

2017

建筑用钢—耐候钢

钢铁研究总院华东分院
钢研研究总院淮安有限公司

目 录

1. 耐候钢的发展历程.....	- 2 -
2. 耐候钢的候技术分析及与普通钢结构经济性对比.....	- 3 -
2.1 普通钢、不锈钢、铝材的腐蚀性分析：	- 3 -
2.1 耐候钢耐腐蚀性原理：	- 4 -
2.3 耐候钢与普通钢的经济性对比分析.....	- 5 -
3. 钢铁研究总院华东分院在耐候钢方面的研究探索和优势：	- 5 -
3.1 团队介绍.....	- 5 -
3.2 新型建筑用钢研究开发介绍.....	- 6 -
4. 钢铁研究总院华东分院耐候钢产品及其配套材料.....	- 13 -
4.1. S20 系列耐候钢.....	- 13 -
4.2. H20 系列耐候钢焊接材料	- 14 -
4.3. B20 系列耐候钢用螺栓连接副.....	- 15 -
附录：耐候钢分析检验报告	- 17 -

1. 耐候钢的发展历程

耐候钢是一类耐大气腐蚀的钢材，能在大气环境下数年以后其表面形成稳定、致密、牢固的锈层，阻止或延缓材料进一步生锈腐蚀。在非重度污染和非海洋气候条件下，正常大气环境中耐候钢具有优良的耐蚀性能，采用耐候钢为骨架结构建造的建筑物或构筑物，钢材表面可以做到免涂装、免维护，而不影响正常其使用。

耐候钢研发及工程应用起始于上世纪二、三十年代美国，起初仅用于铁路交通部门，之后六十年代应用于桥梁建设。1964 年在美国新泽西州建成世界上第一座耐候钢桥梁，而 1974 年建成的“New River Gorge bridge”钢架桥成为耐候钢桥梁应用的经典范例，之后更多的耐候钢桥梁建成投入使用。这些桥梁已历经数十年甚至半个世纪，仍完好无损正常使用，足以看出耐候钢在耐大气腐蚀方面的优势。继美国之后，从上世纪开始在欧州、日本等发达国家，耐候钢被逐渐得到应用，并应用于不同建筑形式，甚至作为一种装饰材料，以其特有的“巧克力色”广泛应用于外装饰或室外工程，如幕墙、公园装饰、绿地雕塑等。我国对耐候钢的研究起始于上世纪 60 年代，但应用发展缓慢，80 年代实现工业化生产，之后其的应用长期局限于铁路车辆和货运集装箱制造，近几年才在建筑领域开始少量应用。其中原因之一是因为我国钢材生产技术和应用方面的脱节，耐候钢在建筑领域还没有得到广泛的认识；另一个原因就是我国在建筑规范、标准、法规方面严重滞后，使耐候钢在建筑结构方面的应用出现瓶颈。当前，随着我国经济改革的深入，在国家大力倡导发展钢结构建筑的大背景下，耐候钢建筑将迎来崭新的发展时代。





2. 耐候钢的耐候技术分析及与普通钢结构经济性对比

2.1 普通钢、不锈钢、铝材的腐蚀性分析：

众所周知，普通钢表面暴露在空气中会生锈，生锈的本质是空气中的氧气和铁发生化学反应而出现表面氧化，而且锈层会越长越厚，直至材料厚度严重变薄甚至最终锈穿不能使用，为了延长使用寿命，不得不在表面涂刷防锈漆，但多年以后漆皮会脱落，表面又会生锈，再涂防锈漆，周而复始。实际上，和普通钢材类似，任何金属，包括不锈钢在内，都会发生表面氧化，如铝合金表面发乌失去金属光泽即是铝被氧化的结果；镀锌板或纯锌时间长了金属光泽褪去，和空气中的氧气反应生成氧化锌；不锈钢表面始终光亮，实际上其表面也生成了极薄且透明的金属氧化膜。不锈钢、铝、锌合金等能抗腐蚀，其本质是表面生成的金属氧化层能把空气和材料本体隔离开，阻止氧化层下面的材料进一步被氧化腐蚀。在普通钢表面刷漆，表面的漆皮和这种氧化膜的作用相同，同样起隔绝空气的作用。所以，如果有一种钢材在其表面也能生成像不锈钢、铝合金那样的能隔绝空气防止氧化的保护层就可以不用刷漆而抵抗生锈腐蚀。这种钢材就是耐大气腐蚀用钢，简称耐候钢。

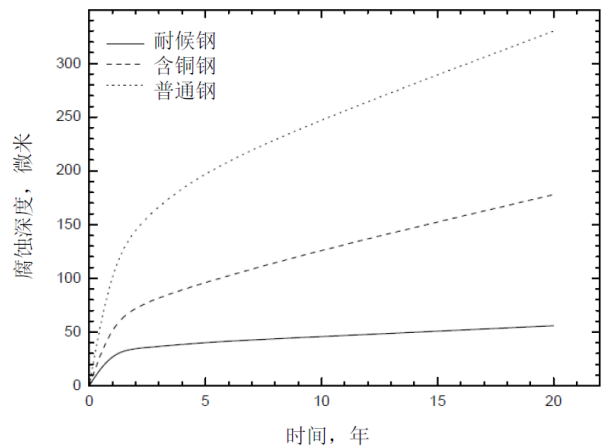
2.1 耐候钢耐腐蚀性原理：

耐候钢，在冶炼过程中通过调整材料配方，在钢中加入铜、磷、铬、镍等元素，就能在大气环境下数年以后在其表面形成稳定、致密、牢固的锈层，阻止或延缓钢材进一步生锈腐蚀。其耐腐蚀能力远远超过普通钢。采用耐候钢建造的建筑，钢材表面可以不刷漆，使用过程中免维护，给人们的居住生活和工作带来很大的便利。

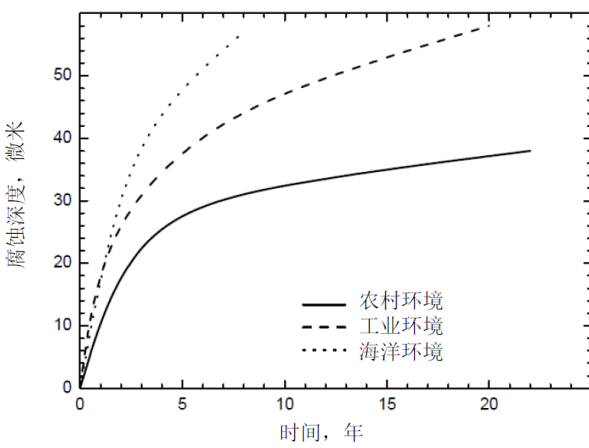
不同金属材料耐大气腐蚀性外观比较

	不锈钢	铝合金	耐候钢	普通钢
是否表面氧化	是	是	是	是
氧化膜成份	富铬	氧化铝	富 Cu、P、Cr、Ni 氧化物	氧化铁
氧化膜外观	极薄透明	银白色	棕红色	棕红色
氧化膜致密性	致密	致密	较致密	疏松
氧化膜稳定性	非常稳定	非常稳定	稳定	不稳定
氧化膜稳定周期	极快，不易察觉	很快，易察觉	5-8 年	始终不稳定
氧化膜自愈性	有	有	有	无
大气腐蚀量,mm/年	≤0.001	≤0.001	0.0025-0.0165	0.05-0.20

