

NB2009-003

成功的不锈钢游泳池设计

Successful Stainless Swimming Pool Design

Nickel Institute 国际镍协会北京办事处

成功的不锈钢泳池设计

Successful Stainless Swimming Pool Design

(选自2005年12月《Construction Specifier》杂志)

作者/凯瑟琳·胡斯卡（美国建筑规范研究院CSI成员）和詹姆斯·弗里兹博士

金属材料用于室内游泳馆建设已经有40多年的历史，但在长期性能方面，不同金属差别甚大。不锈钢材料若得到正确合理的选用和维护，便能获得卓越的使用性能。经验表明，在室内游泳馆游泳池的应用方面，尚无其他金属材料的性能可以与之相媲美。即便出现表面的锈蚀，也不会对游泳池防护甲板周围或泳池内部的不锈钢的结构完整性产生不利影响，而且这些锈蚀很容易清除。

不锈钢集各种优点于一身，外表美观、耐腐蚀、强度高、耐久性好、清洁性好，因而广泛用作室内和室外游泳池的构件，包括扶梯、栏杆、跳台、水上滑梯组件、水槽和通风系统等。这些设施常常在服役超过25年之后依然结构完好、外形美观。



图2

供图/国际镍协会

图1、图2和图3为不锈钢游泳池滑梯和水上设施。



图1

供图/国际镍协会



图3

供图/Martina Helzel

但这并不意味着不锈钢就不存在潜在的问题，自从20世纪70年代以来，休闲娱乐用游泳池的发展趋势是：水温更高，入浴者和水上设施(如滑梯和喷泉等)大量增加，化学消毒剂含量更高。此外，更高的能源成本迫使一些游泳池运营商降低了空气置换率。

这些因素增加了氯化程度和空气湿度，使得游泳池的环境对所有材料而言，腐蚀性都比以前强得多。日益苛刻的环境条件要求采用耐腐蚀性能更强的合金，增加维护力度，方可保持外表美观。提高选材人员和游泳池管理者对不锈钢选择和维护的认识是实现防腐性能的一个关键方面。

在游泳池构件中也采用一些耐腐蚀能力稍差的金属材料。铝制材料的相对安装成本较低，而铝制部件的腐蚀经常被忽视，因为铝的腐蚀产物外观为白色或灰白色。铝材料在氯离子环境中腐蚀速率会显著加快，这使得检查变得非常重要，这样才能确定金属损失程度和结构的完整性。成本相对较低的涂漆和喷镀碳钢有时也用在游泳池上，但其性能取决于涂层质量和维护状况。一旦起保护作用的涂层或镀层开始脱落，碳钢就会迅速被腐蚀并出现结构上的损坏，因此必须定期仔细检查和重新涂漆。

腐蚀的原因

用于给游泳池水消毒的含氯化学消毒剂，与含氮的化合物如尿素(来自汗液和尿液)发生反应生成氯胺。氯胺极易挥发到空气中并沉积在金属表面，在金属表面的凝结水中分解形成腐蚀性溶液。随着凝结水的蒸发，溶液被浓缩，这一过程周而复始，导致这些腐蚀性的含氯化合物在水以上的表面上富集。这些化合物是游泳池周围金属腐蚀问题的主要原因。

游泳池工程中不锈钢的腐蚀，通常是由于以下一个因素造成或多个因素共同造成：

- 不锈钢牌号或表面选择不当；
- 维护不足或不当；
- 低劣的加工技术；
- 游泳池环境控制欠缺。

室内游泳池环境的腐蚀性随温度、相对湿度（RH）、入浴者数量和空气置换率的不同而有显著的不同。

表1和表2总结了各种游泳池用不锈钢材料及其一般特性。浸泡在水中的表面和经常被池水冲刷的区域就很少被腐蚀。与之相似，室外的游泳池环境，由于有充足的新鲜空气和经常性的雨水冲刷，也没有室内游泳池环



