

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.04.026

球型钢支座抗腐蚀方法研究概述

段昕智^{1,2}, 白午龙^{1,2}, 黄少文^{1,2}

(1.上海市市政规划设计研究院有限公司, 上海市 200031; 2.上海城市路域生态工程技术研究中心, 上海市 200031)

摘要: 支座是桥梁工程中承上启下的重要衔接构件,其抗腐蚀性能的优劣将直接影响桥梁的安全性。在现有的支座形式中,球型钢支座相比于板式橡胶支座和盆式支座克服了其材料、结构以及工作原理上的诸多缺陷,即便如此,球型钢支座也不可避免地遭受钢材腐蚀病害,为了更好地对球型钢支座进行抗腐蚀保护,需要先明确钢材腐蚀的机理以及影响腐蚀的环境介质,在此基础上,探讨球型钢支座可能出现的腐蚀类型,寻找合适的手段对其进行抗腐蚀保护,并且列举出了国内外学者基于抗腐蚀的球型钢支座创新设计成果。

关键词: 球型钢支座;抗腐蚀;耐久性;腐蚀机理;保护措施

中图分类号: TU318

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)04-0093-05

0 引言

桥梁支座作为连接上部结构与下部结构的重要组成部分,应具有足够的承载力,以保证安全可靠地传递支座反力,协调梁体的变形与转动,同时还起到减振耗能、保证桥梁安全稳定的作用。

在桥梁的使用过程中,支座具有集中传力的特点,在其全寿命周期中一直受到往复力的作用,且常年暴露在外,所以支座成为了桥梁整体结构中的薄弱构件^[1]。桥梁支座处很容易产生腐蚀,同时支座的维护和更换异常困难,一旦耐久性受损,可能严重影响桥梁结构的安全^[2]。

因此,实际工程中应该选取具有良好抗腐蚀性能的支座形式,并采取积极的抗腐蚀措施,以延长支座乃至桥梁整体的使用寿命。

1 球型钢支座概述

现今桥梁的支座主要有板式橡胶支座、盆式支座和球型钢支座等形式。

板式橡胶支座可以分为加劲橡胶支座与非加劲橡胶支座,加劲橡胶支座内布置有钢板,可以提高支座刚度及竖向承载力,限制横向膨胀变形,大幅增加竖向刚度。板式橡胶支座具有构造简单、制造容易、成本低廉、安装方便等优点,主要应用于中小跨径桥

梁。但是其缺点也很明显,容易出现橡胶老化、龟裂、钢板外露、不均匀鼓凸与脱胶、支座边缘脱空、剪切超限和支座位置串动等病害^[3]。

盆式支座相对于板式橡胶支座而言体积更大,高度较低,橡胶用量减少,钢材用量居多,因此支座的质量较大,承载能力和横竖向的位移能力显著提升,通常应用于大跨度桥梁。盆式支座经常出现钢件裂纹、变形、锚栓剪断、钢件脱焊、锈蚀、位移转角超限、密封圈或承压板挤出等病害^[3-4],同时长期运营也会导致滑板材料逐步磨损,支座摩擦因数增大,活动性能降低。

我国从上世纪70年代开始研制球型钢支座,球型钢支座是在盆式支座的基础上发展而来的。相比以上两种支座,球型钢支座在耐久性等方面具有更突出的优势。球型钢支座一般按其水平位移特性予以分类:双向活动支座:具有双向位移功能,不承担水平向荷载的作用,代号SX;单向活动支座:具有单向位移性能,承担单向水平荷载的作用,代号DX;固定支座:承受各向水平荷载的作用,各向无水平位移,代号GD。球型钢支座一般由上支座板(含不锈钢板)、平面聚四氟乙烯板、球冠衬板、球面聚四氟乙烯板和下座板等防尘结构组成^[5],其结构示意见图1。

球型钢支座的主要承压部件是钢制的球冠衬板,这使得球型钢支座继承了盆式支座的大位移、大承载能力的特点,同时还具有传力可靠、反力均匀以及转动灵活等优良特性。与板式橡胶支座和盆式支座不同的是,球型钢支座避免了橡胶的应用,不存在橡胶的剪切应变^[6],其水平位移和转动性能主要通过聚四氟

