

# 高强度螺栓氢脆的发生与预防

张先鸣 (宁波东港紧固件有限公司)

## Occurrence and Prevention of High Strength Bolt Hydrogen Embrittlement

Zhang Xianming (Ningbo East Port Fastener Manufacturing Co.,Ltd.)

摩托车结构中的螺栓,起着连接、紧固和密封的作用,螺栓装配时必需拧紧,因而它受到均匀的拉伸应力。在摩托车行驶过程中,高强度螺栓(8.8级以上)连接的零部件不同,所受的载荷各不相同,故不同螺栓的应力状态也不相同。有的承受弯曲或剪切应力,有的承受反复交变的拉应力和压应力,也有的承受冲击载荷或同时承受上述几种载荷。

目前,由氢脆引发的螺栓联接断裂仍然是一个严重的产品质量问题,人们可以采取各种技术来减少或预防螺栓中产生的氢脆问题。

### 1 氢脆的发生

氢脆是指工件吸氢或原材料含氢过高而导致的韧度和延性断裂强度降低的现象。它的发生需满足两个条件:1)金属有较高的含氢量;2)一定的外力作用。

氢脆是一种延迟破坏,即材料在低于抗拉强度的应力作用下,经过一段时间后发生突然断裂。其脆性表现为金属材料的伸长率及断面收缩率的降低,缺口抗拉强度降低,静载下的滞后断裂。氢脆一般发生于屈服强度大于620 MPa的高强度材料。材料强度对氢脆敏感性的影响是:随着钢的强度的提高,其变脆指数也升高,而持久强度降低。说明钢的强度越高,对氢脆越敏感。由于氢脆具有延迟性和突发性,所以它的危害很大。

#### 1.1 螺栓中氢的来源

对于10.9级、12.9级高强度螺栓不但使用中碳合金结构钢,而且还要进行调质处理,热处理调质是为了提高螺栓的综合力学性能,以满足产品规定的抗拉强度值和屈强比。

由于高强度螺栓生产量大,价格低廉,螺纹部分又是比较细微且相对精密的结构,因此,要求热处理设备必须具备生产能力大、自动化程度高、热处理质

量好的能力。进入20世纪90年代以来,我国带有保护气氛的连续式热处理生产线已占主导地位,国内紧固件企业纷纷添置网带炉,尤其适用于中小规格螺栓,避免了在热处理加热中螺栓氧化烧损、脱碳,得到光亮和光洁的表面。

保护气氛常采用高纯度甲醇经低温催化裂解: $\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$ ,炉内气氛成分 $\text{H}_2$ :64%、 $\text{CO}$ :32%、 $\text{CO}_2$ :<1%、 $\text{CH}_4$ :0.2%、 $\text{CH}_3\text{OH}$ :余量。

螺栓多采用冷镦工艺生产,局部区域材料塑性变形可达60%~80%,不允许有任何折叠。但由于机床精度、操作工人的技术水平、模具尺寸和质量等综合因素影响,造成螺栓头部和杆部结合处的晶粒破碎或金属纤维断裂。此处组织很不均匀,并形成一个脆性断裂危险区域,造成应力集中。在热处理时,较高的加热温度,氢很容易渗入螺栓应力集中的区域(螺栓头杆结合处)。

氢渗入原因还很多,如酸洗和电镀,都会发生氢的渗入。这是因为紧固件用户市场对螺栓表面的要求越来越高(即要求螺栓表面具有特殊的处理、防腐性和均一的起动力矩)。表面处理通常是电镀,有机和无机物涂层或磷化,所有这些工艺有一个共同的前提——必须除去螺栓表面黑色氧化层,使具有金属光亮,为此就必须对螺栓进行酸洗。

酸洗是把螺栓放在稀盐酸中搅动10~15 min。所以从酸洗到表面处理(如电镀)期间,大部分氢侵入到螺栓表面。

#### 1.2 氢脆的发生

氢脆断裂均发生于螺杆处,断口平坦,源区呈放射状特征,无缩颈变形。断口上有数个台阶,具有多裂纹源的特征,从宏观断口特征分析为脆断。

在热处理加热中,螺栓吸收并溶解的氢以原子形式进入晶格的间隙,为了降低晶格被氢胀大后造成的高能量状态,在应力梯度驱动下,氢原子会以扩

散方式迁移,自动集中到螺栓塑性变形后产生的缺陷处——头杆结合部。大量氢原子的聚集,使该处氢含量增大。由于分子氢是更稳定的状态,所以氢原子会以分子形式存在,而分子氢的比容很大,故体积膨胀就造成巨大的内应力,在一定外力共同作用下,使螺栓头杆结合处产生裂纹,严重的产生断裂。由于氢的扩散需要时间,且氢的浓度达到一定程度后才发生开裂,这一段时间为开裂孕育期。若实际应力大于上临界应力,则出现瞬时过载断裂;若小于下临界应力,则长期工作也会断裂。