图4 用于固定泳道标志的镀铬碳钢卷盘投入使用仅几年，镀层下就已严重锈蚀。
供图/TMR咨询公司



图5 一家清洗承包商使用碳钢刷清洗安装在室内游泳池旁边不锈钢门的合页。被碳钢污染的区域已生锈。
供图/TMR咨询公司

境的腐蚀性那样强。另一方面，室内游泳池环境中的天花板和其他隔离区是最容易发生腐蚀的区域，原因是这些区域既未被池水冲刷，也不太可能进行清洗，使得含氯化合物大量聚积。

表1 游泳池用不锈钢材料的一般特性

不锈钢牌号	(UNS编号)	一般特性
标准铬-镍奥氏体不锈钢	304 (S30400) 304L (S30403)	耐腐蚀性好 优异的成型性、焊接性和抗冲击强度 易于获得 在游泳池建筑中容易发生应力腐蚀断裂(SCC)*
标准铬-镍-钼奥氏体不锈钢	316 (S31600) 316L (S31603)	耐腐蚀性优于304/304L 优异的成型性、焊接性和抗冲击强度 易于获得 在游泳池建筑中容易发生应力腐蚀断裂*
高合金化奥氏体不锈钢	317LMN (S31726) 904L (N08904)	耐腐蚀性比316/316L更好 良好的塑性、焊接性和抗冲击强度 在游泳池建筑中抗应力腐蚀断裂性能良好
含6%钼的超级奥氏体不锈钢	254 SMO® (S31254) AL-6XN® (N08367) 25-6MO (N08925)	耐腐蚀性极好 良好的成型性、焊接性和抗冲击强度 在游泳池建筑中抗应力腐蚀断裂性能良好
双相不锈钢	2205 (S33305)	耐腐蚀性类似于904L和317LMN 强度高 良好的焊接性和抗冲击强度 在游泳池建筑中抗应力腐蚀断裂性能良好
超级双相不锈钢	SAF 2507® (S32750)	耐腐蚀性类似于含6%钼的不锈钢 强度高 可焊接 在游泳池建筑中抗应力腐蚀断裂性能好

注：254 SMO是奥托昆普公司的注册商标。AL-6XN是ATI Properties公司的注册商标。SAF 2507是山特维克公司的注册商标。

假定以上所有应用都具有高质量、光滑的不锈钢表面。SCC是应力腐蚀断裂(stress corrosion cracking)的缩写。

*如果用于承重的经过冷加工的部件（例如天花板结构支撑）不经常清洁或冲刷，这种情况才会出现。

304和316不锈钢通常用于游泳池中淹没在水下或经常有池水冲刷的部位。304不锈钢在温度较低、氯化物含量较低、环境控制较好的游泳池中可以发挥其良好性能。喷漆或涂敷的304不锈钢有时用于腐蚀性较强的区域，如管道系统。而裸露的316不锈钢更多用于温度较高、氯化物含量升高的游泳池或温泉，以及对氯化处理缺乏精心控制的区域。

游泳池建筑中的高应力不锈钢应用构件可能容易发生应力腐蚀断裂（SCC），而且可能造成灾难性后果。敏感的不锈钢包括304/304L、316/316L、201/201L、321以及其他镍含量在8%–10%的奥氏体不锈钢。承重或经深度冷加工的部件面临的风险最大。这一问题最有可能影响靠近天花板的部位，因为在这里氯胺非常有可能在金属表面大量沉积。换句话说，完全浸没在水下或是经常受池水冲刷或经常清洁的不锈钢表面，极少发生应力腐蚀断裂。