耐候钢的耐大气腐蚀能力受大气环境的影响，在严重潮湿、酸雨及盐分含量超高环境会加剧其腐蚀，在广大农村、没有重度污染的普通空气环境下，耐候钢可不做防腐处理。针对不同大气环境地区，耐候钢成分设计将有差别，此外，在结构加工工艺中还需要与之相配套的焊接材料和螺栓连接材料共同组成完整的耐候钢骨架结构，共同抵抗大气腐蚀。



不同钢材耐大气腐蚀能力比较



耐候钢在不同大气环境下的耐蚀能力比较

2.3 耐候钢与普通钢的经济性对比分析

普通钢防腐工艺一般有两种方式，即防锈漆防腐处理和热镀锌防腐处理。普通钢防腐处理工艺为：先喷丸或喷砂（预处理），然后喷防锈漆（底漆），再喷面漆。多年后漆面脱落需要再次做除锈和防锈漆维护。普通钢结构其防腐处理费用约 800 元/吨，甚至更高，而工程投入使用后，按照 70 年全寿命周期至少需定期维修防腐处理涂装 4 次，如涉及高空作业时维护费用还会进一步增加。热镀锌防腐处理工艺为：型材先酸洗（盐酸），然后清水洗（一般热水），再热镀锌，并要求构件内外双面镀锌。在防腐处理成本上，热镀锌 150g/m²，约 800~950 元/吨；热镀锌 240g/m²，约 1200 元/吨，热镀锌 300g/m² 以上的约 1500 元/吨。有些构件在安装前还需要在镀锌层表面另涂装环氧富锌黄底漆和面漆。从耐候年限看，热镀锌 150g/m² 耐候年限 10 年左右，240g/m² 左右 15~20 年，300g/m² 以上 30 年左右，因此，钢结构镀锌防腐不能和建筑钢结构期望寿命同步，存在很大的局限性。

而耐候钢因表面逐渐形成稳定、致密、牢固的锈层，阻止或延缓钢材进一步生锈腐蚀，可做到免涂装免维护。从工程施工进度上也可省去防腐处理工序的时间消耗，加快建设工期。同时，减少油漆作业时有毒挥发性物质对人体健康的伤害和对大气环境的污染。按 70 年寿命周期计算，耐候钢相对腐蚀量远不足 1mm，耐久年限远远超过镀锌钢板和普通钢板刷漆防腐。生产耐候钢的成本相比普通钢会高出约 15% 左右，但在防腐处理费用上低于普通钢除锈加防腐总费用，而且普通钢日后的防腐维护成本会逐渐增加。所以，耐候钢的全寿命周期成本远低于普通钢。；与热镀锌钢费用比较，耐候钢成本优势更是显而易见的。

因此，在涂装维护、耐久年限和建筑的全寿命周期综合成本等多个方面，耐候钢占有绝对优势，在今后钢结构建筑发展中将有广阔的应用前景。

3. 钢铁研究总院华东分院在耐候钢方面的研究探索和优势：

3.1 团队介绍

钢铁研究总院华东分院，隶属于国务院国资委管理的中央企业—中国钢研科技集团下属钢铁研究总院的分支机构，钢铁研究总院是中国钢研集团的科技研发核心单位，从事冶金材料研究和开发的科研机构；钢铁研究总院淮安有限公司是将科研成果和高新技术向产业转化的附属公司，是开展新工艺、新材料工程应用及对外合作的重要窗口。我们在冶金材料及工

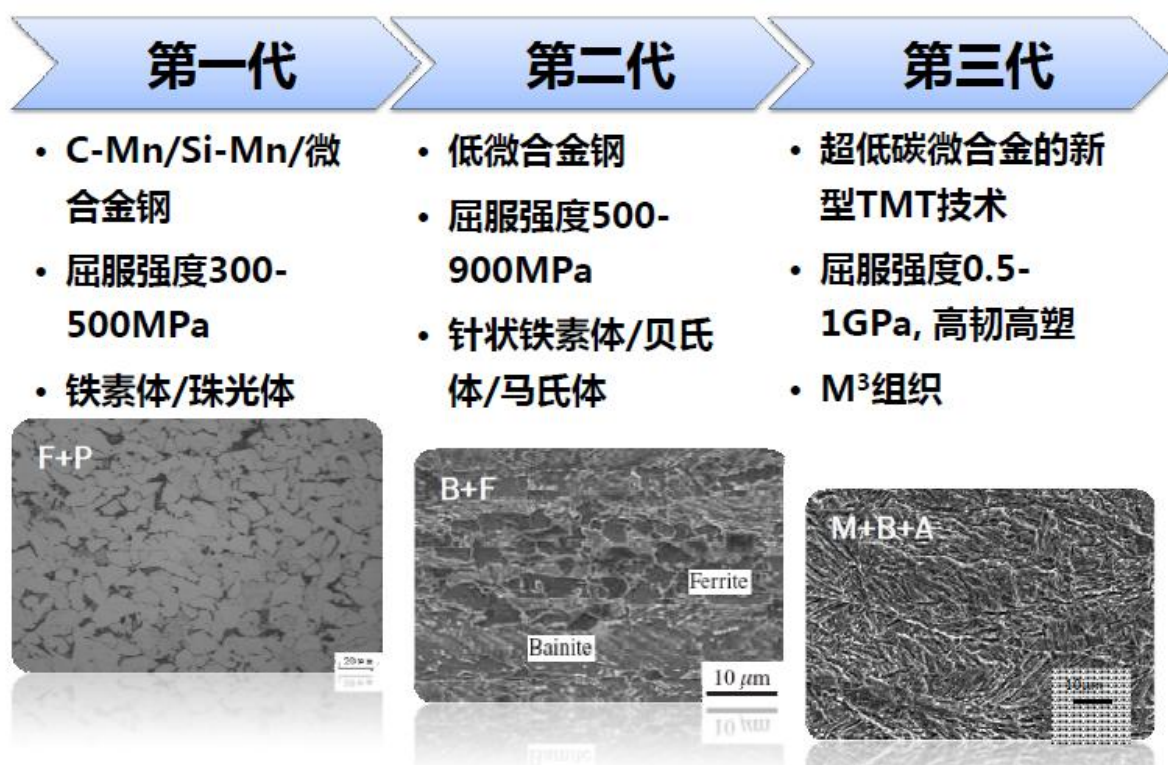
艺、产品开发等领域具有国内顶尖的科研人员和产品开发人员以及建筑行业的专家。在新品种钢开发、冶金工艺及产品质量控制方面，不仅具有很高的科研学术水平，而且积累了丰富的现场实践经验。产品涵盖了特种设备用钢、建筑用钢及其焊接材料，包括建筑高强钢、耐候钢、耐火钢、紧固件用钢、轴承钢、不锈钢、弹簧钢、齿轮钢等系列钢种，以及相关的配套焊材和链接螺栓。其中超高强度钢焊接及质量控制方面居国内一流水平。在建筑用钢生产技术、质量控制、工程应用方面具有领先优势。随着钢结构市场的发展，我们不断探索在建筑行业推广高强钢、耐候钢的试点与开发，其中耐候钢已逐渐被业内所了解认识并应用。目前，建筑市场上已逐渐出现了各种耐候钢材料，但质量参差不齐，甚至很多产品打着耐候钢的招牌，销售普通钢。钢铁研究总院华东分院从事耐候钢研究多年，并为许多知名钢厂提供技术支持，我们生产的耐候钢，可以针对不同气候条件开发不同性质的耐候钢，并能有效的控制冶炼成本。钢铁研究总院华东分院已与国内多家科研单位、生产企业及工程公司建立了钢结构建筑行业联合体，进行高性能建筑用钢开发、装配式钢结构建筑设计及产业化、工程化的相关工作。

