

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.02.020

聚脲弹性体与不同底材的粘接性能

冯永强^{1,2}, 陈强³, 李海柱^{1,2}, 张君^{1,2}, 孙有利^{1,2}, 仪海霞^{1,2}, 孙佳春³

(1. 济南北方泰和新材料有限公司, 济南 250033; 2. 济南市胶粘剂工程技术研究中心, 济南 250033; 3. 山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要:从聚脲弹性体粘接机理出发,探讨了采用不同种类的底漆和不同的底材处理方式对聚脲弹性体与不同底材粘接性能的影响。结果表明,对钢、铝底材经过喷砂、涂底漆工艺处理后,与未涂底漆时对比,聚脲弹性体对金属底材的附着力显著提升,采用单组分聚氨酯底漆时,聚脲弹性体对钢的附着力最好,可达到 15.2 MPa。在混凝土底材表面干燥的条件下涂底漆,聚脲弹性体与混凝土之间具有较高的粘结强度。橡胶经过表面氯化处理和底漆处理后,聚脲弹性体对它的剥离强度显著提高。环氧树脂玻璃钢、乙烯基树脂玻璃钢无底漆处理时,表层容易被聚脲弹性体剥落,涂底漆后,表层不会被剥落,聚脲弹性体与玻璃钢的剥离强度得到明显提升。

关键词:聚脲弹性体;粘接机理;涂层附着力;底漆;底材

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)02-0133-06

Bonding Properties of Polyurea Elastomers to Different Substrates

Feng Yongqiang^{1,2}, Chen Qiang³, Li Haizhu^{1,2}, Zhang Jun^{1,2}, Sun Youli^{1,2}, Yi Haixia^{1,2}, Sun Jiachun³

(1. Jinan North Taihe New Material Co., Ltd., Jinan 250033, China; 2. Jinan Adhesive Engineering Technology Research Center, Jinan 250033, China; 3. Shandong Institute of Nonmetallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract : Based on the bonding mechanism of polyurea elastomer, the effects of different kinds of primer and different substrate treatments on the bonding properties of polyurea elastomer and different substrates were discussed. The results show that the adhesion of polyurea elastomer to steel or aluminum substrates after sand blasting and primer coating is significantly improved compared with that without primer, and the adhesion of polyurea elastomer to steel is the best with using one-component polyurethane primer, which can reach 15.2 MPa. When primer is coated on the dry surface of concrete substrate, the polyurea elastomer has a high bond strength with the concrete. After chlorination and primer treatment of rubber, the peeling strength of polyurea elastomer to rubber is significantly improved. When epoxy resin based fiber glass-reinforced plastics (FRP) and vinyl resin based FRP are treated without primer, the surface layer is easy to be peeled off by polyurea elastomer. After primer coating treatment, the surface layer is not peeled off, and the peeling strength of polyurea elastomer to FRP is also significantly improved.

Keywords : polyurea elastomer ; bonding mechanism ; coating adhesion ; primer ; substrate

喷涂聚脲弹性体技术是一种新型无溶剂、环保的绿色喷涂施工技术,其应用范围广泛,是继高固体份涂料、水性涂料、光固化涂料、粉末涂料等技术之后又一种新的无污染的涂料技术,近十几年来发展迅速。聚脲弹性体是由二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI)半预聚体、端氨基聚醚、胺扩链剂、色浆、功能填料等原料,经专用设备现场喷涂而成。该涂料固化快,20 s内凝胶,立面连续喷涂不流挂;固化后涂层富有弹性、吸能,同时具有拉伸强度高、伸长率

大、抗冲击性和耐磨性能优异等优点,另外其耐候性、耐低温性好且抗化学腐蚀,是一种集橡胶与涂料等优点于一身、集防腐与防护于一体的高新技术材料^[1]。聚脲弹性体在化工防腐、管道、建筑、舰船、水利、交通、机械、矿山耐磨,以及军事领域都具有广阔的应用前景。

由于喷涂聚脲弹性体具有优良的力学性能和绿色、快捷的施工工艺,许多文献对喷涂聚脲弹性体在防爆抗冲击^[2-4]、防水^[5-6]、防腐^[7-9]、耐磨^[10]、快速

通信作者: 李海柱,高级工程师,主要从事聚氨酯/脲、光固化胶粘剂的研究

收稿日期: 2022-12-20

引用格式: 冯永强,陈强,李海柱,等. 聚脲弹性体与不同底材的粘接性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(2): 133-138.

