

隧道施工应用中的不锈钢

篇目

隧道施工应用中的不锈钢	4
为什么在隧道中使用不锈钢?	4
不锈钢在公路隧道	5
公路隧道失火	5
案例研究	5-8
不锈钢在铁路隧道	9
地铁隧道	9
案例研究：伦敦地铁使用不锈钢来提高其安全性和美学效果	9
铁路隧道	10
长距离海底铁路隧道	10
案例研究：英吉利海峡隧道材料测试中不锈钢的性能	10-12
结论	13
参考资料	13
附件A：指南文件	14
感谢	15

免责声明：

国际不锈钢论坛ISSF和国际镍协会尽最大努力确保本手册提供信息的在技术上是正确的。但是，敬请读者将本文资料仅做一般性信息来阅读。国际不锈钢论坛ISSF，欧洲不锈钢市场发展协会Euro Inox，和国际镍协会和其他信息提供者特此声明：对由于本指南信息引起的任何损失、损害或伤害，不承担任何责任或职责。

隧道施工应用中的不锈钢

大卫·J·寇克兰，镍金属研究所顾问 伯纳德·海瑞帝耶 国际不锈钢论坛（ISSF）阿兰卡·考斯马克， 欧洲不锈钢发展协会（Euro Inox）

隧道可以高效地提升公路铁路交通速度，减少运输时间。

它被广泛用于人员和货物运输，长度从几米到50公里甚至更长。

隧道，顾名思义，通常位于地下。但是隧道通过的地下空间条件各异，或穿山越岭，或跨越海底。空间条件的差异意味着每条隧道所使用的建筑材料都是独特的，因此隧道材料的选择要考虑其所处的地质条件。隧道建好后必须在无人维护的状态下良好运行几十年。因此所选材料必须在腐蚀或有毒环境下能够满足上述要求。

