脱硫烟囱防腐方案简单介绍

1、脱硫工艺对烟囱的影响

1.1.1 脱硫工艺简况

我国是一个能源结构以燃煤为主的国家，大气污染属煤烟型污染，粉尘、二氧化硫（SO_2）、氮氧化物（NO_X）是电厂对大气的主要污染物，其中二氧化硫造成了酸雨等污染情况。因此，对二氧化硫的防治是势在必行。目前，国内外燃煤火电厂中烟气脱硫（Flue Gas Desulfurization 简称“FGD”），是控制二氧化硫排放的主要措施。其中湿法石灰石、石膏法是当今世界各国应用最多和最成熟的工艺，国家电力公司已将湿法石灰石脱硫工艺确定为火电厂脱硫的主导工艺。

湿法脱硫工艺主要流程是，锅炉的烟气从引风机出口侧的烟道接口进入烟气脱硫(FGD)系统。在烟气进入脱硫吸收塔之前经增压风机升压，然后通过烟气—烟气加热器(GGH)，将烟气的热量传输给吸收塔出口的烟气，使吸收塔入口烟气温度降低，有利于吸收塔安全运行，同时吸收塔出口的清洁烟气则由 GGH 加热升温，烟气温度升高，有利于烟气扩散排放。经过 GGH 加热器加热后烟气温度一般在 80℃左右，可使烟囱出口处达到更好的扩散条件和避免烟气形成白雾。GGH 之前设的增压风机，用以克服脱硫系统的阻力，加热后的清洁烟气靠增压风机的压送排入烟囱。

在锅炉启动过程或脱硫装置因故障而解列时，烟气可不进入脱硫装置，而通过旁路烟道进入烟囱排向大气。

1.1.2 脱硫对烟囱的影响

烟气经过脱硫后，虽然烟气中的二氧化硫的含量大大减少，但是，洗涤的方法对除去烟气中少量的三氧化硫效果并不好。由于经湿法脱硫，烟气湿度增加、温度降低，烟气极易在烟囱的内壁结露，烟气中残余的三氧化硫溶解后，形成腐蚀性很强的稀硫酸液。调查实际的烟囱发现，脱硫烟囱内的烟气有以下特点：

1) 烟气中水份含量高，烟气湿度很大；

2) 烟气温度低，脱硫后的烟气温度一般在 40～50℃之间，经 GGH 加温器升温后一般在 80℃左右；

3) 烟气中含有酸性氧化物，使烟气的酸露点温度降低；

4) 烟气中的酸液的浓度低，渗透性较强，对烟囱结构有很强的腐蚀性。

由于脱硫烟囱内烟气的上述特点，对烟囱设计有如下影响：

1）烟气湿度大，含有的腐蚀性介质在烟气压力和湿度的双重作用下，烟囱内侧结构致

密度差的材料内部很易遭到腐蚀，影响结构耐久性。

2）低浓度稀硫酸液比高浓度的酸液腐蚀性更强。

3）酸液的温度在 40-80℃时，对结构材料的腐蚀性特别强。以钢材为例，40-80℃时的腐蚀速度比在其它温度时高出约 3-8 倍。

由此可知，排放脱硫烟气的烟囱比排放普通未脱硫烟气的烟囱对防腐蚀设计要求要高得多，这也许与我们的传统观念有所不同。故在设计脱硫烟囱时，烟囱内壁的防腐蚀措施应进一步加强。

此外，由于在烟囱运行时，烟气有可能不进入脱硫装置，而通过旁路烟道进入烟囱。此时，烟气温度较高，一般在 130℃左右，故设计烟囱时，还必须考虑在此温度工况下运行对烟囱的影响。

1.1.3 电厂烟囱运行工况

目前，电厂烟囱主要在以下三种工况下运行：

1）排放未经脱硫的烟气，进入烟囱的烟气温度在 130℃左右。在此条件下，烟囱内壁处于干燥状态，烟气对烟囱内壁材料不直接产生腐蚀。

2）排放经湿法脱硫后的烟气，且烟气经 GGH 系统加热，进入烟囱的烟气温度在 80℃左右，烟囱内壁有轻微结露，导致排烟内筒内侧积灰。根据排放烟气成分等条件的不同，结露状况将有所变化。

3）排放经湿法脱硫后的烟气，且烟气无 GGH 系统加热，进入烟囱的烟气温度在 50℃左右，烟囱内壁有明显结露。

此外，烟囱设计时还应考虑在锅炉事故状态排放烟气的温度，一般该温度在 180℃左右。

电厂烟囱安全运行的必要条件是承重的钢筋混凝土外筒不被烟气腐蚀，排烟内筒在电厂运行期间尽可能的抵抗烟气腐蚀。

脱硫后烟囱运行条件如下：

	脱硫有 GGH 工况	脱硫无 GGH 工况
烟囱内烟气温度℃	74~80	41~45
烟囱入口烟气酸露点温度℃	81~86	88~94
烟囱入口烟气压力 Kpa(a)	101	101

由此表可知，在有无 GGH 系统的情况下，烟囱内壁均存在酸结露状况。

2、脱硫后烟囱钢内筒防腐设计

2.1 脱硫后烟囱钢内筒内衬概况

烟囱内化学环境复杂，烟气含酸量很高，在内衬表面形成的凝结物，对于大多数的建筑材料都具有很强的侵蚀性，所以对内衬材料要求具有抗强酸腐蚀能力；烟气温差变化大，湿法脱硫后的烟气温度在 40℃~80℃之间，在脱硫系统检修或不运行而机组运行工况下，烟囱内烟气温度在 130℃~150℃之间，那么要求内衬具有抗温差变化能力，在温度变化频繁的环境中不开裂并且耐久，满足两方面性能对内衬材料至关重要。

