築龍網
zhulong.com

铁道客运专线混凝土桥面聚脲防护涂料的性能分析和评价

摘要：对铁道客运专线混凝土桥面聚脲防护涂料性能分析的基础上，提出了对客运专线聚脲防护涂料技术条件的建议，详细介绍聚脲材料综合性能的加权评价法以及聚脲配套材料及施工条件。

关键词：客运专线；混凝土桥面；喷涂聚脲弹性体

Analysis and evaluation on performances of polyurea coating for concrete bridge surface for passenger railway line

我国高速铁路的高速发展，京沪高速铁路开工及全线采用聚脲防水的喜讯，掀起了高速铁路的聚脲热。京沪高速铁路全线采用聚脲防护面积1000多万 m^2，需用聚脲2亿t。京沪高速的最高运行速度达380 km/h，是目前世界上技术水平最高、工程量最大的聚脲防护工程。如何保证质量令人担忧。设计是前提，施工是关键，监理和管理是保证。当前京沪高速铁路聚脲防护的暂行技术条件即将出台，工程招标在即，希望“暂行技术条件”规定合理的防护层结构设计，合理的选材和合理的施工方案，这是保证工程质量的第一步。

1 对客运专线混凝土桥面聚脲防护层行业标准的几点建议

自2008年年底以来，笔者多次与铁道部的科研设计单位技术人员进行交流，提出了个人的建议，现做些修改以供参考。

1.1 聚脲的通用物理力学性能

聚脲的通用物理力学性能见表1。

表1 聚脲的通用物理力学性能

序号	项目		国家标准技术指标		客运专线技术指标		建议京津城铁技术指标	广深客运专线技术指标
			Ⅰ型	Ⅱ型	Ⅰ型	Ⅱ型		
1	拉伸强度/MPa，≥		10	16	12	16	10	12
2	断裂伸长率/%，≥		300	450	350	500	250	350
3	撕裂强度/(N/mm)，≥		40	50	50	65	45	50
4	粘结强度/MPa	干基材，≥	2.0或底材破坏	2.5或底材破坏	2.5或底材破坏	3.0或底材破坏	2.0	
		湿基材，≥	-	-	2.0或底材破坏	2.5或底材破坏		
5	低温弯折性/℃，≤		-35	-40	-35	-40		-35
6	不透水性(0.4 MPa，2 h)		不透水	不透水	不透水	不透水	不透水	不透水
7	固体含量/%，≥		96	98	96	98	98	
8	凝胶时间/s，≤		45	45	45	45	实干20 h	
9	表干时间/s，≤		120	120	120	120	≤600	
10	加热伸缩率/%，≤		1.0	1.0	1.0	1.0		1.0
11	吸水率/%，≤		5.0	5.0	5.0	5.0		
12	硬度/邵氏A，≥		70	80	85	90	90	
13	耐磨性/mg，≤(750 g/500 r)		40	30	15	10		
14	耐冲击/(kg•cm)，≥		0.6	1.0	1.0	1.5	0.5	
15	推荐涂层厚度/mm，≥				2.5	2.0	2.0	1~2

1.2 聚脲的通用物理力学性能说明

(1)表1中"客运专线技术指标"是笔者提出建议的指标。

(2)客运专线桥面承受的是高速、重载、交变负荷，聚脲防护层的破坏是疲劳失效，对聚脲防水材料的性能、可靠性及耐久性要求较高，故拉伸强度、断裂伸长率、撕裂强度、粘结强度、硬度、耐磨性及耐冲击性等7项主要性能指标的要求高于聚脲国家标准，其余指标与国家标准相同。7项指标中断裂伸长率最重要，因材料的柔韧性好，抗疲劳性就好。

(3)高速铁路要求聚脲涂层的耐磨性、耐冲击性、耐碾压性和耐穿刺性优异，而高的抗拉强度、撕裂强度和硬度，特别是又有高的断裂伸长率是实现上述性能优异的条件。Ⅱ型板(博各板)和聚脲防护层是在重载、振动和小幅水平振荡状态下的磨损，Ⅱ型板的设计寿命是60年，故只有提高聚脲抗拉强度、撕裂强度、硬度、断裂伸长率，从而大幅度提高耐磨性，使涂层的耐磨损寿命也达60年，才能与Ⅱ型板的寿命相匹配，使高铁的维修费用和间接损失降至最低。