### 1.3 关于螺栓镀层中氢含量的讨论

用美国LECO测氢仪测量M10×70外六角螺栓不经镀锌处理(GB 5782),螺栓的氢含量不足 $1 \times 10^{-6}$ ,酸洗之后测得的氢含量只有轻微增加。35、ML35和35CrMo钢的氢含量仅为 $1 \times 10^{-6}$ ,而在镀锌之后,测得氢含量分别超过了 $5.5 \times 10^{-6}$ 、 $6.5 \times 10^{-6}$ 和 $1.0 \times 10^{-6}$ 。

把氢含量为 $5.5 \times 10^{-6}$ 的35钢和 $1.0 \times 10^{-6}$ 的35CrMo钢镀锌螺栓,去除镀层后测得氢含量仅为 $0.2 \times 10^{-6}$ 和 $0.96 \times 10^{-6}$ ,这说明电镀处理产生的氢大部分都驻留在镀层中,而不是在基体材料中。

氢含量的试验表明,酸洗将少量的氢引入到材料中,而电镀处理试样中的氢含量要比酸洗试样中的氢含量多得多,且氢主要驻留在镀层中。

去氢处理使导致损伤减小的机理还不完全清楚,但从3种材料去氢处理后断裂应力的恢复表明,去氢处理是减小氢致损伤的有力措施,虽然在200℃分别进行4h和8h去氢处理后氢含量只有很小量的减小,但说明镀层起到了氢扩散的障碍作用。在去氢处理过程中,氢在材料中重新分布,扩散到材料内部的陷井位置而成为非活动状态。螺栓去氢处理就是一种能够使氢的聚集减少到氢脆临界水平以下的处理方法。

### 1.4 氢脆的检查

将螺栓放在专用夹具上,旋到使螺杆承受相当保证应力的拉力时,保持48h,松开后螺栓不应产生断裂,此法为氢脆的检查方法。

目前有一种非常简便的方法测去氢效果,具体方法如下:将家用小电炉接通电源,上面放一石棉网,把盛有适量凡士林的烧杯置于石棉网上,均匀加热至凡士林完全融化(凡士林量应以融化后能完全浸没螺栓为准),并保持在100℃~110℃、约5min,以完全去除其中的水分。然后将螺栓上的油迹和水清除干

净,放入凡士林液中。若在10s内凡士林液中有气泡产生,就证明该螺栓含有一定量的氢。

## 2 氢脆的预防措施

a) 在保证螺栓达到各项力学性能指标的基础上(尤其把强度和保证应力控制在合格范围内),要对螺栓的硬度控制在一定范围内,见表1。

表1 螺栓的硬度控制范围 HRC

螺栓等级	螺栓规格	硬度控制范围
10.9	≤M8	34~39
	<M16 且 ≥M10	34~36
	≥M16	35~37
		36~39
12.9	≤M12	39~43
	<M24 且 ≥M14	39~41
	≥M24	40~43
		39~40

b) 适当降低淬火加热温度。由于氢在金属中的溶解度与温度有关,所以降低温度,可减少螺栓的吸氢量,对SCM 435(35CrMo)、SCr 440(42CrMo)或40Cr淬火或复碳工艺,加热温度一律控制在860℃~870℃。

c) 在连续式网带渗碳炉加热时,要在保证炉内有足够的保护气氛,碳势在0.33%~0.38%的前提下,尽量减少载气和富化气的供给量,使炉内氢的浓度降低,也就使螺栓中氢的渗入量减少。

d) 减少应力集中,改善螺栓头杆结合处的组织结构。精心调整冷镦机床,合理分配螺栓头部的镦锻变形量,增大头杆结合处的过渡圆角,使其内部组织达到合理状态。

e) 推荐镀锌去氢工艺:镀锌约4~5min→去氢处理200℃、2~4h→清洗→再镀锌约4~5min→钝化。

## 3 结束语

高强度螺栓吸入氢并引发氢脆的发生,需要一定的时间,即它有一个孕育期,在生产中不易表现出来,所以常常被忽视。只要认真遵循工艺规程,制订合理的加工工艺,就能防止氢脆的产生。

### 参考文献

- 1 刘宝俊. 材料的腐蚀及其控制. 北京:北京航空航天大学出版社,1989
- 2 金属防腐手册编写组. 金属防腐手册. 上海:科学技术出版社,1989
- 3 热处理手册编写组. 热处理手册第三版. 北京:机械工业出版社,2001

(收稿日期 2002-10-12)