doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.02.006

设计计算

干饱和水蒸气泄放质量流量计算解析

吴全龙[1,2],后文杰[2],胡熙玉[1]
(1.国家市场监督管理总局重点实验室(爆破片装置安全技术),沈阳 110179;
2.上海华理安全装备有限公司,上海 201109)

摘　要:由于介质的特殊性,水蒸气超压泄放质量流量计算公式不同于一般压缩气体。基于干饱和水蒸气超压泄放质量流量计算公式Napier(纳皮尔)方程的演变过程,提出了水蒸气超压泄放质量流量理论计算模型,并与ISO 4126-7:2013标准水蒸气超压泄放质量流量计算公式进行了对比。结果表明,泄放压力较低时(<0.135 MPa),采用Napier方程计算质量流量会产生较大偏差,需进行修正;泄放压力为0.135~14.0 MPa时,Napier(纳皮尔)方程与理论模型(ISO 4126-7:2013计算值)计算偏差在±3%之内;泄放压力为14.0~21.5 MPa时,引入修正系数的计算值与理论模型计算值偏差在±3%之内;泄放压力大于21.5 MPa时,采用Napier方程的修正式进行计算,与ISO 4126-7:2013计算值相比,产生的偏差超过3%,最高达到9%。研究给出了不同压力范围的Napier(纳皮尔)方程修正方法,并根据ISO 4126-7:2013数据拟合得出泄放压力-水蒸气压力系数关系曲线,可为工程应用提供参考。

关键词:干饱和水蒸气;质量流率;质量流量;水蒸气压力系数
中图分类号:TQ055.8;T-65　　**文献标志码:**B

Analytical calculation of relief mass flow rate for dry saturated steam

WU Quanlong[1,2],HOU Wenjie[2],HU Xiyu[1]
(1.Key Laboratory of Bursting Disc Devices Safety Technology,State Administration for Market Regulation,Shenyang 110179,China;2.Shanghai Huali Safety Devices Co.,Ltd.,Shanghai 201109,China)

Abstract: Due to the unique properties of water vapor,the calculation formula for mass flow rate during overpressure relief of steam differs from that of general compressed gases.Based on the evolution of the Napier equation for calculating the mass flow rate of dry saturated steam during overpressure relief,this paper proposes a theoretical model for steam overpressure relief mass flow rate.The theoretical model is compared with the calculation formula specified in ISO 4126-7:2013.Results show that when the relief pressure is low (<0.135 MPa),the use of the Napier equation causes significant deviations and requires correction.For relief pressures between 0.135~14.0 MPa,the deviation between the Napier equation and the theoretical model (ISO 4126-7:2013 calculation) remains within ±3%.When the relief pressure ranges from 14.0~21.5 MPa,the calculated values with the modified coefficient deviate from the theoretical model by less than ±3%.For relief pressures exceeding 21.5 MPa,the deviation between the modified Napier equation and ISO 4126-7:2013 calculations exceeds 3%,reaching up to 9%.This research provides correction methods for the Napier equation in different pressure ranges and establishes a relief pressure versus steam pressure coefficient relationship curve based on ISO 4126-7:2013 data,offering references for engineering applications.

Key words:dry saturated steam;mass flow rate;Napier equation;steam pressure coefficient

收稿日期:2024-10-10　**修回日期:**2024-11-12
基金项目:国家市场监督管理总局科技计划项目(2024MK163)

符号说明

A——泄放面积，mm^2；
G——质量流率，$kg/(s\cdot m^2)$；
ρ——介质密度，kg/m^3；
v——介质比容，m^3/kg；
h_1——喷嘴入口滞止焓值，J/kg；
h_{tj}——假定喉部压力下焓值，J/kg；
K_d——泄放系数；
K_N——水蒸气质量流量与入口压力和喷嘴泄放面积乘积之比；
K_p——理论质量流量与纳皮尔质量流量之比；
K_m——Napier方程修正系数；
k——气体绝热指数（C_p/C_v）；
k_s——水蒸气压力系数；
I——积分结果，m^2/s^2；
M——摩尔质量，kg/kmol；
P_0——泄放侧压力（绝对压力），MPa；
P_1——泄放压力（绝对压力），MPa；
P_1'——泄放压力（绝对压力），bar；
P_{tj}——假定喉部压力（绝对压力），MPa；
T_1——泄放温度，K；
u——流速，m/s；
W_s——质量流量，kg/h；
W_T——理论质量流量，kg/h；
W_N——纳皮尔质量流量，kg/h；
Z——压缩系数；