烟囱钢内筒选择一个合适的内衬，必须考虑以下几方面的因素，一、技术可行性，满足复杂化学环境下的防腐要求；二、经济合理，较低的建筑成本，一次性投资费用要低；三、施工容易进行速度快，周期短；四、运行维护费用低，并且方便检修。需注意的是，用材的选择不仅应考虑初期成本，还应考虑装置的可靠运行周期（即大修周期）和总使用寿命等相关问题，以便作出经济上的合理决定。

欧美等发达国家电厂烟气脱硫开始的时间比较早，根据国内外的经验，目前湿法脱硫后的烟囱钢内筒内衬防腐主要有三类形式，第一类采用耐腐蚀的轻质隔热的制品粘贴，隔绝烟气和钢内筒接触，如发泡耐酸玻璃砖内衬；第二类贴衬薄板，采用耐酸腐蚀的金属合金薄板材作内衬，内衬材料包括钛板（TiCr2）、镍基合金板（C-276、C22）或铁-镍基耐蚀合金板（AL-6XN）；第三类采用耐酸耐热混凝土和玻璃鳞片涂层等防酸腐蚀涂料。

电厂烟气脱硫是近些年的事，由于我国这方面起步比较晚，缺乏工程实际经验。对湿法脱硫后的烟气情况有待进一步的认识。可供脱硫后烟囱钢内筒内衬选择的方案有镍基耐蚀合金 C-276 衬板、C22 衬板、TiCr2 钛衬板、铁-镍基耐蚀合金 AL-6XN 衬板、耐蚀鳞片胶泥内衬、钾水玻璃耐酸砂浆层内衬、刷防腐涂料层+耐酸耐热混凝土、耐硫酸露点钢内刷防腐涂料层、内筒为耐硫酸露点钢(钢板厚考虑一定腐蚀余量)等。

脱硫后烟气的特点

烟气经过脱硫后，虽然烟气中的二氧化硫的含量大大减少，但是，洗涤的方法对除去烟气中少量的三氧化硫效果并不好。由于经湿法脱硫，烟气湿度增加，经 GGH 加热升温，产生温度达 75～85℃的混合气体，混合的结果，处理后的气体中的大部份冷凝物质蒸发了。然而小部分的侵蚀性冷凝物保留了下来，蒸发的结果，使这些冷凝物的硫酸含量非高，75～85℃的温度和高硫酸含量相结合，对于大多数的建筑材料都具有很强的侵蚀性。根据资料，经过脱硫装置的气体中主要物质 SO_3 的露点温度为 150℃，这表明，烟气在与烟囱的内壁极易结露，从而形成酸液。

2.2.3　烟气对烟囱的影响

从脱硫烟囱内烟气的上述特点，可以看出：

排放脱硫烟气的烟囱比排放普通未脱硫烟气的烟囱对防腐蚀设计要求要高得多，这也许与我们的传统观念有所不同。故在设计脱硫烟囱时，烟囱内壁的防腐蚀措施应进一步加强。

新设计的烟囱内衬，必须具备耐 750－85℃以及高浓度硫酸的条件。这是脱硫后的烟囱内衬设计所要解决的主要问题。

另外，由于在烟囱运行时，烟气有可能不进入脱硫装置，而通过旁路烟道进入烟囱。此时，烟气温度较高，故设计烟囱时，还必须考虑在 130～150℃温度工况下运行对烟囱的影响。

2.3　钢内筒各内衬方案评述

2.3.1　镍基耐蚀合金板(C-276、C22)内衬

1)元素成份及机械物理性能

C-276 的 ISO 材料牌号 NiMo16Cr15Fe6W4;　美国材料试验学会（ASTM）编制的联合编号 UNS N10276;　德国 DIN 材料牌号 NiMo16Cr15W(W.Nr.2.4819)

表 2.3.1.1　C-276　C22 元素成份表

合金类别	商品牌号	元素成份 wt%	Cr	Mo	Ni	W	Fe	SiC	SP
镍基耐蚀合金	C-276	典型成份	15.5	16.0	余量	3.5	6.0	0.03	0.004
	C-22	典型成份	20.39	13.79	余量	2.75	2.79	0.057	0.006

0.002 0.005

0.0002 0.008

表 2.3.1.2　C-276 元素成份机械物理性能表

导热系数 7.2W/M・C

密度 8.89G/cm2

屈服强度≥283 MPa

抗拉强度≥690 MPa

弹性模量 209～200KN/mm2　(0～200°C)

热膨胀系数 11.2*10-6/°C

延伸率%≥40

溶点 1325-1370 ℃

2003 年以来，国际国内市场镍价持续上涨，国际交易所镍现货价格由 7500 美元/吨升至 14000～15000 美元/吨，国内镍现货价格也升至 16 万元/吨，镍价目前已处于 1990

年以来 14 年的最高水平。日本 JSW 资料显示 C276 轧制复合板价格近 10 万元/吨。国际国内市场镍价上涨，使得 C276 合金材料初期成本较高这一因素更加制约了 C-276 耐腐合金在脱硫烟囱中的应用。

