

热套管计算

艾默生提供新式热套管计算工具 – 免费在线提供
根据 **ASME PTC 19.3 TW**, 免费在线工具可从 Rosemount.com/ThermowellCalc 获得。
立即试用, 并观看阐述新标准的视频。



Dirk Bauschke
工程经理

David Wiklund
高级首席工程师

Andrew Dierker
机械项目工程师

Alex Cecchini
高级营销工程师

ROSEMOUNT®

www.rosemount.com.cn


EMERSON™
Process Management

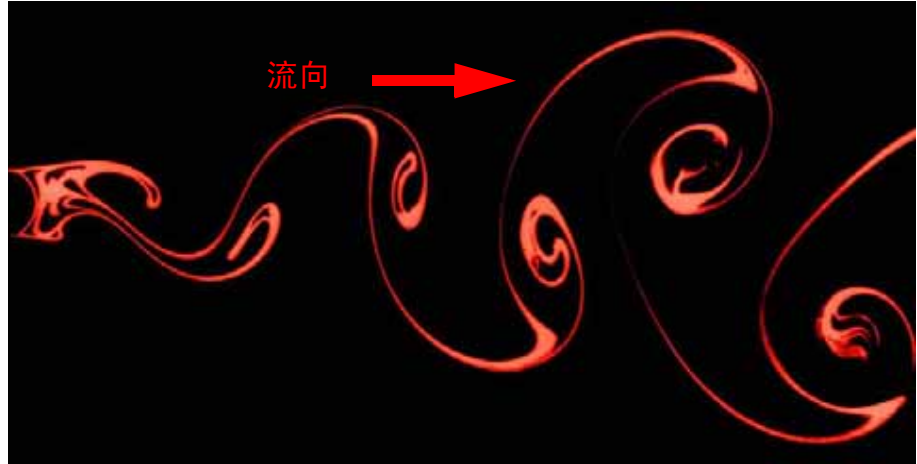
目录

热套管计算

简介	1-1
ASME PTC 19.3 的简要历史	1-1
ASME PTC 19.3-1974 方法研究	1-2
涡旋脱落理论	1-3
弯曲和压应力	1-7
安装变化	1-12
无支撑长度定义	1-14
流速套圈	1-16
平均速度与速度曲线图	1-17
热套管构造要求	1-17

简介

热套管本质上是如同悬臂一样安装到过程管道中的圆筒，可为温度传感器提供过程条件保护和过程密封。在过程流体通过热套管周围时，会在层流、湍流和过渡流的下游端形成低压涡旋。由于存在由来自流体流动的静态纵向拉力和交替涡旋脱落导致的动态横向升力生成的应力组合，因此热套管可能会因疲劳产生机械故障。管道设计人员可以使用多种工具在其系统中预测和避免热套管故障，但是 ASME PTC 19.3-1974 已成为设计大多数热套管所依据的标准。



颜色增强的烟迹显示层状流体中的冯·卡门涡街。(1)

ASME PTC 19.3 的简要历史



该标准的历史要回溯到 1957 年，当时 ASME（美国机械工程师学会）对 1930 年的《温度测量补充说明》不满意，因为它不包括热和应力效应。ASME 请锅炉和压力容器委员会制订一个文档，但是锅炉和压力容器委员会认为这不在他们的工作范围之内。一个独立委员会随后承担了所有温度测量工作，其中也包括热套管设计。ASME PTC 19.3-1974 的基础是 J.W. Murdock 所著的一篇文章（1959 年）。(2)

海军研究生学校的 John Brock 在 1974 年进行了一些后续工作，发现了几项 Murdock 假设或忽略的内容。Brock 提出了一些建议，如使用可变斯特劳哈尔数而不是固定斯特劳哈尔数、在热套管的自然频率近似计算中应用安装系数，以及检查频率比限值 0.8 以解释自然频率计算中的不确定性(3)。其中某些内容显示 ASME PTC 19.3-1974 有待改进。

- (1) 维基百科 http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_induced_vibration（截至 2011 年 5 月 20 日）
- (2) Murdock, J.W., "Power Test Code Thermometer Wells" Journal of Engineering for Power (1959).
- (3) Brock, John E., "Stress Analysis of Thermowells," Naval Postgraduate School, Monterey CA (1974).

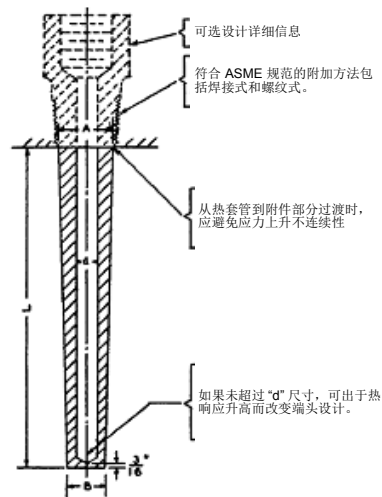
ASME PTC 19.3-1974 似乎无法解释所有安装。1995 年日本“文殊”号快中子增殖反应堆由于液钠冷却剂系统泄漏而停机，这是典型的灾难性热套管疲劳故障范例。调查显示，热套管是根据 ASME PTC 19.3-1974 设计的，但是故障模式的成因是纵向共振，这在标准中未做解释。因此便制订了日本版本的标准，称为 JSME S012⁽¹⁾。经过多年的调查和法律战之后，该反应堆最终于 2010 年 5 月重新启动。

不过在大多数情况下，ASME PTC 19.3-1974 在蒸汽和非蒸汽应用中都得到了成功使用。几个关键因素导致 ASME 在 1999 年重新组成了委员会以彻底重写标准；进一步了解热套管性能、一些灾难性故障（其中包括“文殊”号反应堆）及有限元分析在应力建模中的更多使用。这些因素结合在一起，促使许多业内人士放弃 ASME PTC 19.3-1974 中的不成熟方法和简化表格，转而采用预测热套管自然频率和计算强迫频率的更先进方法。

由于工作所带来的重大改变，委员会决定发布新标准，而不是仅仅更新现有版本的 ASME PTC 19.3-1974。ASME PTC 19.3-1974 的热套管计算部分共有 4 页。相比之下，由于需要解释理论并且过程极其复杂，因此名为 ASME PTC 19.3 TW-2010（“TW”表示热套管）的新标准总共包含 40 多页。

ASME PTC 19.3 TW-2010 于 2010 年 7 月发布。

ASME PTC 19.3-1974 方法研究



如前所述，1974 年标准非常简要。它适用的杆剖面非常少，并且使用简化公式对热套管建模以进行自然频率计算。即使允许使用《ASME 锅炉和压力容器及管道规范》批准的任何连接方法，该公式也不会区分常用安装型式变化（如法兰式、螺纹式和承插焊接式），并且会忽略不同杆剖面（如直型、锥型和阶梯型）的影响。未针对表中未包含的孔尺寸进行说明，因此直径为 6 毫米和 1/4 英寸的传感器的孔在公式中共享相同常量，但未为直径 3 毫米的传感器孔提供任何常量。