(4)高铁桥面的高速重载、振动负荷，加剧了桥面混凝土裂逢的扩展，故要求聚脲涂层有优良的抗渗性、抗混凝土桥面开裂性及对桥面裂缝极佳的追随性。聚脲抗拉强度高、断裂伸长率大、粘接强度高、整体无缝，是真正的"皮肤式"防水。

(5)客运专线Ⅰ型聚脲适用于一般客运专线的桥面防护，Ⅱ型聚脲适用于运行速度更高、使用条件恶劣、要求使用寿命更长的高速铁路无碴桥面，如京沪高铁的桥面防护。

(6)拉伸强度、断裂伸长率和粘结强度是最关键的3项指标，这3项指标可以作为检验聚脲性能优劣的尺度，可在现场抽样检验中抽检这3项指标，达不到要求的为不合格，不得在工程中使用。

(7)聚脲的抗拉强度和涂层厚度的乘积决定涂层的抗拉能力。故防护涂层以涂层的抗拉能力代替涂层厚度更科学。

若涂层的厚度相同(如2 mm)，则抗拉强度高的材料的抗拉能力强。如客运专线Ⅱ型材料的抗拉强度为16 MPa，Ⅰ型为12 MPa，京津城铁的为10 MPa，则Ⅱ型的抗拉能力为：16×2=32，Ⅰ型的抗拉能力为：12×2=24，京津城铁的抗拉能力为：10×2=20，则Ⅱ型的抗拉能力远高于Ⅰ型和京津城铁。

若要求涂层的抗拉能力相同，则抗拉强度高的材料可采用较薄的涂层。如客运专线Ⅱ型的涂层厚度为2 mm，其抗拉能力为：16×2=32；Ⅰ型的厚度为2.5 mm时，其抗拉能力为：2.5×12=30；京津城铁的厚度为3 mm时，其抗拉能力为3×10=30；即2 mm厚Ⅱ型聚脲略大于2.5 mm厚Ⅰ型和3 mm京津城铁的抗拉能力。

还应特别指出的是，2 mm的Ⅱ型聚脲比2.5 mm的Ⅰ型聚脲和3 mm的京津城铁聚脲有更好的综合物理性能。因为Ⅱ型的断裂伸长率、粘结强度、耐磨、耐冲击等都高于Ⅰ型和京津城铁聚脲，特别是断裂伸长率是混凝土基材抗开裂最重要的指标。故客运专线Ⅰ型的推荐涂层厚度为2.5 mm，Ⅱ型为2 mm，京津城铁为3 mm。

(8)京津城铁和客运专线Ⅰ型聚脲单位质量的价格低于Ⅱ型聚脲，但在相同防护性能条件下，Ⅱ型聚脲单位面积的造价却低于京津城铁和Ⅰ型聚脲，即Ⅱ型聚脲有较好的性价比。因为Ⅱ型聚脲的使用性能、可靠性和耐久性远高于Ⅰ型和京津城铁，而单位质量的价格只比Ⅰ型和京津城铁略高一点。要改变崇尚低质量低价格，仅以价格低论输赢的恶习，战胜造假的歪风，走出恶性竞争的怪圈。

1.3 聚脲的耐久性能(见表2)

表2 聚脲的耐久性能技术指标

序号	项目		国家标准技术指标		客运专线技术指标		京津城铁指标	广深客运专线指标
			Ⅰ型	Ⅱ型	Ⅰ型	Ⅱ型		
1	定伸时老化	加热老化	无裂纹，无变形		无裂纹，无变形			
		人工气候老化	无裂纹，无变形		无裂纹，无变形			
2	热处理	拉伸强度保持率/%	80~150		80~150		≥80	≥80
		断裂伸长率/%，≥	250	400	300	450	≥80①	350
		低温弯折性/℃，≤	-30	-35	-30	-35		-35
3	碱处理	拉伸强度保持率/%	80~150		80~150		≥70	≥70
		断裂伸长率/%，≥	250	400	300	450	≥70①	350
		低温弯折性/℃，≤	-30	-35	-30	-35		-35
4	酸处理	拉伸强度保持率/%	80~150		80~150		≥80	
		断裂伸长率/%，≥	250	400	300	450	≥80①	
		低温弯折性/℃，≤	-30	-35	-30	-35		
5	盐处理	拉伸强度保持率/%	80~150		80~150		≥80	
		断裂伸长率/%，≥	250	400	300	450	≥80①	
		低温弯折性/℃，≤	-30	-35	-30	-35		
6	人工气候老化	拉伸强度保持率/%	80~150					
		断裂伸长率/%，≥	250	400				
		低温弯折性/℃，≤	-30	-35				
7	紫外线老化(3000 h)	拉伸强度保持率/%			≥80		≥80②	
		断裂伸长率/%，≥			≥80		≥80②	
		低温弯折性/℃，≤			-30	-35		