隧道的使用方法也影响其选材。本手册案例研究表明，公路车辆隧道和电力火车隧道的环境条件存在很大差异。

本手册搜集了来自全球各地已建隧道案例。这些隧道均使用了不锈钢，尤其是含镍不锈钢，来改进其运行效率，同时获得显著的经济效益。

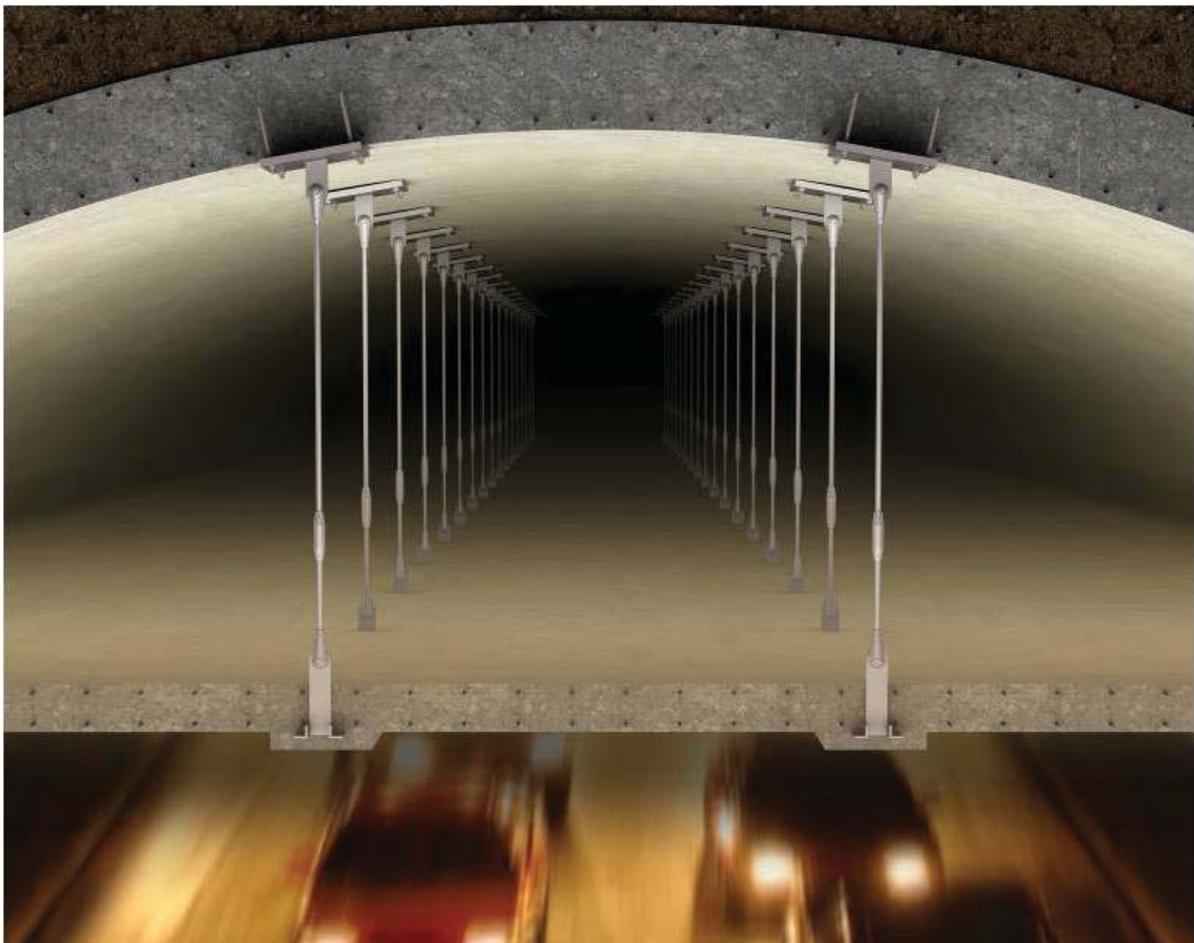
为什么在隧道中使用不锈钢？

不锈钢能提供一系列的合金元素和产品形态，并能

满足在极端条件使用的要求。不锈钢不需要添加其他保护成分就具有抗腐蚀性，它的高强度和防火性能使其更加持久耐用，无须太多维护。隧道工程师会在隧道中的可见部位应用不锈钢，如防火门，扶梯，也会在不可见部位应用不锈钢，如预应力钢筋等。

经过对空气和环境长期的监测，隧道运营商对组件（如固件）用不锈钢的规格进行了严格规定。防故障固件对于灯光、通风及防火设备等核心组件的安全固定来说极其重要。固件出现故障后果极其严重，会导致隧道阻断或关闭。隧道固件需要忍受极端的大气和裂缝腐蚀，尤其在墙面或岩面连接处，因此要明确规定它所使用的不锈钢牌号。

每条隧道的内部条件决定了在施工及隧道内部该使用哪些特定建材。在选择材料规格的筹划阶段，也应该界定隧道运营商提供的维修服务水平，还要咨询防腐蚀工程师或不锈钢制造商的意见。也可以参考当地建筑施工规范。请参看本手册第六页附件A中所列文件清单。



布里斯班南北通道是澳大利亚最长的公路隧道

公路隧道

公路隧道是最常见的交通隧道。公路隧道有可能穿越软硬岩石，河流、湖泊或港口。隧道里出现任何事故都可能引起爆炸和火灾。即便在正常使用下，隧道内的温度差、岩石放射出的腐蚀性化学物质，以及寒冬冬季机动车轮胎带入隧道的除冰盐等都会对隧道产生影响。

典型情况下，公路隧道内的空气含有下列尾气化学物质：二氧化硫SO₂，二氧化氮NO₂，硫化氢H₂S（参看表1）。其他排放物包括轮胎摩擦颗粒物，重矿物粉尘，烟灰，水溶性氯化物等。勃朗峰隧道测量结果表明，隧道空气中包含3.5%的水溶氯化物。在定期清理的情况下，隧道粉尘中的氯化物含量在0.1%~0.7%之间不等；如果不做清理，其含量会高达0.7%~3.5%。

