

· 工程应用 ·

(20) 115-119

张紧螺栓的断裂分析*

Fracture Analysis of Tense Bolt

赵长富

Zhao Changfu

(重庆大学工程力学系, 重庆, 630044)

TH 131.3

A 摘要 用断裂力学和可靠性分析的方法,研究了天然气跨江管桥斜拉索张紧螺栓断裂的原因,并提出了应采取的安全措施。

关键词 螺栓; 疲劳断裂; 裂纹; 可靠性

中国图书资料分类法分类号 O346.1

ABSTRACT In this paper the methods of fracture mechanics and reliability are used to analyse the causes for failure of a flange bolt connecting an inclined rope to the natural gas pipeline bridge spanning the Changjiang (the Yangtze River) located at Chongqing and the proper safety measures that should be required are proposed.

KEYWORDS bolt; fatigue fracture; crackle; reliability

建峰化工总厂的双塔双家面混合型斜拉索天然气跨江管桥是30万吨合成氨化肥装置原料气的通道,管桥横跨长江主航道,管桥底部至长江常年枯水水面高度为70 m。在1992年3月23日和5月28日相继发生两次斜拉索张紧螺栓的突然断裂,使相应的斜拉结构退出工作状态,严重地危及管桥的安全和长江主航道的安全航行。因此分析张紧螺栓的断裂原因,采取相应的安全措施,杜绝今后类似事故的再次发生,确保管桥安全输气,是十分重要的。

1 断口形貌特征

张紧螺栓为T48×5的梯形螺纹。从断裂后的螺栓上取样分析,确认张紧螺栓的材质为45钢,符合设计图纸的要求。

螺栓断口如图1所示,从图上可观察到清晰的疲劳扩展辉纹,共有6个疲劳源点,分别位于3个层面上。这些疲劳源点在不同层面上起裂,同时扩层,当彼此的疲劳扩展辉纹相遇时,再发生轴向撕裂而最终断裂。

从两根螺栓断口的多疲劳源点扩展途径及其形成的特征来看,螺栓的受力状态是复杂

* 收文日期 1994-09-20

多变的, 断面上的疲劳源点形成的时间先后不一, 在不同的层面上起裂, 同时扩展, 直至各裂纹的辉纹前沿相遇而最终断裂, 其断裂特征为多源点疲劳脆性断裂。

2 金相分析

从两根断裂螺栓的残留部分取样, 梯形螺纹的剖面如图 2 所示。从图上可以看出在螺纹根部有数条微裂纹。经测定螺纹根部右底圆弧 $r=0.35\text{ mm}$, 左底圆弧 r 较小, 基本上是尖角。由于刀具放置不正, 偏斜 2° , 导致右侧根部向内挖掘, 边壁啃成锯齿状。如此加工缺陷形成了螺纹根部的严重应力集中, 使得局部应力急剧增大。在不同试样的螺纹根部还发现了来自材质本身的缺陷, 非金属夹杂物也较多。非金属氧化物和硫化物之和大于 7 级, 图 3 所示为螺纹根部转角处的硫化锰夹杂, 相当于若干条预制裂纹存在于该处。金相分析还发现螺纹根部材质疏松, 在空间上形成许多孔隙, 从而构成孔隙状微裂纹网络。这些缺陷在适当的条件下, 就可以诱发成为疲劳裂纹的源点。