注：①保持率；②250 h。

1.4 聚脲的耐久性能说明

(1)国家标准人工气候老化的非外露型：试验累计辐照能量为1500 MJ(约合720 h)；人工气候老化的外露型：试验累计辐照能量为3150 MJ(约合1512 h)。

(2)高速铁路聚脲防护层与Ⅱ型板配合使用，不加保护层，是暴露型的，故耐紫外线老化是关键指标，需耐3000 h紫外线老化合格方可使用。

芳香族聚脲因芳香族异氰酸酯的苯环暴露于紫外线下，表面层会失光和变色，但这种作用只是对聚脲表面层起作用，优质聚脲材料从整体上看性能的保持性较好。如BASF公司优质半聚脲不但拉伸强度高，断裂伸长率高，经过1512 h紫外线老化后拉伸强度保持率达109%，断裂伸长保持率106%，-35 ℃低温弯折无裂纹；即拉伸强度和断裂伸长率比未经紫外线老化前还高，其性能不但未劣化，反而有所改善。从上述检测结果看到了优质半聚脲直接用于高速铁路防护的可能性，如能实现此方案，则是最经济和施工最快捷的选择。

建议聚脲颜色采用黑色、深绿或褐色，以减少聚脲涂层黄变对桥面外观的影响。京沪高铁对抗黄变要求高，可增加0.1 mm的丙烯酸脂肪族聚氨酯面漆，以改善表面装饰性。

(3)鉴于客运专线聚脲的抗拉强度、断裂伸长率及粘接强度指标比国标相应指标已经提高，故其耐久性比国标聚脲的耐久性要好。

(4)抗拉强度和断裂伸长率高的聚脲材料其耐久性就好，Ⅱ型聚脲的耐久性、使用寿命比Ⅰ型或京津城铁聚脲要好。

(5)高速铁路的使用寿命是100年，与此相匹配就要求聚脲涂层为高性能、高可靠性、高耐久性。高速铁路是难维修、甚至不可维修的，间接损失非常惊人，故提高高速铁路的耐久性至关重要。

聚脲老化处理(热、酸、碱、盐、紫外线)后，拉伸强度将增大，断裂延伸率将减小，老化失效为脆性失效，故高断裂伸长率对保证涂层耐久性极为重要。高断裂伸长率的材料老化处理后涂层的劣化程度小。以聚脲国标样品检验结果为例，国标Ⅰ型(低档聚脲)10个样品，其中有8个样品耐久性不合格；而国标Ⅱ型(高档聚脲)的3个样品，耐久性全部合格。另外，断裂伸长率高的材料，即使随使用年限的增长断裂伸长率有所降低，但仍有较大富裕度，安全系数较大。如客运专线Ⅱ型的断裂伸长率为500%，紫外线老化处理的保持率为80%，仍有400%的断裂伸长率；京津城铁聚脲断裂伸长率为250%，老化处理后只有200%，故客运专线Ⅱ型的耐久性好。