这些大气中的化学物质产生的腐蚀作用会导致锚点发生故障。墙体与固件间连接处会形成一层酸性氯化物溶剂，发生电解作用。隧道经过几个干燥周期后，溶剂的浓度会逐渐提高。锚点会很难接触，因此清理成本很高，甚至几乎不能清理。

如果固件不锈钢选材不合适的话，会出现了隙间腐蚀，并造成固件失效。为了减少维护，提高耐用性，勃朗峰隧道运营商提出要求，隧道用不锈钢至少要含有6%的钼。

公路隧道失火

公路隧道失火会引起大规模人员伤亡。除死亡外，火灾还会引起公路隧道的封闭，产生昂贵的维修费用。布朗峰隧道1999年火灾就是个典型的例子。一辆运输面粉和人造黄油的卡车起了火，大火持续燃烧了53个小时。隧道内温度超过了1000度，死亡39人。火灾后隧道关闭了三年，维修费用超过了4.5亿欧元。

由于在烃类火灾产生的高温环境下性能出色，不锈钢成为预防或减少公路隧道火灾的不二选择。

案例研究

这部分介绍了全球各地如何在隧道中使用不锈钢来解决实际问题。某些案例规定隧道建设必须使用不锈钢。在其他案例中，不锈钢被用作翻新材料来解决影响隧道安全的问题。



公路隧道火灾对人和隧道带来灾难性损伤

表1:公路隧道中湿度、温度和大气环境存在较大差异

隧道	相对湿度	温度范围	空气		
			二氧化硫	二氧化氮	硫化氢
Gottard (瑞士)	25 到 81%	3 到 27° C	81 PPM	3 PPM	27 PPM
布朗峰 (法国—意大利)	41 到 95%	6 到 25° C	95 PPM	6 PPM	25 PPM
圣比拿迪卢 (瑞士)	平均: 73%	-20 到 17° C	-	73 PPM	20 PPM
Seelisberg (瑞士)	7 到 72%	14 到 28° C	72 PPM	14 PPM	28 PPM

案例研究：意大利高速公路隧道的混凝土剥落
恶劣的大气条件使得意大利A7, A10, 和A12 高速公路很多路段的混凝土衬砌出现损坏。引起大气的高度腐蚀的因素很多：汽车尾气排放并滞留的高浓度硫化物、当地海洋性气候、震动，以及极度潮湿。

仅A10高速公路（从热那亚到萨沃那）上，就有25条隧道需要大量维护以防止剥落的混凝土落到高速公路路面。这条路共使用了12,000 平米的不锈钢网（EN 1.4401/AISI 316）来衬砌混凝土。任何跌落的混凝土块都会被不锈钢网拦住，而不会落在路面上。



用12000平米的不锈钢网来确保剥落的混凝土不会掉入车流中

赫尔辛基附近Kehu隧道里的固定灭火系统喷出的细水雾，能有效地灭火



案例研究：芬兰Kehu隧道中的固定灭火系统

赫尔辛基的Kehu隧道使用了固定灭火系统。它由五排直径为16毫米的不锈钢管道和喷嘴组成。隧道失火时，高压灭火系统会喷射出细水雾，这被证实对消除隧道火灾非常有效。整个灭火系统都使用不锈钢（EN 1.4404/AISI 316L）作为原材，由于它卓越的强度，抗腐蚀和防火等特性。该系统不仅能提高安全性，同时还能减少火灾引起的隧道损害和堵塞。

不锈钢在公路隧道 - 案例研究

案例研究：澳大利亚，排烟排热系统中使用了双相不锈钢

澳大利亚最长的公路隧道是位于布里斯班的南北穿越隧道（也被成为克莱姆琼斯隧道CLEM7）。该隧道由两条4.8公里长的双线隧道组成，穿越布里斯班河底。整条隧道指定使用了双相不锈钢（EN 1.4462/ASTM-UNS S32205/S31803），因为它可以忍耐高度腐蚀环境。其他应用还包括支撑隧道衬砌的33000根轻质不锈钢钢柱。