Feng Yongqiang, Chen Qiang, Li Haizhu, et al. Bonding properties of polyurea elastomers to different substrates[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2): 133-138.

修复^[1]等领域的应用进行了深入研究。戴平仁等^[2]运用数值模拟研究了聚脲弹性体对靶板抗爆性能的影响,发现当聚脲弹性体与钢板形成“三明治”夹层靶板结构时,靶板的抗爆性能最好,而且中间层聚脲弹性体的厚度越大,靶板的背压越小。王小伟等^[3]应用LS-DYNA有限元软件,研究了聚脲弹性体复合夹层结构的防爆性能,分别在总厚度固定和总质量固定的条件下,得出了钢板/聚脲弹性体/钢板结构最佳的三层厚度比。黄微波等^[4]综述了喷涂聚脲弹性体抗爆抗冲击研究进展,指出了目前研究存在的问题以及今后的发展方向。王玉杰^[5]研究了喷涂聚脲弹性体作为防水材料在高铁桥面防水涂层中的应用,并针对混凝土底材施工进行了底漆优化。张燕^[7]介绍了喷涂聚脲弹性体在军事永久工程中对钢结构及钢筋混凝土防腐的应用和质量控制措施。上述所有的应用都是喷涂聚脲弹性体附着在底材上发挥作用的,因此,喷涂聚脲弹性体与底材的粘接性能显得尤为重要。笔者通过实验研究初步探讨了采用不同种类的底漆和不同的底材处理方式对聚脲弹性体与底材粘接性能的影响。研究表明,经过特殊的底材处理和严格的施工工艺处理,聚脲弹性体对钢、铝、混凝土、橡胶、复合材料等多种底材都能具有良好的粘接性能。

1 实验部分

1.1 主要原材料

聚脲弹性体涂料:WS T-5043,济南北方泰和新材料有限公司;

底漆:WS D110 [单组分聚氨酯(PUR)],济南北方泰和新材料有限公司;

底漆:Qtech-113 (双组分PUR),青岛沙木新材料有限公司;

底漆:WS D111 (双组分环氧),济南北方泰和新材料有限公司;

单组分PUR:WS T80,济南北方泰和新材料有限公司;

三元乙丙橡胶和天然橡胶:衡水中铁建工程橡胶有限责任公司;

环氧树脂玻璃钢和乙烯基树脂玻璃钢:山东非金属材料研究所;

橡胶表面处理剂(三氯异氰尿酸溶液):济南北方泰和新材料有限公司。

1.2 主要仪器与设备

高压反应喷涂机:GRACO H-XP3型,美国固瑞克公司;

喷枪:GX-7-400型,美国固瑞克公司;

电子拉力机(涂层附着力测试仪):WDW-5KN型,济南翰森精密仪器有限公司。

1.3 试样制备

(1)金属底材的试样制备。

①底材处理。

参照GB/T 5210-2006,采用的钢底材为直径20 mm、高度30 mm的45#钢制圆柱体,采用的铝底材为直径20 mm、高度30 mm的铝制圆柱体。将试验用钢制或铝制圆柱体的一个圆端面进行喷砂处理,处理至Sa2.5级,再用毛刷蘸丙酮清洁喷砂表面,并晾干。

上述金属底材各自使用不同类型的底漆。用毛刷蘸底漆,在金属底材处理及清洁后的表面涂刷底漆,单组分PUR底漆一般涂刷后晾置3~6 h至表干再喷涂聚脲,双组分PUR和双组分环氧底漆一般涂刷后晾置1~2 h至表干再喷涂聚脲,底漆厚度控制在20~40 μm 。

②制样。

将WS T-5043聚脲弹性体(拉伸强度23 MPa,断裂伸长率400%,凝胶时间29 s)均匀喷涂在涂有底漆的若干个金属试柱粘接面上,涂层厚度约1 mm,每两个金属试柱1组,迅速将2个金属试柱的粘接面对接在一起,轴心对齐,必要时使用胶带固定,避免涂料固化前每组试样的两个试柱之间发生轴向偏移。试样在室温下养护7 d。

