



铸铁管的工程分析

栢诚马萨诸塞州波士顿市分公司

Steve McKelvie 著 (mckelvie@pbworld.com)

很多目前仍在使用的旧铸铁管，如果被适当地修复的话，仍然能够提供许多年具成本效益的服务。本文提供了一些早期标准和铸铁生产技术的历史，对进行修复时所需的结构分析有所帮助。此外作者亦对分析步骤作出解释。

在供水系统中采用铸铁管已有悠久的历史。铸铁管安装的第一个正式记录可追溯至 1455 年德国的 Siegerland 市。法国国王路易十四于 1664 年建造了一条 24 公里长，从水泵站延伸到凡尔赛宫的铸铁管。这条管道一直沿用至今。美国也早在 1817 年已经在费城的供水系统中采用铸铁管。

昔日的保守设计和生产过程令管道的设计寿命远远超越现今的标准。很多旧的铸铁管适宜被复修，而且据估计仍然可以提供许多年具成本效益的服务。不过要让修复成功，我们有必要了解铸铁管的历史，以及昔日的设计标准和生产过程。

20 世纪的标准与生产技术

最早的铸铁管设计标准可追溯至美国供水协会（American Water Works Association，简称 AWWA）1890 年的标准。在 1902 年，新英格兰供水协会（New England Water Works Association，简称 NEWWA）采纳了一套较详细的标准，称为「铸铁管与特殊铸件的标准规范」，反映了当年的设计常规。在 1908 年，AWWA 的铸铁管与配件标准 7C.1-1908 获得批准。这项标准一直被沿用至 1950 年代初，期间并无经过任何修订。

NEWWA 的 1902 年标准

标准规定管道尺寸为「供应波士顿市和方圆 10 哩内其它城镇的大都会供水公司所采用的管壁厚度」。编写该标准的三人委员会成员包括大都会供水公司的 Dexter Brackett。这些管壁的厚度是根据下列公式计算的，比现在采用的延性铸铁管厚很多：

$$t = \frac{(p + p')r}{3,300} + 0.25 \quad (1)$$

t = 壁厚（英寸）

p = 静压（磅/平方英寸）

p' = 为水锤预留的压力（磅/平方英寸）

r = 管道内半径（英寸）

3,300 = 铸铁抗张强度（为 16,500 磅/平方英寸的 1/5）

0.25 = 为锈蚀和其它因素而预留的管壁厚度（英寸）

采用厚管壁有几个原因，其中之一是当年所用的设计步骤仍在发展中。一个关于 NEWWA 的 1902 年标准的初步报告说明：「静压头或压力可以被精确地估算，但是水锤、车辆交通经过管道时所造成的影响、管道下的沉降物、管道内的结节形成（由局部性锈蚀导致的结节状锈蚀物）、管道外的电分解，以及管道的年龄等等，都无法根据现时的知识用数学方法定量」。NEWWA 的 1902 年标准没有说明铸铁管管壁的允许应力，但是从该标准所附的报告中，我们得知它是基于 16,500 磅/平方英寸的抗张强度。

计算管道垂直土压力的 Marston 公式（也许是分析刚性管道的最重要设计步骤）直到 1913 年才面世。Spangler 对刚性管道荷载系数所作的研究也要到 1933 年才被刊登。

AWWA 的 1908 年标准

在十九世纪初，管道材料市场的竞争并不大，因此灰铁管工业不需与其它材料制成的压力管道进行激烈竞争。AWWA 的 1908 年标准明确地描述了灰铁管的地坑浇铸生产方法。这种管子的壁厚是采用 Fanning 公式计算的，只考虑到管道的内压。此外公式在算出的抗压厚度上叠加了一个随意系数，足以包含当年还未被认识到或至少不能被满意地算出的应力。

1939 年的规范

1921 年出现的离心铸造方法取代了一直被采用的地坑浇铸方法。这种新方法加上对铁冶炼的更深认识提高了铁的强度，使离心铸铁管虽然管壁较薄，但是和地坑铸铁管同样坚固。