布里斯班南北通道在高腐蚀环境中使用33000根轻质不锈钢柱来支撑隧道衬砌。

发生火灾或爆炸时，高科技通风系统通过100个喷流扇将烟气抽送到路面垂直设立的通风道。巨大的混凝土板被挂在不锈钢悬挂系统上，形成了通风井。该系统使用了牌号为EN 1.4462（ASTM-UNS S32205/S31803）的不锈钢，能够满足耐热要求，同时在腐蚀环境下长期表现良好，无需维护。

案例研究：布朗峰隧道中的不锈钢喷流扇

为了减少维护，提高耐久性，布朗峰隧道运营者提出隧道建设用不锈钢中至少要含6%的钼。

2011年隧道改造中安装了不锈钢（EN 1.4404/AISI 316L）风扇。隧道电缆梯也使用了同牌号不锈钢。

被1999年火灾严重破坏后，布朗峰隧道被关停了三年。目前隧道内大量使用了不锈钢。



案例研究：英国新的地下通道在桥面面板与竖柱中使用不锈钢

克莱德维尔地下通道是位于伦敦北部的一条主要的海岸通道。在施工期间，隧道面板与竖柱使用了256吨EN 1.4401/AISI 316不锈钢。选用该牌号钢是因为其对冬季使用的除冰盐具有高度耐蚀性。面板中铺设的管道可以将径流水引开。若不用不锈钢，而是使用碳钢钢筋，将会引起灾难性的渗漏，而且维修成本昂贵。

位于海岸线附近的克莱德维尔海底隧道使用了250吨不锈钢来抵抗腐蚀



案例研究：苏格兰新型不锈钢结构及衬砌

位于格拉斯哥的克莱德隧道是连接南城与北城的主要通道。它由两条长达762米、互相平行的双管隧道组成，每天机动车流量可以达到65000辆。

克莱德隧道在整修过程中（2005~2010），在保留50年代铸钢结构的基础上，又架设了一个镍钢（EN 1.4401/AISI 316）结构。镍钢结构能更好支撑不锈钢隧道衬砌，一旦发生火灾，该设计能将隧道内温度控制在300度以下。

克莱德隧道（如下）增设了一个二级不锈钢架构来支持不锈钢衬砌



不锈钢在公路隧道 - 案例研究

案例研究：使用不锈钢联接面板来抵抗腐蚀，英国

位于伦敦东部的达特福德跨河隧道，横穿泰晤士河底，是连接伦敦南城与北城的主要通道。它是伦敦环状高速公路M25的一部分。

虽然才仅仅使用了20年，但由于公路桥桥面的碳钢筋已经腐蚀，因此翻修十分必要。碳钢筋被腐蚀，很大程度上是由于冬季使用除冰盐残留下的含氯水渗入了混凝土路面造成的。

为了避免混凝土板边缘碎裂及渗入更多水，396吨奥氏体不锈钢（EN4.1101/AISI316）制成的连接板被嵌入到每隔4.5米的混凝土板中。



英国达特福德河隧道安装了不锈钢面板来抵抗除冰盐的腐蚀。

火灾逃生系统和通风系统

法国利奥兰隧道火灾逃生门使用了不锈钢（EN 1.4404/AISI 316L）。该牌号钢抗腐蚀性能卓越，而且受热后机械性能良好。

不锈钢防火门将隧道连接到安全区，在门内将安全区与逃生路线连接起来

公路隧道通风竖井盖会受到高腐蚀性大气气体的侵害。从隧道内抽取空气的通风竖井盖受影响最严重。但是新鲜空气入口也会受到大气侵蚀。利奥兰隧道使用了不锈钢（EN 1.4404/AISI 316L）竖井盖来抵抗腐蚀。

案例研究：降低火灾对德国E1b隧道的影响

为了减少火灾的影响，德国汉堡的E1b隧道衬砌使用了1500吨的不锈钢板（EN 1.4571/AISI 316Ti）。同时使用了总重量高达60吨，同牌号的螺栓和螺钉将钢板固定到隧道上。

