

# 扣件氢脆问题剖析

文/Laurence Claus

若待在扣件产业够久,应该都会经历或听说过因氢脆导致扣件失效的故事。虽然这类经历未必那么特别,但不可否认的是,氢脆失效对所有牵涉其中的人来说影响极深。



因氢脆而断裂的内六角帽螺丝(图片提供: SV Brahimi)

有人可能会问为什么氢脆失效会比其他扣件失效问题严重。这是个好问题,也许会有争论提出这并没有比其他扣件失效还糟,我们都了解失效就是失效;相反的,其他人或许会反驳是真的比较糟,因为它不会有预先的警讯,且失效是无法事先预测的。在某个案例中,可能会影响到整体,但在另一个案例中可能只会影响一小部分。此外,虽然部件本身就有形成问题的条件,但它只会在产品被实际应用时才会产生作用。其遏阻和复原成本高昂,使得失效问题难以处理。

好消息是每年产出多达数十亿支的扣件中,实际出现问题的只占少数。事实上,氢脆事件实际发生的次数一般来说十分少见(纵使部件容易发生问题)。因此,最近的研究显示扣件发生氢脆的机率也许远比传统上假设的要少。在该领域实际发生问题的「少见程度」似乎也在支撑著这个结果。

不过问题真的会发生。其中一个最近较广为人知的意外是发生在多年前加州旧金山和奥克兰湾大桥新东延伸线的建筑上。该桥首次在1936年开始建造,有两个延伸线,一个是连接旧金山和芳草地岛的西延伸线及连接芳草地岛和奥克兰市的东延伸线。1989年10月17日,Loma Prieta地震袭击加州湾区,地震规模6.9级,造成东延伸段有50英尺的崩坏。由於该桥为主要交通要道,所以立即抢修,但加州交通部决议,为了能长期使用,应该把东延伸段更换成全新的桥梁。

当加州交通部官员设计出他们想要的新桥梁时,想出了两个独特要求。首先,决定桥梁的使用寿命需为150年或是一般正常桥梁使用寿命的两倍。第二,桥梁本身需设计成可以抵挡1,500年发生一次的大地震。

因交通部制定出全新的严苛要求,必须使用新做法和设计。为达到150年寿命年限的需求,多数五金件被施以保护性涂层,包括热浸镀锌的ASTM A354锚栓螺柱。虽然ASTM标准并没有禁止施以保护性涂层,一般来说供应这类产品没有涂层也算少见。为满足抗震的要求,桥梁在设计上都会有一系列「轴承」和「防止桥梁落桥装置」。位於水泥桥墩上桥梁甲板下的组件被设计来传送地震波至桥墩,而不会损伤桥梁甲板的上层结构。「轴承」与「防止桥梁落桥装置」的设计是使用嵌入底部桥墩凹入处的ASTM A354锚栓螺柱来做接合。

这些锚栓螺柱在最後紧固至高预负荷值前就被嵌入混凝土中。2013年3月1日,96支2008年制的螺条锁於两座「防止桥梁落桥装置」上。它们被锁固至极限强度的70%以下,或是紧固专家认为的高负荷程度。對於这样的大直径结构产品,常会在必要时进行检测并将接合处紧固。因此在3月8日,也就是紧固後的一周,许多破裂锚栓一一显现。直至3月15日前,共发现32支断裂锚栓。

失效问题令加州交通部陷入难题。他们不了解造成锚栓螺柱发生裂痕的原因,也没有办法修补受损部分。但是加州交通部仍积极加速处理问题,同时招募许多业界专家协助发现问题根源,并让工程师找出如何接合「防止桥梁落桥装置」的解决方案。

专家总结後发现,会发生碎裂问题是因为氢脆产生失效。他们在公开报告中写道:「氢脆是S1和2为防止桥梁落桥,而装上A354级BD高强度钢锚栓螺柱……的根源。」首先,被抨击的是造成氢脆的电镀。随著检查继续进行,专家最後认定,水渗入进去,包住每支A354螺柱的凹处所产生的腐蚀,是让整个系统暴露在氢环境中的原因。「暴露於氢的环境」以及「原料敏感性」等因素,将会损害螺柱的环境氢脆。