随着这种进步，人们认识到在设计管道时必须考虑管身的外压荷载。因此在 1926 年在美国标准协会（现为美国国家标准协会 American National Standards Institute，简称 ANSI）领导之下成立了一个委员会，为灰铁管制订新的规范。委员会在其后的十年里赞助了一系列的研究项目，发展了灰铁管设计的综合荷载分析。委员会在 1939 年也第一次出版了「铸铁管强度与壁厚的计算」标准（ANSI A21.1）。

决定管道是否适宜被修复

决定一根金属水管是否适宜于被修复时，必须评价管道的外部 and 内部情况，如图 1 所示。

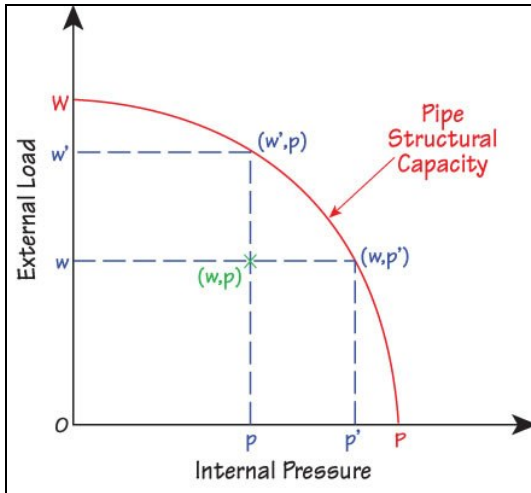


图 1 铸铁管的设计与分析

x 轴 = 管内压力
y 轴 = 管外荷载
曲线 = 管道结构承载力

W = 无内部压力时的管外荷载能力
P = 无外部荷载时的管内荷载能力
w = 实际的管外荷载
p = 实际的管内荷载
w' = 内压力 p 下的管外荷载极限
p' = 外荷载 w 下的管内压力极限
w'/w = 内压力 p 下的管外荷载安全系数
p'/p = 外压力 w 下的管内压力安全系数

金属管的表面会产生锈蚀。锈蚀可能全面地损坏管道的表面导致管壁变薄，或者只局部地损坏某些地方。两者中又以局部的锈蚀损坏较难被确认。在另一方面，锈蚀物黏附在铸铁管表面，可以帮助保护下面的金属。而可观数量的石墨（约占体积的 10%）加上相对地非活性的氧化铁与磷酸盐，亦令灰铸铁的耐蚀能力较高。这种对抗锈蚀的耐力，加上较厚的管壁，使这些旧铸铁管非常适合于被修复。

水泥砂浆内衬修复技术是 1922 年首先在南卡罗来纳州的 Charleston 市被采用的。虽然已知用这方法修复的水管在使用一段时间后可能会出现内部结节，但是尽管管道的内观较难看，结节对水质的影响却十分轻微。不过，由于减小了内径的尺寸和增加了内表面的粗糙度，管道的水力运行会受到显著的影响。

刚性压力管道的结构分析

进行设计与分析时，铸铁管道会被视为刚性管道。利用综合荷载方法，我们可以分别计算管道的最大允许内压力和最大允许外荷载，然后合并这两个数值去评估管道。

典型的铸铁管综合荷载曲线，显示了随着外荷载的增加，最大允许内压力必须相应减少（见图 1）。如果综合荷载超越了此曲线所示的最大承载力，管道的安全性便会成疑。可接受的安全系数应按照业主提供的资料拟定。这程序将向业主提供了解管道情况所需的资料，让业主决定可接受的安全水平，以及有关修复管道的事宜。主要步骤包括下列各项：