0 引言

目前在ASME Boiler & Pressure Vessel Code，Section Ⅷ *Rules for overpressure protection*，API 520 *Sizing, selection, and installation of pressure-relieving devices*等标准规范中，干饱和水蒸气（水蒸气含量不小于98%，过热度不大于11 ℃）超压质量流量通常按以下公式进行计算[1-2]：

当$P_1\leqslant$10.3 MPa时：

$$W_s=5.25K_dAP_1 \tag{1}$$

当10.3 MPa<$P_1\leqslant$22 MPa时：

$$W_s=5.25K_dAP_1\left(\frac{27.6P_1-1000}{33.2P_1-1061}\right) \tag{2}$$

很少有资料详细介绍式（1）和式（2）的来源，了解其推导过程对合理使用公式非常有必要。

早在19世纪，RANKINE等通过喷嘴流动泄放试验，测定了干饱和水蒸气在不同入口压力（100~700 psia）的质量流量。结果表明，水蒸气的质量流量与入口压力和喷嘴泄放面积乘积之比K_N接近常数。NAPIER根据这一规律和试验结果，近似认为K_N=5.25，提出以下用方程估算水蒸气通过安全阀的质量流量[3]：

$$W_N=5.25AP_1 \tag{3}$$

式（3）即为用于水蒸气超压质量流量计算的Napier（纳皮尔）原始方程。20世纪30年代末发表了大量干饱和水蒸气流动试验数据，进一步证实了Napier方程的可用性。期间，试验工作大都集中在压力不高，即P_1<4.9 MPa（700 psia）范围内。美国机械工程师协会（ASME）首先将Napier方程作为计算安全阀水蒸气排放能力的基础方程。

随着工业的不断发展，水蒸气压力越来越高，很多学者对Napier方程在更高压力下的可接受性提出了质疑。文献[4-5]通过理论计算与试验验证，对Napier方程提出了修正计算。本文对比ISO 4126-7：2013 *Safety devices for protection against excessive pressure*，Part 7：*Common data*标准与Napier方程的计算结果后发现，式（3）在低压工况下使用时也需要进行修正，否则可能导致质量流量过低；此外，在高压工况下（P_1>21.5 MPa），经过修正的Napier方程与ISO 4126-7：2013标准的计算结果仍存在较大偏差。本文根据ISO 4126-7：2013提供的试验数据，采用数学拟合方法，提出更加精确的计算公式，为工程设计提供参考。

1 理论计算模型

超压泄放装置排放能力通常可按公式$W_s=K_d\times A\times G$进行计算。对于某一确定的超压泄放装置，K_d和A的乘积为定值，因此质量流量与转化质量流率密切相关。

容器超压泄放的过程，介质从高压腔体流经超压泄放装置自由膨胀后，排出至低压腔体（如大气侧）。在推导理论质量流率计算公式时，通常做出以下假设[6-12]：

（1）流动属于一维流动；

（2）介质均质且满足热力学与机械平衡，同一截面上的任意点密度保持不变；介质可涵盖可压缩或不可压缩流体，亚临界或超临界状态，以及单相或两相流；

（3）计算结果对应规定的超压下（最大允许积

聚压力)达到稳定泄放状态时的最大值;

(4)超压泄放装置的流动特性近似于喷嘴、孔板或短管;

(5)泄放过程为绝热可逆的等熵过程;

(6)忽略流体黏度的影响。

RANKINE等进行的干饱和水蒸气喷嘴泄放试验表明,实际流动特性与假设条件高度吻合。

1.1 比容模型

已知介质在不同压力的比容时,理想喷嘴等熵流动的流体质量流率可按以下公式计算[1,13]:

$$G=10^3\times\rho_n\sqrt{-2\times\int_{P_1}^{P_n}\frac{\mathrm{d}P}{\rho}}=10^3\times\frac{1}{v_n}\sqrt{-2\times\int_{P_1}^{P_n}v\mathrm{d}P)} \tag{4}$$

式(4)适用于计算液体、压缩气体、超临界流体以及两相流介质在各种工况(包括临界流动和亚临界流动)下泄放时的质量流率,其中n表示计算终点[1]。文中式(4)被定义为比容模型。如果密度或比容与压力的关系能够用函数表示,那么可运用解析法求解积分;而当密度或比容与压力的关系难以通过函数表达时,则需要借助数值法进行积分运算,常见的数值法有梯形法则(trapezoidal rule)和辛普森法则(simpson rule)。