2) C-276 合金耐腐蚀性能

C-276 合金是一种含钨的镍-铬-钼合金，其硅、碳的含量极低，在氧化和还原状态下，对大多数腐蚀介质具有优异的耐腐蚀性，出色的耐点腐蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀性能。较高的钼、铬含量使合金能够耐氯离子的侵蚀，钨元素也进一步提高了其耐腐蚀性。C-276 合金在 10％硫酸沸腾试验溶液中的腐蚀速率为 0.35mm/y，316L 为 16.15mm/y，317 为 7.85mm/y，钛板在 99℃的 20％H2SO4 试验溶液中腐蚀速率>61.8 mm/y。

3) C-276 耐腐内衬构造

钢内筒由 10～16mm 厚(支承式)或 6～8mm 厚(悬挂式)Q235 加 C-276 耐腐内衬。内筒结构设计计算时，不必预留腐蚀富裕度，合金板内侧也不必采取防腐措施。内筒钢板与 C-276 内衬合金板有工厂轧制复合、爆炸复合和现场挂贴式。据日本 JSW 资料，工厂轧制复合板的内衬合金板最小厚度为 1.5mm。

4) C-276 耐腐内衬合金板工程应用

美国近十年中，C276 合金，C22 合金广泛应用于可能形成原始酸冷凝液烟气洗涤脱硫塔及烟囱中。由于 C276 C22 合金材料初期成本较高等原因，国内尚无应用于烟囱钢内筒耐腐内衬的工程实例。

2.3.2 钛板(TiCr2) 内衬

1) 元素成份及机械物理性能

钛位于元素周期表中ⅣB 族，原子序数为 22，高纯度的钛强度较低，它作为结构材料应用意义不大，故在工程中很少应用。工业纯钛按其杂质含量的不同，分为 TA1.TA2 和 TA3 三个牌号。这三种工业纯钛的间隙杂质元素逐渐增加的，其机械强度和硬度也随之逐级增加，但塑性.韧性相应下降。工业上常用的纯钛是 TA2，因其耐蚀性能和综合力学性能适中。对耐腐和强度要求较高时可采用 TA3。对要求较好的成型性能时可采用 TA1。

表 2.3.2.1 钛 TA2 机械物理性能表

密度 4.51G/cm2

抗拉屈服强度 140 MPa

抗拉强度 220 MPa

弹性模量 10.6*104MPA(116 GPa)

热膨胀系数 9.0*10-6/°C

溶点 1668°C

延伸率%54 %

2) 钛及其合金耐腐蚀性能

钛是一种很耐腐蚀的材料，这是由于钛的表面容易生成稳定的钝化膜，钝化膜是由几纳米到几十纳米厚的极薄的氧化钛构成，在许多环境中是很稳定的，并且一旦局部破坏还具有瞬间再修补的特性。因此，钛在酸性、碱性、中性盐水溶液中和氧化性介质中具有很好的稳定性，比现有的不锈钢和其它有色金属的耐腐蚀性都好，甚至可与铂比美。但也必须认识到这层氧化膜被破坏后，若不存在修复的环境介质，这时钛的腐蚀速度比铁还大。

钛的耐蚀介质是指那些能使钛的钝化膜处于稳定状态的介质，这些介质属于氧化性，中性，弱还原性。主要有海水，硝酸，铬酸，醋酸，次氯酸，低于 3%的盐酸，低于 4%的硫酸，乳酸，对苯二甲酸，湿氯气，次氯酸盐，含氯漂白剂，二氧化氯，食盐，氯化铁，氯化铜，尿素，多种有机物等。

钛的不耐蚀介质是指使其钝化膜遭到破坏的介质，这些介质是强还原剂和无水强氧化剂。主要有氢氟酸，氟硅酸，含氟化合物溶液，大于 3%的盐酸，大于 5%的硫酸，草酸，磷酸，干氯气，发烟硝酸等。由于这些溶液溶解钛表面氧化膜，所以钛被腐蚀。如果在这些溶液中加入氧化剂或某些金属离子时，则钛表面氧化膜便会受到保护，此时钛的稳定就会增加。

钛在较高的温度下，可与许多元素和化合物发生反应。各种元素，按其与钛发生不同反应可分为四类：

第一类：卤素和氧族元素与钛生成共价键与离子键化合物；

第二类：过渡元素、氢、铍、硼族、碳族和氮族元素与钛生成金属间化物和有限固溶体；

第三类：锆、铪、钒族、铬族、钪元素与钛生成无限固溶体；

第四类：惰性气体、碱金属、碱土金属、稀土元素（除钪外），铜、钍等不与钛发生反应或基本上不发生反应。

钛与<5%的稀硫酸反应后在钛表面上生成保护性氧化膜，可保护钛不被稀酸继续腐蚀。但>5% 的硫酸与钛有明显的反应，在常温下，约 40%的硫酸对钛的腐蚀速度最快，当浓度大于 40%，达到 60%时腐蚀速度反而变慢，80%又达到最快。加热的稀酸或 50%的浓硫酸可与钛反应生成硫酸钛，见式（1）,（2），加热的浓硫酸可被钛还原，生成 SO2，

见式（3）。

Ti＋H2SO4＝TiSO4＋H2 ……(1)

2Ti＋3H2SO4＝Ti2(SO4)3＋H2 ……(2)

2Ti＋6H2SO4＝Ti2(SO4)3＋3SO2＋6H2O＋202 千卡 ……(3)

