

U型管废热锅炉沸腾传热恶化及其消除

陈听宽 陈宣政 贾岫庄

(能源与动力工程系)

摘 要

本文针对大型合成氨装置U型管转化气废热锅炉爆管问题,在高压电加热水回路试验系统上研究了垂直U型管弯管段沸腾传热特性,得出了发生传热恶化的规律和壁温飞升特性,提出了用管内扰流子及改进U型管结构来消除传热恶化,以保证U型管废热锅炉工作的可靠性。

关键词: 合成氨; 废热锅炉; 沸腾传热

中国图书资料分类法分类号: TK 224

0 前 言

在年产30万t的大型合成氨装置中,采用垂直U型管废热锅炉回收二段转化炉出口高温工艺气的热量,每小时可产生10.4 MPa高压蒸汽180t,这对提高合成氨装置的经济性具有很大的意义。可是,该锅炉在运行中,在U型管弯管段,经常发生爆管事故,严重影响生产的安全性。为了解决废热锅炉爆管问题,对废热锅炉的水循环特性进行了全面的分析;在高压水回路系统上,对U型管弯管段的传热特性进行了深入的研究,得出了U型管中发生传热恶化的规律和壁温特性,弄清了U型管中发生传热恶化的机理;在此基础上,提出用管内扰流子和改进的U型管圈结构来消除传热恶化,通过热态试验,具有很好的效果。

1 U型管废热锅炉水循环特性

垂直U型管废热锅炉的受热面是由28种弯管尺寸的646根U型管组成,共有受热面719 m²。锅炉采用自然循环,依靠高置汽包所产生的压头来保证锅炉的水循环。该锅炉同时备有辅助循环泵及文丘利喷射器,在锅炉启停及低负荷运行时投入。根据水循环计算^[1],得出不同负荷下水循环的平均特性和外圈受热最强偏差管的水循环特性,如表1所示。

收到日期: 1990-04-19

本课题为国家“七五”科技攻关项目,并得到中国石油化工总公司和国家自然科学基金资助。

表1 锅炉水循环特性

名 称	平均受热管			受热最强管		
锅炉负荷 (%)	100	60	20	100	60	20
单管产汽量 D (kg/h)	279	167	55	362	217	72
循环水量 M (kg/h)	1695	1672	1435	1442	1493	1349
循环水速 w_0 (m/s)	2.0	1.97	1.69	1.7	1.76	1.59
质量流速 G (kg/m ² ·s)	1364	1343	1152	1159	1200	1084
循环倍率 K	6.1	10	26	4	6.9	18
U管底折算水速 w'_0 (m/s)	1.83	1.87	1.66	1.49	1.63	1.55
U管底折算汽速 w''_0 (m/s)	1.89	1.13	0.38	2.46	1.47	0.49
U管底混合物流速 w_m (m/s)	3.72	3.0	2.04	3.95	3.1	2.04

在不稳定工况,特别是在事故停炉等特殊工况下,如果降压速度过快,则将影响水循环,甚至发生水循环事故。在降压过程中,工质饱和温度随着降低,使上升管中含汽率增加,如果下降管中没有蒸汽形成,则回路的有效压头增加,因而对水循环是有利的。但是,如果降压速度过快,下降管中工质和金属的蓄热量使下降管中形成蒸汽,则由于回路的运动压头减小,而下降管的阻力增加,因而对回路的水循环不利,可能导致U型管爆管事故。

根据高位汽包下降管中不产生蒸汽的条件,由计算得出允许降压速度为0.006 MPa/s,即0.36 MPa/min。厂方规定系统的降压速度应不超过0.2 MPa/min,这对水循环是可靠的。