在运用数值法进行积分计算时,压力步长越小,则计算精度越高。通常情况下,可以取泄放压力与出口侧压力之差的1%作为压力步长。以梯形法则为例,其积分计算的近似公式为:

$$I=\int_{P_1}^{P_n}v\mathrm{d}P\approx\frac{1}{2}\times\sum_{j=1}^{n-1}\left(P_{j+1}-P_j\right)\times\left(v_{j+1}-v_j\right) \tag{5}$$

当压力达到泄放侧压力P_0,或者质量流率G达到最大值时,即可终止计算。终点压力大于泄放侧压力,表明流体达到了临界流动状态。在此状态下,流体速度为当地声速,压力为临界流动压力。从终点n至出口侧,压力和速度均为定值,质量流率G达到最大值。

干饱和水蒸气与理想气体存在较大差异,其压力与密度之间的关系难以用精确的解析式表达,绝热指数k也非定值。然而,干饱和水蒸气的热力学数据较易获取,因此,可采用式(4)和式(5),通过数值迭代的方法来计算其质量流率。

1.2 焓变模型

对于水蒸气,根据Mollier图可查询饱和水蒸气的焓值。基于此,其质量流率也可按照以下公式进行计算[4-5,14]:

$$G=\left(\frac{u_j}{v_j}\right)_{\max} \tag{6}$$

式中,$u_j=\sqrt{2\left(h_1-h_{tj}\right)}$,$j$=2,3,4,……,$n$。

当已知泄放压力P_1时,假定合适的喉部压力($P_{t1},P_{t2},\cdots,P_{tn}$),通过查询Mollier图得到不同假定喉部压力($P_{t1},P_{t2},\cdots,P_{tn}$)下的焓值,如图1所示。根据查询所得的焓值和比容,计算不同假定喉部压力下焓值与比容的比值,其中最大比值即为所求的质量流率G,结果如图2所示。同理,当压力达到泄放侧压力P_0或质量流率G达到最大值时,即可终止计算。文中定义公式(6)为焓变模型。