收稿日期:2021-07-26

基金项目:上海市2019年度“科技创新行动计划”社会发展领域项目(19DZ1203001)

作者简介:段昕智(1987—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

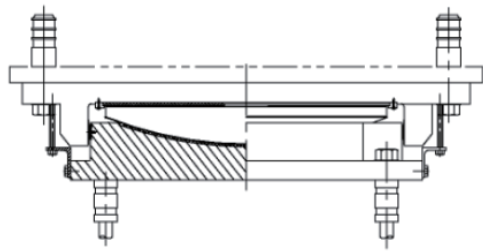


图1 球型钢支座结构形式

乙烯与不锈钢滑板材料摩擦副系统来实现。

球型钢支座相比于板式橡胶支座和盆式支座,克服了其材料、结构以及工作原理上的诸多缺陷与不足,具有以下优点^[1]:

(1)避免采用橡胶材料,不存在橡胶老化和质量控制问题,钢材的耐腐蚀性能更好;

(2)传力路径明确,克服了盆式橡胶支座中盆环应力集中的缺陷;

(3)支座内部通过平面摩擦副和球面摩擦副之间的滑动实现支座的平面位移和转角需求,与橡胶支座依靠橡胶变形提供转角相比,其反力更小,转动更灵活;

(4)设计容许应力不再受橡胶材料限制,当选用承载能力高、耐磨性好的新型滑动材料时,可有效减小尺寸、降低重量;

(5)滑板材料相比于橡胶,其各项性能指标受温度变化影响小,温度适应性更强,可在 $-40^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ 的温度下正常工作,在我国南北方区域,甚至严寒、大温差的高纬度地区[7]均适用。

鉴于以上诸多优点,球型钢支座已经广泛应用到了国内各地的高铁高架桥、城市轨交桥梁中,如上海的南浦大桥、佛山西站高铁桥梁段、河北的大岭堡大桥^[8]、广州报业文化中心连廊^[9]等等。

然而,虽然球型钢支座避免了橡胶材料的老化问题,但是不可避免的受到钢材腐蚀的病害,造成支座安全可靠度下降,耐久性大打折扣,尤其是在海洋高湿度、高盐度等严酷腐蚀性环境下,球型钢支座面临的受腐蚀形势极其严峻。因此,为了对球型钢支座进行合理的抗腐蚀保护与设计,前提是了解钢材的腐蚀机理与影响介质。

2 钢材腐蚀机理与影响介质

钢材的腐蚀是钢材在环境中发生化学反应或者电化学反应,导致材料本身损伤或者性能退化。据中国工程院在“我国腐蚀情况及控制战略”重大项目的研究结果,2014年国内腐蚀产生的成本约为2.13万亿元

(其中钢材腐蚀最普遍),占到当年GDP的3.34%^[10],足以见得钢材腐蚀造成的损失之严重。

2.1 钢材腐蚀机理

按照腐蚀的作用性质分类,钢材腐蚀有三种情况:物理腐蚀、化学腐蚀、电化学腐蚀。

(1)物理腐蚀

物理腐蚀指纯粹的物理溶解引起腐蚀破坏,在实际的腐蚀情况中占比较小,比如钢材在高温熔盐、熔碱、液态金属中的腐蚀。

(2)化学腐蚀

化学腐蚀是指钢材直接与氧化剂接触发生化学反应,从而被腐蚀。化学腐蚀中常见氧化剂包括氧气、氯气、硫等气体,但是自然环境中的化学反应导致的化学腐蚀速度相对缓慢。

(3)电化学腐蚀

钢材的绝大多数腐蚀以电化学腐蚀为主,指钢材与环境相互作用,金属离子与电解质作为电池的正极和负极,在钢材表面形成放电反应,使金属材料的本身造成不可逆损害反应。电化学腐蚀经过一系列反应,最终脱水成铁锈的主要成分,铁锈质地疏松多孔,体积膨胀^[11],让水和空气渗透到钢材内部,导致进一步腐蚀。

2.2 钢材腐蚀影响介质

钢材所处环境的不同对其受腐蚀程度尤为重要,带有腐蚀性的物质成分统称为腐蚀介质,根据环境腐蚀介质的不同,钢材腐蚀可以分为大气腐蚀、淡水腐蚀、海水腐蚀、土壤腐蚀、化工介质腐蚀、微生物腐蚀等^[12]。对于桥梁支座,常常受到的是前三种腐蚀情况。

