可以节制省煤器烟道中的烟气流量，迫使大部份烟气流经过热器，以提高蒸汽温度。高负荷时则相反。在现代锅炉上常采用过热器和再热器并列布置的方式，如图1-3所示。

烟气调节挡板常布置在 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ 的烟气中，以防止变形。挡板一般由耐热铸铁或耐热钢制成，在某些情况下还涂上搪瓷涂料。可以做成冷却的或不冷却的，冷却介质为水或空气。

烟气调节挡板的优点是结构简单、操作方便，缺点是对蒸汽温度调节的

延迟较大；而且挡板的开度也只有在 0~40% 的范围内较为有效。

蒸汽侧调节蒸汽温度就是在减温器中用冷却水直接或间接地冷却蒸汽,进行调温。直接冷却的有喷水减温器,间接冷却的有表面式减温器。有关减温器的详细内容将在后面几章中加以描述。

在有再热器的锅炉上还有一种调节再热蒸汽温度的方法,这就是汽-汽热交换器。是用过热蒸汽加热再热蒸汽,控制再热蒸汽量就可以按需要调节再热蒸汽温度。汽-汽热交换器一般采用U型管套管的结构,国产670吨/时锅炉用的汽-汽热交换器见图1-4。其外套管为 $\phi 194 \times 11$ 毫米,内装7

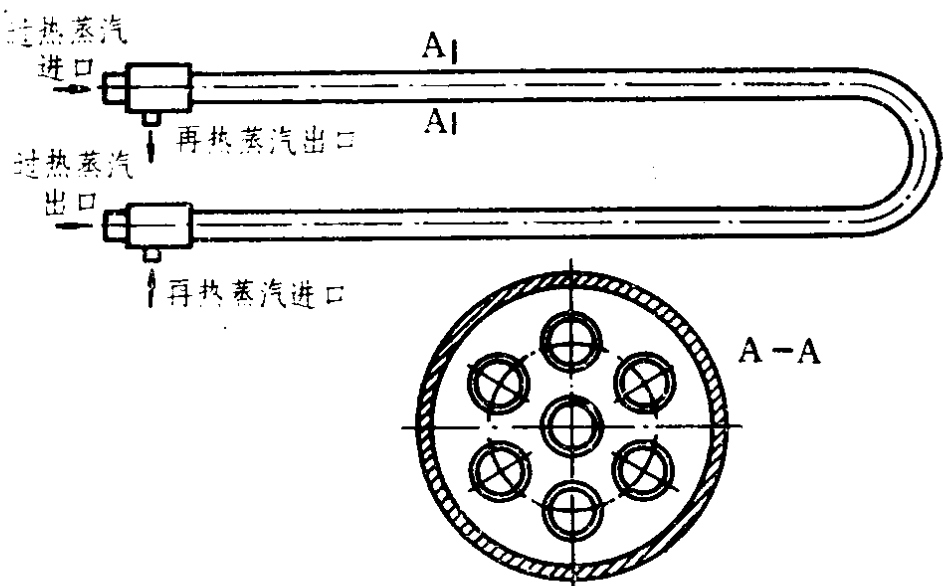


图1-4 汽-汽热交换器

根 $\phi 42 \times 5$ 毫米的U型管。过热蒸汽从小管中流过,再热蒸汽在小管之间流动。在汽-汽热交换器中,由于过热蒸汽向管壁和管壁向再热蒸汽的放热系数均较高,因此传热系数可达