尽管有许多缺点，ASME PTC 19.3-1974 的确采用了一个简单过程来进行热套管评估，并因此在业内得到广泛认可；收集过程数据和热套管材料信息，计算自然和斯特劳哈尔频率，将比率与 0.8 进行比较，计算弯曲应力，将最大压力与过程压力进行比较，并将最大长度与所需长度进行核对。

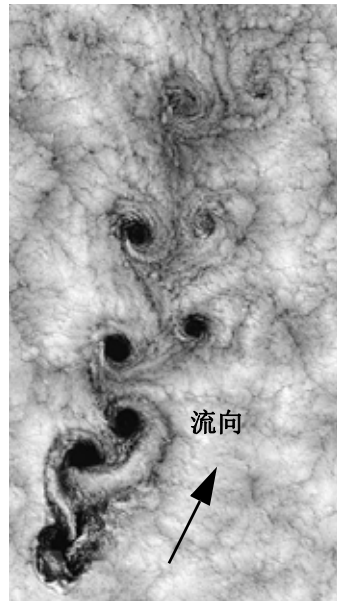
收集过程数据和材料信息是一个简单步骤，只不过有一个数据不再容易获得，即“过程温度下的频率与 70°F 时频率的比率”。

计算热套管自然频率的方法使用简单公式，但是没有很好地定义某些项，如 K_f 。如果热套管 U 长度不能与表中列出的任何一个值匹配，设计人员应使用比热套管保守长度更长的数据。对于可接受的热套管设计，斯特劳哈尔频率与自然频率之比“不应超过”0.8。

最终步骤是基于稳定状态应力评估热套管长度。这可确定热套管为处理弯曲应力可以采用的最大长度。将此长度与所需长度进行比较，以确定其是否可接受或是否必须缩短。

(1) Odahara, Sanoru, et al. “Fatigue Failure by In-line Flow-induced Vibration and Fatigue Life Evaluation,” JSME International Journal, Series A, Vol. 48, No. 2 (2005).

涡旋脱落理论
(ASME PTC 19.3
TW-2010 的基础)



胡安费尔南德斯群岛附近智利海岸云层中的冯·卡门涡街的 7 号陆地卫星图像 (1999 年 9 月 15 日)。(1)

当流体在其路径中的钝体周围流动时, 会在该物体下游形成涡旋。这常常称为涡旋脱落、冯·卡门涡街或流体涡旋。涡旋是以交替模式在下游形成并脱落的低压单元。由于交替涡旋而形成的压差会对物体生成交替力。这会在其偏移时, 对物体形成交替应力。此现象可在自然界中观察到, 例如桥墩下游水流中的漩涡、山顶云层顺风区中的旋涡或是在风吹过公用设施管线时听到的风吹声。尽管涡旋脱落对于过程流量测量有用, 不过由于它可能会导致故障, 热套管设计人员应尽量避免使用。

(1) NASA 地球观测站网站
“http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img_id=3328”。

因为热套管故障的主要原因是共振导致的疲劳，所以设计人员需要了解涡旋脱落以便避免其影响，并预测涡旋脱落频率。由于涡旋脱落以 50 Hz 到 1,500 Hz 之间的频率发生，因此热套管可能会在短时间内遇到许多个周期。



由于涡旋引起的振动所导致的热套管故障示例⁽¹⁾

随着涡旋脱落频率（或斯特劳哈尔频率）接近热套管自然频率，末端位移和应力会显著增加，热套管可能会由于必须吸收大量能量而发生疲劳故障。因此除了过程条件（如压力、温度和腐蚀）之外，设计人员还必须针对应用中的总体适用性而考虑高循环疲劳强度。

最低速度

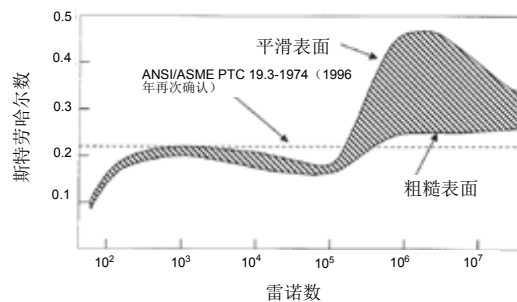
对于缓慢流动的过程流体，不会有足够能量从过程流体传输到热套管，因此不会导致疲劳故障。如果满足以下条件，则无需进行频率限制计算，因为热套管故障风险是微不足道的。

1. 过程流体速度， $V < 0.64 \text{ m/s (2.1 ft./sec)}$
2. 壁厚， $(A - d) \geq 9.55 \text{ mm (0.376 in.)}$
3. 无支撑长度， $L \leq 0.61 \text{ m (24 in.)}$
4. 根部和末端直径（A 和 B） $\geq 12.7 \text{ mm (0.5 in.)}$
5. 允许的最大应力， $S \geq 69 \text{ Mpa (10 ksi)}$
6. 耐疲劳性限值， $S_f \geq 21 \text{ Mpa (3 ksi)}$

即便如此，这些低速度仍可能会激发纵向共振，从而因为共振时存在的高振动而导致传感器故障。如果不满足这些条件，或是如果由于流体交互作用而可能导致应力腐蚀或材料脆化（这可能会导致耐疲劳性变化），则设计人员必须充分评估热套管设计。

斯特劳哈尔数

对于是使用固定还是可变斯特劳哈尔数的问题，已进行了很多讨论。ASME PTC 19.3-1974 使用 0.22 的固定斯特劳哈尔数，而 Brock 建议根据雷诺数来使用可变斯特劳哈尔数。许多业内人士开始将可变斯特劳哈尔数纳入到涡旋脱落频率公式中，在 ASME PTC 19.3-1974 框架中，称之为“布洛克方法”或类似说法。

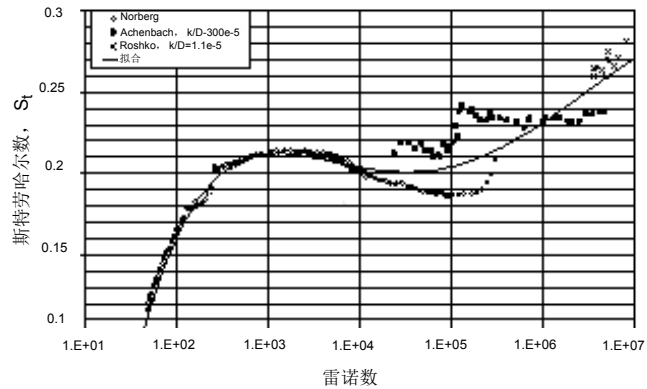


将斯特劳哈尔数显示为雷诺数函数的典型图表

(1) Energy Institute, "Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue in Process Pipework" 2nd Edition, (2008), Publication Number 978-0-85293-463-0.