如果降压速度大于上述数值,在下降管中有蒸汽产生,经计算得出的不同降压速度时的水循环特性如表2所示。

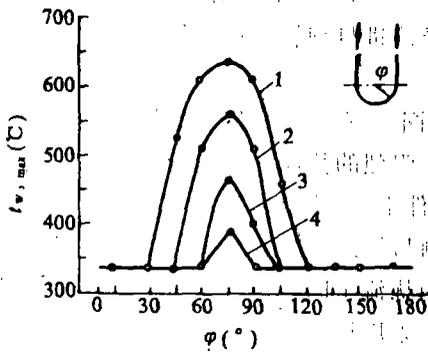
表2 不同降压速度时的水循环特性

$\partial p/\partial \tau$ (MPa/s)	平均受热管		受热最强管	
	w_0 (m/s)	K	w_0 (m/s)	K
0	2.0	6.1	1.7	4
0.01	1.87	5.0	1.54	3.3
0.02	1.74	4.2	1.41	2.8

2 U型管弯管段沸腾传热恶化特性

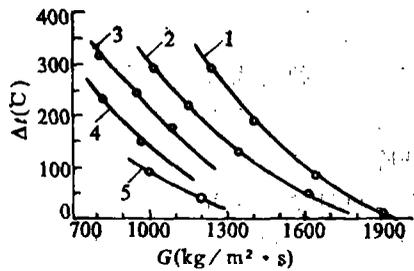
为了弄清废热锅炉爆管原因,在高压电加热水回路系统上,于废热锅炉运行参数条件下,对U型管中发生传热恶化的特性进行了试验研究^[2]。试验管采用 $\phi 25\text{mm} \times 2\text{mm}$ 不锈钢管,弯管段弯管半径700mm,加热段展开长度2.38m,直段高度7.8m。在U型管弯管段外壁11

个截面上共安装 60 对 0.2 mm 镍铬-镍硅热电偶, 用以测量管壁温度沿弯管长度和管子周界的分布。试验是在废热锅炉运行压力 $p=10.4\text{MPa}$ 条件下进行, 试验所用质量流速 $G=800\sim 2000\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$, 热负荷 $q=80\sim 330\text{kW/m}^2$ 。图 1 表示 U 型管弯管段内侧壁温飞升时的壁温分布。在弯管段内侧, 当有蒸汽形成时, 在 $\varphi=45\sim 105^\circ$ 间, 也就是从弯管段下行段中部到上行段 15° 间发生传热恶化, 引起壁温飞升。在 $\varphi=75^\circ$ 处, 也就是在管子底部上游 15° 处, 飞升值最大。沿管子周界, 管子内半侧的壁温离顶点越近, 飞升值越大, 而管子外半侧的壁温则保持正常, 没有飞升, 说明在 $\varphi=45\sim 105^\circ$ 范围内存在着严重的汽水分层。随质量流速增加, 壁温飞升减小, 且壁温飞升的区域缩小; 随热负荷增加, 则壁温飞升增大。根据试验结果, 弯管段内外侧最大壁温差 Δt 与质量流速 G 和热负荷 q 的关系如图 2 所示。



1— $G=1000\text{kg/m}^2\text{s}$ 2— $G=1200\text{kg/m}^2\text{s}$
 3— $G=1350\text{kg/m}^2\text{s}$ 4— $G=1800\text{kg/m}^2\text{s}$
 $p=10.4\text{MPa}$, $q=250\text{kW/m}^2$

图 1 U 型管弯管段内侧壁温飞升时的壁温分布



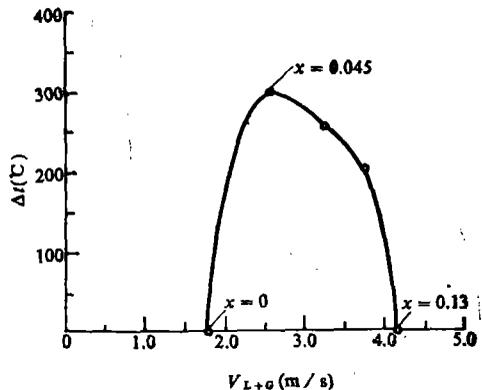
1— $q=330\text{kW/m}^2$ 2— $q=250\text{kW/m}^2$
 3— $q=180\text{kW/m}^2$ 4— $q=120\text{kW/m}^2$
 5— $q=80\text{kW/m}^2$