(1)淡水腐蚀

淡水主要来源于地表降水,包括雨、雪、冰雹。普通的淡水呈中性,对钢材腐蚀性低,但随之环境的变化和空气中工业排放的污染物增多,水质会形成酸雨,腐蚀性增强。

(2)大气腐蚀

钢材由于长期暴露与空气当中,所以大气腐蚀具有普遍性,大气腐蚀情况又可以分为三种情景:干环境、潮湿环境、湿环境。

目前研究发现影响钢材大气腐蚀速率的因素主要有^[10]:

a. 温度在零度以上的时候大气湿度超过临界湿度的时间长久,这是影响大气腐蚀速率的最重要因素,腐蚀速率与超过临界湿度的时间近似呈指数关系;

b. 大气中的腐蚀物质含量,如二氧化碳、二氧化硫、氟化氢、硫化氢、氮的氧化物等,这些物质能够大大加速腐蚀速率。

c. 盐粒沉降,在自然环境中的常见盐中,腐蚀速率由高到低依次为 $\text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_3 > \text{H}_2\text{O}$,且对于处在含有以上电解液的环境中的钢材,仅仅涂抹在表面的试样比完全浸泡在电解液中的试样腐蚀速率更快。

(3)海水腐蚀

海水腐蚀指材料或构件在海洋环境中发生的腐蚀。这是一种非常复杂的腐蚀环境,海水中含有大量的氯离子,海洋腐蚀以局部腐蚀为主,往往从钢构件的表面开始,在小区域发生腐蚀作用并扩大,加上海洋中的微生物、附着生物及它们的代谢产物都会对腐蚀的过程产生促进加速作用^[13]。

3 球型钢支座抗腐蚀保护与设计

3.1 球型钢支座受腐蚀类型

球型钢支座由于其所处在桥梁上下部结构的衔接位置,其腐蚀既具有一般钢结构的腐蚀特征,又有其自身的不同特点,球型钢支座的腐蚀主要表现为均匀腐蚀(全面腐蚀)、点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀等形态^[14]。

(1)均匀腐蚀

此类腐蚀遍布于钢材表面,所以也叫全面腐蚀,因为是均匀的大规模表面腐蚀,会造成大量的金属损失,使得支座钢材厚度逐渐减薄,但由于腐蚀速度均匀,所以从技术层面来看,这类腐蚀对支座的危害并不会很大,可以较为可靠地进行预测以及防护。

(2)点蚀

支座的点蚀是金属表面在相对集中的小部位发生局部腐蚀。点状腐蚀的迅速出现,往往是因为点蚀发生前期,会在钢结构表面的氧化保护层中生成微米级别的小凹陷或微孔,这些微孔处于亚稳定状态,在外界条件的影响下迅速增生并向内扩张,最终形成大的凹陷和孔穴^[15]。

点蚀最常见地发生在沿海地区,因为氯离子半径小、穿透力强、极性强等特点,很容易到达金属表面,并且在点蚀形成的凹坑内富集,同时在基体铁与腐蚀产物膜界面处的双电层结构会容易优先吸附氯离子,导致该区域阳极溶解加速。金属基体会被向下深挖腐蚀,形成点蚀坑内阳极金属的溶解,这一过程属于氯离子的催化机制,当氯离子浓度超过临界值

之后,阳极金属将处在持久活化状态而不会钝化。因此点蚀坑会不断扩大、加深。

所以对于沿海等环境下的球型钢支座,点蚀形成的蚀孔出现位置、腐蚀程度等难以通过有效的检测方法做出评估及预测,一旦支座形成了严重的腐蚀穿孔,往往可能导致承载力大幅下降甚至失效,隐患极大,因此需要特别关注球型钢支座的点蚀病害。

(3)缝隙腐蚀

在安装支座时,支座垫石顶面不水平或梁底不平整,垫石砂浆不密实,与支座连接不牢固,紧固件松动或者桥墩、桥台等的不均匀沉降、倾斜,上部结构的水平移位与振动变位等诸多原因,都会形成缝隙,进而发生缝隙腐蚀。