表2 建议游泳池不同部位采用的不锈钢材料

位置	说明	不锈钢类型
水下	氯气含量1~3ppm，水温较低，水的化学成分控制良好，氧化分解水溶性排泄物的操作很少或没有	304 型
水下	氯气含量1~3ppm，水温较低，水的化学成分控制可能较差	316 *型
水下	氯气含量3~5ppm，水温较高，水的化学成分控制良好，氧化分解水溶性排泄物的操作很少或没有	316型
水下	氯气含量3~5ppm，水温较高，水的化学成分控制可能较差	316 *型
有水冲刷 不承重	定期维护清洁，水的成分化学控制、空气置换率和湿度控制良好	304 型
有水冲刷 不承重	定期维护清洁，水和空气质量控制状况未知	316 型
室内 有水冲刷 不承重	维护极少，经常有氧化分解水溶性排泄物的操作，空气置换率低，和/或表面加工质量差	317LMN, 904L, 2205
室内 无水冲刷 不承重	定期维护清洁，高质量的表面加工，良好的空气置换和湿度控制	Type 316
室内 无水冲刷 不承重	维护极少或没有，表面加工质量差，空气置换率低和/或湿度控制较差	317LMN, 904L, 2205
室内 无水冲刷 承重	定期维护清洁，高质量的表面加工，良好的空气置换和湿度控制	317LMN, 904L, 2205
室内 无水冲刷 承重	维护极少或没有，表面加工质量差，空气置换率低和/或湿度控制较差	254 SMO®, AL-6XN®, 25-6MO

注：

*如果定期有氧化分解水溶性排泄物的操作，氯气不能迅速、均匀地分布在整个水池中，316不锈钢在氯气浓度极高的区域可能会发生点蚀。如果不监测氯气浓度，并且经常明显地超过5ppm，也会出现上述情形。可以规定采用耐腐蚀性能更好的不锈钢材料，但更有效的解决方案还是加强水质管理。

含6%钼的不锈钢材料突出的耐腐蚀性和良好的抗应力腐蚀断裂性能，使其成为苛刻的水面之上应用部件（既无法被水冲刷也不能进行清洗）的理想选材。超级双相不锈钢材料尽管不易获得，但其具有类似的耐腐蚀性，也是上佳之选。904L、317LMN和2205双相不锈钢的防锈和抗应力腐蚀断裂性能优于304和316不锈钢。如果能够适当选择抗应力腐蚀断裂的不锈钢材料，则游泳池结构部件在泳池的寿命期中的使用是无需担忧的，也无需维护。这些更高合金化的抗应力腐蚀断裂的不锈钢通常要比304和316不锈钢更加昂贵，但双相不锈钢具有更高的强度。如果结构工程师充分利用双相不锈钢的强度优势，降低截面尺寸，其安装成本就可与316不锈钢类似。现有的由易发生应力腐蚀断裂的合金如304或316不锈钢制作的在安全性上非常关键的应用部件以及承重部件需要定期地清洁和检查以确保长期的结构完整性。

不锈钢的表面状况会影响不锈钢的性能。当具有良好表面和较差表面的不锈钢在同等条件下并排放置，后者出现锈蚀的可能性大得多。非常光滑的表面(例如管道系统中的无光轧制表面或抛光栏杆的镜面表面)一般具有最佳耐腐蚀性能。要想获得刷光或4号缎面表面，应采用碳化硅研磨剂，而且一旦开始磨损就应该换新的。氧化铝和非金属研磨垫可能会弄污表面，产生易引发腐蚀的微小缝隙。

不应当用盐酸(氢氯酸)来清洗不锈钢附近的混凝土和瓷砖，因为有可能造成快速腐蚀。一旦盐酸与不锈钢接触，必须立即将其冲净并中和。应避免使用含有盐酸的清洗剂，即使只含有少量盐酸也不行。

缺乏维护和使用不合适的清洁剂是影响防腐性能的另一个因素。碳钢钢丝球和钢丝刷不能用于清洁或“重新磨光”不锈钢，因为碳钢颗粒会嵌入到不锈钢表面。这些碳钢颗粒的腐蚀速率与未受保护的碳钢相同，会造成难看的表面损伤。

不锈钢部件上如果有焊缝，焊缝应与周围金属具有相同的耐腐蚀性。所以不锈钢焊缝及其周围出现腐蚀是不合格的。焊缝进行研磨和酸洗是恢复焊缝良好耐腐蚀性的最佳手段。



图6 在一游泳池水槽没有妥善清理的焊缝和沿着焊缝发生的点蚀。
供图/TMR咨询公司

浸没到水中的应用

不锈钢的耐腐蚀性使其成为全部或部分浸没到氯化处理的水中的部件，包括游泳池的水槽、扶梯、水下照明设备、衬板和水下管道系统的理想材料。为这些部件选择金属材料时，游泳池水温、氯化处理的程度以及水质能否进行精心管理都是需要考虑的因素。