管道宽度预留值

在设计铁管时，必须考虑以下两项预留值以应付实际情况：

- 锈蚀预留值 2 毫米（0.08 英寸）

- 浇铸预留值（因为铸铁品生产并非精细的工序）。NEWWA 规定 1.2 米（48 英寸）直径的管道需有 2 毫米的浇铸预留值

因此铸铁管能够承受设计荷载的净壁厚，为标准壁厚减去 4 毫米。

管内压力

承受内压力所需的净壁厚可用下式计算：

$$t = \frac{pD}{2S} \quad (2)$$

- t = 所需的净壁厚（英寸）
- p = 内压力（磅/平方英寸）
- D = 外径（英寸）
- S = 管壁应力（磅/平方英寸）

管外压力

外部荷载对管道的影响可用下式计算：

$$MR = \frac{0.0795(W)(D+t)}{t^2} \quad (3)$$

- MR = 断裂模数或应力（磅/平方英寸）
- W = 管外总荷载（磅/英尺）
- D = 外径（英寸）
- t = 壁厚（英寸）

在设定可允许的最大断裂模数或极限应力后，可计算出管道的最大允许外荷载。此荷载将等于管道的三边支承强度。

结合效果

内部与外部荷载的结合效果可以 Schlick 方程式计算。它是根据 1930 年代对铸铁管的研究而得出的：

$$w = W[(P - p)/P]^{1/2} \quad (4)$$

- w = 在内部与外部荷载的结合作用下，管道断裂时的三边支承荷载（磅/英尺）
- W = 无内压时的管道三边支承强度（磅/英尺）
- P = 无外部荷载时的管道爆裂强度（磅/平方英寸）
- p = 在内部与外部荷载的结合作用下，管道断裂时的内压力（磅/平方英寸）

安全系数

评估管道的内部设计压力时，必须考虑下列三种压力：正常运作压力、瞬变压力和测试压力。这几种压力的相关不确定性各有差异，因此每个数值的安全系数也可能不相同。

- **正常运作压力** 这是系统的正常水力坡度线与管道标高之间的差压。这个数值能被合理地确定，因此安全系数可订为 1.25。
- **管内瞬变压力** 也称为水锤压力。这些压力并没有很明确的定义，因此相应的安全系数可订为 2.0。
- **测试压力** 这是在受控情况下进行的测试，用以校核管道的设计与安装。安全系数可取 1.25 至 1.50。

计算步骤

最大的管内压力可以方程式 (2) 计算。设计者应考虑在该方程式中所采用的管壁应力值。如果采用的应力为 16,500 磅/平方英寸，另外假定铸铁仍然保持生产时的抗张强度，那么所得出的管内压力将是管道的极限承载力。但较谨慎的做法是采用小于 16,500 磅/平方英寸的抗张强度。此外，对铸铁进行冶金学试验将有助于制订一个合适的数值。

同样地，管道能承担的最大外荷载亦可用方程式 (3) 计算。波士顿市一条有 100 年历史的 1.2 米直径铸铁管，经 Talbot Strip 试验后测出断裂模数为 29,000 磅/平方英寸。方程式 (3) 的结果是管道的最大外部三边支承强度，相等于 1.0 的安全系数。

方程式 (4) 可以利用从方程式 (2) 与 (3) 得出的结果，算出管道的极限综合荷载力。这条曲线相当于 1.0 的安全系数。

荷载情况

评估的下一个阶段是确定管道将承受的荷载情况。内部压力和外部荷载的结合作用应被标绘在综合荷载曲线上。各标绘点与极限综合荷载力之间的距离代表在该情况下预防管道断裂的安全系数。每一种荷载情况都应经过评估，从而判断所得出的安全系数是否合适。

【 完 】

相关网站:

- 美国延性铸铁管研究协会 Ductile Iron Pipe Research Association: <http://www.dipra.org>

Steve McKelvie 已有 30 年以上的管道与管线设计经验，同时积极于为美国供水协会编写管道设计标准。他目前正在为马萨诸塞州水资源协会的一项铸铁管道修复项目工作。在本文刊登于 PB Network 第 64 期后，Steve 另将文章的改篇版本刊登于电子杂志 WaterWorld (2007 年十一月号)。

http://www.pennnet.com/display_article/311279/41/ARTCL/none/none/1/Engineering-Analysis-Determines-Rehab-Potential-for-Cast-Iron-Pipe/