HCl 和氯化物

氯化氢气体能腐蚀金属钛，干燥的氯化氢在>300℃时与钛反应生成 TiCl4，见 式(5);浓度<5%的盐酸 在室温下不与钛反应，20%的盐酸在常温下与钛发生瓜在生成紫色的 TiCl3，见式(6);当温度长高时，即使稀盐酸也会腐蚀钛。各种无水的氯化物，如镁、锰、铁、镍、铜、锌、汞、锡、钙、钠、钡和 NH4 离子及其水溶液，都不与钛发生反应，钛在这些氯化物中具有很好的稳定性。

Ti＋4HCl＝TiCl4＋2H2＋94.75 千卡 ……(5)

2Ti＋6HCl＝TiCl3＋3H2 ……(6)

3) 钛板耐腐内衬构造

钢内筒由 10～16mm 厚(支承式)或 6～8mm 厚(悬挂式)Q235 加钛板耐腐内衬。内筒结构设计计算时，不必预留腐蚀富裕度，合金板内侧也不必采取防腐措施。内筒钢板与钛板内衬有工厂轧制复合、爆炸复合和现场挂贴式。钛板内衬厚度一般为 1.2～1.6mm。

4) 钛板内衬合金板工程应用

根据钛板材料的耐腐特性，一般认为，钛板合金内衬是不带再加热装置(GGH)海水脱硫系统最好的烟气耐腐材料。对目前国内工程应用较多的带再加热装置(GGH) 石灰-石膏法湿法脱硫系统，相关资料显示，硫酸在沸腾情况下，即使是浓度达 0.5%的硫酸也对钛板采用强烈的腐蚀，从湿度和硫酸这两个参数来看，温度对钛板的腐蚀影响更为严重，从龙净环保公司提供的资料来看，脱硫后的烟气中还含有大量的氧化性介质，这对保护钛板表面的氧化膜是有好处的，从另一方面又降低了硫酸的侵蚀。应对应用工程实际烟气成份及结露情况进行分析应用。

国内台塑集团福建省漳州后石电厂 6 台 600MW 机组、常熟电厂 3 台 600MW 机组采用钛复合钢板，江苏镇江电厂也采用钛复合钢板，国外脱硫电厂应用这一方案较多。

2.3.3 铁-镍基耐蚀合金板(AL-6XN) 内衬

1)元素成份及机械物理性能

可供选择的铁-镍基耐蚀合金板有 AL-6XN (UNS 牌号 N08367)、317LXN (UNS 牌号 S31726) 、316L (UNS 牌号 S31603) ， UNS 为美国材料试验学会（ASTM）编制的联

合编号。

表 2.3.3.1　铁-镍基耐蚀合金元素成份

合金类别合金牌号 Cr Mo Ni Mn Cu SiC SP N

铁—镍基耐蚀合金 AL-6XL 典型成份 20.5 6.24 24.0 0.40/0.37 0.02 0.001 0.022 0.22

317LXN317LMN17.0/20.04.0/5.013.5/17.5≤2.0/≤1.0≤0.03≤0.03≤0.040.10/0.20

316L16.0/18.02.0/3.010.0/14.0≤2.0/≤1.0≤0.03≤0.03≤0.40/ 字串 5

表 2.3.3.2 国外烟气脱硫装置中常用耐蚀合金的物理性能及力学性能（ASTM 标准数据）

合金牌号密度 g/cm3 热膨胀系数 m/m/℃×10－6 导热率 w/m℃抗拉强度 MPa 屈服强度 MPa 延伸率%硬度 HRB

AL-6XN8.0615.313.7≥690≥310≥30≤HB240

S317268.0216.114.0≥550≥240≥40≤97

S316037.9515.714.0≥485≥170≥40≤96

表 2.3.3.3 各种耐蚀合金 ASME 标准许用设计应力值(MPa)

UNS 牌号商品牌号 38℃ 93℃ 149℃ 204℃ 260℃ 316℃

N08367AL-6XN187.0180.8164.2151.5141.5133.9

S317 26317LXN141.2130.4115.2107.6104.2/

S316 03316L115.298.087.680.775.271.8

2) 铁-镍基合金耐腐蚀性能

Al-6XN 耐蚀合金是 20 世纪 70～80 年代由美国 Allegheny Ludlnm 公司开发的一种超低碳的高钼、含氮的高纯度不锈钢（德国 Krupp VDM 公司研制的同类钢为 926 合金，我国现钢号为 00Cr20Ni25Mo6.5CuN）。

该合金中的 Cr 具有抗氧化性介质腐蚀能力；Mo、N、Cu 等提高在多种酸类和卤素介质中抗点蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀的能力；Ni、N 又能使钢中奥氏体稳定。

它兼有高强度、高耐蚀性及高热稳定的性能。人们常将其视为 316L 和镍基合金之间的耐蚀材料。国外已广泛用于炼油工业的原油蒸馏装置、热电厂的脱硫系统、纸浆酸化及漂白设备、食品炼制容器、盐生产用浓缩和结晶设备以及海洋平台系统等的容器及管道。

我国这类合金的应用不多。20 世纪 90 年代后期开始，合肥通用机械研究所将 Al-6XN 用于化工和冶金设备，并为此做了大量的腐蚀和焊接试验，合肥所采用 Al-6XN、哈氏合金 G-3 以及 316L 的焊接接试样进行晶间腐蚀、点腐蚀试验以及相应工业介质条件下