建议的游泳池内游离氯气浓度范围是1~3ppm (在温泉和较高温度的池中是3~5ppm)。过氯化作用和氧化分解水溶性排泄物的操作 (也就是利用氧化作用分解游泳者产生的水溶性排泄物的一种维护操作)会暂时使池水中氯气含量达到10ppm左右，这会加快游泳池材料的腐蚀。通过精心的水质管理可以将高浓度的氯减少到最小，乃至消除。

将各种铝材(如1100、3003和6061)、铸铁、碳钢和不锈钢合金暴露在3~5ppm氯化水中250天，暴露在20~25ppm氯水中32天。铝材料在氯离子含量为2ppm以下的水中腐蚀速率低，但当高于这一浓度水平时，随着氯离子浓度增加，腐蚀速率大大加快。图7给出了铝、铸铁和碳钢的腐蚀速率随氯化程度增加而呈相对线性迅速增加的情况。试验中的不锈钢(304和316)在所有氯化程度的水中的均匀腐蚀速率非常低(<0.1 mpy)，所以在图中显示。即使暴露在氯气含量为20~25ppm水中长达32天，304和316不锈钢也没有出现均匀腐蚀或点蚀。

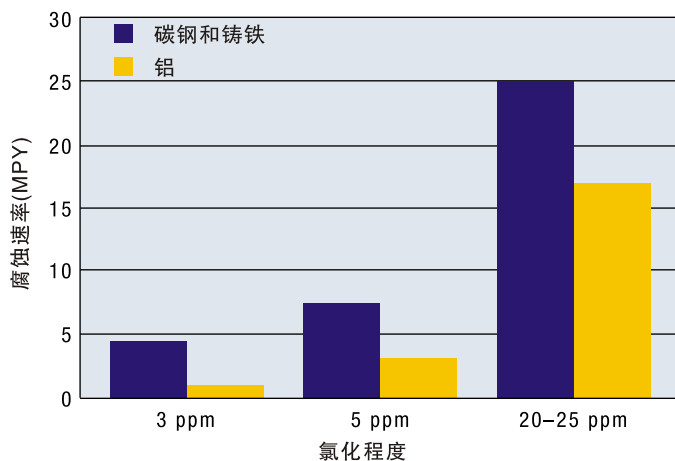


图7 碳钢、铸铁、铝和不锈钢合金在三种不同浓度的氯化水中进行测试，金属的平均损失速率以mpy(密耳/年)计算。304和316不锈钢材料在所有浓度的氯化水中均匀腐蚀速率都非常低 (<0.1mpy)，在图中未显示。

当在游泳池环境中采用金属材料时，应避免缝隙或将其密封，因为它们可能成为腐蚀加速发生的部位。还应注意防止不同金属直接连接，避免发生电偶腐蚀。

304不锈钢最适合用于浸没或部分浸没在水质经严格监测、温度较低的游泳池的应用。316不锈钢是较为保守的选择，因为其耐腐蚀性更好，推荐用于氯离子含量高达5ppm的游泳池。如果水处理系统不能迅速将氯气分散，在游泳池中氧化分解水溶性排泄物的操作可能会暂时使局部氯化物浓度非常高。反复过度的氯化处理，如果没有适当的监测，也会导致氯气浓度非常高。尽管不锈钢要比其他金属更耐氯的腐蚀，但在氯化处理的浓度非常高时，也可能出现点蚀，所以应仔细监测游泳池水的化学成分。

游泳池衬里

不锈钢游泳池衬里长期以来一直在欧洲和日本使用，既用于新建的游泳池，也用于游泳池的改建翻新，在北美也开始采用。不锈钢材料之所以受到欢迎，是因为其寿命长、维护成本低、清洁卫生。不锈钢能够有效去除细菌和污染物，所以不锈钢成为商用厨房、食品和药品制造、水处理设施和其他非常关注表面清洁性的应用领域的理想选材^{3,4,5}。在日本，不锈钢游泳池衬里非常流行，因为有文献记录表明，它们能够经受住地震的破坏，而传统混凝土和玻璃钢(FRP)游泳池衬里则会在地震中被损坏⁶。