3.2 新型建筑用钢研究开发介绍

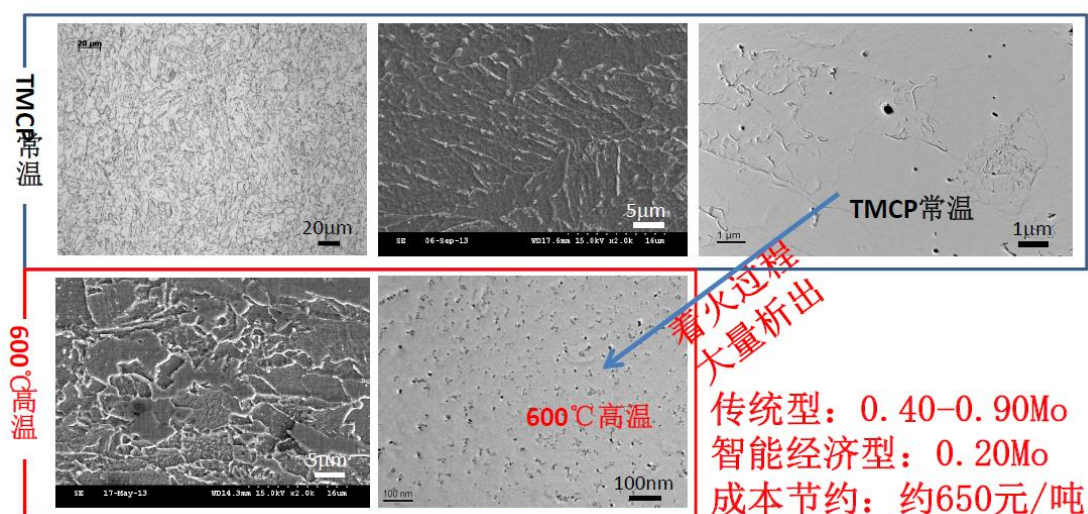
长期以来，钢铁研究总院在材料研究、冶金工艺研究及材料工程应用研究方面得到国家大力支持，同时和知名企业签订科研合作项目，取得了丰硕的成果。在系列耐大气腐蚀用钢、高强度高韧性工程结构钢、建筑耐火钢研究方面，居国内领先水平。以下是我们近期开展的针对建筑用钢的研究工作及成果介绍。

(一) 新型高强度建筑钢板

在国家“973”项目支持下，采用 M3 组织调控思想成功研发第三代低合金钢，具有高强度韧性、高塑性及优良焊接性、自适应调整等特点。钢材屈服强度 500~700MPa，0.85 以下低屈强比、高延伸率、600℃强度大于常温时设计强度 2/3 的水平，可满足建筑钢结构工程高强、抗震、耐火、耐候等性能要求，同时 12.9S 级高强度建筑螺栓研发取得显著进展，是绿色建筑高性能材料。



低合金钢的发展历程



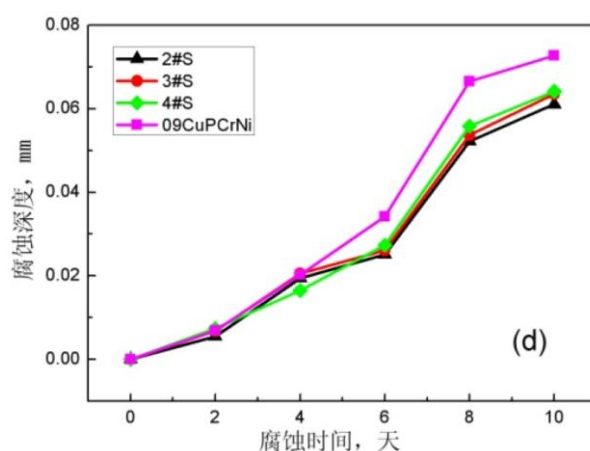
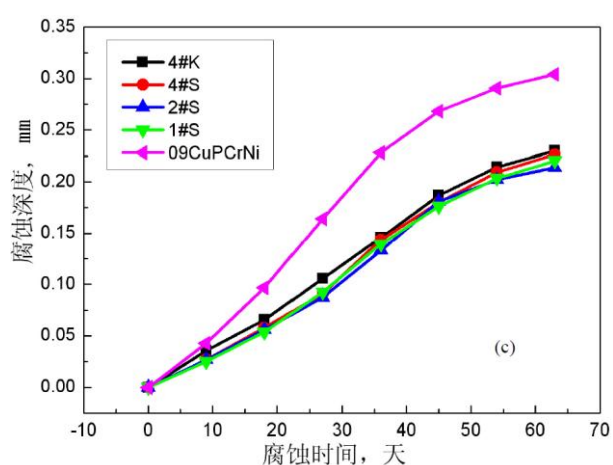
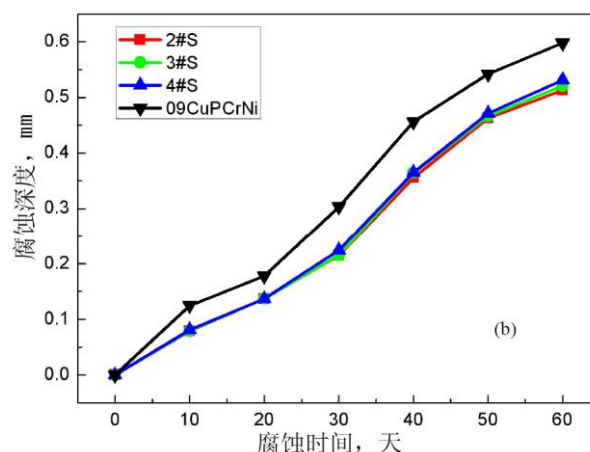
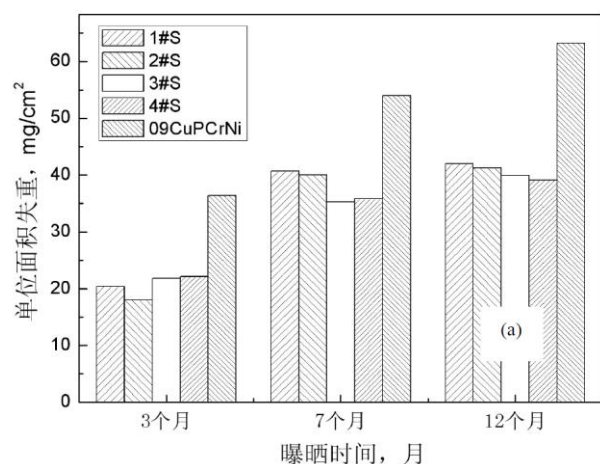
智能经济型抗震耐火钢