1.5 聚脲的使用性能

建议铁道科研设计院做如下4项前瞻性试验，通过模拟试验验证技术指标的可行性。

(1)Ⅱ型板(博各板)与聚脲涂层做耐磨性模拟实验，保证使用寿命60年。

(2)断梁裂缝追随性、振动疲劳试验，确保使用的安全可靠性。

(3)低温及冻融循环条件下的粘结强度试验。

(4)3000 h以上紫外线老化试验。

1.6 聚脲防护层的主要技术指标

(1)抗拉强度≥16 MPa；

(2)断裂伸长率≥500%；

(3)粘接强度≥3 MPa或底材破坏；

(4)耐磨性≤10 mg；

(5)耐紫外线老化(3000 h)：拉伸强度保持率≥80%、断裂伸长保持率≥80%、低温弯折性≤-35 ℃无裂纹，其中断裂伸长率指标最重要。

1.7 建议

笔者建议在聚脲类材料中淡化聚脲和半聚脲的区别，性能的高低应以理化性能和耐久性能指标的高低来区分，而不是聚脲和半聚脲之分，且勿认为聚脲(笔者不赞成纯聚脲这个名词)一定高于半聚脲。“暂行技术条件”中聚脲的技术指标低于半聚脲就是有力证明。断裂伸长率526%，紫外线老化后断裂伸长保持率106%的优质半聚脲的耐久性，就不比断裂伸长率400%，紫外线老化后断裂伸长保持率80%的聚脲材料的差。聚脲和半聚脲都是聚脲大家族的一员，各有长处和不足，我们要扬长避短，使其更好为我国高速铁路事业效力。半聚脲以高的性能价格比及高的断裂伸长率在我国得到更广泛的应用，占领了90%以上市场份额，京津城铁、奥运场馆都是用半聚脲，这是不争的事实。

2 聚脲材料性能的加权评价法

为了用数据综合评价聚脲材料的综合理化性能的高低，我们推出了6项主要性能指标加权评价法，作为京沪高铁评标中判断聚脲材料优劣的准则。

2.1 聚脲6项性能指标加权评价标准(见表3)

2.2 聚脲6项性能指标加权评价标准说明

(1)表3中断裂伸长率的加权系数为2，拉伸强度的加权系数为1.5，粘结强度的加权系数为1.5，其余3项的加权系数为1。将各项性能指标得分乘以加权系数为该项的加权得分。

(2)将某型号聚脲的6项性能指标的加权得分连加，其和分数高者综合性能优于其和分数低者。

(3)耐久性指标具有一项否决权，耐久性指标不合格者为不合格产品，不得参与加权评价，不得在客运专线上使用。

2.3 客运专线桥梁和隧道防护材料性能加权评价比较(见表4)

表 3　聚脲 6 项性能指标加权评价

项目级别	得分	断裂伸长率/%		拉伸强度/MPa		粘结强度/MPa		撕裂强度/(N/mm)		耐磨性/mg		耐冲击/(kg•m)	
		指标	加权得分	指标	加权得分	指标	加权得分	指标	加权得分	指标	加权得分	指标	加权得分
1	5	≥500	10	≥20	7.5	≥5	7.5	≥80	5	≤5	5	≥1.8	5
2	4	400~<500	8	16~<20	6.0	3.8~<5	6.0	65~<80	4	>5~15	4	1.2~<1.8	4
3	3	280~<400	6	12~<16	4.5	2.5~<3.8	4.5	50~<65	3	>15~30	3	0.7~<1.2	3
4	2	150~<280	4	8~<12	3.0	1.3~<2.5	3.0	35~<50	2	>30~50	2	0.3~<0.7	2
5	1	<150	2	<8	1.5	<1.3	1.5	<35	1	≥50	1	<0.3	1

表 4　客运专线桥梁和隧道防护材料性能加权评价比较

聚脲型号	断裂伸长率/%		拉伸强度/MPa		粘结强度/MPa		撕裂强度/(N/mm)		耐磨性/mg		耐冲击/(kg•m)		总计加权得分	
	指标	加权得分	指标	加权得分	指标	加权得分	指标	加权得分	指标	加权得分	指标	加权得分	6 项总计	5 项总计
国标Ⅰ型	300	6	10	3.0	2.0	3.0	40	2	40	2	0.6	2	18.0	16.0
国标Ⅱ型	450	8	16	6.0	2.5	3.9	50	3	30	3	1.0	3	27.5	24.5
客运专线Ⅰ型	350	6	12	4.5	3.0	4.5	50	3	15	4	1.0	3	25.0	21.0
客运专线Ⅱ型	500	10	16	6.0	3.0	4.5	65	4	10	4	1.5	4	32.5	28.5
京津城铁用聚脲	250	4	10	3.0	2.0	3.0	45	2			0.5	2		14.0
BASF 聚脲Ⅰ型	520	10	17	6.0	4.0	6.0	65	4	5	5	1.5	4	35.0	30.0
BASF 聚脲Ⅱ型	500	10	20	7.5	4.0	6.0	75	4	3	5	1.9	5	37.5	32.5