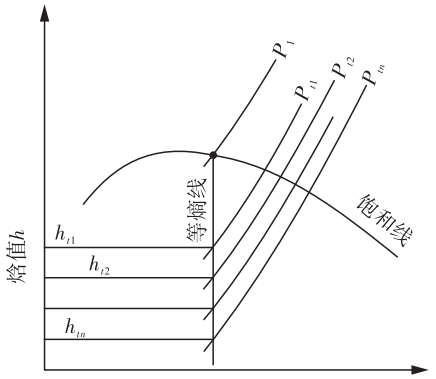


图1 喉部压力对应的焓值

Fig.1 Enthalpy corresponding to the throat pressure

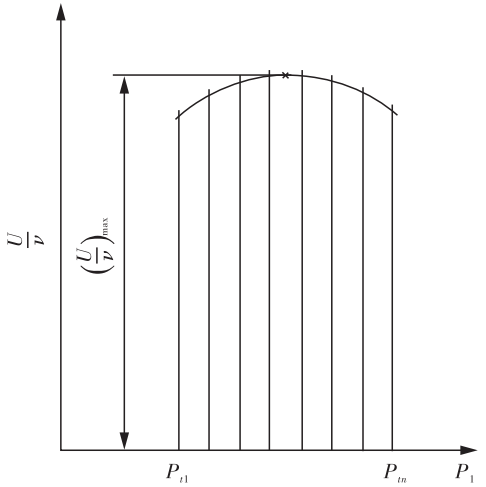


图2 给定泄放压力对应的最大质量流率

Fig.2 Maximum mass flow rate corresponding to the given relief pressure

1.3 计算举例

为进一步解释以上计算模型,举例如下。已知泄放介质为水蒸气,泄放压力P_1=5.5 MPa,T_1=300 K,P_0=0.101 MPa。在此条件下,试计算水蒸

气通过标准喷嘴的理论质量流率。计算过程如下：

（1）P_1-P_0=5.399 MPa；

（2）步长为0.01×5.399≈0.054 MPa；

（3）按步长假设各喉部压力，并查得相应压力下水蒸气的温度、密度（比容）及焓值[15]；

（4）根据式（4）和式（6）进行数值积分计算，结果如表1所示。

表1 理论质量流率计算

Tab.1 Calculation of theoretical mass flow rate

j	P_1/MPa	T/K	$v\times10^2$/($m^3\cdot kg^{-1}$)	$I\times10^3$/($m^2\cdot s^{-2}$)	G（比容模型）	$h\times10^{-3}$/($J\cdot kg^{-1}$)	u/($m\cdot s^{-1}$)	G（焓变模型）
1	5.500	543.1	3.563 494	—	—	−13 181.877 4	—	—
2	5.446	542.5	3.596 079	−1.933	1 729.1	−13 183.810 5	62.18	1 729.1
3	5.392	541.9	3.629 276	−3.884	2 428.5	−13 185.761 6	88.14	2 428.5
4	5.338	541.2	3.663 103	−5.853	2 953.6	−13 187.730 6	108.20	2 953.7
5	5.284	540.6	3.697 579	−7.840	3 386.6	−13 189.718 1	125.23	3 386.7
6	5.230	539.9	3.732 723	−9.846	3 759.5	−13 191.724 4	140.34	3 759.6
7	5.176	539.3	3.768 555	−11.872	4 088.8	−13 193.749 9	154.09	4 088.9
8	5.122	538.6	3.805 096	−13.917	4 384.5	−13 195.794 9	166.84	4 384.6
9	5.068	537.9	3.842 368	−15.981	4 652.9	−13 197.859 8	178.79	4 653.0
10	5.014	537.3	3.880 393	−18.067	4 898.7	−13 199.945 1	190.09	4 898.8
				.....				
40	3.394	514.0	5.540 742	−92.743	7 773.0	−13 274.624 6	430.69	7 773.2
41	3.340	513.0	5.621 948	−95.757	7 784.2	−13 277.638 6	437.63	7 784.4
42	3.286	512.1	5.705 662	−98.815	7 791.5	−13 280.697 2	444.57	7 791.7
43	3.232	511.2	5.792 004	−101.919	7 795.0	−13 283.801 7	451.50	7 795.2
44	3.178	510.2	5.881 105	−105.071	7 794.7	−13 286.953 5	458.42	7 794.9
45	3.124	509.3	5.973 100	−108.272	7 790.6	−13 290.154 2	465.35	7 790.8
46	3.070	508.3	6.068 136	−111.523	7 782.9	−13 293.405 5	472.29	7 783.1

由表1可知，当j=43时，式（4）和式（6）得出最大理论质量流率，且二者计算结果非常接近，约为7 795 kg/($m^2\cdot s$)；此时终点压力为3.232 MPa，该值大于出口压力0.101 MPa，这表明在泄放过程中出现了临界流动现象，临界流动压力为3.232 MPa。

2 高压工况下的Napier方程修正式

COPIGNEAOX等[5]采用式（6）所述的焓变模型，在P_1<14 MPa（140 bar）的范围内，对Napier方程的精度展开了研究。经过大量理论计算证实，在P_1<14 MPa的范围内，该方程的计算结果与饱和水蒸气等熵流动质量流量的理论计算值相比，最大偏差在±3%以内。THOMPSON等[4]在更高的压力区间进行理论计算，发现当泄放压力接近水蒸气的临界压力（约为22.1 MPa）时，W_T比W_N偏大约19%。为验证理论计算的准确性，文献[4]在高压范围内进行了饱和水蒸气流动试验，结果表明，在2.76~15.86 MPa的泄放压力范围内，理论计算结果与试验结果的相对偏差带仅为±2%。

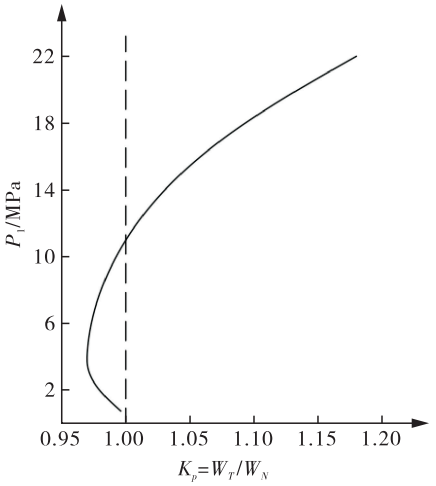


图3 Napier方程与其修正式计算结果的比较

Fig.3 Comparison between the results of Napier equation and its modified form

图3示出0.7~22.1 MPa泄放压力范围内修正式理论计算结果与Napier方程计算结果的比值[4-5]，其中K_p为理论质量流量与纳皮尔质量流

量之比。当K_p>1.0时，表明Napier方程的计算结果小于理论方程的计算结果，即Napier方程的估算值偏保守；当K_p<1.0时，该方程的计算结果大于理论方程的计算结果，存在质量流量不足的可能性；当K_p=1.0时，理论质量流量等于纳皮尔质量流量。

