



中碳钢管敷设野外输油管道的实践

冯金奎* 陈 岗

(中国人民解放军海军 38562 部队)

冯金奎, 陈 岗. 中碳钢管敷设野外输油管道的实践. 油气储运, 1994, 13(5): 40~43

摘 要 根据中碳钢管敷设野外输油管道的实践, 提出了用中碳钢管替代低碳钢管必须解决的问题, 论述了解决方法。中碳钢管材(J-55)的化学成分, 含碳量介于 40# 与 45# 钢之间, 含硫量明显低于低碳钢, 含锰量变化区间较大, 计算出的碳当量大于 0.6%, 表明管材的可焊性较差; 其机械性能, 抗拉强度和屈服极限比低碳钢高, 冲击韧性相对较小, 延伸率变化区间大, 形成强度有余、塑性和韧性不足的特点, 使系统有发生脆性断裂的危险。为了保证焊接后的管道在不产生裂纹的前提下具有足够的机械强度, 对管道及附件加工、安装及试验等作业程序作了明确规定, 并对管道焊接工艺提出了详细要求。为了检验工艺设计是否合理, 施工质量是否合格, 及时清除可能对系统安全运行造成威胁的隐患, 有必要对管道中存在的主要缺陷进行安全性评定。实践证明, 只要选择合理的焊接工艺, 进行严格的质量检查和认真的安全评定, 中碳钢管用作野外输油管道是可行的。

主题词 中碳钢 输油管道 管材 管道敷设

敷设野外输油管道普遍采用低碳钢材质的无缝钢管或焊缝钢管。我部在建设一条长约 6 500 m, 设计输送能力为 600 t/h 的中压输油管道时, 因国内货源紧张、经费不足、任务紧等原因, 选用了当时仅能购到的中碳钢石油套管(钢号为 J-55, 规格为 $\phi 340 \times 11$, 技术要求为 Q/BG-518-90)作为管材, 在施工中成功解决了中碳钢管替代低碳钢管必须解决的几个问题。

材料的性能分析

中碳钢管材的化学成分与机械性能分别见表 1、表 2。

表 1 中碳钢管材的化学成分 %

钢号	C	Si	Mn	P	S
J-55	0.38 ~0.5	0.17 ~0.37	0.17 ~1.0	<0.04	<0.06

表 2 中碳钢管材的机械性能

钢号	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服极限 σ_s /MPa	伸长率 δ_5 %
J-55	517~1 385	379~551	18~29

从普通管材 20#、40#、45# 钢(参见 GB 699-65)与中碳钢管材的化学成分对比上看, J-55 材质的含碳量介于 40# 与 45# 钢之间, 其含硫量明显高于低碳钢, 含锰量变化区间较大, 且有部分材料低于低碳钢的含锰量。

* 066000, 河北省秦皇岛市; 电话: (0335)335613。

根据 IIW(国际焊接学会)推荐的碳当量计算公式:

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (\%)$$

碳当量 $C_E > 0.6\%$, 表明管材的可焊性较差, 对焊接工艺的选择、焊工的技术水平相应提出了较高要求。

从普通管材(参见 GB 699-65)与中碳钢的机械性能对比看, 虽然 J-55 钢材的抗拉强度 σ_b 和屈服值 σ_s 比低碳钢有一定提高, 但冲击韧性相对较小, 延伸率变化区间大, 形成了强度有余, 塑性和韧性不足的特点。因此, 系统有发生脆性断裂的危险, 在进行系统工艺设计和计算时, 不能简单地模仿以往的经验做法和常用公式, 必须对系统的安全可靠性予以充分考虑。

采用适当的焊接工艺

中碳钢一般是指含碳量在 $0.30\% \sim 0.60\%$ 的碳钢, 与低碳钢相比, 焊接有两个显著特点:

(1) 由于母材近缝区容易产生低塑性的淬硬组织, 并且随着母材含碳量的提高和管材厚度的增加, 这种淬硬倾向愈加明显, 所以在母材近缝区(或焊接处)易产生冷裂纹, 其特征是产生裂纹的时间发生在焊接后近缝区冷却到 300°C 以下时。出现这种情况的主要原因是冷却速度过快, 以及焊缝含氢量偏高和存在较大应力。

(2) 由于在第一层焊缝金属中熔化的母材比例通常达 30% 左右, 使得焊缝金属的含碳量偏高, 往往导致热裂纹的产生, 特别是在弧坑处更易出现。其分布规律是裂纹与焊缝的鱼鳞状波纹线相垂直, 当母材含硫量偏高、含锰量偏低时, 也易产生热裂纹。