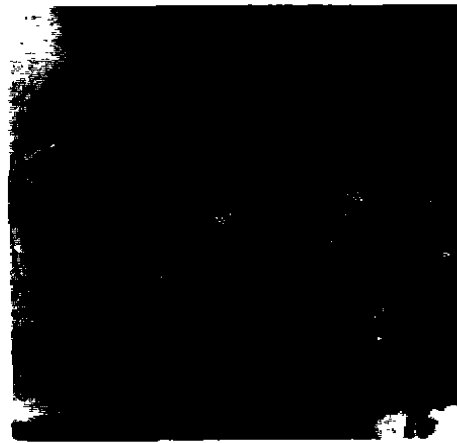


图 1 螺栓断口形貌

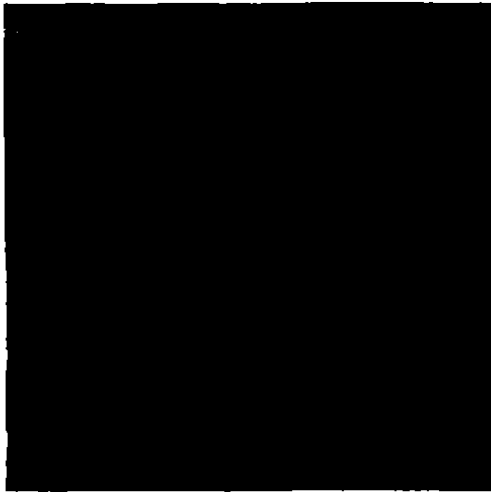


图 2 梯形螺纹剖面

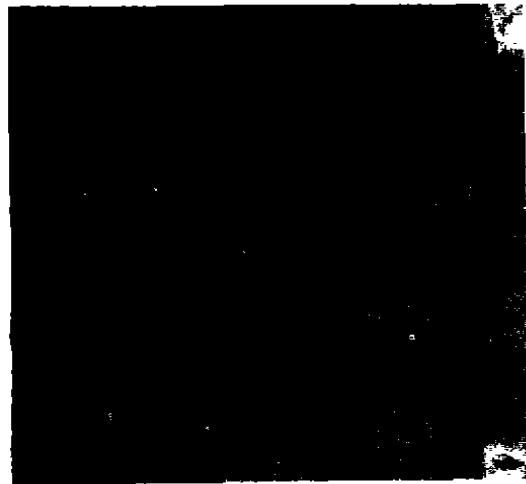


图 3 螺纹根部的硫化锰夹杂

3 断裂分析

由有限元计算知两次螺栓断裂时承受的最大载荷分别为 89.5 kN 和 92.7 kN , 经核算,

它们的静强度是足够的。*

从以上分析知，螺纹根部存在严重的应力集中，按“机械零件强度计算手册”中的公式，其理论应力集中系数为

$$\alpha_s = 1 + 1.1 \sqrt{P/R} \quad (1)$$

式中，螺距 $P = 5 \text{ mm}$ ，根部圆角半径 $R = 0.1 \text{ mm}$ ，经计算后得 $\alpha_s = 8.8$ 。螺栓材料的 $\sigma_s = 360 \text{ MPa}$ ，螺栓的工作应力

$$\sigma_m = T/A = 66.9 \text{ MPa} \quad (2)$$

式中， T ——螺栓张力， $T = 92.7 \text{ kN}$ ， A ——螺栓有效承载面积。

螺纹根部的表面裂纹尺寸为： $2c \times a = 1 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ ，则当量裂纹深度为：

$$\bar{a} = \alpha^2 a, \quad \alpha \text{——形状因子} \quad (3)$$

$$\alpha = 1.1 / \sqrt{E(k)^2 - 0.212(\sigma/\sigma_s)^2} \quad (4)$$

式中 $\sigma = \alpha_s \sigma_m$ ， $k = \sqrt{1 - (a/c)^2} = 0.6$ ，查第 2 类完整椭圆积分表得 $E(k) = 1.4171$ ，计算后有 $\alpha = 0.9162$ ，则 $\bar{a} = 0.3358 \text{ mm}$ 。

已知 45 钢的 $K_{Ic}^{[1]} = 63 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ ， $E = 210 \text{ GPa}$ ，则

$$\delta_0 = K_{Ic}^2 / E\sigma_s = 0.0525 \text{ mm} \quad (5)$$

因为 $\sigma/\sigma_s > 0.5$ ，所以临界裂纹深度

$$a_c = \delta_0 / 2\pi e_s (e/e_s - 0.25) \quad (6)$$

式中， $e = \sigma/E = 2.803 \times 10^{-3}$ ， $e_s = \sigma_s/E = 1.740 \times 10^{-3}$ 。

经计算后得 $a_c = 3.519 \text{ mm}$ 。因为 $a_c > \bar{a}$ ，所以 $2c \times a = 1 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ 的表面裂纹不会引起螺栓的失稳断裂。斜拉索张紧螺栓在役工作状态如图 4，由图可知，张紧螺栓的一端和斜拉钢索相连，另一端和套在输气管牛腿上的 U 型环相连，U 型环和牛腿间可以相对滑动。在风载作用下，螺栓承受拉—拉交变应力作用。按当地全年风载情况，取最大风速计算，交变应力幅

$$\Delta\sigma = 0.4\sigma = 235.5 \text{ MPa}$$

已知 $K^{[8]} = 1.12\sigma \sqrt{\pi a}$ ，则 $\Delta K = 1.12\Delta\sigma \sqrt{\pi a}$ 。

* 816 厂涪陵长江跨越有关设计说明，中国石油天然气公司四川设计院，1992



图4 张紧螺栓在级工作状态

界限应力强度因子 $\Delta K_a = 6.08(1 - 0.76R)\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, 经计算后知 $\Delta K > \Delta K_a$, 所以在风载作用引起的交变应力作用下, 裂纹要产生疲劳扩展, 计算式为

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K)^m \quad (7)$$

式中^{*} $c = 1.57 \times 10^{-11}$, $m = 4$.

