

认识除冰盐的腐蚀威胁，合理选用耐腐蚀材料

Deicing Salt - Recognizing the Corrosion Threat

撰文 凯瑟琳·胡斯卡 美国宾夕法尼亚州匹兹堡市TMR咨询公司

0 引言

自20世纪60年代以来，在世界范围内，除冰盐被广泛用于道路安全受到季节性冰雪威胁的地区，美国、加拿大、日本以及欧洲国家使用量巨大^[1-6]。中国由于基础设施的改建和扩建导致除冰盐的使用愈加随意，并且中国最近已经成为世界上最大的除冰盐生产国。

大量资料表明，除冰盐已造成汽车、公路桥梁材料的腐蚀以及生态系统的改变，但人们对除冰盐破坏性的认知目前仅局限于毗邻公路的地区，因此建筑材料的劣化被大大忽视。有资料表明，在距繁忙公路远达1.9km（1.2英里）的地方以及摩天大楼高达59层处已发现季节性除冰盐的聚积^[7,8]。在地处“雪带”的城市，季节性的除冰盐接触量可以很大，材料如果选用不当，有时在材料安装当年的第一个冬季比较温暖的时期就开始出现腐蚀。一些冬季气候较温和的内陆城市，如中国的北京、美国田纳西州的纳什维尔市等，由于采用除冰盐应对冻雨，局部区域也会接触到除冰盐。

除冰盐接触风险就成了大多数室外重点设计项目考虑的一个重要潜在因素^[4]，对除冰盐缺乏充分的了解会导致金属材料选用不当及材料过早失效，建筑设计师应对此给予充分重视。弗兰克·盖瑞（Frank Gehry）设计的位于美国明尼阿波利斯市的威斯曼艺术博物馆（图1）在这方面就是做得非常好的一个范例。博物馆外表采用精细4号抛光表面的316不锈钢，表面光滑，很容易被雨水冲刷。尽管该博物馆每年除冰盐的接触量很大，但是它依然表现出良好的性能。建筑物外表没有明显腐蚀锈迹，只有一些积尘。

1 除冰产品和道路盐雾

防冰除冰产品种类繁多，包括氯化钠、氯化钙、氯化镁、乙酸钾、醋酸钙镁等。氯化钠（即岩盐）仍然是世界上应用得最普遍的除冰产品，其次是氯化钙和氯化镁。所有用于除冰的盐类（氯化物）都具有腐蚀性。公路上的盐雾或悬浮微粒是行驶车辆的轮胎把盐水或者干盐粒卷起并抛向空气时产生的。车辆在行驶时引起的大气湍流形成一个由湿或干盐粒组成的垂直气柱，再由风把这些盐粒带离公路、飘向远方。

由伊利诺州交通运输部（DOT）与美国阿尔贡国家实验室（ANL）和美国国家大气沉降计划/国家动态监测网（NADP/NTN）

携手合作完成的一项新研究（图2）证明，在繁忙公路附近100m（328英尺）范围内的区域最有可能发生盐聚积，该区域的盐含量类似于中等至高盐含量的沿海环境。在风力等级适中的主要城区，在间距较近的高层建筑物上，除冰盐沉积一般不超过第12层。但是在冬季风力等级较高的城市里，会在更高楼层发生除冰盐沉积现象。在芝加哥，邻近繁忙公路、中等规模的高层建筑物，因除冰盐引起的金属材料腐蚀现象一般在第20层和第30层之间停止，而有一座大楼，除冰盐腐蚀直到第59层和第60层之间才停止。在邻近低层建筑物的人行道上，除冰盐沉积现象可能在第1层和第3层就停止了^[8]。

2 不同材料的耐盐腐蚀对比

一般对盐（氯化物）环境下金属性能的长期测试主要是针对沿海或海洋应用，基本不涉及公路桥梁和公路运输车辆。而目前公路附近的年均盐沉积量相当于甚至高于沿海地区的年均盐沉积量，所以，我们以沿海腐蚀的数据资料为参照预测建筑金属材料的相对耐腐蚀性。表1汇总了从几个沿海腐蚀试验点收集的一些常用建筑金属材料的腐蚀性对比数据^[11]，其条件类似于美国和欧洲季节性冰雪灾害多发地区。表中还收录了一处没有盐暴露风险和低污染的测试点，用作对比。