ASME PTC 19.3 TW-2010 委员会在决定如何使用可变斯特劳哈尔数之前审查了后续实验。对于在形式上与热套管相似的机加工直型和锥型圆筒，2001 年 JSME International Journal 上发表的两篇论文显示了其有趣的测试结果。在将圆筒浸入流体流中时测量了力和振动振幅。得出的结论是，以前实验中的较大斯特劳哈尔数证据是基于涡旋脱落的测量值，而不是热套管上实际力的测量值。(1)(2)

“粗糙”表面在实验中定义为测量值超过 128 Ra。加工行业中热套管的表面光洁度都不会超过 32 Ra，ASME PTC 19.3 TW-2010 中的应力限制和计算对于比 32 Ra 更粗糙的表面无效。



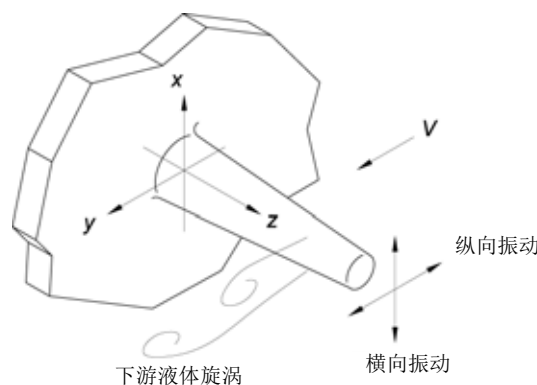
粗糙圆筒斯特劳哈尔数的实际数据作为雷诺数函数。(3)

根据此数据，ASME PTC 19.3 TW-2010 委员会决定纳入通过粗糙圆筒曲线定义的可变斯特劳哈尔数。为了简化计算，还允许设计人员保守地将斯特劳哈尔数近似为 0.22。如果设计人员无法建立动态或运动流体粘度来确定雷诺数时，这尤其有用。

雷诺数

在任何完全浸入的流动中，基本参数是雷诺数。雷诺数是流场中的惯性力与粘性力之比。为用于涡旋脱落元素，雷诺数的长度输入是脱落元素的宽度。对于热套管，为末端直径。

热套管自然频率



用于热套管应力计算的流体引起的力和轴分配(1)

ASME PTC 19.3 TW-2010 将热套管作为简单悬臂梁进行建模，并通过包括加入的流体质量、加入的传感器质量、非均匀剖面梁和安装合规性，应用一系列校正系数来解释与理想梁之间的差异。对于阶梯型杆热套管，由于几何形状和应力集中点的因素，大多数相关性和计算都会更加复杂。

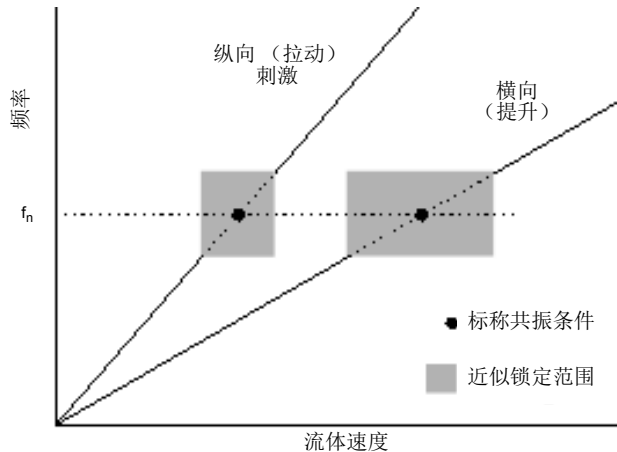
因此，ASME PTC 19.3 TW-2010 将考虑的阶梯型杆热套管尺寸变化限制在标准范围内。

- (1) Sakai, T., Iwata, K., Morishita, M., and Kitamura, S., "Vortex-Induced Vibration of a Circular Cylinder in Super-Critical Reynolds Number Flow and Its Suppression by Structure Damping," JSME Int. J. Ser. B. 44, 712-720 (2001).
- (2) Iwata, K., Sakai, T., Morishita, M., and Kitamura, S., "Evaluation of Turbulence-Induced Vibration of a Circular Cylinder in Super-Critical Reynolds Number Flow and Its Suppression by Structure Damping," JSME Int. J. Ser. B. 44, 721-728 (2001).
- (3) 《ASME 标准》，《性能测试规范 19.3TW（草稿 7）》。

临界速度

应用所有校正系数之后，会计算“现场”或安装的自然频率 f_n^c ，并将其用于其余频率分析。

建立热套管自然频率之后，设计人员需要设置自然频率与斯特劳哈尔频率之间的安全余量。



显示“锁定”区域的纵向和横向刺激示意图。(1)

实际上有两种模式的热套管刺激。横向（提升）力导致热套管在与流垂直的方向上振动，而纵向（拉动）力导致热套管在与流平行的方向上振动。纵向振动大约是横向频率的两倍。纵向“临界速度”（斯特劳哈尔频率等于自然频率）大约是横向速度的一半。ASME PTC 19.3-1974 未解释纵向振动，仅解释了稳定状态弯曲应力。(2)

当脱落频率的变化与流体速度成比例时，热套管会非常容易地锁定到共振频率。这还会显著改变速度，使热套管在其自然频率上避免脱落涡旋。因为典型热套管的阻尼非常低，所以避免共振是至关重要的。共振时，力和位移会显著增加。

$$f_s < 0.8 f_n^c$$

使用 20% 的防护带应对由于以下原因引起的显著变化：

- 热套管弹性响应的非线性
- 宽松的热套管制造公差
- 仅按 3 位有效数建立的材料属性信息
- 过程中流速、温度、密度或粘性的细微日常变化

由于纵向振动的速度大约是横向速度的一半（或两倍的频率），因此流体受到更多限制。

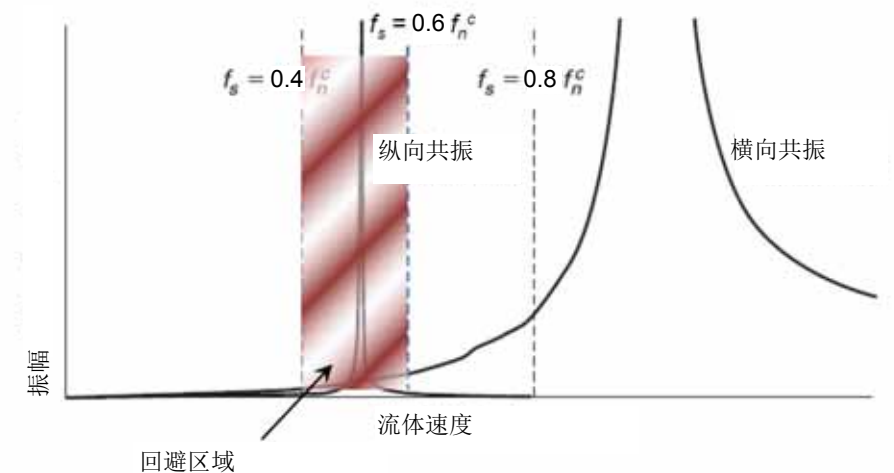
$$2f_s < 0.8 f_n^c$$

以稍微不同的方式看待此问题，会以更大视角了解允许进行热套管操作的位置。

$$f_s \text{ (稳定状态)} < 0.4 f_n^c \quad \text{或} \quad 0.6 f_n^c < f_s \text{ (稳定状态)} < 0.8 f_n^c$$