的模拟试验。试验结果表明：Al-6XN 与 G-3 均未产生晶间腐蚀，其年腐蚀率也相当（Al-6XN 为 0.37～0.39mm /y ；G-3 为 0.32～0.34mm / y），而 316L 既有晶间腐蚀，年腐蚀率高达 7.10～7.30mm。Al-6XN 无点蚀痕迹，年腐蚀率 0.05～0.06mm / y，而 316L 既有严重的点蚀，且年腐蚀率为 39～43mm / y。工业介质下模拟试验三个月的 Al-6XN 和 G-3 的试样均未发现点蚀，晶间腐蚀和应力腐蚀，而 316L 试验 40 天就有点蚀。某化工厂的氯化反应釜，设计压力<0.1MPa；设计 130℃；介质酸性氯化物；由于 130℃的酸性氯化物溶液具有很强的腐蚀性，316L 和钛合金均不适用。长期以来采用搪瓷或搪铅，搪瓷易爆瓷；搪铅太软，不耐磨损，而且铅污染物料和环境；设备使用寿命仅 2～3 年。因此，该设备选用 Al-6XN，在整个制造过程中进行跟踪并监造。设备运行后耐腐无污染，效益显著。

表 2.3.3.4 铁-镍基耐蚀合金点腐蚀，缝隙腐蚀临界温度

合金牌号合金元素含量（wt%）PRE 1N（30）CCCT 2（℃）CPT 3（℃）CPT 4（℃）CrMoN

316L16.52.10.0523.3<2.515/

317LXN184.50.1538.220//

904L20.54.50.0536.9244045

254SMO206.10.246///

926206.50.2484070/

AL-6XN20.56.20.2247.6438078

1、PREN=Cr+3.3Mo+30N

2、按照 ASTM G-48B 方法进行试验

3、按照 ASTM G-48A 方法进行试验

4、按照 ASTM G-150 方法进行试验

317LXN、316L 的耐腐性能不足于满足湿法脱硫系统烟气腐蚀要求，Al-6XN 作为 316L 和镍基合金之间的耐蚀材料，可考虑应用于不带再加热装置(GGH) 石灰-石膏法湿法脱硫系统。

3) Al-6XN 耐腐内衬构造

钢内筒由 10～16mm 厚(支承式)或 6～8mm 厚(悬挂式)Q235 加 Al-6XN 耐腐内衬。内筒结构设计计算时，不必预留腐蚀富裕度，合金板内侧也不必采取防腐措施。内筒钢板与 Al-6XN 内衬合金板有工厂轧制复合、爆炸复合和现场挂贴式。

4) Al-6XN 耐腐内衬合金板工程应用

国内外 Al-6XN 耐腐合金 Al-6XN 耐腐内衬合金应用于 HGD 的工程应用。国内尚无应用于烟囱钢内筒耐腐内衬的工程实例。

2.3.4 发泡耐酸玻璃砖内衬

1) 发泡耐酸玻璃砖和专用粘合材料的元素成份及机械物理性能

发泡耐酸玻璃砖由美国 Henkel 公司开发，玻璃砖和专用粘合材料的基本性能见下表

表 2.3.4.1 Henkel#55 玻璃砖的成份硅酸硼玻璃，无机，无粘合剂

Henkel#55 玻璃砖成份硅酸硼玻璃，无机，无粘合剂

导热系数(38°C/93°C/149°C)0.087/0.098/0.110 W/M·K

密度 0.19G/cm2

抗压强度 827KPA

弹性模量 12600KG/CM2

线涨系数 5.5*10-6/°C

吸湿率 0.2%(仅表面潮湿)

表 2.3.4.2 玻璃砖专用粘合材料(两组份尿腕沥)

导热系数(38°C/93°C/149°C)0.087/0.098/0.110 W/M·K

密度 0.19G/cm2

抗压强度 827KPA

弹性模量 12600KG/CM2

线涨系数 5.5*10-6/°C

吸湿率 0.2%(仅表面潮湿)

2) 发泡耐酸玻璃砖内衬耐腐性能

美国 Henkel 公司开发采用发泡耐酸玻璃砖作为烟囱的材料用于脱硫电厂烟囱，发泡耐酸玻璃砖具有耐腐蚀和保温的双重性能，使原来的烟囱内衬和保温层结构合二为一。发泡耐酸玻璃砖由专用的粘合材料直接粘贴于钢排烟内筒内侧内表面，并且由粘合材料对玻璃砖间的缝隙勾缝。阻断了烟气对烟囱内筒结构的腐蚀。

发泡耐酸玻璃砖是以优质的泡沫硼硅玻璃结合人造橡胶技术形成的防腐衬里，在化学环境与温度大幅度变化的情况下，都具有防腐能力。

发泡耐酸玻璃砖的特性及优点：

耐酸腐蚀，耐各种浓缩酸（除氢氟酸）和包括氯化物在内的废气冷凝液。发泡耐酸

玻璃砖内衬是以硼酸玻璃为基础制成的，它对于高浓度硫酸有无限的抵抗力，在高温下也不例外。

高绝热性，导热性极低，可以省去钢排烟内筒外绝热保温层，作为粘结剂，发泡耐酸玻璃砖粘膜有很好的柔性。

耐高温，可以持续承受 204℃以下温度，也可以短时承受 371℃高温。低热膨胀系数，当烟气被旁路隔过脱硫塔，在剧烈的再加热过程中，以及由于空气预热器失灵等造成的温度突变时，都不会受到损伤。