可以看出，当P_1=0.7 MPa时，W_T=W_N，在此之后，W_T逐渐减小至比W_N小约3%。随后，二者偏差开始缩小，当泄放压力达到10.3 MPa时，W_T再次等于W_N（K_p=1.0）。在10.3~22.1 MPa压力区间内，W_T相较于W_N逐渐偏大。当泄放压力接近水蒸气的临界压力（约为22.1 MPa）时，W_T比W_N偏大约19%。

鉴于在高压范围内使用Napier方程进行计算会产生较大偏差，THOMPSON等[4]根据理论计算数据，对Napier方程提出的修正系数如下：

$$K_m=\frac{27.6P_1-1000}{33.2P_1-1061} \tag{7}$$

式（7）对泄放压力范围在10.3~22.1 MPa的工况进行了修正，该结论被ASME和API等标准化机构采纳。从图3可以看出，在10.3~14 MPa泄放压力范围内，K_p<1.03，即方程的计算值相较于理论值偏小的程度不超过3%；而在图中虚线左侧范围内，K_p>0.97，表明理论值比方程计算值偏大的程度同样不超过3%。由于在压力小于10.3 MPa时，Napier方程计算值3%的偏差已被认可，则对于此处偏保守的3%估值偏差也可接受。因此，当10.3 MPa<P_1≤14 MPa时，仍可采用公式Napier（纳皮尔）原始方程进行计算。式（7）的压力适用范围可修正为14.0 MPa<P_1≤22.1 MPa。

3 基于ISO 4126-7:2013的水蒸气压力系数

ISO 4126-7:2013标准中水蒸气质量流量的计算公式为：

$$W_s=\frac{AKP_1{}'}{k_s} \tag{8}$$

根据喷嘴等熵流动特征，按照以下步骤进行计算：

（1）以喷嘴进口压力为初始值，并假设多个喷嘴喉部压力值；

（2）通过IAPWS-IF97 *Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic properties of water and steam*标准中的分区图，得到喷嘴喉部压力所对应的水蒸气热力学性能数据；

（3）计算对应的质量流率；

（4）重复上述步骤，直至获得最大质量流率G_{max}；

（5）根据式（9）计算得出水蒸气压力系数。

$$k_s=\frac{P_1{}'}{G_{max}} \tag{9}$$

以上计算原理与文中式（6）所述的焓变模型一致，即$k_s=10\times\frac{1}{K_N}$；当$k_s$=1.905时，$K_N$=5.25。

基于ISO 4126-7:2013标准中0.105~22.0 MPa范围内的水蒸气压力系数，表2示出K_N及K_N/5.25（该值等效于W_T/W_N）的计算结果。

可以看出，当1.848≤k_s≤1.962时，采用式（8）计算的质量流量（不考虑泄放系数K_d的影响）与Napier方程计算结果的偏差处于±3%范围内。图4和图5分别示出0.105 MPa≤P_1≤0.2 MPa及0.2 MPa≤P_1≤22.0 MPa时饱和状态下泄放压力与水蒸气压力系数的关系曲线，进一步验证了Napier方程及THOMPSON[4]等修正系数的工程适用性。

由表2可知，当泄放压力较低时，如果直接采用Napier方程进行计算，可能存在较大偏差。基于表2数据，K_p-P_1曲线（0.105 MPa≤P_1≤0.7 MPa）如图6所示。可以看出，当P_1<0.135 MPa时，W_T与W_N的偏差超过3%；当泄放压力低至0.105 MPa时，偏差到达50%。基于以上分析，结合表2中0.105~0.135 MPa范围内的数据，拟合得出的修正函数如下：

$$k_m=4452P_1{}^3-2035P_1{}^2+310.6P_1-14.81 \tag{10}$$

$$W_T=5.25AP_1\times\left(4452P_1{}^3-2035P_1{}^2+310.6P_1-14.81\right) \tag{11}$$