(1) 《ASME 标准》，《性能测试规范 19.3TW-2010》。

(2) 《ASME 标准》，《性能测试规范 19.3-1974（1998 年再次确认）》。



该图形描述热套管对流体引起的力的振幅响应。(1)

斯柯顿数

ASME PTC 19.3 TW-2010 还包含“超临界”操作的规定，其中热套管的操作频率高于热套管自然频率。艾默生强烈反对在此情况下操作热套管。

理论的新增内容是使用斯柯顿数，该数表示热套管的固有阻尼。ASME PTC 19.3 TW-2010 非常保守，将阻尼系数设置为 0.0005，除非是通过其他方式确定。

小于 2.5 的斯柯顿数表示不存在固有阻尼，热套管必须按纵向共振频率进行评估并且避免横向共振频率。随着斯柯顿数增大，固有阻尼级别会增大，这会减少变形，进而减少应力。可接受的阻尼级别允许热套管在纵向上操作，甚至可以在横向共振频率上操作。

如果情况是热套管的操作频率高于自然频率，则必须考虑较高阶共振，但是 ASME PTC 19.3 TW-2010 未提供有关于此的任何指导，艾默生强烈反对在此情况下操作热套管。

弯曲和压应力 (用于 ASME PTC 19.3 TW-2010)

虽然涡旋脱落理论和应用似乎备受关注，但是热套管中的应力和作用力对于评估特定过程应用的适用性也十分重要。与 1974 版中的简单方法相比，ASME PTC 19.3 TW-2010 中与热套管上的频率和应力有关的内容要详细得多。这样便允许采用更广泛的安装型式、剖面 and 孔尺寸，来满足行业中当前的产品需要。

对于一组特定过程条件，ASME PTC 19.3 TW-2010 中总共有 4 个量化标准用于可接受的热套管：

1. **频率限制：**热套管的共振频率必须足够高，以便流体流动不会激发破坏性振荡。
2. **动态应力限制：**最大动态应力不得超过允许的疲劳应力限制。如果设计要求热套管经历纵向共振以达到操作条件，则会对共振进行额外疲劳检查。
3. **静态应力限制：**热套管上的最大稳定状态应力不得超过允许的应力（根据冯·米塞斯标准确定）。
4. **流体静压力限制：**外部压力不得超过热套管末端、杆和法兰（或螺纹）的压力额定值。

(1) 改编自《ASME 标准》，《性能测试规范 19.3TW-2010》。

频率限制

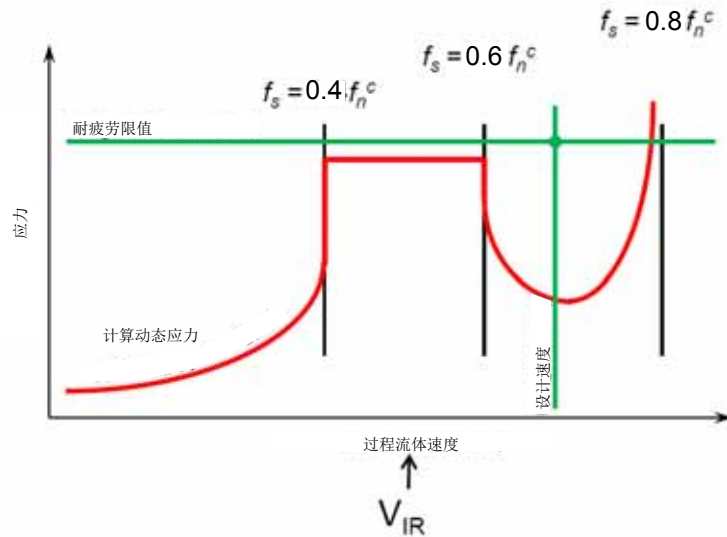
此外，必须考虑热套管材料对过程环境的适用性。这表示设计人员必须评估腐蚀和侵蚀对热套管的影响情况，以及暴露在过程条件下对材料属性的影响情况。

涡旋脱落理论一节讨论用于斯特劳哈尔频率计算的 ASME PTC 19.3 TW-2010 方法。如果斯特劳哈尔频率介于纵向临界频率锁定带与横向临界频率锁定带之间，并且斯柯顿数评估表示阻尼不足，则必须修改热套管设计，除非满足以下所有条件：

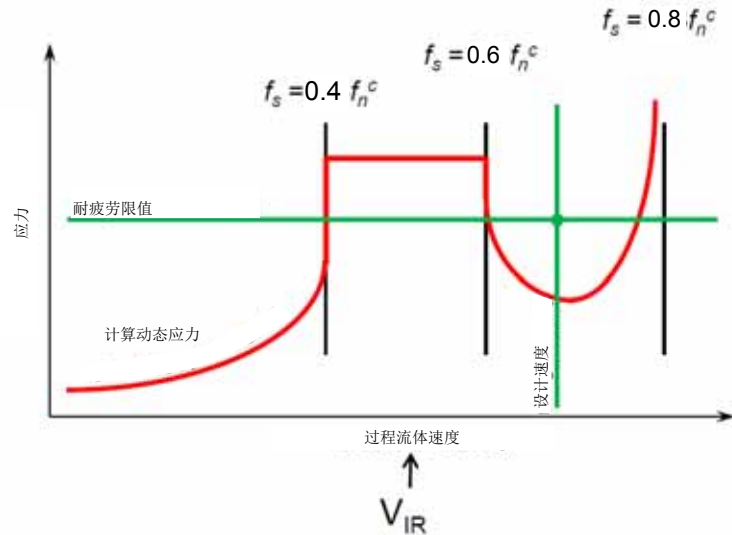
1. 过程流体为气体
2. 热套管仅在启动、关闭过程中经历纵向共振，或是在操作过程中很少经历纵向共振
3. 共振时的峰值应力小于材料的疲劳限制
4. 过程流体不会导致材料属性改变（特别是耐疲劳性）
5. 热套管故障的后果是可接受的风险

经历纵向共振

如果热套管峰值振荡弯曲应力小于纵向临界速度时的耐疲劳性限制，则热套管可能会在达到稳定状态设计速度的过程中经历纵向共振锁定区域。由于会对热套管施加大量疲劳循环以及传感器损坏的可能性增大，因此不允许在纵向共振锁定区域内采用稳定状态速度。