安装简便，发泡耐酸玻璃砖衬里安装不需要很强的专业性，当地人员在质量检验员的监督下即可完成，不需要专门培训。

玻璃砖内衬系统是由基层、玻璃砖、粘结料三部分构成，形成了一个完整的隔热、防腐体系，缺一不可，除了玻璃砖本身的防腐、隔热、低膨胀率等优点外，粘结料的防腐，耐久性是最为重要的，粘结料是连接基层及砖与砖之间的关键材料，它的老化，开裂，都将直接影响到整体内衬系统的防腐性能，但从厂方的产品介绍来看，关键的粘结料的性能和使用寿命，仍然是个谜，而且其报出的价格也不低，将近 2000 元/m2，这在非金属内衬中，这已经算是相当高了。由于发泡耐酸玻璃专用粘合材料是有机材料，其寿命保证期为～20 年。

2)发泡耐酸玻璃内衬构造

钢内筒由厚度为 10～18mm 的钢板卷成弧形后焊接而成。钢内筒采用耐硫酸露点腐蚀钢板，在钢内筒结构设计计算时，预留了 2mm 厚度的腐蚀富裕度。钢内筒内表面衬贴防腐发泡隔热玻璃砖，该砖具有耐腐蚀和保温的双重性能，使原来的烟囱内衬和保温层结构合二为一。钢内筒简图如下。

4) 发泡耐酸玻璃工程应用

根据资料介绍，从 1979 年开始，发泡耐酸玻璃砖内衬在国外已经应用于烟囱中。世界各地采用 Henkel 发泡耐酸玻璃砖内衬的工程亚太地区有 8 项，包括韩国、菲律宾、越南、中国台湾，目前国内没有业绩；北美地区有 45 项，主要位于美国本土和加拿大；欧洲有 21 项，位于荷兰、捷克、法国、德国、西班牙、英国等国家。国内除台湾地区已有应用；西北电力设计院设计的霍州电厂采用此方案；东北电力设计院设计的在建的利港电厂采用此方案。

2.3.5 耐蚀鳞片胶泥内衬

1) 鳞片胶泥成份及机械物理性能

根据树脂基体基材的不同，有二种鳞片胶泥：一种是环氧树脂鳞片胶泥，国内有兰州化机设计院提供；另一种乙烯基酯树脂鳞片胶泥（vinyl ester glass flake mortar），简称为 VEGF 鳞片胶泥，如上海富晨化工有限公司研发的 VEGF 高度耐蚀鳞片胶泥。相对而言，后者的综合性能包括耐腐蚀性能和耐温性能均优于前者，目前在日本、美国等国家均采用后者。

表 2.3.5.1 胶泥性能表

项　　目指　标项　　目指标

未硬化胶泥的外观各色糊状物延伸率 %0.7

拉伸强度Mpa30 耐磨耗 mg*(CS-17W-500g,1000 转)120

弯曲强度 Mpa55 线膨胀系 / ℃1.2×10-5

粘接强度 Mpa2.0(与钢板)2.5(与混凝土)水蒸气扩散速率 g/hr　cm21.5×10-6

*　该数据是 VEGF-1-M 的测试结果。

2)VEGF 鳞片胶泥的耐蚀机理

VEGF 鳞片胶泥具有优良的耐腐蚀性能，这主要是与胶泥的组成有关。一般情况下，防腐蚀层的防蚀失效主要是树脂基体受到腐蚀，基体树脂首先产生失重、变色等情况，之后引起材料的鼓泡、分层、剥离或开裂等情况，最后导致防腐蚀层失效，尤其后者，由于渗透等因素，加速了具有腐蚀性的化学介质渗入到防护层的内部。因此在选择具有良好耐腐蚀性能树脂基体的同时，应采取有效的措施来减弱、减缓腐蚀介质或水蒸汽的渗透作用。而 VEGF 鳞片胶泥比基体树脂能够提供更为有效的耐腐蚀性能，这主要是因为 VEGF 玻璃鳞片能够有效的防止腐蚀介质或水蒸汽的物理渗透。VEGF 鳞片胶泥具有较强的抗渗透性是与其的物料组成有关，一般情况下，VEGF 鳞片胶泥含有 10%-40%片径不等的玻璃鳞片，胶泥在施工完毕后，扁平型的玻璃鳞片在树脂连续相中呈平行重叠排列，从而形成致密的防渗层结构。如下图所示，腐蚀介质在固化后的胶泥中的渗透必须经过无数条曲折的途径，因此在一定厚度的耐腐蚀层中，腐蚀渗透的距离大大的延长，客观上相当于有效地增加了防腐蚀层的厚度。同时，在无玻璃鳞片增强情况下，树脂基体连续相中会存在大量的所谓的“缺陷”，如微孔、气泡及其它微缝等，这些缺陷的存在会加速或加快腐蚀介质的渗透过程，因为一旦介质渗透到这些缺陷中，渗透的速度在得到提高的同时，接触具有腐蚀性的介质的基体连续相的面积也随之会加大，从而更加速了物理渗透和化学腐蚀过程，而在 VEGF 玻璃鳞片胶泥中，由于平行排列的玻璃鳞片能够有效的分割基体树脂连续相中的这些“缺陷”，从而能够有效的抑制腐蚀介质的渗