为了保证焊接后的管道在不产生裂纹的前提下具有足够的机械强度, 我们编制了

《 $\phi 340$ 输油管线施工及验收说明书》, 对钢管检验、管道及附件加工, 管道安装及试验等全部作业程序作了明确规定, 对管道焊接工艺提出了如下要求:

1. 一般规定

(1) 管道焊接接头的坡口加工、组对、热处理、焊接及验收等均应符合本规定。

(2) 取得施焊资格的焊工, 在施焊过程中应按规定的焊接工艺进行操作, 工序间应有交接手续。

2. 坡口加工及接头组对、点固焊

(1) 管道(管件)焊接前, 采用氧—乙炔气割工艺加工成 V 型坡口。加工后的坡口表面不得有裂纹、夹层等缺陷。

(2) 管段、管件组对时, 其内壁应平齐、错边量不大于 1 mm 。为满足通球扫线要求, 管内壁焊缝不允许突出。

(3) 管段、管件组对后点固焊的工艺措施及焊接材料应与正式焊接一致。

(4) 管段、管件在组对及点固焊时, 应保证焊接区域不受恶劣环境条件(如风、雨、雪)的影响, 以保证正式焊接质量。

(5) 管段、管件上卡具的焊接工艺及焊接材料应与正式焊接相同。卡具的拆除采用氧—乙炔焰切割, 其残留痕迹应进行修整。

3. 预热和热处理

为降低或消除焊接部位的残余应力, 防止产生裂纹, 改善焊缝和热影响区的金属组织和机械性能, 应依据以下原则进行焊前预热和焊后热处理:

(1) 管道焊接前应先预热至 $150 \sim 250^\circ\text{C}$, 当焊接环境温度(气温)低于 0°C 时, 预热温度应提高至 $300 \sim 350^\circ\text{C}$, 焊接过程中层间温度不应低于预热温度。

预热范围: 以焊口中心为准, 至两侧 $150 \sim 200\text{ mm}$ 范围内为预热区。预热时, 应使焊口两侧及内外壁温度均匀, 防止局部过热。加热区附近用岩棉被保温, 以减少温度梯度及

热损失。

(2) 焊接后应及时对焊接区域加热至 600 ~ 650 °C, 立即用半米宽岩棉被三层裹紧, 保温不少于 1 h, 然后在空气中冷却, 退火处理的范围与焊前预热范围相同。

(3) 预热前及退火热处理采用工频加热方式, 也可用乙炔—氧焰均匀加热。

4. 施焊方法及焊接后的检查

可参照 Q/GDJ 0002-91 及 JB 1152-81、GB 3323-87 等标准。

对系统进行的安全评定

由于中碳钢管材材质的影响及焊接工艺、焊接质量、作业环境等诸多因素, 管路系统中不可避免地存在着缺陷。在系统投入正常运行后, 由于操作压力和温度的波动以及腐蚀、疲劳等原因, 也会产生新的缺陷。正确评定中碳钢管路系统的安全可靠性, 不仅可以检验工艺设计是否合理, 施工质量是否合格, 也可及时清除可能对系统安全运行造成威胁的隐患。可见, 完全有必要对系统存在的一些主要缺陷(特别是超标缺陷)进行安全性评定。为此, 我们以有关施工资料、试验数据为依据, 以 CVDA-84《压力容器缺陷评定规范》为标准, 对系统的脆断进行了评定。

1. 系统的缺陷及其简化

(1) 第一类缺陷 根据无缝探伤检查的结果, 管道对接接头处焊缝未焊透的最大长度为 80 mm, 深度为 4 mm(长度大于 80 mm 的均已返工重焊), 按照 CVDA 规范将其简化为 $2c=80$ mm, $a=4$ mm 的半椭圆形表面缺陷(c 为长半轴, a 为短半轴, 管壁厚度为 11 mm)。

根据 CVDA 规范中计算公式可计算出该种缺陷(裂纹)的等效尺寸 $\bar{a}=10.40$ mm。

(2) 第二类缺陷 假设管道表面有纵向非穿透性裂纹, 长 500 mm, 深 1 mm(实际

检查未发现), 将其简化为 $c=250$ mm, $a=0.5$ mm 的椭圆形表面缺陷(参数意义同前)。

计算出裂纹等效尺寸 $\bar{a}=1.36$ mm。

(3) 第三类缺陷 假定管道内有平行于管道自由表面方向的最大长度为 100 mm、沿厚度方向的最大高度为 1 mm 的埋藏缺陷(实际未发现), 且缺陷位于距管道外表面 5~6 mm 之间, 将其简化为长轴 $2c=100$ mm, 短轴 $2a=1$ mm 的椭圆形埋藏裂纹。