(2)混凝土底材的试样制备。

①底材处理。

参照GB/T 16777-2008,制备8字形水泥砂浆块作为混凝土底材试样,试样的粘接面为22.5 mm×22.2 mm的矩形,将粘接面用高压水冲洗干净并烘干。

采用双组分环氧作为封闭底漆,在粘接面涂刷底漆,晾置1~2 h至表干再喷涂聚脲,底漆厚度控制在20~40 μm 。

②制样。

混凝土底材试样的底漆表干后,在试样上喷涂WS T-5043聚脲涂料,快速将每对试样的两个粘接面对压在一起,试样在室温下养护7 d。

(3)橡胶和玻璃钢底材的试样制备。

①底材处理。

由于玻璃钢和橡胶不易制成拉拔方式的测试试样,参照GB/T 2790-1995和GB/T 15254-1994制备剥离方式的测试试样。制备玻纤增强环氧树脂复合材料和玻纤增强乙烯基树脂复合材料2种玻璃钢底材试样,以及三元乙丙橡胶和天然橡胶两种橡胶底材试样,试样尺寸为200 mm×25 mm的样条,厚度为3 mm。将玻璃钢底材的粘接面用80#纱布打磨粗糙,用丙酮将粘接面擦拭干净并晾干;将橡胶底材的粘接面用三氯异氰尿酸溶液进行表面氯化处理。

对于玻璃钢底材,选择无底漆、单组分PUR底漆和双组分PUR底漆分别进行粘接性能试验,单组分PUR底漆一般涂刷后晾置3~6 h至表干再喷涂聚脲,双组分PUR底漆一般涂刷后晾置1~2 h至表干再喷涂聚脲,底漆厚度控制在20~40 μm ;对于橡胶底材,选取单组分PUR底漆(WS T80)进行粘接性能试验,在粘接面涂刷底漆后晾置20~30 min至表干,底漆厚度控制在20~40 μm 。

②制样。

无底漆处理的玻璃钢基材在打磨预处理后直接在基材的打磨面喷涂聚脲弹性体;有底漆处理的玻璃钢基材和橡胶基材需等待底漆表干后在样板上喷涂聚脲弹性体,所有试样在室温下养护7 d。

1.4 性能测试

将养护好的金属底材试样参照GB/T 5210-2006进行涂层附着力试验,以附着力代表聚脲弹性体与金属底材的粘接性能;将养护好的混凝土底材试样参照GB/T 16777-2008进行粘结强度测试,以粘结强度代表聚脲弹性体与混凝土底材的粘接性能;将养护好的橡胶底材试样按照GB/T 15254-1994进行剥离强度测试,以剥离强度代表聚脲弹性体与橡胶底材的粘接性能;将养护好的玻璃钢底材试样按照GB/T 2790-1995进行剥离强度测试,以剥离强度代表聚脲弹性体与玻璃钢底材的粘接性能。

2 结果与讨论

2.1 聚脲弹性体粘接机理

由于聚脲弹性体凝胶速度快,当聚脲喷涂至底材后迅速固化成膜,对底材没有渗透性,当聚脲材料直接喷涂在未处理的各种底材上时,与底材粘接性能都很差^[12]。为提高聚脲弹性体与底材的粘接性

能,底材的处理与底漆的使用非常重要。

底漆(也称底涂)是介于聚脲弹性体表面与底材表面之间,将两表面牢固结合起来的一种特殊胶黏剂。一般来说,固体材料的粘接需要满足两个必要条件:一是液体胶黏剂可以在固体材料表面完全铺展,浸润充分;二是对固体材料表面的“薄弱界面层”通过物理或化学的方法进行清除,并赋予一定的粗糙度^[13]。聚脲弹性体通过底漆与底材粘接,主要表现为两种方式:物理吸附和化学吸附。物理吸附为聚脲涂料与底材凹凸面的物理咬合、氢键的吸附连接;化学吸附为聚脲涂料与底材存在化学反应,涂料与底材间通过化学键实现连接。其中,底漆的化学吸附对涂层粘接性能起到决定性的作用。一方面底漆要与底材发生化学吸附,另一方面底漆又要有足够的活性能够与聚脲涂层发生化学反应。在底材与聚脲涂层间,底漆起到嫁接桥梁的作用,实现底材与聚脲弹性体间有效粘接。