2.4　客运专线桥梁和隧道防护材料性能加权评价比较表说明

(1)按 6 项指标加权总计得分排序:BASF 聚脲Ⅱ型(37.5 分)>BASF 聚脲Ⅰ型(35.0 分)>客运专线Ⅱ型(32.5 分)>国标Ⅱ型(27.5 分)>客运专线Ⅰ型(25.0 分)>国标Ⅰ型(18.0 分)。

(2)按 5 项指标加权总计得分排序:BASF 聚脲Ⅱ型(32.5 分)>BASF 聚脲Ⅰ型(30.0 分)>客运专线Ⅱ型(28.5)>国标Ⅱ型(24.5 分)>客运专线Ⅰ型(21.0 分)>国标Ⅰ型(16.0 分)>京津城铁聚脲(14.0 分)。京津城铁用聚脲的综合性能只有客运专线Ⅱ型综合性能加权分值的 1/2。

3　客运专线桥面聚脲防护材料的配套材料及施工环境条件

3.1　配套材料

(1)基层处理剂性能指标(试验方法 GB/T 16777—2008)

表干时间≤2 h,干燥基层用粘接强度≥3.0 MPa,潮湿基层用粘接强度≥2.5 MPa。

(2)层间粘合剂性能指标(试验方法 GB/T 16777—2008)

表干时间≤2 h,涂层间剥离强度≥6.0 N/mm。

(3)丙烯酸脂肪族聚氨酯面涂性能指标(见表 5)

表 5　丙烯酸脂肪族聚氨酯面涂性能指标

序号	项　目		性能指标	试验方法
1	固体含量/%,≥		40	GB/T 1725
2	细度/μm,≤		20	GB/T 6753.1
3	干燥时间/h	表干,≤	1	GB/T 1728
		实干,≤	24	
4	柔韧性(直径 10 mm 轴弯曲,-35 ℃)		无开裂,无剥落	GB/T 6742
5	附着力(与聚脲涂层)		1 级	
6	耐冲击性/(kg•cm),≥		50	GB/T 173
7	耐酸性(5%H_2SO_4,240 h) 耐碱性(5%NaOH,240 h) 耐盐性(5%NaCl,240 h) 耐油性(2 号柴油,240 h)		无气泡,无脱落,无起皱,无变色	GB/T 9274
8	耐水性(240 h)		无气泡,无脱落,无起皱	GB/T 1733
9	耐紫外线老化(1500 h)		无明显变色,无粉化,无裂纹	GB/T 16777
10	推荐干膜厚度/mm		0.1	

3.2　配套材料说明

(1)上述配套材料的表干时间和实干时间是指常温(20 ℃)时的指标,此外还要求配套材料在 5 ℃以上能凝胶,在 10 ℃

以上能正常固化。

(2)基层处理剂的粘接强度包括处理剂和混凝土基层及后续聚脲涂层两者的粘接强度，层间粘接剂的剥离强度是与新旧聚脲涂层的剥离强度，丙烯酸脂肪族聚氨酯面漆的附着力是面漆和聚脲涂层的附着力。

(3)紫外线保护面漆的3种可供选择方案

A方案：满足客运专线Ⅱ型技术指标要求的优质芳香族聚脲类涂料(1.9 mm厚)+丙烯酸脂肪族聚氨酯面漆(涂层厚0.1 mm)。

此方案的立足点是：优质的客运专线Ⅱ型聚脲有优异的耐紫外线老化性能，经过3000 h紫外线老化处理后断裂伸长率的保持率大于80%，即断裂伸长率仍大于400%，柔韧性良好，不会出现粉化和开裂。尽管出现了表面的失光和黄变，但只限于聚脲的表层，涂层内部的性能基本保持稳定。表面丙烯酸脂肪族聚氨酯面漆起到抗黄变作用，可改善涂层表观质量。国内产品可以满足表5所列面漆性能指标，价格适中，不需从国外进口。