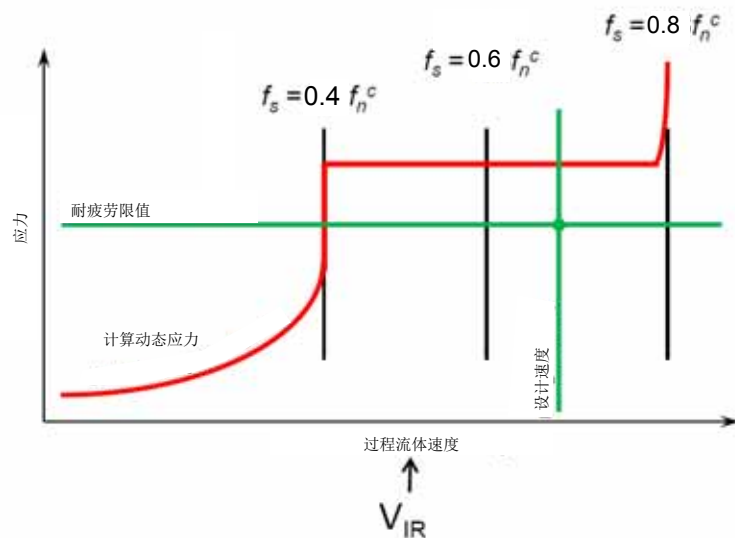


显示通过纵向共振评估的热套管设计的示例图。



显示未通过纵向共振评估的热套管设计的示例图。根据 ASME PTC 19.3 TW-2010，也许可接受此设计。

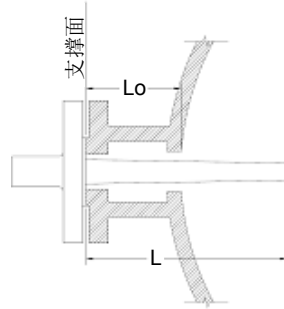
如果热套管峰值振荡弯曲应力大于纵向临界速度时的耐疲劳性限制，则关于热套管是否可以在纵向临界速度以上进行操作会更加不明确。理论上，如果热套管快速经历纵向共振锁定区域，则允许在 $0.6 f_n^c$ 到 $0.8 f_n^c$ 之间进行操作。疲劳循环计数会在热套管寿命中进行累积，因此了解热套管处于共振的时间长度十分重要。由于疲劳寿命取决于许多因素，热套管在共振中的操作时间越长，其寿命越短。



显示艾默生如何解释纵向共振评估的示例图。艾默生认为此设计不可接受。

由于仪器提供商不了解有关倾斜上升速度的设计详细信息，因此艾默生会将未通过峰值振荡弯曲应力评估且在纵向临界速度以上操作的热套管视为不可接受。

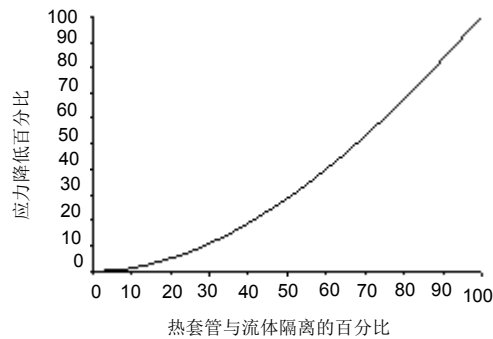
与流体隔离的热套管



与流体部分隔离的锥型热套管

大多数安装的热套管与流体部分隔离；暴露在流体中的热套管长度不是完整的无支撑长度，需要调整弯矩和弯曲应力的公式。

锥型热套管上的隔离效果可方便地演示，但是对阶梯型杆热套管上的隔离效果进行预测或建模的难度要大得多，因为暴露的表面不是均匀变化的形状，且数据存在显著的不连续性。因此，根据阶梯相对于流体流动的位置，可为阶梯型杆隔离热套管执行两组评估。还必须执行两次应力计算，以确定热套管根部和阶梯处的应力。



锥型热套管上的隔离效果

了解安装和过程条件以及斯特劳哈尔频率在频率域中所处的位置之后，可以执行作用于热套管的实际应力分析。如前所述，如果热套管要在纵向临界速度以上进行操作，则当它在达到设计速度的过程中经过该区域时，要考虑纵向共振时的循环应力。还必须评估处于设计速度时的稳定状态和动态应力。

纵向循环应力评估

由作用于热套管表面的纵向和横向力形成的循环应力会集中在根部。为了应对共振条件，必须以纵向共振临界速度执行计算，以了解共振时的峰值弯曲应力是否小于材料的耐疲劳性限制。此分析在纵向临界点执行，所以由于纵向共振而形成的力增大会掩盖升力，因而可以忽略升力以简化计算。仅当斯柯顿数评估指示过程条件需要此评估时，才需执行。

纵向临界速度用于计算作用于热套管的单位面积力。由于是以平均值的形式提供过程流体速度而不是速度曲线图，因此计算还假设单位面积是热套管的整个暴露长度。如果热套管某部分与流动部分隔离（例如带支架管道），则还必须考虑这一点。对于阶梯型杆热套管，必须对两个峰值应力位置（阶梯型杆的根部和基部）执行此分析。

为了确保进行保守的计算，固有阻尼系数设置为 **0.0005**。阶梯型杆热套管必须在两个位置进行评估以找出两者中的最高应力。

ASME PTC 19.3 TW-2010 中的主要变化之一是使用表格指定允许的疲劳应力限制。该表将材料按材料级别进行分类，并在安装方法中交叉引用以确定应力限制。

必须要注意，部分焊透焊接被视为抗疲劳性小于全焊透焊接，此表中为其提供的值较小。有关更多信息，请参阅下面的热套管构造要求。

设计速度下的稳定状态应力评估

还必须以设计速度评估热套管, 以确保其满足过程环境的需求。稳定状态应力是过程中外部压力与拉力的组合。需再次针对最大应力位置计算这些项, 因此如果部分热套管隔离, 或是为阶梯型杆, 则应在考虑这些安装考虑事项的情况下执行计算。

计算出最大应力之后, 可以将其用于确定是否满足冯·米塞斯标准。冯·米塞斯标准用于评估球体和圆筒中的剪切和压应力条件。它会预测材料的塑性屈服条件。⁽¹⁾ 通过了此评估, 则表示稳定状态应力未超过材料疲劳强度, 可以采用所需设计速度使用热套管。

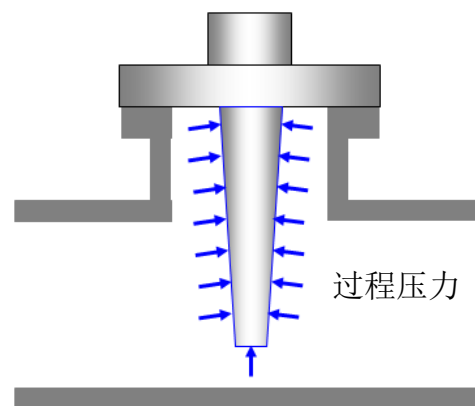
设计速度下的动态应力评估

热套管上的动态应力归因于振荡提升力 (横向) 和拉力 (纵向)。放大系数表示随着斯特劳哈尔频率接近热套管自然频率 (如接近纵向临界速度) 时力增大的指数性质。如果斯特劳哈尔频率不在纵向或横向自然频率锁定带中, 则会计算放大系数并应用于循环应力公式。需要按照与执行纵向循环应力评估相同的方式, 以设计速度计算循环拉力和升力。与以前执行的纵向循环应力评估不同, 不会忽略升力。