2.2 聚脲弹性体与金属的粘接性能分析

金属、玻璃等物质表面张力很高,属于高能表面,金属底材用底漆一般分环氧和PUR两种。在PUR或环氧底漆中,含有内聚能较高的极性基团和高活性基团,在粘接面上聚集,形成高表面张力胶粘层。同时,聚脲材料中含有内聚能较高的脲键和活性基团,可与底漆中的活性基团产生物理吸附和化学反应,实现聚脲材料与金属底材间的有效粘接。此外,因为一些加工、使用等原因,通常情况下钢材表面很容易存在油污和锈蚀,或是旧的漆膜,这就需要对钢材进行预处理,以提高新涂层的附着力。在实际工程中,钢底材表面处理通常包括两个方面:除油和除锈。除油常用的方法是溶剂清洗,利用有机溶剂对油污的溶解能力来清除,该方法除油效率高,可清除各种油污;除锈最好的方式是抛丸喷砂处理,正常操作下可以得到清洁、干燥、锚状凹陷的粗糙表面,由于处理后大大增加了表面积,能够显著增强附着力。铝材表面有惰性的氧化铝,需要对其进行喷砂、打磨等表面处理后,才能获得与聚脲材料较好的粘接。

分别对钢和铝采用不同的底材处理方法,不同的底漆类型,对比了聚脲弹性体与这些处理后的钢与铝的附着力,测试结果见表1。

表1测试结果表明,钢与铝经过表面清洁后,聚脲弹性体附着力较低,而喷砂处理后,聚脲弹性体

表1 聚脲弹性体与金属底材的附着力

底材	底材处理方法	底漆类型	附着力 MPa
钢	表面清洁		2.4 ^[1]
钢	喷砂		9.8 ^[1]
钢	喷砂/清洁/涂底漆	单组分PUR (WS D110)	15.2
钢	喷砂/清洁/涂底漆	双组分PUR (Qtech-113)	13.6
钢	喷砂/清洁/涂底漆	双组分环氧 (WS D111)	10.2
铝	表面清洁		1.4 ^[1]
铝	喷砂		4.5 ^[1]
铝	喷砂/清洁/涂底漆	单组分PUR (WS D110)	8.4
铝	喷砂/清洁/涂底漆	双组分PUR (Qtech-113)	8.2
铝	喷砂/清洁/涂底漆	双组分环氧 (WS D111)	9.2

附着力明显提升,聚脲弹性体与钢的附着力是表面清洁的4倍多,聚脲弹性体与铝的附着力是表面清洁的3倍多。经过喷砂/清洁/涂底漆处理后,聚脲弹性体在钢与铝表面的附着力比单纯喷砂处理又有明显提高,不同型号底漆对附着力效果也不同。使用双组分环氧(WS D111)底漆时,聚脲弹性体在铝表面的附着力最好,可达到9.2 MPa;使用单组分PUR (WS D110)底漆时,聚脲弹性体在钢表面的附着力达到最高值15.2 MPa。因此,金属底材经过喷砂/清洁/涂底漆处理,聚脲弹性体的附着力可达到较好效果。

2.3 聚脲弹性体与混凝土的粘接性能分析

混凝土表面含有液体或固体杂质以及在施工过程中形成的一些缺陷,必须加以处理,以免影响聚脲弹性体与混凝土的粘接性能。清除混凝土表面杂质和缺陷的方法很多,国内外目前采用物理法和化学法进行处理,物理法有蒸汽清理、抛丸、喷砂、真空吸尘、高压气吹洗和高压水冲洗等方法,化学法有酸蚀、化学剥离等方法。混凝土有很多微孔,混凝土表面喷涂聚脲弹性体时需要使用专门的底漆。底漆的主要作用有两个:一是对混凝土底材的毛细微孔进行封闭,避免微孔中的空气和水分与聚脲材料发生反应出现鼓泡和针孔现象;二是底漆可以起到混凝土与聚脲弹性体之间的“架桥”作用,增强聚脲涂层与混凝土底材的粘结强度^[1]。分别采用不同方式对混凝土表面进行处理,观察不同处理方法对聚脲弹性体粘结强度的影响,结果见表2。