透速度。

另外，除了具有腐蚀性的化学介质渗透之外，还存在着水蒸汽的渗透。通常情况下，高聚物材料的分子间距为 10?，而对于水蒸汽来说，只要高聚物材料的分子间距达到 3？，水蒸汽就能容易地透过高聚物的单分子层。若基础材料是碳钢时，水蒸汽由于渗透而达到碳钢表面后，并在氧气存在情况下，会由于电化学反应而生锈。VEGF 鳞片胶泥在固化后，由于乙烯基酯树脂的高交联密度可以有效的减弱水蒸汽和腐蚀性化学介质的渗透，并且如同上文中所述，VEGF 的独特结构更能达到防渗透或减渗的效果，经测定 VEGF 鳞片胶泥的水蒸汽扩散速率为 1.5×10-6g/hr.cm2。固化后的 VEGF 鳞片胶泥是一种复合材料，其中基体树脂起粘结作用，这个过程主要是：具有高度活性的不饱和双键的基体树脂通过交联，形成三维的体型结构，期间线性的高分子形成网状的结构会导致化学体积的收缩；同时，在这分子中的不饱和双键打开生成饱和单键时伴随着分子体积的变化，有数据表明：液态树脂中 C=C 基团分子体积在固化后会缩小 25%，这个树脂固化过程中分子自由体积的变化，也是造成不饱和树脂（包括乙烯基酯树脂）收缩的一个重要原因。而收缩会产生内应力，严重时会导致微裂纹等的出现，并且残余内应力的存在会微裂纹的扩展提供了潜在条件。因此在选择基体树脂时，应充分考虑树脂在具有良好的耐腐蚀性能的同时，又要求树脂具有较低的收缩率。由于加入了玻璃鳞片和其它填料等，VEGF 鳞片胶泥的收缩率会大幅度降低。并且由于 VEGF 鳞片胶泥的中玻璃鳞片的存在可以起到降低固化后的残余内应力的作用。这是因为：在树脂基体中不规则分布的玻璃鳞片是一具有较大比面积的分散体，在胶泥固化后，树脂由于固化收缩而产生的界面收缩内应力可以被玻璃鳞片所稀释或松弛，因此有效的减弱了内应力影响；同时，虽然玻璃鳞片在树脂基体连续相中是近乎平行排列，但还是存在一定的倾角，该倾角的存在可以有效的分割树脂基体连续相为几个小区域，使应力不能相互影响或传递。

VEGF 鳞片胶泥的特点

耐腐蚀性能好。由于 VEGF 鳞片胶泥采用的基体树脂是高性能的乙烯基酯树脂，该类型树脂具有较环氧树脂更好的耐腐蚀性能。

较低的渗透率。VEGF 鳞片胶泥的抗水蒸汽渗透率比普通环氧树脂涂料高 6-15 倍，比普通环氧 FRP 高 4 倍。

VEGF 鳞片胶泥具有较强的粘结强度，不仅指树脂基体与其中的玻璃鳞片之间的粘结强度较高，而且 VEGF 鳞片胶泥与混凝土或碳钢基材之间的粘结强度高，与钢板的粘结强度≥2.0Mpa，与混凝土的粘结强度≥2.5Mpa 。因此 VEGF 鳞片胶泥涂层不易产

生龟裂、分层或剥离，附着力和冲击强度较好，从而保证较好的耐蚀性。

耐温差（热冲击）性能较好。涂层中由于含有许多玻璃鳞片，因此消除了涂层与钢铁之间的线膨胀系数的差别，VEGF 鳞片胶泥涂层的线膨胀为 11.5×10-6/℃,钢铁的线膨胀系数为 12×10-6/℃，两者之间比较相近，使 VEGF 鳞片胶泥适合于温度交变的重腐蚀环境，如电力系统中的 FGD。在某些非正常情况下，FGD 中的某些阶段温度可以达到 200-250℃。我们进行了耐热冲击性能试验，即把涂有 VEGF 胶泥的钢板交变放置在 100℃沸水和 0℃的冰水各 1 小时，经 100 次交变试验后未能有异常现象出现。

耐磨性好。VEGF 鳞片胶泥在固化后的硬度较高，比普通醇酸漆高 2-3 倍，耐磨性较好，如 VEGF 鳞片胶泥的耐磨性为 120mg （CS-17W-500 g 情况下），而受外机械损伤时，VEGF 鳞片胶泥的破坏是局部的，其扩散趋势小，易于修复。

由于 VEGF 鳞片胶泥采用的基体树脂是有机材料，其寿命保证期为 5～10 年。

3) 耐蚀鳞片胶泥内衬构造

钢内筒由厚度为 10～18mm 的钢板卷成弧形后焊接而成。钢内筒采用耐硫酸露点腐蚀钢板，在钢内筒结构设计计算时，预留 2mm 厚度的腐蚀富裕度。钢内筒内表面涂刷 VEGF 鳞片胶泥。

在碳钢基层上使用：

①先将表面除油去污，之后再进行除锈，除锈等级应满足不低于 Sa2.0 或 St3 标准。在锈面清理干洁后，用 VEGF 树脂打底，待干后施工。

②用手工泥刀刮镘成 1-2mm(每道)厚的 VEGF 胶泥层，数小时后即硬化，再按设计要求施工至规定厚度。一般在每涂 1mm 厚度时进行检测，以确认涂层是否有针孔及其它瑕疵。