尽管维修现有混凝土或乙烯基和玻璃纤维衬里的初始成本较低，但这些都只是短期的解决方案，需要频繁的维护以清除藻类和频繁的维修，而且比不锈钢衬里的使用寿命短。欧洲历史最长的不锈钢游泳池衬里已经使用了40多年，而且没有损坏的迹象。对于不锈钢池壁的游泳池来说，藻类通常不是什么问题，因为植物不能附着在比较光滑的表面。光滑的池壁也消除了擦伤游泳者皮肤的顾虑。

安装不锈钢游泳池衬里有两种方法。第一种采用涂敷PVC材料的304不锈钢板，这些钢板用螺栓连接在一起，用水平和垂直的不锈钢支撑件固定。溶剂“焊接”PVC形成了一个光滑、防水的密封连接。游泳池标记可以直接喷涂在PVC上。尽管不锈钢的缝隙腐蚀速率要比其他衬里基层低，仍建议有破损时应尽快修复。⁷



图8 德国慕尼黑的这个游泳池在更换衬里时，采用焊接在一起的316不锈钢板。
供图/Martina Helzel

裸露型316不锈钢已用于游泳池的衬里，尤其是在欧洲。在衬里的更换中，不锈钢已经取代了塑料和瓷砖，而在新建游泳池项目中，由不锈钢板和结构框架构成的自支持结构多用于水深达2米(6.5英尺)的泳池。更深的游泳池，由于承载的水压更大，通常都需要二级支撑结构或更重的墙板。将不锈钢板焊接在一起构成了水密结构，将焊缝酸洗以恢复其抗腐蚀性。游泳池泳道标志可以事先采用电化学方式着色来标示，免去维护喷涂。