螺栓的疲劳剩余寿命估算为:

$$N = \frac{2}{(m-2)cM^m(\Delta\sigma)^m} (a_0^{1-\frac{m}{2}} - a_s^{1-\frac{m}{2}}) \quad (8)$$

式中, $M = 1.12\sqrt{\pi} = 1.985$, 取 $a_0 = 0.4 \text{ mm}$, $a_s = 3.519 \text{ mm}$, 按断裂力学的方法计算后有

$$N = 29555 \text{ 次}$$

按可靠性计算, 将式(8)的两边同时取对数, 有

$$\lg N = \lg \frac{2}{(m-2)M^m} - \lg c - m \lg \Delta\sigma + \lg [a_0^{1-\frac{m}{2}} - a_s^{1-\frac{m}{2}}] \quad (9)$$

设 n 和 M 为常数, 因此上式右边的第 1 项为常数, 余下各项分析如下:

- 1) 在式(7)中, m 为常数, da/dN 的离散性是 c 的随机性造成的, $c = 1.57 \times 10^{-11}$, $\lg c = -10.8041$, 设 c 服从对数正态分布, 其值为 $\lg c = N(-10.8041, 0.3)$.
- 2) 设交变应力幅度也服从对数正态分布, 其均值为 $\mu = 235.5 \text{ N/mm}^2$, 标准差 $\sigma = 15.84 \text{ N/mm}^2$, 则 $\lg \Delta\sigma = N(1.373, 0.2)$.
- 3) 由于 $a_0 \ll a_s$, 所以 $\lg [a_0^{1-\frac{m}{2}} - a_s^{1-\frac{m}{2}}] \approx \left(1 - \frac{m}{2}\right) \lg a_0$, 由无损探伤结果知, 初始裂纹 a_0 也符合对数正态分布, 其值为 $\lg a_0 = N(-0.3980, 0.15)$. 其标准差大于平均值是由于探伤结果的分散性造成的。

把以上数据代入式(9), 计算后得

$$\mu_N = 4.5191$$

$$\sigma_N = \left[\sigma_c^2 + m^2 \sigma_{\Delta\sigma}^2 + \left(1 - \frac{m}{2}\right)^2 \sigma_{a_0}^2 \right]^{1/2} = 0.8675$$

* 压力容器学会, 化工机械与自动化学会, 压力容器缺陷评定规范编制组, 《压力容器缺陷评定规范》, CVDA-1984

给定置信度 α , 即可靠度 $R = 1 - \alpha$, 得 u_α , 使

$$\lg N = \mu_N + \sigma_N u_\alpha, \quad N = 10^{\mu_N + \sigma_N u_\alpha} \quad (10)$$

如给定 $R = 0.9999, 0.999, 0.99$, 则可查表得 u_α 的值分别为: $-3.702, -3.091$ 和 -2.326 , 代入(10)式得 $N_1 = 21$ 次 $N_2 = 69$ 次 $N_3 = 317$ 次。

显然小于用一般断裂力学方法所得的估算寿命值 29555 次。这说明在给定的工作条件下, 对应于不同的可靠度, 有不同的寿命值, 它定量地表示了螺栓在一定的可靠度条件下, 它的剩余寿命数。

跨江管桥位于长江和乌江交汇的拐弯处, 两岸夹山, 沿江风在管桥北岸汇集转向。在两次螺栓断裂的前一天, 江面上都刮过大风, 两次螺栓断裂都位于管桥北跨。从以上分析知, 风载引起的交变应力作用, 是使张紧螺栓断裂的主要原因。

4 应采取的安全措施

鉴于管桥上有 128 套张紧螺栓, 除已断裂的两根外, 余下螺栓材质有无缺陷, 还会发生突然断裂吗? 因此为了确保管桥的安全, 应立即采取临时加固措施, 以防止意外事故的发生。

5 结 论

综上所述, 螺栓断裂是在风载引起的交变应力作用下, 发生多疲劳裂纹点, 低频率, 低应力的脆性疲劳断裂。引起断裂的主要原因是:

- 1) 螺栓在制造过程中留下各种加工缺陷, 在齿根产生严重的应力集中, 使得局部应力急剧加大。
- 2) 螺栓材质中的硫化物夹杂和疏松的存在, 相当于在该处有预制裂纹和孔隙状的微裂纹网络, 在交变应力作用下, 诱发成疲劳裂纹的源点。
- 3) 螺栓的设计中没有考虑带裂纹构件的交变应力作用下抗疲劳扩展的能力和断裂韧性, 这是设计的不足之处。

为确保管桥的安全, 应重新设计, 制造螺栓, 用其代换现有的全部在役的张紧螺栓。在新螺栓使用之前, 应立即采取临时加固措施, 以保证管桥的安全。

参 考 文 献

- 1 徐 颢. 疲劳强度设计. 北京: 机械工业出版社, 1983. 257
- 2 尹双增. 断裂, 损伤理论及应用. 北京: 清华大学出版社, 1992. 73