由表2结果可知,与表面潮湿相比,混凝土表面

表2 聚脲弹性体与混凝土的粘结强度

底材	底材处理方法	底漆类型	粘结强度 MPa
混凝土	表面干燥		2.2 ^[1]
混凝土	表面潮湿		1.4 ^[1]
混凝土	涂底漆/干燥表面	双组分环氧(WS D111)	3.2
混凝土	涂底漆/潮湿表面	双组分环氧(WS D111)	2.7

干燥时,聚脲弹性体的粘结强度更高;使用双组分环氧(WS D111)底漆后,混凝土无论是干燥表面还是潮湿表面,聚脲弹性体的粘结强度都比不使用底漆时增大;在涂底漆并且表面干燥的条件下,聚脲弹性体在混凝土表面的粘结强度最高,为3.2 MPa。混凝土在干燥表面时,聚脲弹性体的粘结强度由不涂底漆时的2.2 MPa提升到了涂底漆后的3.2 MPa,升高了45.5%。因此,对于混凝土底材,底漆对提高聚脲弹性体的粘结强度有显著作用。

2.4 聚脲弹性体与橡胶的粘接性能分析

橡胶材料属于低表面能材料,具有不易附着的涂装特性,需要进行特殊的表面处理。橡胶的表面处理方法主要有化学改性和物理改性,包括在橡胶表面引入极性基团、提高表面能和表面粗糙度,以及消除表面弱界面层等方法,如橡胶表面打磨处理,提高橡胶表面粗糙度,增大与聚脲弹性体的实际粘接面积。采用三氯异氰尿酸处理橡胶表面,既可以在橡胶表面引入极性基团,又能提高表面粗糙度,从而提高粘接性^[14]。橡胶表面经过表面处理剂处理以后,能够产生羧基等极性分子,可以采用单组分PUR底漆,与羧基等发生化学交联,从而提高聚脲弹性体与橡胶的粘接性能。分别采用了3种不同的处理方法对橡胶底材进行预处理,且都涂刷了单组分PUR底漆,考察了聚脲弹性体与橡胶的剥离强度,具体结果见表3。

表3 聚脲弹性体与橡胶的剥离强度

底材	底材处理方法	底漆类型	剥离强度 kN/m
三元乙丙橡胶	表面打磨/底漆	单组分PUR (WS T80)	1.3
三元乙丙橡胶	表面氯化/底漆	单组分PUR (WS T80)	10.0
天然橡胶	表面打磨/底漆	单组分PUR (WS T80)	1.7
天然橡胶	表面氯化/底漆	单组分PUR (WS T80)	7.6

由表3结果可知,三元乙丙橡胶和天然橡胶分别经过表面打磨/底漆处理和表面氯化/底漆处理后,聚脲弹性体与橡胶的剥离强度差异非常大,经表面氯化/底漆处理后的剥离强度明显更高,这是由于,表面氯化处理后,橡胶表面极性增大,更有利于底漆的润湿和附着,使橡胶表面层的强度增大,更有利于聚脲弹性体的粘接性能提高。

2.5 聚脲弹性体与玻璃钢的粘接性能分析

玻璃钢也属于低表面能材料,其表面有脱模剂、纯树脂层等薄弱界面层,需要进行特殊的表面处理。玻璃钢表面处理的方法,一般先采用机械或手工的方式,将表面打磨粗糙,然后再采用有机溶

剂将表面影响涂层附着力的化学物质及灰尘污物清除掉。玻璃钢制品在使用过程中,受到外力作用时会产生较大形变,因此底漆的使用选择柔性PUR底漆,玻璃钢表面的极性基团可以与PUR底漆中的氨基键、酯键、醚键等基团形成氢键,形成有一定强度的接头。分别对环氧树脂玻璃钢和乙烯基树脂玻璃钢进行了预处理,分析不同处理方法对聚脲弹性体与玻璃钢剥离强度的影响,具体结果见表4。