图 2 压力为 10.4MPa 时, U 型管弯管段管子内侧与外侧间的最大壁温差

由上述结果可以看出, 在垂直 U 型管中, 当弯管段中产生蒸汽形成两相流时, 由于离心力和重力的双重作用, 发生明显的汽水分层, 使管子内侧的壁温发生飞升, 造成爆管事故;

含汽率进一步增加, 则壁温飞升值又逐渐降低; 当达到一定含汽率时, 壁温飞升消失, 图 3 示出了管子内、外侧最大壁温差随汽水混合物速度 V_{L+G} 的变化情况。当单相水达到饱和产生蒸汽时, 壁温差就开始飞升; 当蒸汽干度 x 到 0.045 时, 壁温差达到最大值。进一步增加含汽率, 使混合物流速增加, 壁温差下降; 当蒸汽干度 x 到 0.13 时, 壁温差消失。

由废热锅炉的水循环特性可知, 在 60%~100% 负荷范围内, U 型管外圈管的质量流速约为 $1150\sim 1200\text{kg/m}^2\text{s}$ 左右, U 型管底部的含汽率约为 0.05~0.125 左右, U 型管外壁最大热负荷约为 300kW/m^2 左右。在工作压力



$p=10.4\text{MPa}$, $G=1200\text{kg/m}^2\text{s}$, $q=330\text{kW/m}^2$

图 3 管子内、外侧壁温差随混合物流速的变化

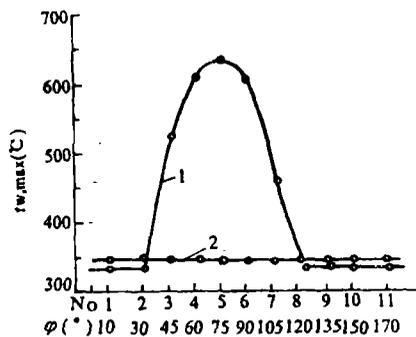
$p=10.4\text{MPa}$ 时,上述参数正好处于传热恶化区,管子内、外侧的最大壁温差可达 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,因而容易发生爆管事故。由此可见,该锅炉原设计质量流速偏小,如将循环泵连续运行,根据实际测量,约可使循环水速提高 0.3m/s 左右,质量流速约可提高到 $1400\sim 1500\text{ kg/m}^2\text{s}$,此时仍处于传热恶化区,管子内外侧的最大壁温差约为 $100\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,工作可靠性有所提高,但经一段时间运行后,仍可能由于壁温波动而发生疲劳破坏。

3 U型管沸腾传热恶化的消除

为了提高U型管废热锅炉的工作可靠性,必须消除上述由于汽水分层引起的传热恶化。为此,可以用提高循环水速及降低热负荷等办法来解决,但这对现有锅炉来说非常困难。根据U型管发生传热恶化的机理,可以采用管内扰流子及改进U型管结构来解决。

3.1 用管内扰流子消除U型管传热恶化

管内扰流子是用 6mm 宽的不锈钢片绕成螺旋形线圈,安装在U型管弯管段发生传热恶化的区段,利用扰流子使流体发生旋转,在流体中产生强烈的扰动,对消除汽水分层十分有利。螺旋线圈的节距取 80mm ,在压力 $p=10.4\text{MPa}$ 条件下,当热负荷为 330kW/m^2 时,质量流速降到 $800\text{kg/m}^2\text{s}$,管壁温度未发生飞升,管子内侧与外侧的壁温差小于 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$,一般在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,可见壁温分布十分均匀。图4表示采用与不采用扰流子时的壁温分布。由图4可见,采用扰流子对消除汽水分层是十分有效的。根据试验,采用扰流子时,其阻力将比光管增加一倍。但是,由于所需的扰流子长度不大,其长度在U型管总长度中所占比例很小,因此,由此引起的阻力增加不多,对锅炉水循环不会有大的影响。扰流子结构简单,因此可以推荐作为消除U型管传热恶化的一种措施。