如果设计速度大于纵向临界速度, 则可能必须将热套管视为会以不确定方式在纵向共振应力级别上操作。请参阅上面有关“经历纵向共振”章节。

显然, 需对热套管设计执行多项评估, 但是借助诸如纵向临界速度、稳定状态和动态应力评估这类信息, 设计人员可以详细地了解热套管在频率域中的操作范围及其操作时接近于疲劳限制的程度。这类信息让设计人员能够决定要在过程中保持的安全系数。

压应力评估



了解应用是否可接受热套管设计的最终检查是压应力评估。该评估经常会被忽视, 因为它一般不是设计不合适的原因, 但却非常关键。必须分别对杆和末端执行压应力检查。

根据过程压力, 有两种方法可用于计算柄上的压力, 作为适用性检查。对低于 103 MPa (15 ksi) 的过程压力, ASME PTC 19.3 TW-2010 建议使用《ASME 锅炉压力容器规范》(BPVC) 第 VIII 部分第 UG-28 段来计算允许的外部压力。BPVC 这一部分列出的温度限制不适用, 因为大部分热套管是按 ASME B31.1 或

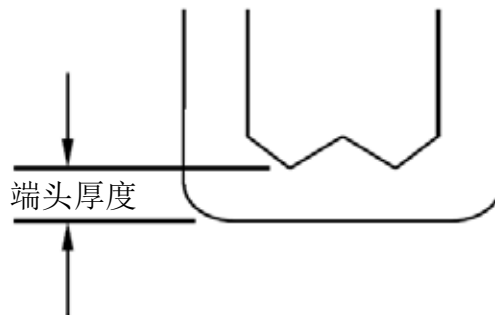
ASME B31.3 设计的。因此, 应通过前述的两种标准之一获得允许的最大应力值。ASME PTC 19.3 TW-2010 中之所以会引用 BPVC 中的计算, 是因为公式具有成功使用的历史, 在行业中比较有名。

如果所需热套管材料不在 BPVC 中或是如果需要更简单的方法, 则 ASME PTC 19.3 TW-2010 提供了备选简化关系。使用简化方法的缺点是在某些温度下, 此方法对某些材料确定的杆压力可能比通过 UG-28 方法计算的数值低 17%。优点是计算复杂性较小, 且具有额外安全余量。

对于高压 (> 103 MPa (15 ksi)) 应用, ASME PTC 19.3 TW-2010 采用 ASME BPVC 第 VIII 部分第 3 节或 ASME B31.3 第 IX 章进行计算。此高压 (超过 ASME B16.5 中针对 2500# 法兰的压力限制) 需要小心评估, 不要通过自动化工具执行。

末端厚度是从外部末端到钻孔最远点的最薄尺寸。因为大多数热套管使用枪钻制造, 所以使用的末端厚度应是最薄点的实际测量值, 这十分重要。使用波峰尺寸计算传感器长度, 因为波峰会接触传感器, 而不是“波谷”。当枪钻尖锐时, 波谷可能会更深 (更薄) 1.5 毫米 [0.060 英寸], 并随着钻头磨损而变厚。

(1) Brock, John E., “Stress Analysis of Thermowells,” Naval Postgraduate School, Monterey CA (1974).



热套管末端厚度详细信息。

热套管可以承受的最大压力是杆或末端压力限制中较小的值。



重要注释:

无论参照 ASME PTC 19.3 还是 ASME PTC 19.3 TW-2010, 压应力评估都只涉及热套管杆 (或柄) 和端头可承受的应力, 而不是螺纹或法兰可承受的应力。应在针对涡旋引起的振动评估热套管设计之前, 执行过程连接选择和压力额定值评估。

材料信息

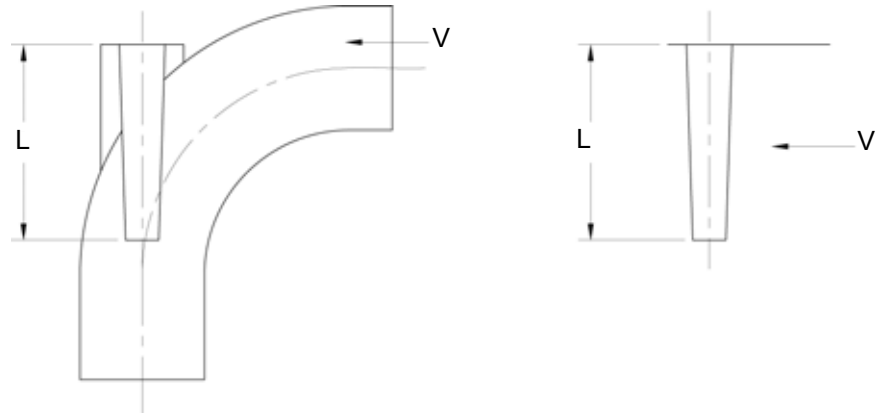
针对材料信息的最佳工程实践是尽可能使用可靠且标准化的信息。艾默生仅使用来自开放源标准 (如 ASME 锅炉和压力容器规范与 ASME B31.1/B31.3) 的材料信息。此信息通常比较保守, 为业界所接受。理论上, 艾默生可以使用供应商信息填充材料数据库。但不鼓励此做法, 因为艾默生不能确保将特定批次的材料用于特定热套管可符合特定报告标准。这不是优化热套管性能的实用或可靠方法。

安装变化

在过程中安装热套管的方法可能会显著影响热套管应力计算和涡旋脱落。此处讨论的变化不属于“标准”安装 (如法兰式、螺纹式和焊接式热套管) 或热套管的部分隔离。

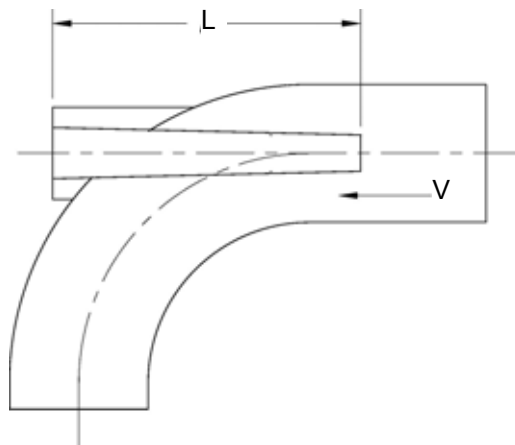
弯管安装

ASME PTC 19.3 TW-2010 未针对在弯管中安装热套管提供有意义的指导。由于存在湍流且复杂性高, 因此对弯管中的流体进行建模极其困难。ASME PTC 19.3 TW-2010 建议为保守起见, 考虑将整个无支撑、无隔离长度暴露在流体中, 同时作用力垂直于 (即“正常”) 热套管轴。对于许多情况, 这并不是可接受的答案。对于此过于保守的观点, ASME PTC 19.3 TW-2010 中的某些意见和委员会讨论产生了一种备选方法。如果末端处于距离弯管足够远的上游或下游位置, 从而使流体流动在末端处与热套管轴平行, 则斯特劳哈尔数非常小, 因为穿过末端的流体微不足道。ASME PTC 19.3 TW-2010 表示这超出了标准的范围, 而业内其他人士坚持认为此类型的安装对与自然频率非常接近的热套管设计来说, 是一个简单的解决方案。