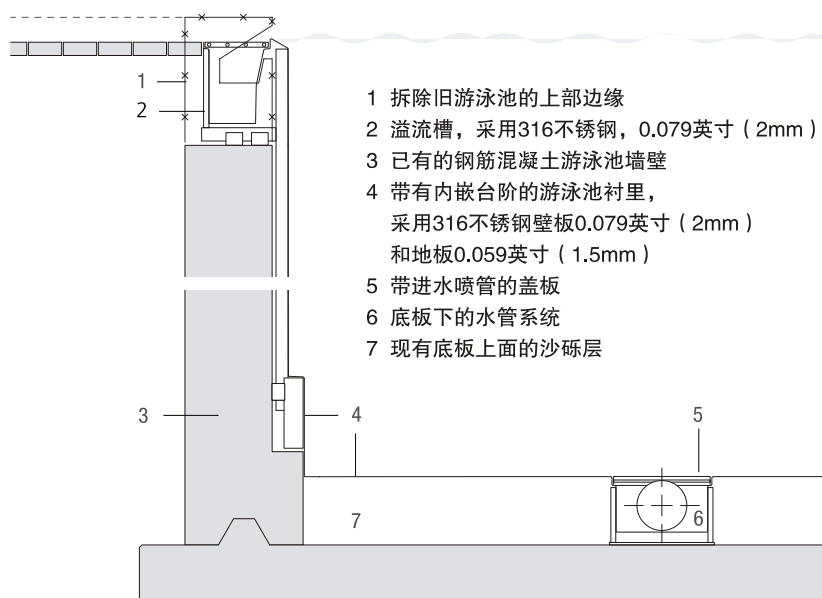


图9 该示意图显示的是重新铺设衬里的过程。
供图/欧洲不锈钢市场开发协会（EuroInox）

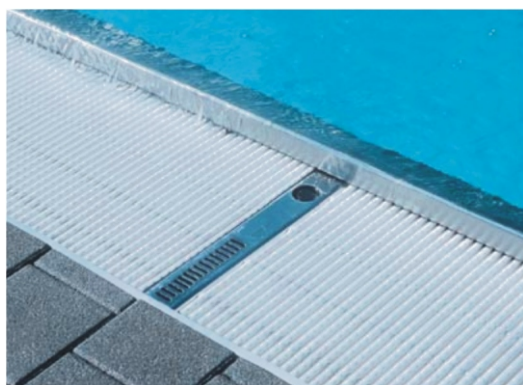


图10和图11 地板上的316不锈钢游泳池水槽和喷水管出口。
供图/Martina Helzel

水面以上的应用

由于氯胺聚积的可能性增加，水面以上的位置是游泳池周围最具腐蚀性的区域。如果经常冲刷和清洗这些区域，腐蚀发生的可能性会大大降低(如游泳防护甲板和一些更衣间)。但室内游泳池未受到冲刷的水面以上的应用设施，在游泳池环境中最易被腐蚀，因为这些位置很难受到水的间接清洗。这类区域包括：高台、管道系统和天花板等。此外，一些防护甲板层面的应用设施也可以归于此类。既不是结构件也难于冲刷/清洗的组件(如装饰板和通风管道)应至少采用耐腐蚀性能达到316不锈钢水平的材料制造，并且要采用高质量的光滑表面。高处难以清洗和检查，一般推荐采用耐腐蚀性更强的不锈钢材料。



图12 室内游泳池上方屋顶304不锈钢的腐蚀状况。
供图/TMR咨询公司

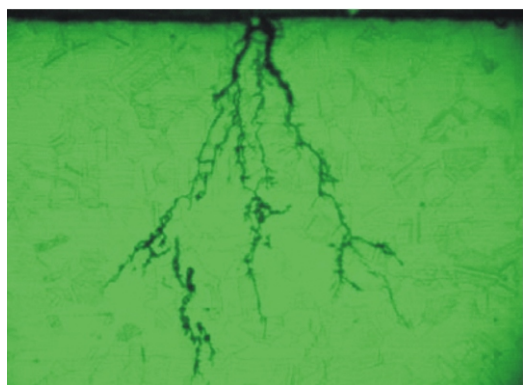


图13 屋顶板材样品横截面的放大照片显示发生了大面积的应力腐蚀断裂。
供图/TMR咨询公司

应力腐蚀断裂是那些无法清洗或被游泳池水冲刷的承重部件所关心的问题，例如天花板吊钩、紧固件、支架、支撑件、螺栓、钢线、电缆和挂钩。图12和图13描绘了一个应力腐蚀断裂的例子。北美一个室内游泳池屋顶的304不锈钢顶板从未检查和清洗过，暴露十年后，跳台上方的屋顶已经可以看到明显的褐色锈迹。从顶板上取样，经仔细检查发现浅的点蚀和大面积裂纹，有些裂纹穿透了横截面的80%。这些裂痕产生的原因如下：

采用的不锈钢材料易发生应力腐蚀断裂。

屋顶板材冷加工的残余应力比较高，而且承载的屋顶压力较大，尤其是冬天屋顶有积雪的时候。

没有清洁措施去除聚积的腐蚀性氯化物。

当时游泳池环境控制较差。

应力腐蚀断裂可能导致结构完整性的严重损坏，并且可能造成灾难性后果。因此，必须通过优质设计、仔细选择抗应力腐蚀断裂材料、以及经常性的维护和检查来避免。防止这种形式腐蚀的产品包括更高合金化的奥氏体不锈钢如317LMN、904L，含6%钼的超级奥氏体不锈钢，以及双相和超级双相不锈钢如2205和2507。

经镀锌和喷涂处理的碳钢和结构钢具有抗应力腐蚀断裂性能，也可用于承重的应用。但这些材料必须经常检查，以保证保护性的镀层和涂层完好。否则，腐蚀会造成结构完整性的迅速破坏。

不锈钢的清洁

过度氯化处理、空气置换不充分以及清洗不足/不当都会增加游泳池环境的腐蚀性。通过选择适当的不锈钢牌号和表面、控制游泳池环境和维护清洗，绝大多数腐蚀问题是可以避免的。简单的清洗程序如用软管接水冲洗或擦洗，就可以有效清除含氯化物的污染物，防止锈蚀。