根据式（11）计算得出的W_T与标准相比，偏差小于±3%。

此外，当泄放压力大于21.5 MPa时，W_T与W_N的偏差已超过19%，在临界压力下该偏差高达30%，这一结果与文献[4-5]中的结论存在差异。式（7）计算得出的修正值与ISO 4126-7:2013标准相比，偏差仍超过3%，最大偏差高达9%，如表3所示。因此，当P_1>21.5 MPa时，水蒸气超压质量流量计算公式可被修正为：

$$W_N=6.63AP_1 \tag{12}$$

根据式（12）得出的W_T与ISO 4126-7:2013的计算结果相比，偏差小于±3%。

表2 不同泄放压力下k_s与K_N对比

Tab.2 Comparison of k_s and K_N under different discharge pressures

饱和水蒸气压（绝压）/MPa	k_s	K_N	K_N/5.25	饱和水蒸气压（绝压）/MPa	k_s	K_N	K_N/5.25
0.105	3.832	2.610	0.497	2.5	1.958	5.107	0.973
0.106	3.538	2.826	0.538	2.6	1.959	5.105	0.972
0.107	3.313	3.018	0.575	2.8	1.961	5.099	0.971
0.108	3.133	3.192	0.608	3.0	1.962	5.097	0.971
0.109	2.987	3.348	0.638	3.2	1.963	5.094	0.970
0.110	2.865	3.490	0.665	3.4	1.964	5.092	0.970
0.112	2.672	3.743	0.713	3.6	1.964	5.092	0.970
0.114	2.527	3.957	0.754	3.8	1.964	5.092	0.970
0.116	2.413	4.144	0.789	4.0	1.964	5.092	0.970
0.118	2.322	4.307	0.820	5.0	1.962	5.097	0.971
0.120	2.248	4.448	0.847	6.0	1.956	5.112	0.974
0.125	2.112	4.735	0.902	6.5	1.953	5.120	0.975
0.130	2.021	4.948	0.942	7.0	1.949	5.131	0.977
0.135	1.958	5.107	0.973	7.5	1.944	5.144	0.980
0.140	1.913	5.227	0.996	8.0	1.939	5.157	0.982
0.145	1.882	5.313	1.012	8.5	1.933	5.173	0.985
0.150	1.860	5.376	1.024	9.0	1.927	5.189	0.988
0.160	1.836	5.447	1.037	9.5	1.921	5.206	0.992
0.170	1.829	5.467	1.041	10.0	1.915	5.222	0.995
0.180	1.834	5.453	1.039	10.5	1.908	5.241	0.998
0.190	1.835	5.450	1.038	11.0	1.900	5.263	1.003
0.2	1.838	5.441	1.036	11.5	1.892	5.285	1.007
0.3	1.860	5.376	1.024	12.0	1.884	5.308	1.011
0.4	1.876	5.330	1.015	12.5	1.876	5.330	1.015
0.5	1.888	5.297	1.009	13.0	1.867	5.356	1.020
0.6	1.898	5.269	1.004	13.5	1.857	5.385	1.026
0.7	1.906	5.247	0.999	14.0	1.847	5.414	1.031
0.8	1.913	5.227	0.996	14.5	1.837	5.444	1.037
0.9	1.919	5.211	0.993	15.0	1.826	5.476	1.043
1.0	1.924	5.198	0.990	15.5	1.814	5.513	1.050
1.1	1.928	5.187	0.988	16.0	1.802	5.549	1.057
1.2	1.932	5.176	0.986	16.5	1.789	5.590	1.065
1.3	1.936	5.165	0.984	17.0	1.775	5.634	1.073
1.4	1.939	5.157	0.982	17.5	1.761	5.679	1.082
1.5	1.942	5.149	0.981	18.0	1.745	5.731	1.092
1.6	1.944	5.144	0.980	18.5	1.728	5.787	1.102
1.7	1.946	5.139	0.979	19.0	1.709	5.851	1.115
1.8	1.949	5.131	0.977	19.5	1.689	5.921	1.128
1.9	1.950	5.128	0.977	20.0	1.665	6.006	1.144
2.0	1.952	5.123	0.976	20.5	1.638	6.105	1.163
2.1	1.954	5.118	0.975	21.0	1.605	6.231	1.187
2.2	1.955	5.115	0.974	21.5	1.559	6.414	1.222
2.3	1.956	5.112	0.974	22.0	1.459	6.854	1.306
2.4	1.957	5.110	0.973	—	—	—	—

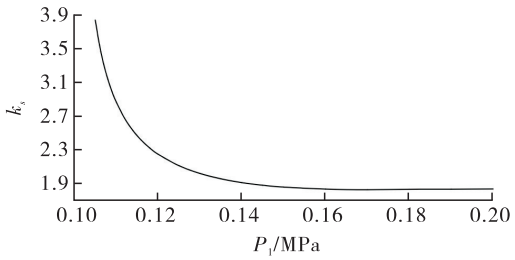


图4 P_1–k_s关系曲线(0.105~0.2 MPa)

Fig.4 Relationship curve of P_1 and k_s(0.105~0.2 MPa)