1—光管, $q=250\text{kW/m}^2, G=1000\text{kg/m}^2\text{s}$,
2—有扰流子, $q=330\text{kW/m}^2, G=800\text{kg/m}^2\text{s}$
图4 采用扰流子时的壁温分布与光管的比较

3.2 改进U型管结构消除传热恶化

根据对垂直U型管弯管段两相流型特性的研究,在低质量流速和低含汽率时,两相流处于分层流动,使弯管段内侧得不到水的冷却,引起壁温飞升。又从气泡运动规律来看,在U型管下行段,由于气泡所受的浮力作用方向与流动方向相反,使气泡运动速度小于水流速

度,因而气泡易于积聚在内侧管壁,引起壁温飞升.当气泡运动到管子上行段时,由于气泡所受的浮力作用方向与流动方向一致,气泡运动速度快于水流速度,气泡不易积聚,因而壁温飞升消失.在垂直向上或向下的流动中,当壁面上形成的气泡长大到一定大小时,就将脱离壁面进入流体的中心流动,因而在壁面上有较好的冷却条件.在水平或曲线管中,由于受重力和离心力的作用,气泡偏于管子的上侧和内侧流动,因而在管子的上侧和内侧容易发生传热恶化.由以上分析可知,在不同流向的管子中,以微倾斜向下流动的条件最差,传热恶化最易发生.也正由于此,所以在垂直U型管中,在下行段接近底部处的传热条件最差,因而壁温飞升最为严重.

由以上分析,为了改善垂直U型管的传热特性,应设法消除U型管中平缓下降的下行段,因而提出采用底部倾斜上升的改进型管圈来代替普通的U型管结构,以改善其传热特性.

试验用的改进型U型管结构和热电偶布置如图5所示.试验管采用 $\phi 25\text{mm} \times 2\text{mm}$ 不锈钢管,两直管间的中心距离为1400mm,弯管段进口弯头 $R_1/d=3$,出口弯头 $R_2/d=6$,底部倾斜管段的倾角取 18° .加热段展开长度2.38m与原U型管试验相同.在试验段外壁12个截面上共布置36对 $\phi 0.2\text{mm}$ 镍铬-镍硅热电偶,以测量管壁温度沿管子的分布.

根据试验结果,改进型U型管的传热特性与原U型管相比有很大的改善.在低含汽率区,在进口端弯头处发生传热恶化的质量流速比原U型管降低很多.由图6可见,在质量流速低

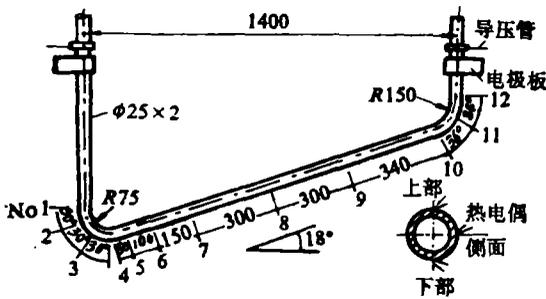
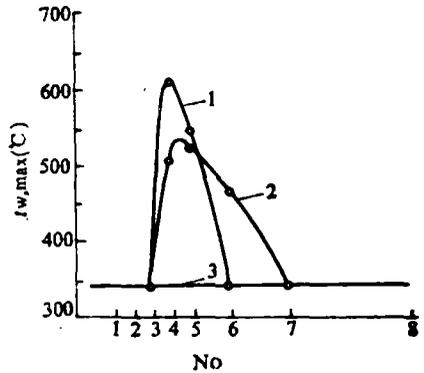