SUSTAINABLE
STAINLESS

法国利奥兰隧道的通风和消防安全应用中大量使用不锈钢（下图和右图）



不锈钢在铁路隧道

为了满足乘客交通需求，缓解交通拥挤，城市规划人员越来越多地倾向于使用地下铁路系统。高铁网络在主要城市人口之间，甚至国家之间也变得越来越重要。

很多发展中国家正在快速发展其铁路网络。例如，中国已经有21个城市在规划开发轻轨系统，其中至少有七个城市已经在市区开始施工。2012年，中国将新增120辆高铁列车，运行在6000公里已建的铁路网络上。另一个国家印度，宣布计划在至少十几个城市里开发与地铁相连的城市轻轨系统。

这部分描述了地铁（或地下）隧道，铁路和长距离海底铁路线在施工中要考虑什么，不锈钢如何能延长铁路的运行周期，并提高其安全性。



伦敦地下铁路网的270个车站利用不锈钢来保证安全的人员流动！



地铁隧道

城市地下运行的列车一般都是电动列车，所以和公路隧道相比大气腐蚀并不严重。但是，当地环境因素也会影响隧道施工所选建材。例如：岩石的化学成分，隧道周边的泥土、路面水渗溢、河流，甚至包括城市下水和供水网络。

地铁隧道在使用过程中也会受到火灾的影响，这点也需要在项目说明阶段得以考虑。

案例研究：伦敦地铁使用不锈钢来提高其安全性和美学效果

部分伦敦地铁位于地面67米以下和海平面21米以下，渗入隧道网络的水含有高度腐蚀性和破坏性的氯离子。

1987年国王十字火车站火灾之后，伦敦地铁开始规定，在地铁网络建设和翻修过程中，只能使用在发生燃烧时不会产生烟雾或有毒烟气的材料。由于不锈钢正好满足这些条件，因此它被大量使用在地铁网络重建过程中，如示例所示。

银禧线的扩展

伦敦银禧线在向首都东部的港口区扩建时，在隧道和车站中大量地使用了不锈钢。每个车站从视觉上

都能看到不锈钢效果。不锈钢的不同的表面效果不仅为每个火车站带来独特美学特点，同时也具有一定功能性。长远来看，不锈钢还具有很好的经济性，因为它只需要偶尔清洗来维持其光泽的表面。

维多利亚线的渗漏

维多利亚地铁线翻修时，人们在拱形的乘客隧道中大量使用了正弦形钢板，以便能把渗漏水引流到排水沟。该项目总共使用了560吨的1.2毫米厚的奥氏体钢（EN 1.4401/AISI 316）。发生火灾时，不锈钢比其他金属更能长久保持强度，而且不会产生烟雾或有毒烟气。

地铁北线：旧线翻新

在伦敦地铁北线的老街站，酸性土壤条件引起原有铸铁隧道衬砌发生严重腐蚀。它们后来被3500个弯型铸件所取代，这些弯型铸件是由750吨含8%镍的专用超级双向不锈钢制成。隧道部件通过使用了20000个不锈钢固件（EN 1.4501/ASTM-UNS S32760）而被固定到一起的。

不锈钢在铁路和海底隧道

铁路隧道

铁路隧道必须能适应电动或/和柴油动力火车的运行。电动列车相对要干净些，柴油动力列车排放的二氧化硫烟气会腐蚀或破坏隧道材料。烟气的排放量是由下列因素决定的：火车频率、行驶速度、隧道长度，以及在隧道内安装的用来控制温度和湿度的设备。因此，在进行选材之前，人们应该充分了解当地的污染和大气数据。

长距离海底铁路隧道

由于海底长距离铁路隧道数量不多，因此有关建筑材料性能、适合性，海底隧道条件等各种数据很有限。连接日本本州岛和北海道的青函海底隧道全长53.9公里（海底段长23.3公里），是最老的海底隧道。目前该隧道正在进行升级改造以适应新干线高速列车。