计算出裂纹等效尺寸 $\bar{a}=0.5$ mm。

2. 应力值的确定

在缺陷评定中所考虑的应力是指缺陷部位无缺陷存在时的应力。

(1) 外载荷引起的应力 σ_1

①对第一种缺陷, 由于它沿着环向焊缝, 而焊缝处一般都存在应力集中现象, 所以, 此处应力等于管道系统工作时操作压力所产生的环向应力与应力集中系数 k 的乘积:

$$\sigma_{11} = k PD / (2t) \quad (1)$$

式中 σ_{11} ——焊缝处无缺陷时由管内压力形成的应力, MPa;

k ——应力集中系数, 取 $k=1.5$;

P ——管内工作压力, $P=2.45$ MPa;

D ——管道外径, $D=340$ mm;

t ——管道壁厚, $t=11$ mm。

将各值代入公式(1), 得

$$\sigma_{11} = 56.8 \text{ MPa}$$

②对第二、第三种缺陷, 由于它们不在焊缝部位, 所以这两种缺陷处由外载荷引起的应力为 $P=2.45$ MPa 时的环向应力,

$$\begin{aligned} \text{即 } \sigma_{12} = \sigma_{13} &= \frac{PD}{2t} = \frac{2.45 \times 340}{2 \times 11} \\ &= 37.9 \text{ MPa} \end{aligned}$$

σ_{12} 、 σ_{13} 分别表示在第二、第三种缺陷处由外载荷引起的应力, 其它符号意义及取值同前。

(2) 焊接残余应力 σ_2 管道焊缝处虽

已作热处理,但其焊接残余应力依然有一定值,设残余应力系数 $a_r = 0.5$,

$$\begin{aligned}\text{则 } \sigma_{21} &= a_r \sigma_s = 0.5 \times 379 \\ &= 189.5 \text{ MPa}\end{aligned}$$

式中 σ_{21} ——焊缝处焊接残余应力 MPa;
 σ_s ——母材屈服极限,取 $\sigma_s = 379$ MPa。

在第二、第三种缺陷处,其焊接残余应力为零。

(3) 附加应力 σ_3 在管道弯曲部位,如弯头、热补偿器等处,应力沿截面分布不均匀,且在管件煨制过程中存在应力集中现象,引起的附加应力可依照下式计算

$$\sigma_3 = a_u \sigma_u \quad (2)$$

式中 σ_3 ——弯曲部位附加应力,MPa;
 a_u ——弯曲应力集中系数;
 σ_u ——弯曲应力, $\sigma_u = 0.5 \frac{PD}{2t}$, MPa;
 P 、 D 、 t 意义取值同前。

①对表面裂纹,取 $a_u = 0.75$,

$$\begin{aligned}\text{则 } \sigma_{31} = \sigma_{32} &= 0.75 \times 0.5 \times \frac{2.45 \times 340}{2 \times 11} \\ &= 14.2 \text{ MPa}\end{aligned}$$

②对埋藏裂纹,取 $a_u = 0.25$,

$$\begin{aligned}\text{则 } \sigma_{33} &= 0.25 \times 0.5 \times \frac{2.45 \times 340}{2 \times 11} \\ &= 4.7 \text{ MPa}\end{aligned}$$

(4) 总应力 σ 缺陷部位的总应力为上述三种应力之和,计算结果列于表 3。

表 3 缺陷部位的应力

缺陷类别	外载荷应力 σ_1/MPa	残余应力 σ_2/MPa	附加应力 σ_3/MPa	总应力 σ/MPa
1	56.8	189.5	14.2	260.5
2	37.9	0	14.2	52.1
3	37.9	0	4.7	42.6

3 脆断评定

由于各缺陷处的总应力均小于管材的屈服极限 σ_s ($\sigma_s = 379$ MPa),可任意采用应力强度因子法或 COD 法进行脆断评定。我们运用 COD 法对三种缺陷进行了脆断评定,又采用

应力强度因子法对实际缺陷最严重的第一种缺陷作了校核。

(1) 用 COD 法评定缺陷 等效允许裂纹尺寸计算公式为

$$\bar{a}_m = \frac{E \delta_{cr}}{2 \pi \sigma_s \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)} \quad (3)$$

式中 $\bar{a}_m$ ——等效允许裂纹尺寸,mm;

E ——钢材弹性模量,

取 $E = 2.0 \times 10^5$ MPa;

δ_{cr} ——COD 的临界值(原裂纹尖端张开位移),取 $\delta_{cr} = 0.08$ mm;

σ_s ——钢材屈服极限,取 $\sigma_s = 379$ MPa;