当氯胺聚积在不锈钢表面，会出现表面的褐色腐蚀。这些轻微的腐蚀不会影响不锈钢的结构完整性。表面可采用适当的不锈钢清洁剂或家用清洗剂清洗。但某些不锈钢“清洁剂”可能会损坏金属或导致腐蚀，所以确定清洁剂的成分是非常重要的。应避免采用含有盐酸、氯化物、油类和/或石蜡的清洁剂产品，它们会导致腐蚀或增加氯胺的附着性。钢丝球和钢丝刷不仅会刮伤表面，还可能由于污染表面而导致不可挽回的损伤。清洗不锈钢应采用干净、柔软、无毛绒的布或海绵。

非常轻微的锈迹可以用湿布或食醋或氨水清洗液(如窗户清洗剂和表面清洗剂)去除。较为严重的锈迹应采用含有200目或更细的碳酸钙的家用研磨清洁剂去除。稀释的草酸、柠檬或硝酸也可以有效去除锈迹，有时作为不锈钢除锈剂出售。

致谢

本文作者特别感谢国际镍协会和国际钼协会帮助审阅和准备本文并提供图片。

注：

1. 这些失效问题已在许多技术出版物中提及，如镍发展协会（NiDI）第12010号出版物（1995）《不锈钢在游泳池建筑物中的应用》。又见J.M. Heselmans和E. H. van Duijn撰写的“游泳池用不锈钢的应力腐蚀开裂”（《不锈钢世界》，2001年12月），以及Nancy Baddoo 和Peter Cutler撰写的“不锈钢在室内游泳池建筑中的应用”（《结构工程师》）
2. 见“淡水中氯气对普通材料的影响”，A.H. Tuthill等人（《材料性能杂志》，1998年11月）
3. R.A.Stevens和J.T. Holah，“擦拭和喷雾洗涤温度对磨损的家用水池表面细菌存留的影响”，应用细菌学学报，1993，第75卷，91-94页
4. J.T. Holah和R.H. Thorpe，“未使用的和磨损的家用水池材料上与细菌存留相关的清洁性”，应用细菌学学报，1990，第69卷，599-608页
5. J.T. Holah，“不锈钢水池清洗便捷战胜细菌”，镍杂志，1990年6月，第5卷，第4号
6. 高桥松山，“日本建筑领域对不锈钢的需求”，国际镍协会 MEP 94-7，1995年8月
7. 见“快组装低维护”（镍杂志，2005年7月）
8. “应用于室外游泳池的不锈钢慕尼黑的一项翻新和升级倡议”，欧洲不锈钢市场开发协会（EuroInox），2003，ISBN 2-87997-088-1
9. 在www.stainlessarchitecture.org 和 www.imoa.info均可获得有关不锈钢的清洗指南

作者

凯瑟琳·胡斯卡（Catherine Houska），美国建筑规范研究院（CSI）成员，是一位冶金学工程师，担任TMR咨询公司高级开发经理。她是国际知名的建筑金属规范、修复、失效分析和选材方面的专家。可以通过电子邮件 chouska@tmr-inc.com 与其联系。

詹姆斯·弗里兹（James Fritz）博士，是一位腐蚀工程师，在工业和建筑应用材料选择方面具有丰富的经验。他是美国国际腐蚀工程师协会注册材料选择设计专家，TMR咨询公司（宾夕法尼亚州匹兹堡）高级开发经理。可以通过电子邮件 jfritz@tmr-inc.com 与其联系。

摘要

氯气和高温潮湿环境使得室内游泳池成为对金属和材料腐蚀性非常强的环境，尤其是在靠近天花板的区域。不锈钢在游泳池环境中的应用有着长期成功的历史，腐蚀速率比其他金属低。如果能正确选择不锈钢和表面，精心控制游泳池的水质和空气，并进行适当的维护，就能获得成功。



Nickel Institute国际镍协会北京办事处

地址：北京东直门南大街14号保利大厦办公楼677-678号

邮编：100027

E-mail: agao@ni-china.org

电话：86-10-65533060, 65532603

传真：86-10-65010261

网址： www.ni-china.org