表4 聚脲弹性体与玻璃钢的剥离强度 kN/m

底材	底材处理方法	底漆类型	剥离强度
环氧树脂玻璃钢	打磨/无底漆		*
环氧树脂玻璃钢	打磨/涂底漆	双组分PUR (Qtech-113)	9.2
环氧树脂玻璃钢	打磨/涂底漆	单组分PUR (WS D110)	10.3
乙烯基树脂玻璃钢	打磨/无底漆		*
乙烯基树脂玻璃钢	打磨/涂底漆	双组分PUR (Qtech-113)	11.5
乙烯基树脂玻璃钢	打磨/涂底漆	单组分PUR (WS D110)	13.3

注:*表示玻璃钢表层剥落,剥离强度很低,无法获得准确数据。

由表4可知,无论是环氧树脂玻璃钢还是乙烯基树脂玻璃钢,单纯的打磨处理,无底漆涂覆时,聚脲弹性体与玻璃钢的剥离强度很低,玻璃钢表层容易剥落。而经过涂底漆后,聚脲弹性体与玻璃钢的剥离强度明显提升,环氧树脂玻璃钢最高可达到10.3 kN/m,乙烯基树脂玻璃钢最高可达到13.3 kN/m。这两种达到最高剥离强度的试样都是使用的单组分PUR (WS D110)底漆,因为这种单组分PUR底漆与聚脲弹性体之间可以发生化学反应,使聚脲弹性体与底漆之间形成化学键合,提升附着力。

需要特别指出的是,对于玻璃钢(环氧和乙烯基树脂)底材,涂刷底漆可以显著提高玻璃钢与底材的粘接性能,图1至图3分别是未涂覆底漆和涂覆底漆的环氧树脂玻璃钢底材,以及涂覆底漆的乙烯基树脂玻璃钢底材的破坏情况。从图1、图2和图3可以看出,当玻璃钢表面未涂覆底漆时,由于玻璃钢材料表层层间粘接的强度远小于聚脲涂料与玻璃钢表面的强度,测试结果表现为玻璃钢表面第一层分层被聚脲剥落。当玻璃钢表面涂覆底漆后,底漆可以渗透到玻璃钢表层以下若干层,通过两者之间的渗透和氢键作用使底漆和玻璃钢表层形成坚固的一体,显著提高了玻璃钢表层的层间粘接性能,间接提高了聚脲材料与玻璃钢之间的粘接性能,测试结果表现为玻璃钢底材破坏或聚脲本体破坏。



图1 未涂覆底漆的环氧树脂玻璃钢底材,底材表层剥落



图2 涂覆底漆的环氧树脂玻璃钢底材,底材本体破坏



图3 涂覆底漆的乙烯基树脂玻璃钢底材,聚脲本体破坏(断裂)

3 结论

(1)经过特殊的底材处理和严格的施工工艺处理,聚脲弹性体与钢、铝、混凝土、橡胶、复合材料等多种底材都能具有良好的粘接性能。涂覆专用底漆,能够大大提高聚脲弹性体与底材的粘接性能。

(2)聚脲弹性体与钢材的附着力大于对铝材的附着力,这与铝材的表面能比钢材表面能小有关;聚脲弹性体与金属材料的粘接性能要远远大于混凝土,这与底材的种类有关,也与底材本身的强度有关。

(3)对于橡胶和玻璃钢等低表面能材料的粘接,必须进行特殊的表面处理和涂覆底漆。橡胶通过氯化处理,在橡胶表面引入了极性基团,同时提高了表面粗糙度,使聚脲材料与橡胶底材的粘接性能得到大幅提高;玻璃钢底材表面通过涂覆PUR底漆,通过PUR底漆与玻璃钢底材表面之间的渗透和氢键作用,使底漆和玻璃钢表层形成坚固的一体,显著提高了玻璃钢表层的层间粘接的强度,间接提高了聚脲材料与玻璃钢之间的粘接性能。