表1 常用建筑金属材料的腐蚀性对比

盐含量	环境			
	无	中等	中等	高
污染程度	低	低	中等	中等
每年有雾的天数	10	160	79	10
每年的暴雨次数	43	59	3	28
年平均降雨量： 毫米(英寸)	700 (29)	1370 (54)	515 (20)	1050 (42)
相对湿度/%	57	69	76	78
平均温度/°C (°F)	16 (61)	11 (53)	17 (62)	21 (70)
年腐蚀率：毫米/每年（密耳/每年）				
316 不锈钢	<0.000025(<0.001)	<0.000025(<0.001)	<0.00025(<0.01)	0.00028 (0.01)
304 不锈钢	<0.000025(<0.001)	<0.000025(<0.001)	0.000127 (0.005)	0.0004 (0.02)
铝	0.0003(0.01)	0.009(0.3)	0.004 (0.17)	0.0194 (0.77)
铜	0.0056(0.22)	—	0.007 (0.28)	0.0246 (0.97)
锌	0.003(0.13)	0.002(0.08)	0.03 (1.14)	0.111 (4.37)
耐候钢	0.023(0.9)	—	0.09 (3.6)	0.810 (31.89)
碳钢	0.04 (1.70)	0.147 (5.8)	0.26 (10.12)	2.19 (86.22)



图1 威斯曼艺术博物馆外表采用精细4号抛光表面的316不锈钢

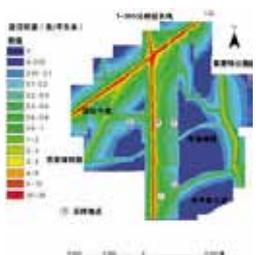


图2 公路周围除冰盐年沉积量模型设计图及主要监测点间距示意图（伊利诺斯州交通运输部提供）



图3 除冰盐造成铝制门槛发生严重腐蚀



图4 一幢办公楼第二层的阳极氧化铝板遭受除冰盐腐蚀



图5 室外采用的阳极氧化铝板，定期清洗去除除冰盐和其它污染物



图6 教堂的镀锌钢屋顶板发生腐蚀



图7 缝隙腐蚀



图8 一幢大楼外部的耐候钢材遭受除冰盐破坏

尽管国际铝协会（IMOA）开发的建筑场所与设计评价系统初衷是为选择不锈钢材料提供帮助，但是该系统在确定影响金属腐蚀的因素方面也非常有用^[12]。

2.1 铝材

铝在许多应用场合都具有优异的耐腐蚀性，但盐类（即氯化物）会破坏铝的保护性氧化膜，造成腐蚀。常用的铝合金一旦接触到盐，其腐蚀速度没有太大的差异。当环境中同时出现硫化物（如大气中的二氧化硫）时，铝的腐蚀速度就会加快。在这种环境下，含有铝的碳钢保护性镀层也会有较大的腐蚀率。

铝发生的腐蚀是点蚀而不是均匀的表面腐蚀，腐蚀后留下白~灰白色的粉末。对铝进行阳极氧化处理可以提高其耐腐蚀性，但是在无保护层的铝材可能受到腐蚀的环境中，阳极氧化处理也不能对铝材提供长期的充分保护。为此有必要对其进行定期的保养和清洁，以清除铝材上的腐蚀性沉积物^[13]。图3中的腐蚀现象发生在宾夕法尼亚州匹兹堡市，腐蚀原因是二氧化硫和除冰盐的联合作用。由于毗邻的人行道冬天经常使用除冰盐，于是盐就在门槛上聚积起来，最终铝门槛由于严重腐蚀而发生穿孔。图4是邻近一幢大楼第二层的阳极氧化铝板，其最初的颜色是炭灰色。图中的白色和浅灰色区域表明除冰盐曾在此聚积，造成其表面的点蚀，破坏了铝板最初的阳极化镀层。直到铝板的美观遭受了永久性的破坏之后，腐蚀留下的白~灰白色粉末才引起人们的重视。这些铝制壁板聚积的盐量远远少于门槛上聚积的盐量，发生腐蚀性穿孔的可能性也不大，但铝板的损伤是不可修复的。通过定期保洁清除盐沉积和各种污染物沉积，可以将腐蚀降到最低限度。位于匹兹堡的古老的美国铝业公司总部（图5）也采用同样的阳极氧化处理铝板，由于定期的维护清洗，墙板只有轻微的损伤。