缝隙腐蚀的结果会导致桥梁支座强度降低,与其他构件吻合度变差。随着缝隙内腐蚀产物体积的增大,会引起局部附加应力,钢支座的承载能力降低。同时,当支座处于通风不佳、湿度高或冻融地区时,缝隙腐蚀更容易产生局部高腐蚀速率,危害球型钢支座健康。对于球型钢支座,还应避免支座内部构件的连接面产生积水,一旦球冠衬板腐蚀生锈,将直接损害支座的位移转动性能,从而潜在威胁桥梁的安全位移。

(4)应力腐蚀

应力腐蚀的发生往往是因为在腐蚀与交变应力的联合作用下,产生较大的局部应力与疲劳,钢材表面氧化膜破坏,形成微裂纹,产生断裂应力腐蚀。应力腐蚀是疲劳应力与腐蚀相互作用的结果,在两者的叠加作用下,既能加速球型钢支座上疲劳裂纹的扩展,又加深了腐蚀的程度,从而导致支座失去有效支撑作用,诱发安全隐患。

3.2 球型钢支座抗腐蚀保护措施

为了提升球型钢支座的耐久性,目前的手段主要有以下方面:

(1)提升基材的耐腐蚀性能

通过在支座所用钢材中加入能提高钢材抗腐蚀性能的合金元素,如铬、镍、锡、钛等,制成合金钢材,能够有效地提高钢材的抗腐蚀能力。

现今,耐候钢的应用也越来越广,耐候钢通过在其表面形成连续、致密的坚硬内锈层,有效阻碍腐蚀性气体和介质向基体渗透。目前的耐候钢按化学成分可以分为铜磷钢和铜磷铬镍钢,有 Q295GNH、Q295GNHL、Q345GNH、Q345GNHL、Q390GNH 等型号,将耐候钢引入至球型钢支座中,可以显著提高其

耐腐蚀性能。文献“高湿热环境下隔震支座连接板防腐技术经济分析”^[16]分析了重度防腐涂层、热喷涂、耐候钢三种支座防腐方案的全寿命累计费用现值,见图2,可见耐候钢在长期使用情况下具有经济合理性。

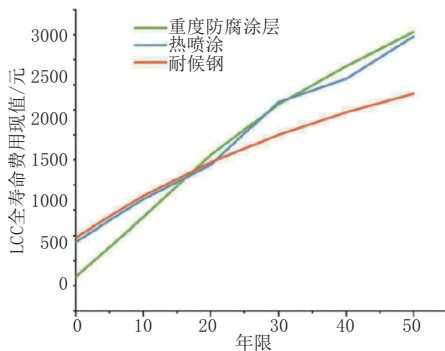


图2 不同方案全寿命累计费用现值比较

(2) 采用特殊工艺

目前钢材防腐的工艺多种多样,可选择性很大,可以应用到球型钢支座中的主要有以下几种:

a. 火焰喷涂:将锌铝等金属高温熔化,通过专业设备将其喷涂到桥梁钢结构表面,冷却凝固形成保护层。这种方法的优势在于不仅可以有效地将钢结构与外界环境隔离,同时金属涂层可以利用牺牲阳极保护阴极的方式对钢结构进行保护。这种防腐在实际应用中的缺陷在于对于球型钢支座这种受集中力及往复力的构件来说,支座钢材表面的金属涂层容易脱落^[17]。

b. 热浸镀锌:首先用酸溶液将支座上的锈渍清洗干净并保持湿润,然后将放入准备好的高温锌溶液中浸泡并取出,冷却一段时间后钢结构部件表面会形成一层保护层,有效的将球型钢支座与外部腐蚀环境分离;另一方面当涂层损坏后也可以通过牺牲阳极的方式对球型钢支座进行保护。

c. 非金属覆盖:又叫涂层防护,是最常用的钢材防腐手段。由于气候环境以及工业等因素,而无法用一种涂料来抵抗各种情况的腐蚀,所以现阶段对于涂料涂装常采取多层涂料叠加的方式,这种方式的优点在于操作方便工期短,缺点在于涂料的防腐周期比较短,应用到球型钢支座中,需要定期维护。

d. 阳极牺牲与阴极保护:对于需要在水下或地下使用的钢结构,普遍采用了阴极保护的防腐方式,阴极保护有外加电流和牺牲阳极两种形式:外加电流措施是对于裸露的钢构件实施外加电流,牺牲阳极措施主要利用比钢材的电位更负的金属和合金制成牺牲性的阳极,从而使钢结构本身免遭腐蚀。研究