参考文献

- [1] 黄微波. 喷涂聚脲弹性体技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
Huang Weibo. Spray polyurea elastomer technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [2] 戴平仁, 黄正祥, 祖旭东, 等. 聚脲弹性体“三明治”夹层结构抗爆性能[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(12): 70–74.
Dai Pingren, Huang Zhengxiang, Zu Xudong, et al. Anti-detonation property of sandwich structure with polyurea elastomer[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(12): 70–74.
- [3] 王小伟, 何金迎, 祖旭东, 等. 聚脲弹性体复合夹层结构的防爆性能[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(05): 63–68.
Wang Xiaowei, He Jinying, Zu Xudong, et al. Antidetonation properties on composite sandwich structure with polyurea elastomer[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(5): 63–68.
- [4] 黄微波, 宋奕龙, 马明亮, 等. 喷涂聚脲弹性体抗爆冲击性能研究进展[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(1): 148–153.
Huang Weibo, Song Yilong, Ma Mingliang, et al. Research progress on blast mitigation and shock resistance performance of spray polyurea elastomer[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1): 148–153.
- [5] 王玉杰. 高铁专用喷涂聚脲弹性体防水材料研发及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
Wang Yujie. The development and application of spray polyurea elastomer waterproof material on high-speed railway[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [6] 张余英, 刘小楠, 李炳奇, 等. 水电大坝用氟硅改性天冬聚脲抗冰拔涂料的研制及应用[J]. 中国涂料, 2022, 37(9): 28–32.
Zhang Yuying, Liu Xiaonan, Li Bingqi, et al. Development and application of an anti-icing fluorosilicone-modified aspartic polyurea topcoat for hydropower dam[J]. China Coatings, 2022, 37(9): 28–32.
- [7] 张燕, 邓智平, 刘朝辉, 等. 喷涂聚脲弹性体在军事永久工程防腐中的应用[J]. 表面技术, 2012, 41(4): 110–112.
Zhang Yan, Deng Zhiping, Liu Zhaohui, et al. Application of spray polyurea elastomer in anti-corrosion of military permanent project[J]. Surface Technology, 2012, 41(4): 110–112.
- [8] 王慧翠, 孙汉军, 汪杰, 等. 储罐外壁防护用聚脲材料的选型研究[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(2): 26–28.
Wang Huicui, Sun Hanjun, Wang Jie, et al. Study on selection of polyurea material for external wall protection of tank[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2022, 51(2): 26–28.
- [9] 张沪伟, 植磊, 岳长山, 等. 喷涂聚脲在桥梁缆索防护中的应用[J]. 中国涂料, 2022, 37(7): 69–74.
Zhang Huwei, Zhi Lei, Yue Changshan, et al. Application of spray polyurea in bridge cable protection[J]. China Coatings, 2022, 37(7): 69–74.
- [10] 孙旂, 张安智, 赵环帅, 等. 聚脲材料在矿山耐磨防腐工程中的应用[J]. 选煤技术, 2018(4): 159–162.
Sun Yi, Zhang Anzhi, Zhao Huanshui, et al. Application of polyurea material for mine wear-and corrosion-resistant works[J]. Coal Preparation Technology, 2018(4): 159–162.
- [11] 马学强, 李鑫茂, 张国锋. 喷涂聚脲快速修复输送带的试验研究[J]. 矿山机械, 2022, 50(10): 51–54.
Ma Xueqiang, Li Xinmao, Zhang Guofeng. Test research on rapid repair of conveyor belt by spraying polyurea[J]. Mining Machinery, 2022, 50(10): 51–54.
- [12] 姜鹏波, 史立彤, 车栋, 等. 喷涂聚脲弹性体底涂粘接机理探究及应用[C]//全国第十六届防水材料技术交流会论文集. 苏州: 中国硅酸盐学会防水材料专业委员会, 2014: 206–208.
Jiang Pengbo, Shi Litong, Che Dong, et al. Study on bonding mechanism of spray polyurea elastomer substrate coating and its application[C]//Proceedings of The 16th National Waterproof Material Technology Exchange Conference. Suzhou: Professional Committee of Waterproof Materials of China Silicate Society, 2014: 206–208.
- [13] 李绍雄, 刘益军. 聚氨酯胶粘剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998: 30–35.
Li Shaoxiong, Liu Yijun. Polyurethane adhesive[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998: 30–35.
- [14] 牛慧军, 张佳佳, 张飞, 等. 天然橡胶表面处理的研究进展[J]. 粘接, 2011(12): 81–83.
Niu Huijun, Zhang Jiajia, Zhang Fei, et al. Development of surface modification of natural rubber[J]. Adhesion, 2011(12): 81–83.