2.2 锌及锌镀层

锌被腐蚀或氧化后产生一种灰色的绿锈，设计师对此饶有兴趣。如果环境的腐蚀作用较小，则锌的腐蚀率较低，且那层保护性的绿锈能够降低腐蚀率。如果暴露在各种硫化物（如二氧化硫）环境下，那么锌材的腐蚀率就会明显增加。盐类（氯化物）和氮氧化物也会增加锌的腐蚀率，但幅度较小。腐蚀率最高的地点是同时存在污染和氯化物的地方。如果雨水的pH值低于5，那么雨水酸度也是影响锌腐蚀率的一个重要因素^[14]。那些加快锌合金腐蚀率的因素同样也会加快镀锌钢和其他含锌镀层的腐蚀。

图6是城郊一条繁忙的四车道公路附近一座教堂的镀锌钢屋顶，该公路在冬天使用了除冰盐。尽管温暖月份的正常降雨有助于冲刷掉屋顶上的腐蚀性沉积物，但是教堂朝向公路的那面由于经常性地暴露于盐环境，比朝向教堂停车场的那面出现的腐蚀现象更多。

这其实是一条较缓慢的车行道，而教堂距离公路有数百英尺之远，污染等级属中度，腐蚀进展比较缓慢。与不暴露在外

的建筑部位相比，易受到雨水冲刷的建筑部位（如这座教堂的屋顶），腐蚀性化合物聚积较少，其腐蚀率也比较低。

2.3 碳钢与耐候钢

碳钢没有能力自发形成保护层，需要用油漆或阴极保护金属涂层减少腐蚀。盐类和各种污染物（如二氧化硫、氮氧化物等）同时存在对裸露的碳钢具有很强的腐蚀性，也对常用于碳钢、由锌和铝制成的阴极保护金属涂层具有腐蚀作用，这种环境条件对处于霜冻地带的工业城市很常见。如图7所示，碳钢涂层失效加快了碳钢腐蚀率，潮气和腐蚀性物质聚积在涂层边缘下方，造成缝隙腐蚀。为了延长使用年限，必须频繁地刮掉涂层并重新涂饰。通常，阴极保护金属涂层外加一种多层涂料系统才能为碳钢提供最佳保护。

如果建筑结构位于一条经常使用除冰盐的道路附近，则设计选材者应当遵循涂层制造商关于沿海地区的推荐作法。在盐和硫化物同时存在的环境，碳钢的腐蚀率最高。

耐候钢属于低合金结构钢，能够形成一层粘着的致密氧化膜，随着氧化膜厚度的增加，金属的腐蚀率下降。在干湿循环周期有利于这种稳定膜形成的地方，使用耐候钢时可无须保护性涂层。

盐类和工业污染物破坏了耐候钢表面上的这层氧化膜，使耐候钢的腐蚀率大大加快。图8显示了一幢大楼外部耐候钢表面除冰盐的聚积情况。没有保护涂层的耐候钢墙板在除冰盐和/或污染环境会穿孔，特别是如果这些墙板被遮挡而不能定期地被雨水冲刷，情况会更糟。

2.4 不锈钢

不同种类的不锈钢其腐蚀率有很大差别。有些不锈钢浸泡在海水中也不会被腐蚀，而有些不锈钢在沿海环境和除冰盐环境下会发生腐蚀。二氧化硫对不锈钢腐蚀率的影响很小。

两种最常用的不锈钢牌号是304和316不锈钢。这两种牌号的不锈钢具有基本相同的成形性能，但是，由于316不锈钢中添加了钼元素，它在含盐环境中具有更加优越的性能。从表1中可以看出，与其他建筑金属材料相比，这两种不锈钢的腐蚀率都非常低，几乎不可能导致结构失效或穿孔。