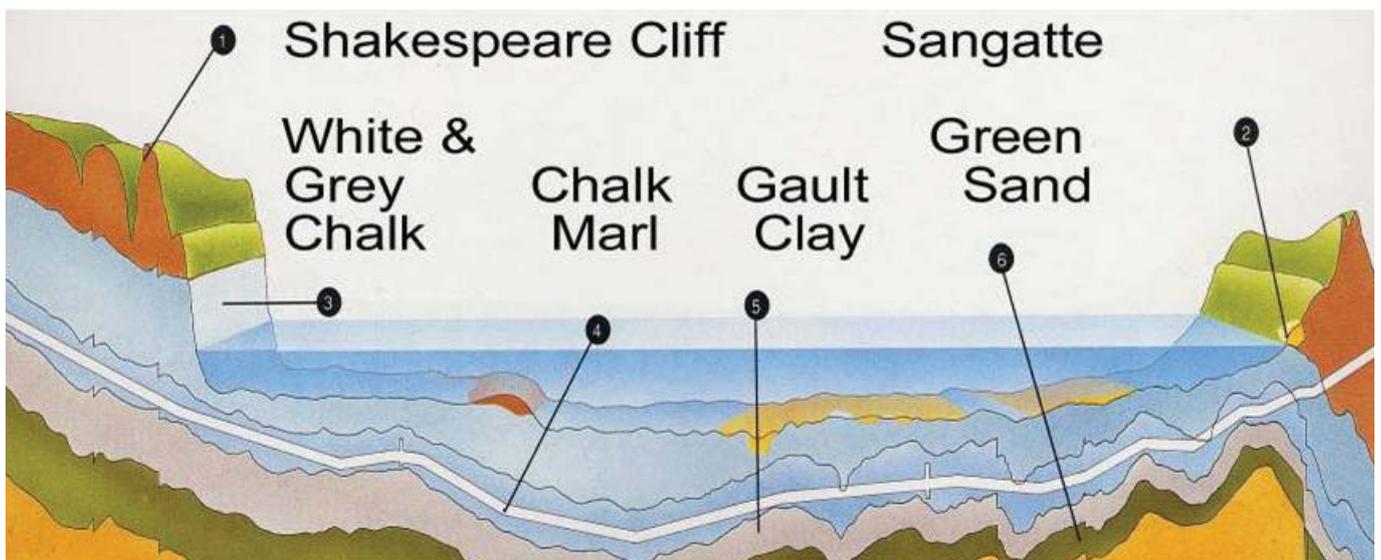
案例研究：英吉利海峡隧道材料测试中不锈钢的性能

虽然没有青函海底隧道的材料性能数据，连接英国和法国的英吉利海峡隧道（长达49.2公里，海底段长37.5公里）还是有些经验可以借鉴。通过在整条隧道的不同节点进行测试，我们研究了不锈钢和其它材料在此特殊环境下的性能。

镍发展学会（现名“国际镍协会”）在1994年做了第一次测试，来评估英吉利海峡建材的性能。法国和英国不锈钢制造商提供了各种牌号的不锈钢测试件。在运营商欧洲隧道公司的配合下，这些测试件被安装在火车隧道和服务隧道的不同位置。

需要含镍的牌号钢

1994年，当时的知识显示含镍奥氏体钢（EN 1.4401/AISI 316）可能会适用于隧道内各部件。它具有良好的防腐性和耐火性，可在很多隧道内部关键应用中使用，所需维护甚低。例如隧道中17000个电动分流槽，必须要在1000度高温下保持运行正常。使用EN 1.4401/AISI 316牌号的钢能够确保在防火测试中实现这个目标。



英吉利海峡隧道从英国（左图）到法国（右图），穿越了各种类型的土壤和岩石

不锈钢在铁路和海底隧道



其中一条火车隧道的内部情景

范围拓展的材料试验

测试活动在初期只是针对不同牌号不锈钢进行评估，之后欧洲隧道决定将评估范围扩大到其他材料。由于隧道内各区段环境存在差异，因此测试件被安装在隧道不同位置的支架上。

整条隧道由两条400毫米直径的充水水管将温度维持在20~25度间，几乎恒温。但是由于位置和大气含盐量的不同，空气的湿度会在45%到76%不等。

大气混合气体

虽然在隧道里运行的客车和火车都是电动车，但是用于维修的列车却是柴油驱动的。因此隧道大气会含有尾气带出的少量二氧化硫。测验表明，隧道大气中含有来自隧道衬砌的混凝土粉尘，车轮与铁轨接触产生的铁离子，以及来自海洋大气的氯离子。