末端朝向下游安装在弯管中的热套管。(1)

ASME PTC 19.3 TW-2010 建议，安装热套管时最好让其指向上游方向，因为流体流量和位置恰当，流向热套管施加的矩臂和力较小，并且末端上流体的层流性更强。如果末端指向下游，流体在经过热套管周围后形成的旋涡可能会具有一些交叉末端分量，但是这极难建模。与下面的成角度安装一样，矩臂计算十分复杂，因此无法方便预测力、矩臂和应力的变化。



末端朝向上游安装在弯管中的热套管。(2)

艾默生正考虑对这些安装方法进行更广泛的调查，以便证实这些解决方案的优点。

成角度的安装

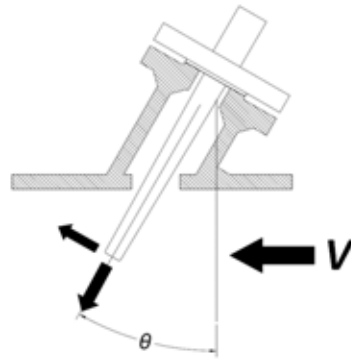
客户经常将热套管与流体成角度地安装以便操作，减少作用于热套管的力或是增加其在小尺寸管路中暴露在流体中的长度，从而获取更加准确的温度读数。末端速度上的“偏航”角度效果与简单三角法无关。它还会使预测作用于热套管的应力和力变得复杂化。

(1) 《ASME 标准》，《性能测试规范 19.3TW-2010》。

(2) 《ASME 标准》，《性能测试规范 19.3TW-2010》。

随着安装角度改变，经过末端的速度会下降。

$$V_{\text{轴交叉}} = V_{\text{流动}} \cdot \cos(\theta), \quad \theta \text{ 最大为 } 30^\circ \quad (1)$$



成角度安装中的速度矢量

随着角度接近 0° ，经过末端的速度分量会接近统一，或是完全等于流动速度。对于应力不是限制因素的安装，这可以帮助减小斯特劳哈尔频率。

对于作用于热套管的力，此相同逻辑并不适用。随着角度改变，表面积会增大，热套管长度会增大，从而增大摩擦力。热套管周围的流体流动的建模会越来越复杂，因而无法容易地预测力、矩臂和应用的变化。ASME PTC 19.3 TW-2010 表示这超出了标准的范围，不过艾默生正考虑对此安装方法进行更广泛的调查，以便证实此解决方案的优点。对于高难度的客户应用，这可能是唯一可行的安装方法。

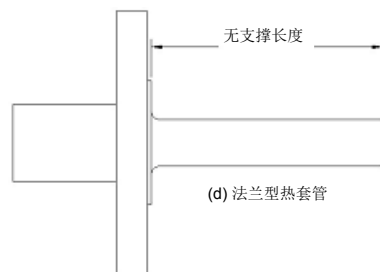
方形管道与圆形管道

由于新标准使用平均速度，因此无需对方形管道的流动剖面以及它与圆形管道有何不同进行了解或建模。设计人员只需了解质量流量、密度和横截面积便可计算平均速度。有关这一点的更多讨论，请参阅“平均速度”一节。

无支撑长度定义

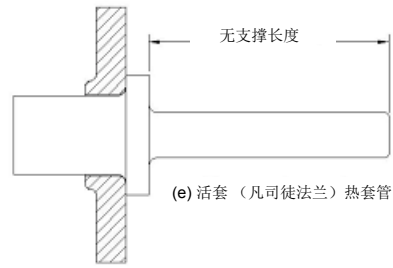
无支撑长度的定义已随着 ASME PTC 19.3 TW-2010 的发布而改变。ASME PTC 19.3 TW-2010 中使用的梁理论模型对无支撑长度的变化非常敏感，因此需要做出明确、一致的定义。

对于法兰式热套管（包括活套法兰 / 凡司徒法兰），浸入长度与无支撑长度相同。

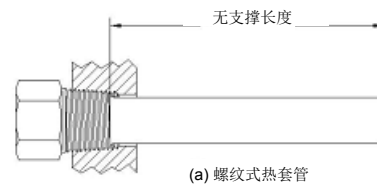


法兰型热套管⁽²⁾

(1) S. E. Ramberg, "The Effects of Yaw and Finite Length upon the Vortex Wakes of Stationary and Vibrating Cylinders," Journal of Fluid Mechanics 128, 81-107 (1983).
(2) 《ASME 标准》，《性能测试规范 19.3TW-2010》。



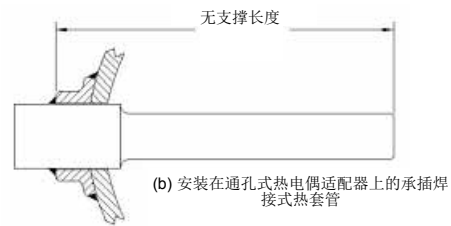
活套法兰 / 凡司徒法兰热套管⁽¹⁾



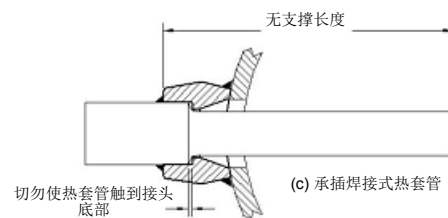
螺纹式热套管⁽¹⁾

对于螺纹式热套管，浸入长度与无支撑长度相同，但是实验结果表明，无支撑长度从螺纹部分的 2 个或 3 个螺纹处开始。在 ASME PTC 19.3 TW-2010 中，通过对螺纹式热套管应用校正系数来解决这一问题。

焊接式热套管方面的变化最大。对浸入长度的不正确使用会缩短无支撑长度并提高热套管的自然频率。



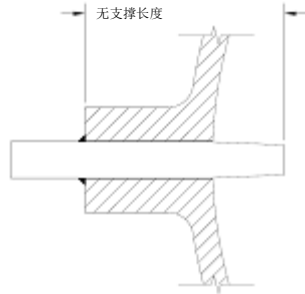
通孔焊接式热套管⁽¹⁾



承插焊接式热套管。⁽¹⁾

(1) 《ASME 标准》，《性能测试规范 19.3TW-2010》。

计算无支撑长度的正确起始位置是焊接点，但是因为艾默生无法准确了解焊接点，所以必须为计算估计焊接点或必须使用总体热套管长度。这会确保无论如何安装热套管，提供的计算都是安全、保守的。