加州交通部主动站出来处理许多组织不晓得如何解决的问题。虽然花费了数百万美元,但他们成功的在既定桥梁通车日(2013劳动节)前完成了。并不定时外出检查所有用於桥梁上的2,306支A354锚栓。

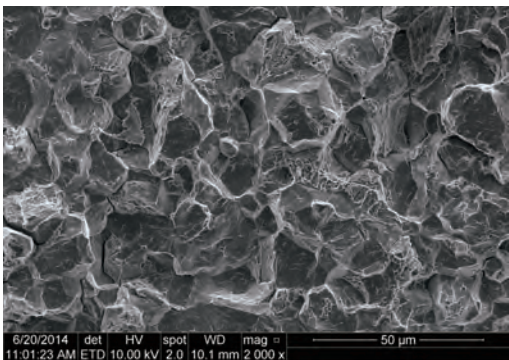
当然并不是所有氢脆成本都必须付出极高代价,或是知名如该事件。不过,这个案例著实提供产业一个值得学习的惨痛经验。为帮助读者了解氢脆,本文接下来将列举一些基本常识。

## 这些基本常识有哪些?

ASTM F2078将氢脆定义为「因氢与应力(无论是外部施加或内部的残余应力)结合,产生金属或合金中延展性的永久丧失。」换句话说,我们知道被部件吸收的自由氢原子移动至受压部件的区域。因为氢在这些区域的密度增加,金属开始变得易脆且在金属晶粒周围开始形成细小裂缝。若氢在这些高应力区域(一般来说在头脊或第一条啮合螺纹)聚集过多,延展性会大量丧失,最後部件会在高应力区发生脆裂。

目前大家对这部分有三种基本误解。第一种是问题发生的根源—氢脆。事实上它并非根源而是失效的机制,所谓的根源通常可以回溯至材料的敏感性;第二种与脆裂模式有关。氢脆失效会呈现晶间脆裂,不过重要的是

其他失效也会显现此迹象。因此，氢脆无法被归因於每一个有晶间脆裂现象的部件。不幸的是，我见过很多人在没有考虑到这些情况下就妄下结论，因为一般都会误解并认为每个晶间脆裂都是氢脆所导致；最後一种误解是最危险的，即是氢脆只会发生在制造过程中，零件因暴露於氢原子环境里却未确实烘烤部件时才会产生。事实上，就像湾区大桥事件所揭示的，部件在实际使用後才会暴露於含有「氢」的环境中。以上例子，虽然了解部件制造过程十分重要，但同样的要去了解「是否有经过除氢烘烤的过程，与其部件直接暴露於有氢的环境所造成的失效并没有关系」。



有典型晶间脆裂形态的氢脆失效处电子显微镜下的成像(图片提供: SV Brahimi)

进一步解释，氢脆可以被分成两种不同类别：内部氢脆(IHE)与外部氢脆(EHE)，皆可总结成氢的来源。内部氢脆是部件在制程中收集氢原子的地方，这可能会在制钢、电子清洗或电镀加工中发生。当然，我们认为电镀和电子清洗也许是可能的来源，虽然制钢流程中会有吸收作用，但在电镀时不会产生障碍物把氢原子困在里面，因此氢是可自由进出的。内部氢脆一般来说是在使用部件後立刻被发现，且可能在安装多天後於任何地方发生。外部氢脆的氢原子来自环境中，通常是局部腐蚀产生的结果或来自邻近的阴极保护机制(像是常被使用的海面下钻油)。许多案例中，局部腐蚀所产生的化学反应会产生大量氢原子副产品。若是腐蚀只受限在某空间内，多数氢原子会被吸收。外部氢脆通常在部件使用几个月至几年後才会发生。

## 失效发生需要哪些条件?

与一些失效参数难以预见的失效机制不同，人们清楚了解到氢脆必须符合四种参数，也就是正确的方式、集中或密度才能造成失效。必须有三种参数同时存在且有足够的集中度或密度才会产生氢脆失效。也就是有氢原子存在、施加高张力和原料具敏感性。右圖解释当这三种参数同时存在并同时整合时，可能产生氢脆条件。除去其中一项，氢脆风险就能大幅降低或全部排除。第四个参数指的是时间，虽然它并没有被加进其他三种参数一起讨论，但氢脆