在典型的沿海条件和除冰盐暴露条件下，如果没有定期的维护和清洗，304不锈钢会出现表面锈迹。如芝加哥内陆钢铁大厦，外墙板采用304不锈钢建造，在每年春天对大厦进行清洁之前，发现其外表有腐蚀斑点。这些轻微的腐蚀斑点只是表皮上的瑕疵，清洗之后，可恢复不锈钢光亮的外表。

在沿海环境或除冰盐暴露环境下，应优先选用316不锈钢材料，因为这种不锈钢在清洁间隔期间的很多年都不会发生腐蚀，尤其当采用光滑的表面时。图1威斯曼博物馆光滑的316不锈钢外墙照片在拍摄时，该博物馆已经五年没进行过清洗了，但一直没有发生腐蚀。

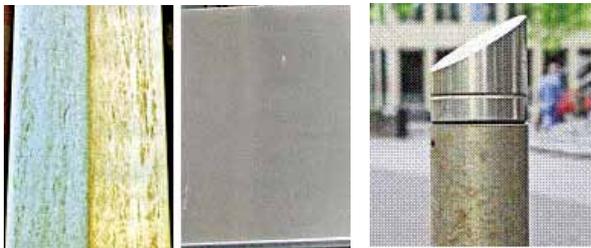


图9 304 (左) 和316不锈钢 (右) 外墙板腐蚀对比

图10 316型不锈钢隔离柱 (国际钼协会尼克·肯斯曼提供)

图9是相邻的两座建筑物第二层上的304不锈钢和316不锈钢外墙板, 暴露在相同含量的除冰盐环境中, 两块不锈钢板都没有进行过清洗, 表面上可以看到有灰尘和少许盐的残留。在304不锈钢板上, 可看到轻微的除冰盐腐蚀斑点, 而316不锈钢板上没有锈斑。

在除冰盐接触量非常高的应用环境里, 如嵌入式人行道照明设备、入口格栅以及易聚积盐的面板底下等, 即使采用了316不锈钢, 也不能保证有足够的耐腐蚀能力。经常暴露于盐水飞溅的区域也易发生腐蚀现象。清洗可以去除锈迹, 但在某些情况下, 有必要采用比316不锈钢耐蚀能力更强的不锈钢如2205、317LMN和904L等。

有关如何选用不锈钢材料的信息, 可以从国际钼协会 (IMOA) 和国际镍协会^[8, 11, 12]免费获取。表面粗糙度、设计、天气条件以及维护和清洗频率也对不锈钢材料的选用有影响。

3 案例研究: 德国的不锈钢交通隔离柱

建筑材料的表面粗糙度对材料的耐腐蚀性能有显著的影响, 因为粗糙的表面会滞留更多的腐蚀性盐、污染物、污垢以及其他的残渣碎片等。不仅如此, 材料较高的表面张力使水分较长时间地停留, 可能造成腐蚀的启动。于是, 在材料表面污染物浓度较高和表面较长时间处于潮湿状态的联合作用下, 材料的腐蚀率远远高于预期。如果材料的表面粗糙度选用不当, 即使通常情况下表现良好的材料也会出现失效。

由于出色的耐腐蚀性, 316不锈钢是在苛刻腐蚀环境下使用的

交通隔离栏的理想建造材料。含硫量低 (0.005%或更低)、表面光滑的316不锈钢隔离柱, 只要不经常性地受到盐水的浸泡、飞溅和喷洒, 就能够在盐环境下表现出长期优秀的结构性能和美学性能。