(二) 新型屈服强度 600MPa 级高强度耐候结构钢研究

在大幅度降低磷含量, 确保低温韧性的前提下, 得到耐候性能超过传统耐候钢的新系列高强度低合金耐候原型钢。

➤ 不同模拟环境下的腐蚀试验

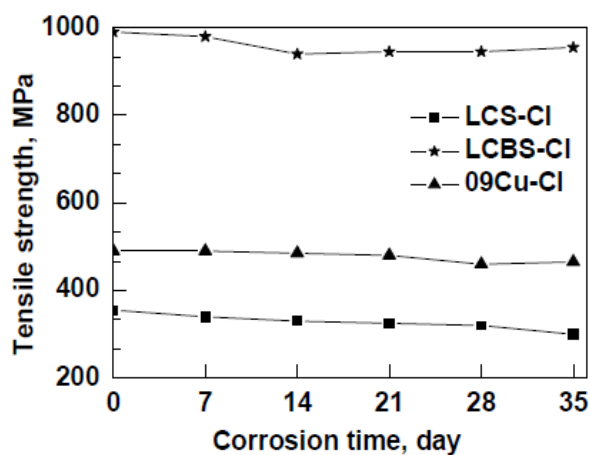
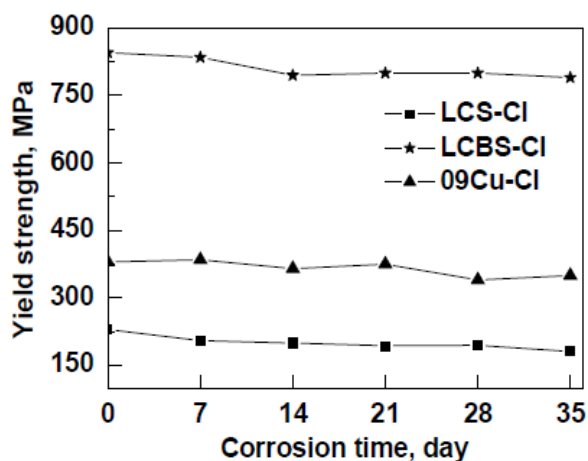
实验室模拟环境腐蚀试验表明, 新型耐候钢的耐候性能优于传统耐候钢。