③在弯角或形状突变处适当增加厚度，或同 FRP 复合使用。

④用 VEGF 树脂罩面一至二道。

⑤VEGF 鳞片胶泥涂层质量控制。VEGF 鳞片胶泥涂层的质量好坏直接影响其耐腐蚀性能和使用寿命，因此应对 VEGF 鳞片胶泥涂层的质量加以严格控制。一般情况下，涂层的最终检测项目主要有：外观缺陷、硬度、针孔测试、厚度测试、锤击检查等。

表 2.3.5.2　胶泥用量表

品 种 规 格用　　量　(KG/M2)

底涂(每道)胶泥层　　(1mm 厚)面涂(每道)

金属面 VEGF-1-M0.20～0.251.4～1.60.25

VEGF-2-M0.15～0.201.3～1.50.20 字串 9

4) 耐蚀鳞片胶泥内衬工程应用

由于 VEGF 鳞片胶泥具有抗渗性好、施工难度小、易修补物理失效少和造价适中等的优点。因此，VEGF 鳞片胶泥在电力、冶金和化工等行业中广泛使用，尤其是电力系统中的烟气脱硫（FGD）系统装置，如吸收塔、氧化塔、进料管，见下表。

表 2.3.5.3 VEGF 鳞片胶泥在湿态气体 FGD 中的应用

装 置 名 称腐 蚀 条 件防 腐 蚀 处 理 规 范

进料管 SO2 气体等，150℃或低于 150℃VEGF 衬里，FRP

SO2 气体等，150℃-200℃高温涂料

冷却塔 SO2 气体等，≤150℃VEGF 衬里

快速冷却塔 SO2 气体等，150 - 200℃VEGF - 耐火砖

SO2 气体等，200 - 300℃VEGF - 耐火砖

SO2 气体等，500 - 700℃VEGF - 耐火砖

循环槽 H2SO3，H2SO4 雾等，60 - 90℃VEGF 衬里，FRP

中间体输送管 SO2 气体，H2SO4 雾等，60 - 80℃VEGF 衬里，FRP

吸收塔 pH = 3 - 12，60 - 80℃VEGF 衬里，橡胶衬里

pH = 3 - 12，150℃VEGF 衬里

pH = 3 - 12，250℃VEGF 衬里 - 耐火砖

循环塔 pH = 4 - 14，60 - 80℃VEGF 衬里，橡胶衬里，FRP

出料管 SO2，H2SO4 雾，60 - 70℃VEGF 衬里，FRP

酸雾分离器 SO2，H2SO4 雾，60 - 70℃VEGF 衬里，FRP

浓缩器 pH = 3 - 12，60 - 70℃VEGF 衬里，橡胶衬里，FRP 字串 6

氧化塔 pH = 3 - 12，60 - 80℃VEGF 衬里，VEGF-FRP

管道橡胶衬里，FRP

输送管≤100℃VEGF 衬里，FRP

100 - 150℃VEGF 衬里，FRP

化学贮罐室温 - 60℃VEGF 衬里，橡胶衬里，FRP

江西贵溪冶炼厂的脱硫烟道：代替原来从日本进口的鳞片胶泥材料使用，经多年使用后未能有异常情况出现。山东某工程公司的 FGD 设备：采用高温型 VEGF 鳞片胶泥材料，制作长期使用温度达 170℃的 FGD 装置，根据运作情况表明性能良好。

脱硫设备上应用较多，国外电厂烟囱早期有应用，现已较少采用。国内电厂烟囱尚无应用。

2.3.6 防腐涂料层+耐酸浇筑料

1)防腐涂料层、耐酸浇筑料

钢内筒内表面先涂刷防腐涂料层再加浇耐酸浇筑料，耐酸浇筑料层内一般配置与钢内筒相连结的钢丝网。防腐涂料层为 OM Ⅰ型防腐涂料。耐酸耐热浇筑料一般有耐酸耐热混凝土、钾水玻璃耐酸砂浆层

2) 防腐涂料层、耐酸浇筑料耐腐蚀性能

此方案，防腐衬料的施工条件较差，质量控制较难。而且设计对防腐衬料要求较高，不能产生细微的裂缝，以免烟气渗入对烟囱钢内筒产生腐蚀。

多管式钢内筒烟囱，钢内筒内浇筑防腐衬料方案投资在多管式钢内筒烟囱方案中最低。

由于烟气不可避免对防腐衬料产生腐蚀，此类烟囱需定期对钢内筒进行检修和维护。根据日本国的经验，一般十几年就需对防腐衬料重新修补施工。

3) 防腐涂料层、耐酸浇筑料内衬构造

钢内筒由厚度为 10～18mm 的钢板卷成弧形后焊接而成。钢内筒外面沿高度每 6m 左右间隔设置一个钢性环（T 型钢或加劲角钢）。在检修平台和吊装平台标高处设有钢内筒稳定装置，以保证钢内筒的横向整体稳定。钢内筒采用耐硫酸露点腐蚀钢板，在钢内筒结构设计计算时，预留 2mm 厚度的腐蚀富裕度。

钢内筒内表面浇筑一层厚度为 60mm 的耐腐蚀混凝土防腐层。混凝土防腐层的胶结料为钾硅砂浆，混凝土防腐层内配有钢筋网，并与钢内筒有锚筋联结。钢内筒简图如下。

4) 工程应用

国内北仑港电厂#1、#2 (600MW)机组（未脱硫）采用耐酸耐热料、韩城第二发电厂新建 600MW 机组（脱硫）采用钾水玻璃耐酸砂浆层内贴陶瓷耐酸板。这种耐腐做法的烟囱，日本国在有塔架及无塔架式钢烟囱上应用较多。