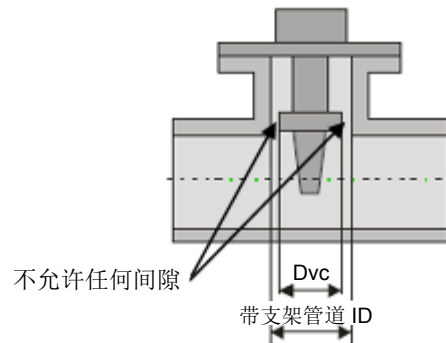
符合 DIN 43772 的焊接式热套管。

备选方法是在热套管上划下一条线，用于显示必须进行焊接的位置，以便使计算准确或保守。这会更加复杂，并需要了解承插尺寸。

必须阐明无支撑长度的特殊情况是根据 DIN 43772 安装的焊接式热套管。这些设计采用穿透到管道中的严格公差孔以及加工棒材热套管的严格公差。由于存在这种安装公差，因此无法确保移动无支撑长度所需的干涉配合（请参阅“流速套圈”一节）。如果缺少其他信息，则会按照左侧的详细信息定义此安装无支撑长度。

流速套圈

在 ASME PTC 19.3 TW-2010 中，还解决了速度（或频率）套圈的使用问题。该标准表示不推荐将套圈用作刚性支撑件来缩短无支撑长度。这只能通过使用干涉配合来实现。这是因为热套管末端位移通常很小（小于 0.5 毫米），⁽¹⁾⁽²⁾ 套圈与带支架管道内径之间的任何间隙都会导致套圈无法减小有效无支撑长度。此外，与锤子重复撞击金属表面一样，热套管或管道会连续变形，并且间隙会加宽，直至没有任何接触。这可能会由于凹陷而导致热套管中的应力增大，也可能会最终破坏位于套圈附近的焊接。套圈必须是有效的干涉配合，因为艾默生无法确保最终配合，所以建议使用几何形状或安装变化来满足过程条件，而不是使用套圈。



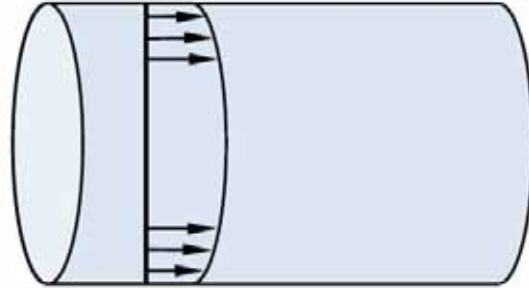
套圈与带支架管道 ID 间不允许存在任何间隙。

艾默生会继续提供采用按照客户规格构造的流速套圈的热套管，但是我们谢绝提供有关流速套圈尺寸的建议，并且不会为使用流速套圈的安装提供计算报告。任何其他政策都与该方法一致。处理 DIN 43772 焊接式热套管时，对流速套圈使用的方法与具有类似用途的其他安装相同。

- (1) Finch, P., Hamblin, M., and Constable, D., "In-situ Measurement of Thermowell Vibration during Production Train Pressurisation," Woodside Energy Ltd. Report (date unknown – post 2001 and pre 2010).
- (2) Haslinger, K.H., Westinghouse Electric Company, "Flow-induced vibration testing of replacement thermowell designs," Journal of Fluids and Structures (2003).

平均速度与速度曲线图

有人认为计算热套管上力的最佳方法是使用有限元分析 (FEA) 方法获得大量详细信息和高精度。使用 FEA 方法的困难之处在于, 输入的参数会持续改变, 因此在不同的时间, 所得的精度会超出可用范围。ASME PTC 19.3-1974 和 ASME PTC 19.3 TW-2010 标准都使用平均速度进行计算。这种做法的基础逻辑是设计人员通常了解质量流率, 但可能不甚了解经过管道的流动剖面。设计人员仅使用质量流率、密度和横截面积便可计算平均速度。使用平均速度还可使计算更加简单, 从而让用户广泛接受。



充分展示管道中湍流流动剖面的示例。

热套管构造要求

计算现场自然频率时, ASME PTC 19.3 TW-2010 假设热套管采用固体棒材制造, 以便可使用简单梁模型。热套管杆可以是锻造或冷弯材料, 但是不能由管道或管材料制成。此限制表示, ASME PTC 19.3 TW-2010 未涵盖属于 3 片式焊接构造的热套管或是通过使用焊帽钻透末端来制造的热套管。

最好将全焊透焊接用于法兰式热套管, 以实现最高疲劳强度额定值 (请参见 ASME PTC 19.3 TW-2010 中的“允许的疲劳应力振幅限制”)。锻造式热套管可在不进行焊接的情况下实现相同目的, 但是成本要高得多。凡司徒法兰式热套管无需更多成本即可实现此目的, 但是许多客户不使用此型式的热套管。

另一个构造问题是热套管的制造公差。太宽松的公差可能会导致梁公式不准确, 并且可能超出公式内所含的所有安全余量。但是严格实施公差可能会导致热套管制造成本增加。对于尺寸还必须考虑腐蚀余量。

艾默生过程控制有限公司

上海办事处
上海市浦东金桥出口
加工区新金桥路 1277 号
电话: 021 - 2892 9000
传真: 021 - 2892 9001
邮编: 201206

北京办事处
北京市朝阳区雅宝路 10 号
凯威大厦 7 层
电话: 010 - 8572 6666
传真: 010 - 8572 6888
邮编: 100020

广州分公司
广州市东风中路 410 - 412 号
时代地产中心 2107 室
电话: 020 - 2883 8900
传真: 020 - 2883 8901
邮编: 510030

西安分公司
西安市高新区锦业一路 34 号
西安软件园研发大厦 9 层
电话: 029 - 8865 0888
传真: 029 - 8865 0899
邮编: 710065

深圳分公司
深圳市南山区海德三道
天利中央商务中心 B 座 1803 室
电话: 0755 - 8659 5099
传真: 0755 - 8659 5095
邮编: 518054

南京分公司
南京市建邺区庐山路 188 号
阳光新地中心 3001 室
电话: 025 - 6608 3220
传真: 025 - 6608 3230
邮编: 210019

济南分公司
济南市历下区泉城路 17 号
华能大厦 9 层 8907 室
电话: 0531 - 8209 7188
传真: 0531 - 8209 7199
邮编: 250011

成都分公司
成都市科华北路 62 号
力宝大厦 5-10-10
电话: 028 - 6235 0188
传真: 028 - 6235 0199
邮编: 610041

乌鲁木齐分公司
乌鲁木齐市五一路 160 号
尊茂鸿福酒店 1001 室
电话: 0991 - 5802 277
传真: 0991 - 5803 377
邮编: 830000

艾默生 (北京) 仪表有限公司
北京市东城区和平里北街 6 号
电话: 010 - 5865 2638
传真: 010 - 6420 0619
邮编: 100013

© 2014 罗斯蒙特有限公司。保留所有权利。所有标识均为其所有者的财产。

Emerson 徽标为艾默生电气公司的商标和服务标志。

Rosemount 和 Rosemount 标识均为罗斯蒙特有限公司的注册商标。

欲了解更多罗斯蒙特测量解决方案, 敬请登陆: www.rosemount.com.cn 进行查询。

咨询邮箱: RMT.China@emerson.com

客服热线: 800-820-1996