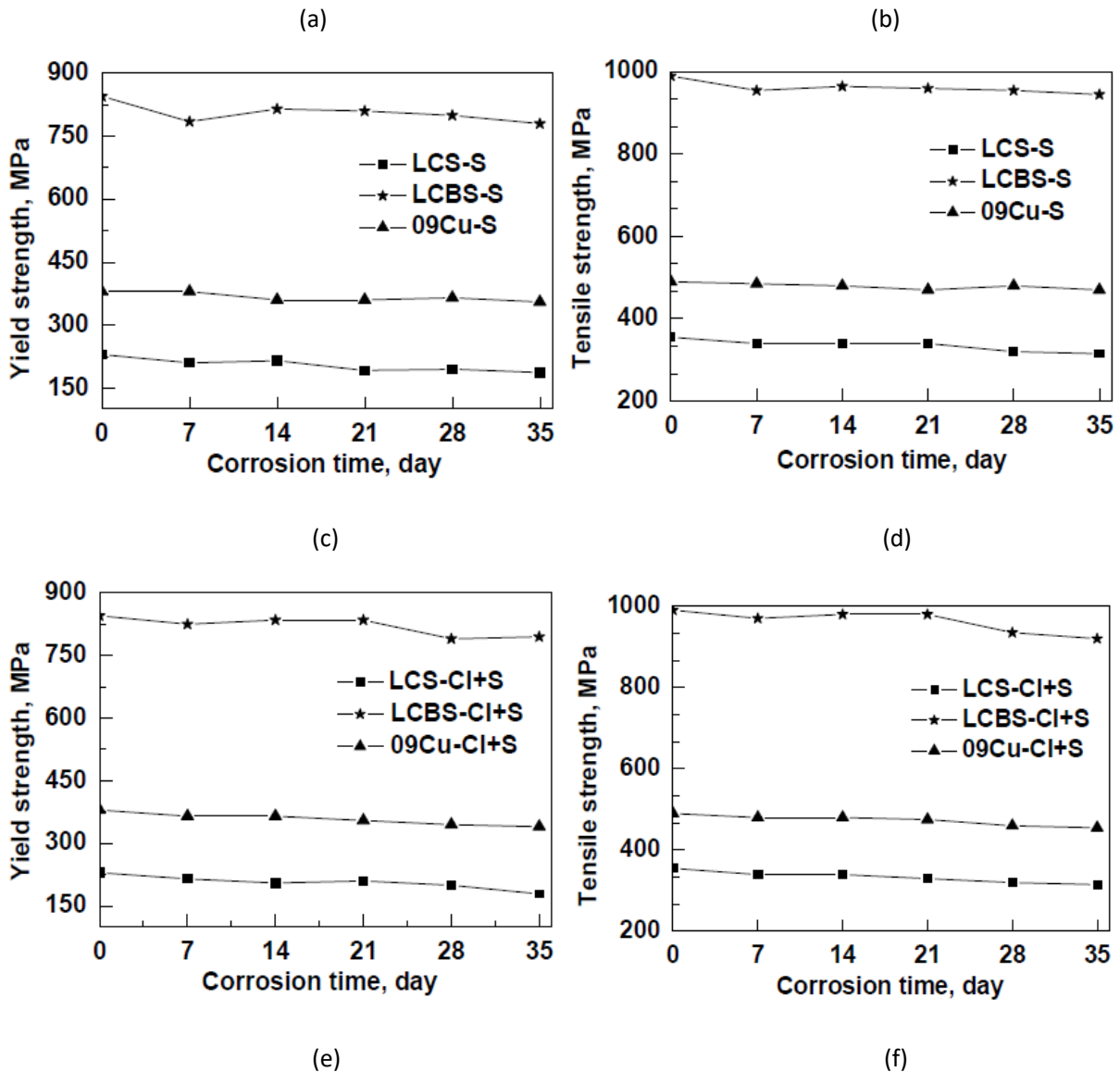


新型耐候钢与 09CuPCrNi 在不同实验环境中耐候性能的比较。图中 1#、2#、3#、4# 分别对应 C 含量为 0.0036%、0.03%、0.05% 和 0.10%，“K”表示终轧后空冷，“S”表示终轧后水冷。(a)青岛团岛海边曝晒；(b)连续喷盐雾实验；(c)间断喷盐雾实验；(d)周浸实验。

➤ 模拟环境腐蚀试验对材料性能的影响

模拟环境腐蚀试验表明，材料的力学性能受环境腐蚀的影响很小。



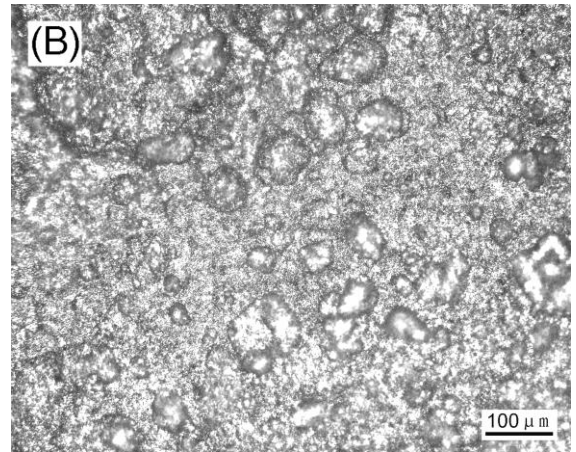
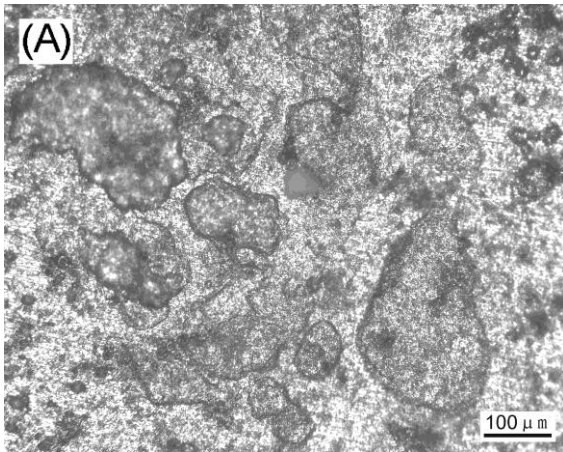


用三种溶液腐蚀后，新型耐候钢（LCBS）不同试样的拉伸强度随腐蚀试验变化曲线

(a)(b) Cl-NaCl 溶液；(c)(d) S-NaHSO₃ 溶液；(e)(f) Cl+S-NaCl+NaHSO₃ 溶液

➤ 耐候钢表面稳定化锈层的形成

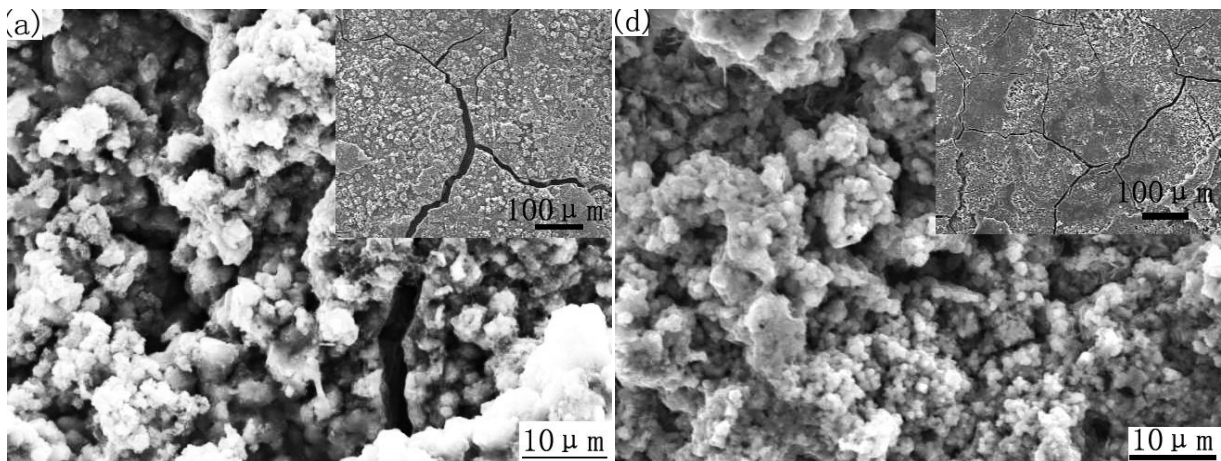
腐蚀坑生成后易于横向扩展，相邻腐蚀坑合并，锈层/基体界面向钢基体一侧推进，在空间、时间尺度上体现为均匀腐蚀，一般不会形成很深的点蚀，而通过平均腐蚀深度基本可以表征其腐蚀程度，减少了在实际工程应用中的危险性。