空气除了湿度较高外，其复杂成分还会导致物体表面受到腐蚀。当火车以每小时140公里的速度经过隧道时，车身和隧道缓冲区产生的风会引发进一步腐蚀。这会导致两种结果：

1. 潮湿的粉尘颗粒会粘贴在表面，尤其是正对着行驶方向，或与缓冲力垂直的表面。
2. 风速、混凝土粉尘及铁粒子组合在一起会侵蚀保护层，因为涂层会不断受到研磨介质的冲击。

很明显大家意识到灰尘不能积聚太多，因此欧洲隧道对隧道进行了定期清理工作。平滑的不锈钢表面还能避免腐蚀性粉尘的积聚，使得清理工作更加容易。

尽管（英吉利）海峡海底隧道绝大部分是相当干燥的，对试件的测试结果表明，隧道里面的环境条件差异很大。测试中对碳钢试件也进行了对比测试。

表2所示为隧道各位置的氯化物和湿度水平。所有位置的二氧化硫的含量不到10 mg/m²/day，可以忽略不计。

表2：英吉利海峡测试点的氯化物含量与湿度

安装基准	氯化物（毫克 / 平米 / 天）	湿度
PK1511	74	< 10 H/A
PK2102	400	2500 < 5500 H/A
PK3574	142	< 10 H/A
PK3575	80	< 10 H/A
PK5052	228	3 < 30 H/A
PK5877	75	3 < 30 H/A

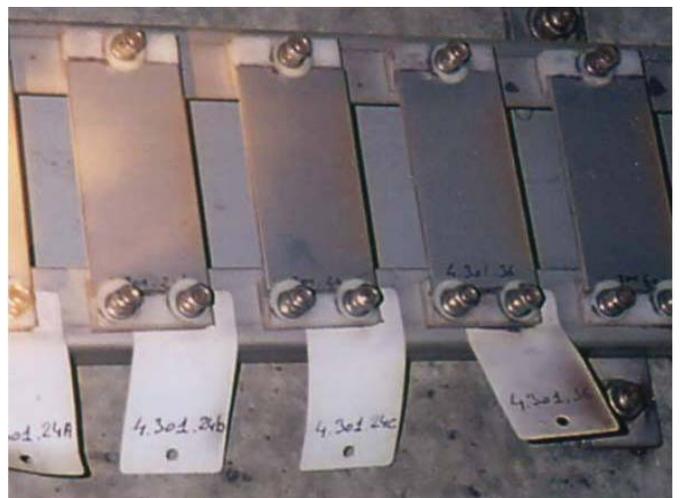
小时 / 年 [凝析物测量]

不锈钢在海底隧道

表3: 重量损失, 单位: 克 / 平米 / 年

安装基准	EN 1.4306/AISI 304L	EN 1.4318/AISI 301LN	EN 1.4404/AISI 316L	碳钢
PK1511	0.01	0.04	0.00	10.39
PK2102	2.00	8.49	7.34	276.26
PK3574	0.01	0.06	0.00	10.10
PK3575	0.03	0.02	0.02	7.94
PK5052	0.07	0.15	0.05	27.79
PK5877	0.03	0.07	0.01	40.16

注: 位于PK2102的牌号为EN 1.4404/AISI 316L的重量损失比较高是因为这里部分(非全部)不锈钢试件受到漏水的影响。而碳钢试件却没有受到影响。



在海峡隧道某位置的测试件

不锈钢被广泛用在海峡隧道内部的各种应用中, 例如通风系统(左图)和电动分流槽(下图)



结论

隧道在长度、位置和用途等各方面存在重大差异。使用隧道可以减少交通时间、缓解拥堵，因此为了减少维修和维护，对隧道建材的要求非常高。对政府及运营商来说隧道建设是一笔重大投入，它必须在未来能够无故障运行几十年，以收回投资。