失效往往伴随时间上的延迟。这是因为氢原子的移动和脆化特性是一种具时间性的过程。

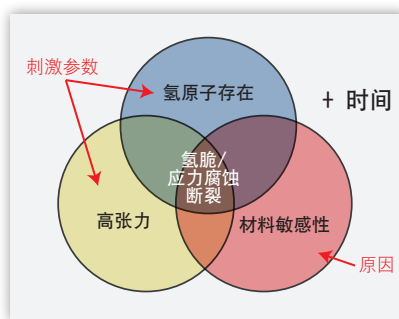
这三个发生氢脆的必要条件中，当今研究显示原因通常是材料的敏感性所致。在扣件领域中，材料敏感性的量测以部件的硬度为指标，且较新的研究结果临界数值是洛氏硬度HRC39，相同硬度和以下的部件不具敏感性，反之则具敏感性。这意味著10.9级和8级(含以下)的部件都不会发生氢脆。

这些发现确实挑战了许多不合时宜的想法。无论是一般或特定公司所使用的标准，时常看到其硬度门槛低於HRC39。在产业逐渐适应新发现和不同规格变得越来越一致前，扣件供应商还是会持续遵循这样的规格指引或其他由客户所提出的契约要求。考虑到硬度为测量材料敏感度的主要标准，但韧度、材料清洁度和微结构同质性等同样在敏感度上扮演重要角色。

另外，高张力和氢原子的存在皆被认为是刺激参数。它们在「部件是否会因为氢脆而失效」的议题上并非决定性因素。不过若把它们从方程式中移出或降低其集中度或强度至临界水平，便无法刺激具敏感性的部件使之失效。

## 预防危机

最好的预防措施即是将其中的一个会导致氢脆的参数从方程式中移除。换句话说，维持部件硬度在HRC39以下，且在使用大线径产品时，确认微结构一致及具备良好强度。(备注：美国湾区大桥4"线径A354锚栓呈现出不良的硬度一致性和低强度)。尝试去限制或降低拉伸应力。使用不会暴露部件至氢原子环境的加工法并烘烤部件。



氢脆失效的必要参数

部分被视为「有风险」的传统除氢法必须在低温烘烤一段指定时间。烘烤背後的概念是升高的温度可以让被困住的氢原子变得活跃并使其离开部件。正常来说烘烤的操作，是在会让部件暴露於氢环境的电镀包膜加工过程之後完成。看似简单，但仰赖卖家产能和有效率地执行「什麽时候将部件放入加工流程」或「取出流程的能力」实际上是耗费成本的。

如同激发烘烤操作的临界硬度值及时间并非所有人都能接受。每一个规格和产业对此皆采取不同立场，以至於烘烤温度时间的标准从4小时到24小时以上都有。汽车领域中传统采用的方法一直都是4-4-4法则，也就是在4小时电镀内以华氏400度烘烤4小时。另也有人将烘烤时间改为1小时以内。最近的研究数据显示4小时的烘烤并不足够，也没有充足的证据显示在特定时间内进行烘烤(不论是电镀後1小时或4小时)会有哪些特别的效果。

预防风险最佳的量测面向之一就是进行定期测试。虽然氢脆事件只占整体的一小部分，但测试是最简单也便宜的保险。多数标准提供了氢脆测试的指引，如同其他要求一样，这些都应该按表操作。多数测试在24-48小时内可以提供结果。

## 结论:

氢脆或许是扣件供应商或使用者必须去忍受且使人恐惧的经验之一。幸运的是，透过充分了解何为造成氢脆的原因以及预防的方法，并稳定执行，就能避免氢脆失效。过去几年，许多针对这主题的完整研究和实验被进行过，也发现了一些新资讯。当越多标准被更新来反映出这些新发现和组织也采纳最新指导原则时，很多困在旧有框架和做法的人会觉得这是艰难的挑战。最後，可以预见产业会持续更上一层楼并努力找出更新更好的办法来预防氢脆失效的发生。