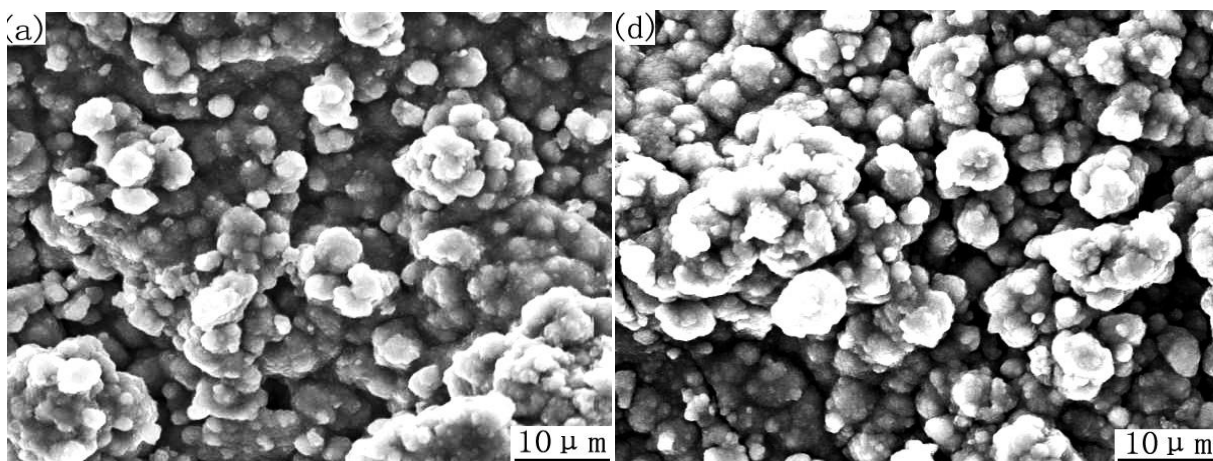


新型耐候钢（LCBS）在海洋大气环境中腐蚀不同时间后的基体表面
(A) 腐蚀 7 天; (B) 腐蚀 28 天

➤ 锈层保护性的起源以及锈层在腐蚀过程中的演化行为

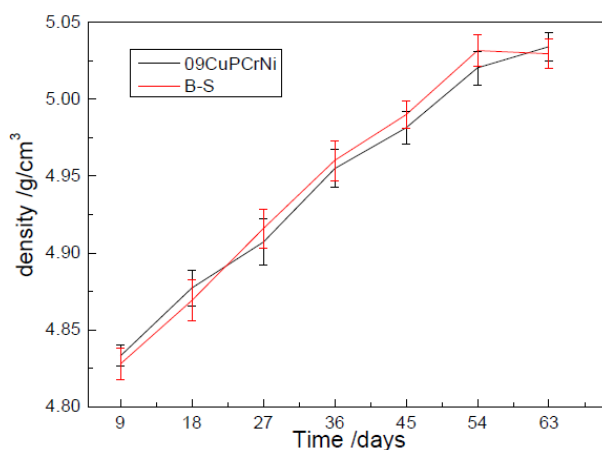
耐候钢在腐蚀初期形成的锈层都是疏松的（包含大量孔洞），液态水易于渗入，在冰冻-解冻循环过程中，由于水的液固相变的体积膨胀效应产生的应力使锈层中产生裂纹。在较长时间的加速腐蚀后，形成了致密锈层，液态水不能渗入其中，进一步的冷冻不会对其造成伤害。致密锈层不会受到冰冻-解冻循环的影响，这是耐候钢安全使用的保障。随着时间延长，锈层密度提高，锈层的保护能力随着腐蚀时间的延长而得到加强。



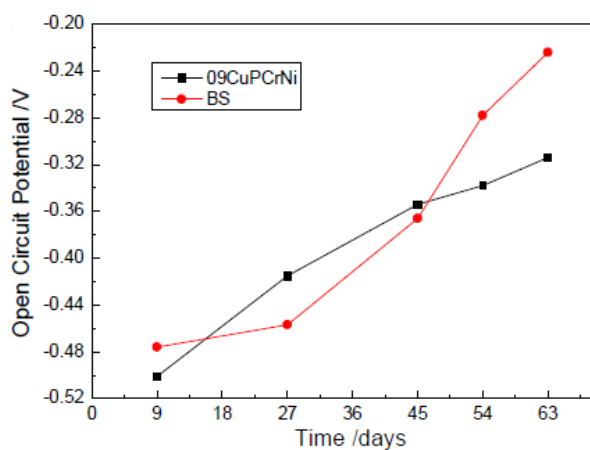


冬季室外（洒水+日晒）试验的锈层形貌（注意修改图号）

(a)新型耐候钢 20 天；(b)09CuPCrNi 钢 20 天；(c)新型耐候钢 60 天；(d) 09CuPCrNi 钢 60 天



(a)



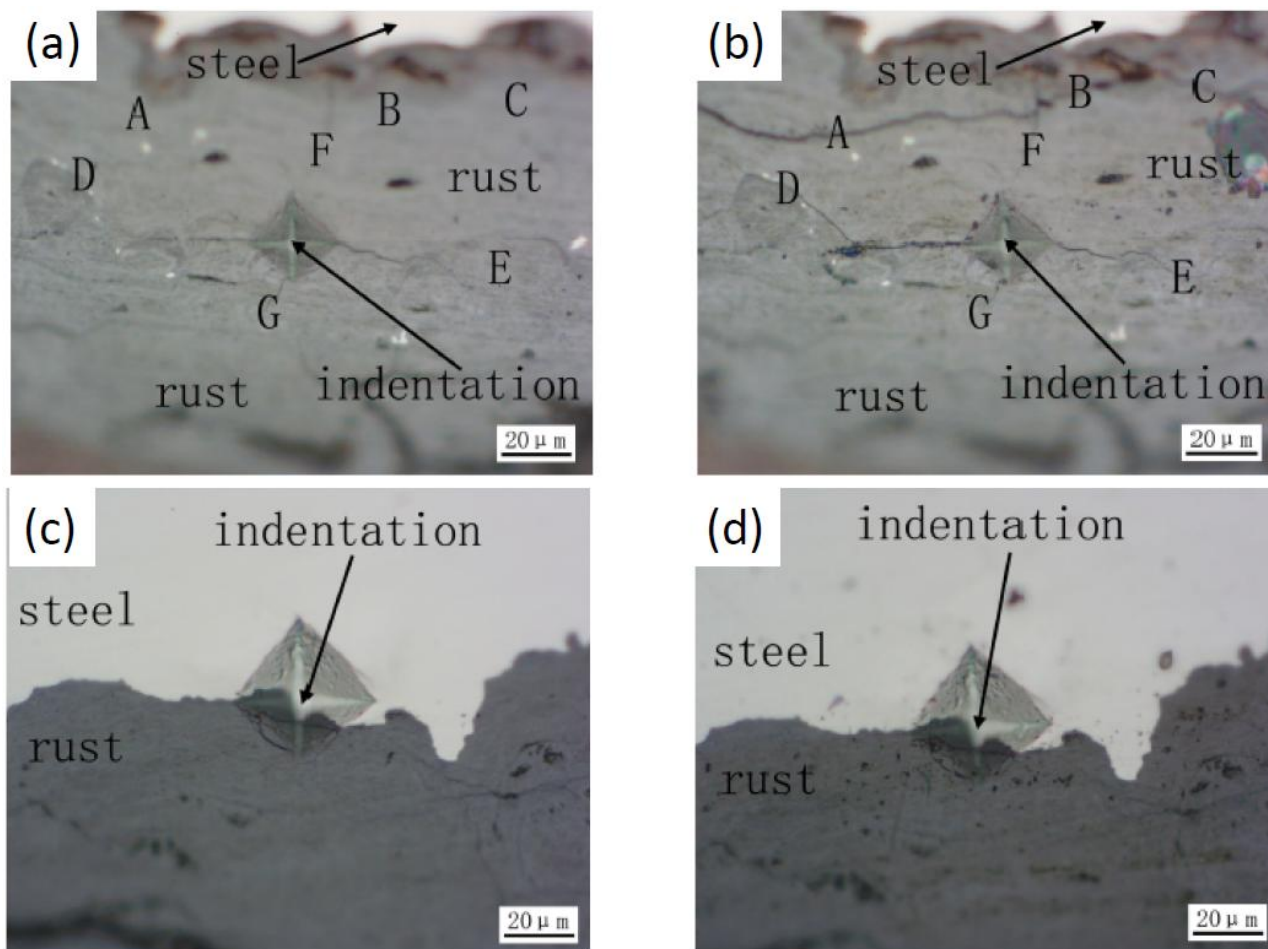
(b)