表明,阴极保护技术是海工环境下行之有效的防腐措施,经采取该措施后的钢结构腐蚀速度可大大减少,仅为未保护钢结构的5%~10%,且牺牲阳极的方法具有施工简便、工期短、不需专人维护管理等优点^[18],对于更换难度大的支座来说,是很合适的一种防护措施。

3.3 新型球型钢支座的抗腐蚀设计与应用

除了前述的抗腐蚀保护措施,也可以针对支座所在的工程环境,对球形钢支座结构形式进行创新设计,以改善抗腐蚀性能,现今国内外的学者已经针对球型钢支座的耐腐蚀性研发了各种形式的新型球型钢支座。

胡选儒等在2004年研制了“HFQZ防海洋大气腐蚀球型钢支座”^[19],采用“防腐材料+金属喷涂+重防腐涂装体系”的防腐技术,用预压紧随动式密封装置和球冠包覆不锈钢板的方法来保证支座在海洋大气强腐蚀环境下的正常使用寿命不小于50a,采用内置式调高和预埋套筒结构,方便支座维护与更换,已经应用到了东海大桥和厦门环岛路实际工程中。

金家康等在2011年研发了“ZXQZ(JF)绝缘防腐球型钢支座”^[20],其防腐体系由两部分组成:内防腐体系,支座钢部件采用耐候钢;外防腐体系,支座上座板和下座板等主要钢部件外防腐涂层采用聚脲涂层,支座预埋钢板外防腐涂层采用锌镍涂层防腐体系,螺栓孔内涂抹防腐黄油。采用内外结合的防腐体系,大大延长支座钢部件防腐维护的周期,极大降低了支座钢部件防腐维护的成本。支座预埋钢板保护涂装采用锌镍涂层防腐体系,锌镍涂层防腐体系耐候性优异,防腐性能稳定可靠。

王祯等在2017年研发了“耐候钢球型钢支座”^[21],有效提高钢支座的耐腐蚀性能,延长使用寿命,节省大量的维护成本,平面滑板和球面滑板能够增加各部件的耐磨性、自润滑性、抗冲击性,连接件能够有效的提高定位以及装配的效率,降低维护等后期操作的难度。

瑞士的Hermann Weiher和Simon Hoffmann将超高性能混凝土(UHPC)和超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)应用到球型钢支座中,见图3,他们用上述两种材料代替了部分钢材,制成凹型构件,具有制造简单,可塑性强的优点,同时通过试验验证了其耐久性^[22-23],同时因为使用了超高性能混凝土,保障了其耐腐蚀性能。

球型钢支座的耐久性也与抗腐蚀性息息相关,

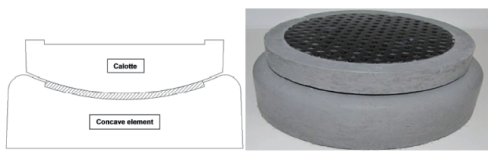


图3 用UHPC制作的球型支座

假如可以提高其耐久性,对抗腐蚀性能,尤其是前面所述的缝隙腐蚀防护将起到重要的作用。目前球型钢支座耐久性的决定性因素是滑板材料。聚四氟乙烯是在我国球型钢支座中应用最早、用量最多的材料,近年新兴的支座采用改性超高分子量聚乙烯的球型钢支座,该种材料的容许设计应力高,为聚四氟乙烯的1.5倍,其次,该种材料的耐磨耗性能优异,其拉伸强度和扯断伸长率均满足技术要求,且磨耗率和摩擦系数均较低,性能保持稳定^[24]。因此,该种材料可以满足不同温度环境内的使用要求,以提升球型钢支座的整体耐久性,从而降低球型钢支座的结构缺陷,减少腐蚀的潜在威胁。