此方案需采用2步喷涂施工法，即先对轨道板底座安装位置进行喷涂；在无碴轨道施工完毕后，再对中间暴露部位进行聚脲喷涂，并涂装丙烯酸脂肪族聚氨酯面漆，故不会造成无碴轨道施工过程中运梁车、施工设备、机具、材料和人员对防护层的破坏。但两步法的施工效率较低。

B方案：芳香族客运专线Ⅱ型聚脲涂料(涂层厚1.8 mm)+脂肪族聚脲面漆(涂层厚0.2 mm)。脂肪族面漆有优异的保色保光性能，抗失光、抗黄变，同时其主要性能指标和Ⅱ型聚脲相近，和芳香族聚脲主层匹配性好，附着力强。此方案性能最好，缺点是脂肪族聚脲价格昂贵，0.2 mm厚面漆将增加成本40元/m^2左右。

C方案：《京沪高速铁路桥梁混凝土桥面喷涂聚脲防水层暂行技术条件(报批稿)》2009年4月提出的方案，它的可操作性差，有下列3项致命弱点。

①所列脂肪族聚氨酯面漆的主要物理性能很低，和聚脲主料性能相差很远，难以承受重载车轮的碾压、施工中的磨损冲击和穿刺。拉伸强度≥4 MPa，只有16 MPa的25%，断裂伸长率200%，只有450%的44%，硬度指标未列出，估计在邵氏A80以下，而且所列指标有待实践的检验，技术上尚不成熟，不能采用一步喷涂法施工，其耐久性指标也不高。

②所列性能要求及涂层厚度远高于一般脂肪族聚氨酯面漆，现有国产原料难以满足；国外高性能产品价格较贵，预计0.2 mm厚面漆的成本将接近脂肪族聚脲，已经没有价格优势。

③脂肪族面漆为慢固化体系，4 h表干，24 h实干，施工1遍需要1 d时间，又是薄涂层，每遍约0.075 mm，0.2 mm厚涂层需2~3遍，故聚脲快速施工的优势将完全丧失，2步法使施工周期更长。而且面漆受环境条件制约很大，低温、大风、雨、雪天会使施工过程中的面漆质量难以保证。

综上所述，笔者认为A方案有较好的性价比，技术成熟，也很实用；B方案有质量和施工方面的优势；C方案在质量、价格和施工三方面均无优势可言。

3.3 施工环境条件

聚脲类涂料施工作业的环境温度及基面温度应高于露点温度3℃或以上，相对湿度应小于85%，不宜在风速大于4级时露天作业，严禁在雨天、雪天、大雾天作业。如因工程紧迫不得不施工时，应采取有效措施确保工程质量。基材含水率高于7%时，应采取潮湿基面专用施工的底漆，但基材表面不得有明水。

对于上述施工条件半聚脲和聚脲都应遵守。

有一种说法，“聚脲快速反应，可在水面和冰面快速固化，不受环境温度和湿度的影响，施工条件几乎不受限制。”这是对聚脲施工的误导。聚脲固然可在水面和冰面上固化成膜，但不可能在有明水和有冰的基材上做出合格的聚脲工程。理由有3点：

(1)在0℃以下温度，聚脲配套底漆不能正常固化，在有明水的基面上底漆不能封闭混凝土基面的空洞和裂缝，也不能形成粘接力。

(2)聚脲在0℃以下的环境和基材温度下快速固化，其后固化温度很低，涂层的性能(如抗拉强度及断裂伸长率等)远低于正常施工条件下的性能。

(3)在0℃以下基材上固化，粘接力形成很慢，而收缩力很大，线性收缩率可超过5%，当收缩力超过粘接力时，就会形成鼓泡和大面积脱层。在有明水的基材上聚脲也同样不能形成粘接力。

综上所述，聚脲弹性体涂料施工时，第一，基材温度必须高于露点3℃或以上；第二，基材上不得有明水。经验证明，许多聚脲工程的质量问题是不遵守此2条准则造成的，希望京沪高铁聚脲防护施工中引以为戒。

築龍網
zhulong.com