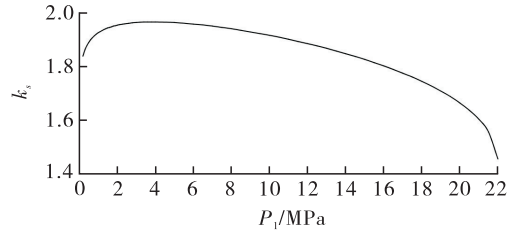


图5 P_1–k_s关系曲线(0.2MPa~22.0 MPa)

Fig.5 Relationship curve of P_1 and k_s(0.2~22.0 MPa)

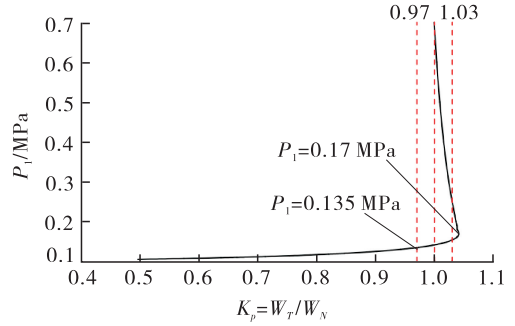


图6 K_p–P_1关系曲线(0.105~0.7 MPa)

Fig.6 Relationship curve of K_p and P_1(0.105~0.7 MPa)

表3 不同压力下k_m×5.25与K_N对比

Tab.3 Comparison of k_m×5.25 and K_N under different pressures

饱和水蒸气压(绝压)/MPa	K_N	k_m	偏差/%
19.0	5.851	1.106	0.71
19.5	5.921	1.117	0.96
20.0	6.006	1.128	1.40
20.5	6.105	1.141	1.88
21.0	6.231	1.156	2.60
21.5	6.414	1.171	4.15
22.0	6.854	1.188	9.0

4 讨论

式(1)和式(2)仅适用于饱和蒸汽处于临界流动状态时质量流量的计算。COPIGNEAOX等[5]开展试验的泄放压力较高,且蒸汽直接排放至大气环境,此时临界流动条件通常能够得到满足。然而,当泄放压力较低,或者排放侧存在背压时,蒸汽很可能在亚临界流动状态下进行泄放。此时,超压泄放装置实际的质量流量会小于通过式(1)或式(2)计算所得的结果,这可能导致估算结果存在危险性偏差。文献[4-5]提出了饱和水蒸气等熵流动质量流量估算模型(该模型仅适用于临界流动工况),分析得出饱和水蒸气的临界流动判断条件,即P_0/P_1<0.59时,将达到临界流动状态。显然,若泄放侧为大气压力,临界流动与亚临界流动状态的泄放压力分界点为0.17 MPa。表2结果表明,当泄放压力为0.17 MPa时,K_N出现了趋势性变化。

(2)考虑到不同泄放压力下水蒸气压力系数k_s,ISO 4126-7:2013中的计算方法比Napier方程(含修正系数)更精确。为便于工程应用,文中根据ISO 4126-7:2013标准拟合得出了泄放压力-水蒸气压力系数关系曲线,如图4和图5所示。在实际计算过程中,可直接查取相应的水蒸气压力系数k_s。

5 结语

本文深入探究了干饱和水蒸气质量流量计算公式的理论来源,基于ISO 4126-7:2013标准拟合了泄放压力-水蒸气压力系数关系曲线;同时对比了ISO 4126-7:2013中水蒸气压力系数计算公式与Napier方程(含修正系数)在计算水蒸气质量流量时的偏差,并以ISO 4126-7:2013水蒸气压力系数计算结果为基准,将±3%设定为可接受的偏差范围,对Napier方程(含修正系数)的水蒸气超压质量流量计算公式进行了修正,优化结果如下:

(1)当0.105 MPa≤P_1<0.135 MPa时,

$$W_S=5.25K_dAP_1\times\left(4452P_1^{\,3}-2035P_1^{\,2}+310.6P_1-14.81\right);$$

(2)当0.135 MPa≤P_1≤14 MPa时,

$$W_S=5.25K_dAP_1;$$

(3)当14 MPa<P_1≤21.5 MPa时,

$$W_S=5.25K_dAP_1\left(\frac{27.6P_1-1000}{33.2P_1-1061}\right);$$

(4)当P_1>21.5 MPa时,$W_S=6.63K_dAP_1$。

参考文献:

[1] DARBY R. Size safety-relief valves for any conditions

[J].Chemical Engineering，2005，112(9)：42-50.