随时间延长，锈层的保护能力提高

(a)锈层密度（致密性）；(b)开路电位（反映保护能力）变化。

➤ 锈层损伤后的继续腐蚀行为及锈层与基体的结合问题

锈层内部由压痕产生的裂纹和原先观测不到的微裂纹都得到扩展。但从未观察到裂纹沿钢基体/锈层界面扩展。锈层/钢基体界面的断裂韧性高于锈层本身，这使得锈层一般不会沿钢基体/锈层界面彻底脱落。

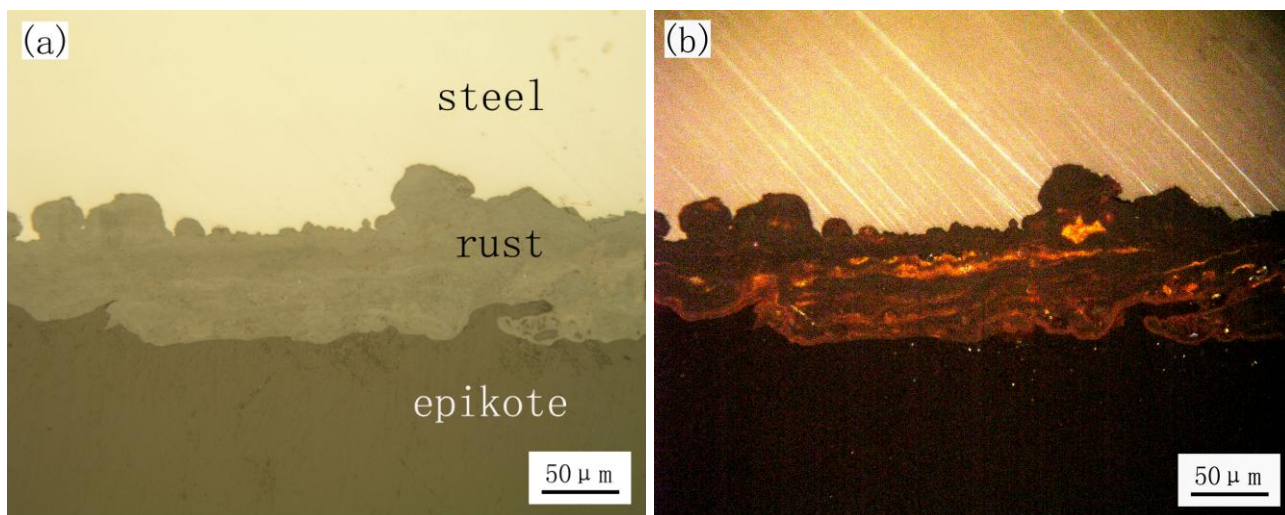


锈层热震循环试验（注意修改图号）

(a)热震前锈层微裂纹；(b)热震循环 10 次后锈层，微裂纹扩展；
 (c)热震前锈层和基体结合部，无裂纹；(d) 热震循环 10 次后和基体结合部，无裂纹。

➤ 耐候钢基体和锈层的结合部的稳固性

为什么锈层/基体界面的断裂韧性高于锈层本身？利用金相显微镜观察锈层截面形貌可以看出，在偏振光条件下锈层外部呈光亮和暗黑色交替的斑点状，而接近钢基体的锈层为暗黑色。由 XRD 结果知，锈层中存在着由细小的 Fe_3O_4 ， $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 或 $\alpha\text{-FeOOH}$ 组成的非晶相 X 射线无定形锈。在偏振光条件下各向异性晶体结构在特定的角度，晶粒将呈现光亮色；而对于各向同性非晶相结构，在所有的角度均呈暗黑色，产生消光现象。锈层接近钢基体的区域是主要由各向同性的非晶相组成，而锈层外部则是晶态相和非晶相共存。锈层中接近钢基体处存在的高含量的非晶相有利于提高锈层与钢基体的结合性能和抗热震性能。



耐候钢锈层/基体界面形貌

(a)普通显微镜观察；(b) 偏振光显微镜观察。

4. 钢铁研究总院华东分院耐候钢产品及其配套材料

4.1. S20 系列耐候钢

➤ 特点：

适用于城市高层住宅楼、办公写字楼、公共建筑、构筑物、农村住宅、别墅式住宅等钢结构用钢建设，可焊接，耐大气腐蚀，免涂装作业。

➤ 产品规格及截面尺寸允许偏差：

热轧板卷，宽度 1000~1800mm，厚度 2.0~20mm，卷重 25~30 吨，可冷弯加工成各种规格形式的构件如矩管、方管、冷弯角钢、C 型钢等系列，也可焊接 H 型钢和 T 型钢等规格；

中板，宽度 2000-3800mm，厚度 6.0mm~50mm，长度 8000~12000mm；

板卷和中板尺寸偏差执行 GB/T 709 热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差；

型钢规格执行下列标准，若需特殊截面，需双方协商；

GB/T 706-2008 热轧型钢；

GB/T 11263-2010 热轧 H 型钢和剖分 T 型钢；

➤ 产品性能:

牌号	质量等级	拉伸性能				冲击性能		耐大气腐蚀性能	
		屈服强度 R _{eL} , MPa	抗拉强度 R _m , MPa	屈强比 R _{eL} /R _m	断后伸 长率A, %	温度℃	冲击 功, J	耐腐蚀性 能指数 I	暴露试验减薄 量
S20	B	≥345	490-610	≤0.85	≥22	20	≥47	≥6.0	5 年
	C					0			≤0.090mm;
	D					-20			70 年估计
	E					-40			≤0.300mm
耐腐蚀性指数I值公式: I=26.01 (Cu)+3.88 (Ni)+1.20 (Cr)+1.49 (Si)+17.28 (P)-7.29 (Cu) (Ni)-9.10 (Ni) (P)-33.39 (Cu) ²									

➤ 工艺性能:

冷弯试验（横向180°）：试样厚度 $a \leq 6\text{mm}$ 时，弯心直径 $d=a$ ； $6\text{mm} < a \leq 16\text{mm}$ 时， $d=2a$ ； $a > 16\text{mm}$ 时， $d=3a$ 。

焊接性能：满足手工电弧焊，埋弧自动焊、高频电阻焊、气体保护焊要求，配套专用S20耐候钢焊材。

4.2. H20 系列耐候钢焊接材料

➤ 特点:

适用于城市高层住宅楼、办公写字楼、公共建筑、构筑物、农村住宅、别墅式住宅等钢结构施工过程中的耐候钢结构件的焊接。

➤ 产品牌号和规格:

钢材牌号	焊材牌号			
	焊条	气体保护焊丝	埋弧焊丝	埋弧焊剂
S20	E20	ER20	H20	SJ121

B20 耐候钢配套焊接材料产品规格执行下列标准，若需特殊要求，需双方协商。

GB/T 5117 非合金钢及细晶粒钢焊条

GB/T 12470 埋弧焊用低合金钢焊丝和焊剂

GB/T 5293 埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂

GB/T 8110 气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝

➤ 熔敷金属和焊接接头力学性能:

焊接方法	牌号	拉伸性能			冲击性能		耐大气腐蚀性能	
		屈服强度 R _{el} , MPa	抗拉强度 R _m , MPa	断后伸长率 A, %	温度℃	冲击功, J	耐腐蚀性能指数 I	暴露试验减薄量
手工电弧焊	E20	≥390	≥490	≥22	-40	≥47	≥6.0	5 年
气体保护焊	ER20							≤0.090mm;
埋弧自动焊	H20							70 年估计
	SJ121							≤0.300mm
耐腐蚀性指数I值公式: I=26.01(Cu)+3.88(Ni)+1.20(Cr)+1.49(Si)+17.28(P)-7.29(Cu)(Ni)-9.10(Ni)(P)-33.39(Cu) ²								

➤ 焊接接头弯曲性能

焊材牌号	弯心直径 mm	弯曲角度 (°)
E20、ER20、H20/SJ121	3a	120

➤ 焊条、气体保护焊丝的抗裂性能

焊材牌号	表面裂纹率 %	断面裂纹率 %	根部裂纹率 %
E20、ER20	0	0	0

4.3. B20 系列耐候钢用螺栓连接副

➤ 特点:

适用于城市高层住宅楼、办公写字楼、公共建筑、构筑物、农村住宅、别墅式住宅等钢结构建筑施工过程中的耐候钢结构构件连接。

➤ 产品规格:

B20 耐候钢紧固件产品规格执行下列标准, 若需特殊截面, 需双方协商

GB/T 1228 钢结构高强度大六角头螺栓

GB/T 1231 钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角头螺母、垫圈技术条件

GB/T 3098.1 紧固件机械性能-螺栓、螺钉和螺柱

GB/T 5780

六角头螺栓（产品等级 A 级、B 级）

GB/T 5782

六角头螺栓（产品等级 C 级）

➤ 产品性能：

性能等级	拉伸试验				冲击试验	耐大气腐蚀性能	
	R _{p0.2} , MPa	R _m , MPa	A,%	Z,%	20-25℃KU ₂ , J	耐蚀性指数 I	暴露试验减薄量
10.9S	≥940	≥1040~1240	≥10	≥42	≥47	≥6.0	5 年
8.8S	≥660	≥830~1030	≥12	≥45	≥63		≤0.090mm;
6.8	≥480	≥600~770	≥17		≥63		70 年估计
5.6	≥300	≥500	≥20	-	≥63		≤0.300mm
4.6	≥240	≥400	≥22	-	≥63		
耐腐蚀性指数I值公式： I=26.01 (Cu)+3.88 (Ni)+1.20 (Cr)+1.49 (Si)+17.28 (P)-7.29 (Cu) (Ni)-9.10 (Ni) (P)-33.39 (Cu) ²							

联系人：

徐德祥：13904087975

范建文：13522019102

孙国强：18631276599



附录：耐候钢分析检验报告

第1页 共1页

NACIS/D BG 12:2011



2014000584E

中国认可
国际互认
检测
TESTING
CNAS L0272



2014000418Z



(2014)国认监认字(102)号

钢研纳克检测技术有限公司

国家钢铁材料测试中心/国家钢铁产品质量监督检验中心

分析测试报告

16R24583 合同号：16C31826

委托单位		钢铁研究总院华东分院						
联系人/电话		范建文 /						
状态工艺		固态		送样日期		2016-12-19		
判定依据		无判定		报告日期		2016-12-20		
编号	样品名称	样品原号	分析项目, %					
			C	Si	Mn	P	S	Cr
16SH027072	S20		0.086	0.31	0.45	0.005	0.002	0.47
			Ni	Cu	Al			
16SH027072	S20		0.16	0.30	0.026			

以下空白

检测方法	Ni, Si, P, Cr, S, C, Cu, Mn, Al: GB/T 4336-2002
备注	

*****报告结束*****

声明：本报告只对委托之试样负责，如对本报告有异议，请在发出报告之日起一个月内提出；报告无“分析检验专用章”、无签发人签字无效，涂改无效；未经本中心书面批准，不得部分复制本报告（全部复制除外）；本中心保留分析试样三个月。

签发人：范建文 签发日期：2016年12月20日

通讯地址：北京市海淀区高梁桥斜街13号 邮编：100081
 联系电话：010-62182643 传真：010-62182266
 电子邮箱：lab@ncschina.com 网址：www.nacis-cn.com

钢铁研究总院分析检验报告

来样名称: S20 耐候钢

试样号: 16SH027072

分析内容: 耐大气腐蚀性能

评价结果:

国家钢铁材料测试中心对 16SH027072 号试样进行成分分析, 其结果如下表所示:

编号	样品名称	分析项目, %								
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
1610367011	耐候钢	0.18%	0.31%	0.45%	0.005%	0.002%	0.47%	0.26%	0.20%	0.0005%

按照国际公认的材料耐候性计算方法, 采用 Legault-Leckie 公式计算, S20 耐候钢的耐大气腐蚀性指数 I 值为 7.44, 达到耐候性 I 值 6.0 以上的耐大气腐蚀性免涂装要求。

签发人:

签发日期: 2016 年 12 月 22 日

附录一:

Legault-Leckie 公式:

$$I = 26.01(\%Cu) + 3.88(\%Ni) + 1.20(\%Cr) + 1.49(\%Si) + 17.28(\%P) - 7.29(\%Cu) \times (\%Ni) \\ - 9.10(\%Ni) \times (\%P) - 33.39(\%Cu) \times (\%Cu)$$

附录二: 国家钢铁材料测试中心分析测试报告原件