图5 改进型U型管结构与热电偶布置

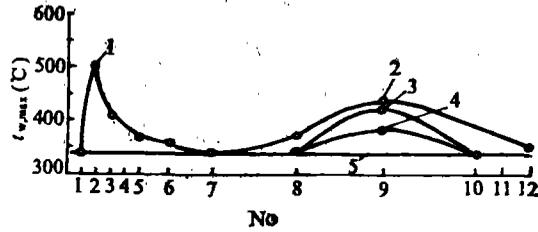


1— $G=500\text{kg/m}^2\text{s}$, $x_{\text{max}}=0.06$, 2— $G=750\text{kg/m}^2\text{s}$, $x_{\text{max}}=0.17$, 3— $G=1050\text{kg/m}^2\text{s}$

图6 $p=10\text{MPa}$, $q=330\text{kW/m}^2$ 条件下不同质量流速时改进U型管进口弯头处的最大壁温分布

时,在进口弯头处发生传热恶化,弯头后即逐步消失.随质量流速增加,壁温飞升减小.当 $G > 1050\text{kg/m}^2\text{s}$ 时,即未有传热恶化发生.

改进型U型管的传热特性分进口弯头,倾斜管段和出口弯头三部分.在试验中,出口弯头均未发生传热恶化.图7表示沿管段发生传热恶化的情况.在低含汽率时,在进口弯头和倾斜管段均未发生传热恶化.当进口含汽率 $x_{i,n}$ 增加到0.17时,在倾斜管段开始发生传热恶化,即管子上部发生液膜撕破,使壁温升高.随含汽率增加,壁温飞升有所增加,传热恶化区域在截面8~10间,基本上保持不变.当 $x_{i,n}$ 增加到0.4时,在进口弯头处也发生传热恶化,在弯头后壁温飞升消失,到截面3处再度飞升,形成了这种管型特有的温度分布特性.



1— $x=0.43(x_{in}=0.4)$, 2— $x=0.47(x_{in}=0.4)$
 3— $x=0.4(x_{in}=0.33)$, 4— $x=0.23(x_{in}=0.17)$, 5— $x_{in}<0.17$

图7 $p=10\text{MPa}$, $q=330\text{kW/m}^2$, $G=1050\text{kg/m}^2\text{s}$ 时发生传热恶化的壁温分布

由此结果可见, 采用这种管型, 在废热锅炉参数条件下, 工作是安全的, 只有在更高的含汽率时才发生壁温飞升。

根据试验结果, 改进管型在弯管段的阻力约比原U型管弯管段增加20%, 比管内扰流子的阻力要小得多, 因而对水循环不会有什么影响。采用改进管型, 由于统一了弯管半径, 其制造工艺更为简单。

由上述结果可见, 在废热锅炉运行条件下, 采用改进型U型管结构代替普通U型管结构, 在防止发生传热恶化方面具有明显的优点, 可予以推荐采用。(责任编辑 蒋慧妹)

参 考 文 献

- 1 陈学俊, 陈听宽主编. 锅炉原理. 北京: 机械工业出版社, 1981
- 2 陈听宽等. 垂直U型管两相流流型和传热研究. 化工学报, 1985, (4): 426~451

BOILING HEAT TRANSFER DETERIORATION AND ITS ELIMINATION FOR U-SHAPED WASTE HEAT BOILERS

Chen Tingkuan Chen Xuancheng Jia Xiuzhuang
 (Department of Energy and Power Engineering)

Abstract

Vertical U-shaped tubes have been used in some waste heat boilers of large synthetic ammonia plants. In operation, accidents of tube failure at the bend due to overheating occur frequently. In order to solve the problem, a study of boiling heat transfer in the bend of vertical U-shaped tube in an electrically heated high pressure water loop was conducted, the law of boiling heat transfer deterioration and the wall temperature rise performance were obtained, and an inserted turbulator and modified U-shaped tubes with inclined upward bottom were recommended for waste heat boilers to eliminate the boiling heat transfer deterioration in synthetic ammonia plants for ensuring safety operation.

Keywords: synthetic ammonia, waste heat boiler, boiling heat transfer