4 结论与展望

球型钢支座的应用越来越广泛,在桥梁工程建设环境纷繁复杂的背景下,对球型钢支座的抗腐蚀性能提出了更高的挑战。高效且经济地做好球型钢支座的防腐保护,对我国严寒、高湿度、高海拔、海工等环境下的桥梁工程建设具有重大的意义。目前,国内外已经有很多学者针对球型钢支座的抗腐蚀保护手段开展了诸多学术研究和项目研发。

将来可以引进更多的新材料、新工艺、新设计到球型钢支座中,同时可以通过定性、定量分析与科学试验手段结合的方式,深入研究新型球型钢支座的抗腐蚀试性能,以更成熟地将支座创新技术引入到桥梁工程中去。

参考文献:

- [1] 郜小兴.桥梁细部设计对结构耐久性的影响分析[J].交通世界,2018(28):78-79.
- [2] 周建龙,冯俊,熊桂容,等.桥梁支座的腐蚀与涂层配套体系[J].中国涂料,2014,29(2):57-60.
- [3] 石秋君.既有铁路桥梁支座病害分析及改造方法[J].铁道建筑,2017,57(10):12-14,25.
- [4] 钟进武.桥梁支座类型及其应用[J].企业科技与发展,2008(12):125-127.
- [5] GB/T 17955—2009,桥梁球型支座[S].
- [6] 白京鑫.桥梁常见支座综述[J].江西建材,2021(4):195-196.
- [7] 宋晓东,陈列,薛鹏,等.高纬度地区铁路桥梁新型球型钢支座设计与试验研究[J].铁道建筑,2018,58(2):32-35.
- [8] 陈飞龙.新型盆式球型钢支座在大岭堡大桥中的应用研究[J].江西建材,2020(10):118-120.
- [9] 娄峰,潘文智,石开荣,等.大型钢结构球形支座位力学性能试验研究[J].施工技术,2017,46(18):35-38,102.
- [10] 徐吉民,幸坤涛,郭小华,等.腐蚀钢结构研究现状及进展[A]//中国老教授协会土木建筑专业委员会、北京交通大学土木建筑工程学院.第十三届建筑物建设改造与病害处理学术会议暨土木建筑专业委员会三十周年纪念活动论文集[C]//2021.
- [11] 贾勇.钢结构腐蚀机理及影响因素初探[J].科学之友(B版),2009(5):33-35.
- [12] 俞冬.钢桥钢结构的腐蚀及其对力学性能影响的研究[D].江西南昌:华东交通大学,2016.
- [13] 周建龙,冯俊,熊桂容,等.桥梁支座的腐蚀与涂层配套体系[J].中国涂料,2014,29(2):57-60.
- [14] 邓楠,粟寒,吴荣桂.桥梁钢结构腐蚀机理与防护[J].交通世界,2020(17):115-117.
- [15] 林国琦,田元福.高湿热环境下隔震支座连接板防腐技术经济分析[J].海南大学学报(自然科学版),2020,38(4):373-378.
- [16] 汤吉彪.桥梁钢结构的整体设计及钢结构损伤中的防腐设计探讨[J].全面腐蚀控制,2020,34(1):73-74.
- [17] 张启富,郝晓东.钢结构腐蚀防护现状和发展[J].中国建筑金属结构,2006(9):22-26.
- [18] 胡选儒,陈军,欧阳先凯.防海洋大气腐蚀球型钢支座技术初探[A]//中国公路学会桥梁和结构工程分会、杭州湾大桥工程指挥部.中国公路学会桥梁和结构工程分会2005年全国桥梁学术会议论文集[C]//2005.
- [19] 金家康.ZXQZ(JF)绝缘防腐球型钢支座[Z].河北:衡水中铁建工程橡胶有限责任公司,2014.
- [20] 王祯.耐候钢球型钢支座[Z].天津:中国铁路设计集团有限公司,2017.
- [21] Hermann Weiher,Simon Hoffmann.Spherical bridge bearings made of UHPC[J].Conference Paper,January,2014.
- [22] Hermann Weiher,Simon Hoffmann.Innovative design of bridge bearings by the use of UHPFRC[J].Conference Paper,January,2012.
- [23] 臧晓秋.球型钢支座用于铁路简支梁桥的适应性研究[J].铁道建筑,2011(12):1-4.