图10 是在德国杜塞尔多夫市区一条主干公路上的一根316不锈钢交通隔离柱, 公路在冬季月份里使用了除冰盐。隔离柱处在公路的下风向, 车水马龙的交通促生了公路盐雾, 盐雾被风吹到隔离柱。隔离柱的顶部除了那个表面较粗糙的凹槽不易受到雨水冲刷外, 采用光滑的No.4表面的不锈钢表现良好。隔离柱下部采用非常粗糙的轧制表面, 表面布满很多小凹坑, 致使大量除冰盐 (白色区域) 滞留, 这从图片中清晰可见。但锈迹仅限于表层, 可通过清洗去除。只是腐蚀锈迹在来年冬天还会再次出现, 因为选用的是表面较粗糙的不锈钢。

位于公路上风向的316不锈钢隔离柱和车速较慢的人行道的隔离柱没有明显的腐蚀现象, 即使在影响最严重的隔离柱上的腐蚀斑点只局限于表皮, 其结构失效可能在几百年之后才会发生。不过, 我们现在考虑的是美观问题, 如果选用了光滑的表面, 如选用低硫含量 (0.005%或者更低)、表面粗糙度小于Ra 0.5微米的表面将明显提高其性能表现; 对于盐接触量较高的环境 (如隔离柱), 选用表面粗糙度Ra 0.3微米 (12微英寸) 或更低的不锈钢表面效果会更好。

4 结论

除冰盐腐蚀能够引起许多意想不到的问题, 而这些其实是很容易避免的。首先, 确定建筑项目附近的公路是否使用了除冰盐以及使用频率。其次, 评估空气污染等级和雨水酸度, 污染和酸雨一旦与盐类 (氯化物) 结合将会极大地提高某些金属的腐蚀率。

通过检查附近的建筑物情况、与保洁工程承包商交谈、进行简单的无损表面检验等就可以确定氯化物是否已经构成了严重的威胁以及它们会随风飘移多远。定期清洗迅速去除除冰盐会大大提高材料的抗腐蚀性能, 及时的涂层维护也能起到相同的作用。

如果希望维护量最少或免维护, 并且/或者保持长期的结构完整性, 选择腐蚀率很低的金属材料如316不锈钢或者其他适用的不锈钢材料就显得尤为重要。▲

致谢: 国际钼协会 (IMOA) 在本文撰写中给予大力帮助, 特此感谢!
图片来源: 文中图片除注明外均为作者拍摄。

参考文献

[1] 欧洲专题小组第三组 (TG3). 欧洲路桥冰雪控制. 2002.
[2] 盐业协会www. Saltinstitute.org.
[3] 2007年5月报告, Verband der Kali- und Salzindustrie e.V.
[4] 除冰业务www.theideicingbusiness.com.
[5] 欧洲盐业公司www.esco-salt.com.
[6] 日本盐业中心www.shiojigyo.com.
[7] 艾伦L.威廉姆斯与加里J.斯兰德. 公路除冰盐的大气扩散研究.《物理研究报告》(第40号), 2006年1月刊, 伊利诺斯州交通运输部.
[8] 凯瑟琳·胡斯卡. 建筑外部应用选用哪种不锈钢. 国际钼协会, 建筑大楼和结构丛书.

[9] 瑞克·韦伯. 腐蚀爆炸. 冷冻运输车, 2004, 10.
[10] 罗伯特·巴伊恩. 汽车环境的化学过程. 德州仪器公司, 麻州阿特伯勒的电气化学与腐蚀实验室.
[11] 凯瑟琳·胡斯卡. 建筑建造中的不锈钢在: 抗腐蚀指南. 国际镍协会, 参考书11 024.
[12] http://www.imoa.info.
[13] 霍林斯沃斯, E.H.与H.Y.汉斯克. 铝与铝合金腐蚀. 金属手册 (第九版) 第13卷, ASM国际, 1987; 599.
[14] 弗兰克C.普特兹与锌合金的抗腐蚀性. 国际铅锌研究组织, 研究三角公园, 北卡罗莱纳州.马塞尔·德克出版社, 1994.

作者简介

凯瑟琳·胡斯卡, 建筑规范学会 (CSI) 会员, 现任职于TMR咨询公司市场开发部高级经理, 是建筑金属材料的选材、修复与失效分析方面的专家顾问; 已出版八十多本专著。