σ ——缺陷处最大应力,MPa。

将已知各值代入式(3),求得各类缺陷等效允许裂纹尺寸,见表 4。

表 4 各类缺陷等效允许裂纹尺寸

缺陷类别	总应力值 σ/MPa	等效允许裂纹尺寸 $\bar{a}_m/\text{mm}$	等效裂纹尺寸 $\bar{a}/\text{mm}$
1	260.5	14.22	10.40
2	52.1	355.55	1.36
3	42.6	531.81	0.50

从表 4 看出,管道缺陷的等效裂纹尺寸均小于管道等效允许裂纹尺寸,所以管道系统中存在的三类缺陷是可以接受的。

(2) 用应力强度因子法对第一种缺陷的脆断进行复核 复核结果同 COD 法结果一致。

4. 结 论

评定结果表明:中碳钢管道中三种缺陷的存在是不会产生脆断而影响系统安全的。

应说明的几个问题

(1)确定坡口尺寸时,对接间隙应尽量与第一层焊道所用焊条直径相同,避免局部不易焊透的现象发生。

(下转第 50 页)

的周边分布特点也证实了对基础沉降变形的论述。油罐基础沉降稳定后,从距基础中心 $D/4$ 到 $D/2$ 这个区域,基础的坡度变小,有助于沉淀水的漫布,从弹性力学分析可知, $D/4$ 附近的底板抗弯强度较低,且易产生凹凸变形,也就是在 $D/4$ 到 $D/2$ 这个区域内极易形成一些积水凹坑,从而造成腐蚀区。

结论与建议

罐基础的沉降,沉降造成的凹凸变形以及由于变形而产生的严重腐蚀,都是不可回避的事实。当务之急是怎样减轻罐基础沉降前后的形状改变对底板腐蚀的影响,而长久之计是重新设计罐基础形状。目前美国采用了一种新型的罐底形状^[3],这种罐底呈中心低周边高的倒圆锥形,即漏斗形,整个油罐由混凝土浇筑成一个钢性基础,在混凝土与地基土之间铺有一层高密度聚乙烯材料,在基础中央有一个集油槽,并用一根管子引到罐壁外面的检测井上。因这种刚性基础在地基的沉降中不会发生形状改变,所以不会造成罐底板的凹凸变形。这种基础的中心处最低,是罐基础上的唯一最低点,这将保证整个油

罐底板上的沉淀水能及时汇集在一起并顺利地排出去,从而可减轻罐底板的腐蚀,延长罐底板的使用寿命。而且,使用这种新型油罐基础还能及时发现罐底板的渗漏,不仅能防止油品的损失,还特别有利于环境保护。另外,据一份新加坡考察报告透露,新加坡的油罐广泛采用一种阶梯式漏斗型油罐基础。这种基础也是中心低周边高,但基础表面为阶梯状而不是一个圆锥面。这种基础除具有美国那种油罐基础的优点外,还具有基础受力均匀,力学性能好的特点。

总之,客观存在的事实是不可改变的,要想彻底解决罐底板的腐蚀问题,增强罐底板的防渗功能,就必须以一个新概念去重新设计油罐基础的形状。

参 考 文 献

- 1 潘家华,郭光臣,高锡祺.油罐及管道强度设计.北京:石油工业出版社,1986
- 2 尹国耀,王福众,钱建华.储油罐腐蚀情况调查及其综合治理.油气储运,1989,8(4):12~14
- 3 倪建乐译.地上油罐的二次封闭和渗漏检测系统.国外油气储运,1991,9(4):55~59

(修改稿收到日期:1994-02-16)

编辑:王 沙

(上接第 43 页)

(2) 管件煨制、管道预热及焊后热处理宜采用工频加热方式。

(3) 为防止管道发生脆性断裂,除对材质应有一定要求并认真检查验收外,在管道的运输、装卸、预加工、组装及下沟等作业工序中,应尽量避免发生压瘪和表面划痕,特别是压瘪处的表面划痕,否则将会严重影响管道抗脆断安全性。

通过这次施工实践,我们认为只要选择合理的焊接工艺,进行严格的质量检查和认

真的安全评定,中碳钢管用于野外输油管道不仅是可行的,而且也是可靠的。我们建成的管道系统近二年来的运行(实际输油能力 $850 \text{ m}^3/\text{h}$,总输量已超过 30 万 t)也证明了这一点。

参 考 文 献

- 1 张康达,洪启超.压力容器手册.北京:劳动人事出版社,1990
- 2 焊工手册.北京:机械工业出版社,1984

(收稿日期:1993-11-27)

编辑:王 沙