[2] CROWL A D，TIPLER A S. Sizing pressure-relief devices [J]. Chemical Engineering Progress，2013，109(10)：68-76.

[3] 詹世平.饱和水蒸气的泄放计算——对GB 150—1998的规定的理解与讨论[J].压力容器，1998，15(6)：6-11.
ZHAN S P.The relief calculations of saturated steam—an understanding and discussion of some regulations in GB 150—1998 [J]. Pressure Vessel Technology，1998，15(6)：6-11.

[4] THOMPSON L，BUXTON O E. Maximum isentropic flow of dry saturated steam through pressure relief valves [J]. Journal of Pressure Vessel Technology，1979，101：113-117.

[5] COPIGNEAOX. Isentropic expansion of dry saturated vapor application to the design of safety valves [J]. Journal of Pressure Vessel Technology，1984，106.

[6] 管国锋.化工原理(第二版)[M].北京：化学工业出版社，2003.
GUAN G F. Chemical Engineering Principle (second edition)[M].Beijing：Chemical Industry Press，2003.

[7] 王永贵.爆破片额定泄放能力的计算[J].化工设计，2020，30(6)：6-8.
WANG Y G. Calculation of rupture disc rated discharge capacity[J].Chemical Engineering Design，2020，30(6)：6-8.

[8] 吴全龙，史斐菲，徐维普，等.火灾工况充装压缩气体容器超压泄放装置尺寸计算解析[J].压力容器，2023，40(11)：62-66.
WU Q L，SHI F F，XU W P，et al. Research on size calculation of pressure relief devices for gas-filled pressure vessels under exterior fire condition [J]. Pressure Vessel Technology，2023，40(11)：62-66.

[9] 吴全龙，陈红亲，周亮，等.浅析超压泄放装置排放能力计算公式中气体特性系数[J].压力容器，2023，40(4)：45-51.
WU Q L，CHEN H Q，ZHOU L，et al. Analysis on the gas characteristic coefficient in the calculation formula of the discharge capacity of pressure relief devices[J].Pressure Vessel Technology，2023，40(4)：45-51.

[10] 罗岩松，何清，于新海，等.先导式主蒸汽安全阀动作性能瞬态模拟及分析[J].流体机械，2023，51(12)：49-55.
LUO Y S，HE Q，YU X H，et al.Transient simulation and analysis of pilot main steam safety valve performance [J]. Fluid Machinery，2023，51(12)：49-55.

[11] 郭远顺，于新海，赵桂生，等.安全阀气体泄漏在线监测方法研究[J].流体机械，2023，51(3)：77-83.
GUO Y S，YU X H，ZHAO G S，et al.Research on on-line monitoring method of gas leakage of safety valve [J].Fluid Machinery，2023，51(3)：77-83.

[12] 李东哲，王重涵，王晓媛，等.宽工况下水蒸气喷射制冷系统试验研究[J].流体机械，2024，52(4)：7-11.
LI D Z，WANG Z H，WANG X Y，et al.Experimental study of water vapor injection refrigeration system under wide operating conditions[J].Fluid Machinery，2024，52(4)：7-11.

[13] CROWL D A，LOUVAR J F.化工过程安全基本原理与应用(原著第4版)[M].青岛：中国石油大学出版社，2021.
CROWL D A，LOUVAR J F.Chemical process safety fundamentals with applications (fourth edition) [M]. Qingdao：China University of Petroleum Press，2021.

[14] HELLER F J. Safety relief valve sizing：API versus CGA requirements plus a new concept for tank cars [J].Proceedings of the American Petroleum Institute，1983，6：123-135.

[15] 杨一平，吴晓明，王振琪.物理化学[M].北京：化学工业出版社，2009.
YANG Y P，WU X M，WANG Z Q.Physical Chemistry [M].Beijing：Chemical Industry Press，2009.

作者简介：吴全龙(1975)，男，高级工程师，全国安全泄压装置标准化技术委员会(SAC/TC503)委员，主要从事爆破片装置的产品设计制造、爆破片标准研究和编写工作，通信地址：201109 上海市鹤翔路99号上海华理安全装备有限公司，E-mail：983762128@qq.com。

本文引用格式：
吴全龙，后文杰，胡熙玉.干饱和水蒸气泄放质量流量计算解析[J].压力容器，2025，42(2)：46-53.
WU Quanlong，HOU Wenjie，HU Xiyu. Analytical calculation of relief mass flow rate for dry saturated steam [J]. Pressure Vessel Technology，2025，42(2)：46-53.