这些要求使得不锈钢成为最理想的隧道建设及其内部设备选材。不锈钢有如下特点：

- 当温度上升时，不会排放有毒烟气
- 温度超过900度，仍保留其高强度的特性
- 不需要添加涂层就能够抵抗腐蚀
- 多种牌号选择，生命周期长，耐用，只需很少、甚至不需要维护。

不锈钢在全球隧道建设和重要操作设备中已经得到广泛应用。隧道设计师和运营商认为，不锈钢卓越的安全性，低廉的维护成本，使其成为保障隧道及内部核心设备长期运行的主要材料。

参考资料：

- Gumpel, P: 《隧道建设中的局部腐蚀与蚀损》 Fisher Connect it; 2005年第6期。
- 《CFA指南导读：固件与腐蚀》；2002。
- 《应用中的产品：隧道施工》。Halfen Deha 。(www.halfen.co.uk)
- 《公路隧道中的防火设计》。美国公路合作研究组织NCHRP合刊415，2011。
- Haselmair, H, Morach, R与Boehni, H: 《用于公路隧道紧固件的高合金钢和镍合金的现场与实验室测试》，《腐蚀工程杂志》；160~168页，1994年2月期。
- Cochrane, D. J. ; Grattepanche, E; Baltenneck, S; Baxter, C: 《海峡隧道：在不同位置对材料进行性能测试的中期结果》。2001年不锈钢国际大会会刊，荷兰海牙：2001年11月13-15日。

附件A：指南文件

隧道用材指南可参考各地法律文件，或参考各国的建设和固定协会的相关文件。下表示例仅供参考。

德国

ZTV-ING Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten（英文：《土木工程附加技术规格及指南》）。最新版本2010年4月。

文件提供了公路隧道露天施工或封闭施工指南。在某些隧道应用中要求使用特定牌号的不锈钢。

意大利

意大利公路管理公司（ANAS）是意大利的国家公路管理机构，为交通隧道安全制定指南。对于街道隧道，ANAS规定隧道内任何暴露材料必须无毒、防火，并且不能产生烟雾。风扇及照明系统等设备必须能够忍耐400度高温至少长达90分钟。现实防火测试表明，不锈钢在900度以上仍然保持其强度，远远超过铝材的耐高温性。

瑞士

瑞士工程师和建筑师协会（SIA）为隧道建造商和运营商提供了建议和链接。可通过下列网址访问其网站（部分网站内容为英文），www.sia.ch。

英国

英国主要道路部门维护着一个内容全面的在线“道路与桥梁设计手册（DMRB）”。隧道相关信息请参见第二卷：高速路结构：设计（子结构和特殊资结构）、材料等。若需更多信息，请查阅下列网址：www.dft.gov.uk/ha/standards/dmr/

感谢

国际不锈钢论坛（ISSF）对下列组织在筹备本文件过程中给予的支持表示感谢：

Annabelle Wilson， 英国安控有限公司（Ancon）

Vittorio Boeschi， 意大利不锈钢发展协会（Centro Inox）

国际不锈钢论坛（ISSF）也非常感谢下列机构及个人允许我们使用它们出版物中的图像：

- 安控有限公司（Ancon）（英国）
- 西班牙不锈钢研究发展中心Cedinox（西班牙）
- 隧道研究中心（法国）
- 意大利不锈钢发展协会Centro Inox（意大利）
- D. J. Cochrane， 国际镍协会
- 欧洲不锈钢市场发展协会Euro Inox（比利时）
- 欧洲隧道
- 日本不锈钢协会
- 芬兰Marrioff公司（芬兰）

如需关于不锈钢及其合金元素的更多信息，请参阅以下组织的网站

www.icdacr.com

www.imoa.info

www.nickelinstitute.org

www.worldstainless.org



International Stainless Steel Forum (ISSF)

Rue Colonel Bourg 120
B-1140 Brussels, Belgium

T: +32 2 702 8915

F: +32 2 702 8912

www.worldstainless.org

SUSTAINABLE
STAINLESS