

海上风电导管架灌浆料产品开发与工程应用研究

汪冬冬,张悦然,孙烜,章廉虎,李成

(中交港湾(上海)科技有限公司 上海 200032)

摘要:导管架结构是海上风机重要基础结构形式之一。灌浆连接是导管架结构与桩基础连接的典型方法,由于灌浆连接受力复杂,对材料技术指标要求极高。本研究自主研发导管架灌浆料,并通过纳米超细矿物粉体改性、聚合物改性和双重膨胀组分改性等系统研究形成超高性能灌浆料,通过成果转化形成海上风电灌浆料专利产品,并实现产品系列化,在实际工程中大量应用。其中 UHPG-120 型产品打破国外技术垄断,填补国内空白,该产品具有大流动性、抗水分散性、高早强、超高强、无收缩、抗疲劳和高耐久性特点,适用于深水导管架水下灌浆。本研究形成的海上风电灌浆料产品及灌浆连接核心技术实现核心技术和产品国产化,促进我国海上风电施工技术进步,引领国内海上风电灌浆技术发展。

关键词:导管架;灌浆料;高早强;超高强;水下灌浆

0 引言

在海上风电场的建设过程中,为承受海上强风荷载、海水腐蚀、海浪冲击等,海上风力机组基础结构建设远比陆上复杂,技术难度高,耗费成本高达总成本的 15%~25%^[1]。海上风场的基础结构主要重力式、单桩式、吸力式、三桩(多桩)导管架式和浮体式等^[2](图 1)。灌浆连接是海上风机支撑结构与桩基础连接的典型方法,根据 DNV-OS-J101^[3]定义:灌浆连接是由两个同心管状部分组成的结构连接件,外部和内部管之间的环形区域被填充灌浆。在海上风电项目中,导管架灌浆连接通常采用泵送压浆的方式将灌浆料灌注到海平面以下的连接段(图 2)。

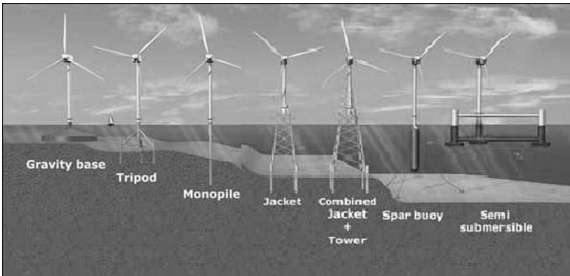


图 1 海上风电基础结构形式

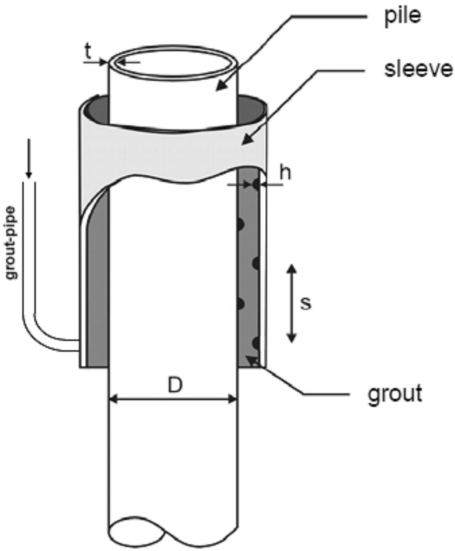


图 2 灌浆连接

灌浆连接是海上风电基础施工的重点和难点,更是导管架基础安装施工的关键,灌浆连接受到业界的广泛关注。丹麦 Densit 公司、德国巴斯夫公司和新加坡 NAUTIC 公司等国外少数公司有海上风电灌浆产品和技术,并在欧洲有大量工程案例^[4],用于风电灌浆的进口产品抗压强度可达 100~140 MPa。过去国产材料^[5-7]也有 100 MPa 以上高

强灌浆料产品,但产品特点不适合风电灌浆,更没有海上风电案例,装配式建筑如住宅产业化项目^[5]钢筋套筒灌浆连接与风电灌浆连接类似,规范《钢筋连接用套筒灌浆料》(JG/T 408—2013)规定套筒灌浆料产品抗压强度 85 MPa 以上,用在装配式桥梁的套筒灌浆料产品抗压强度 100 MPa 以上。海上风电灌浆尤其是导管架灌浆的特殊性在于要求材料在泵送液相阶段具有高度流动黏稠性和高度稳定性,同时需要材料硬化后具有超高强度和超高耐久性和抗疲劳性能。除了外海恶劣施工条件对拌合物性能的特殊要求之外,就材料本身的可靠性、安全性和耐久性而言,极为复杂的海上环境给灌浆连接带来极为苛刻的技术要求。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

本研究原料主要是特种水泥、纳米级超细矿物粉体和高性能膨胀剂等组成的胶材与优质天然高强石英砂、高性能减水剂、聚合物和其他数十种化学改性剂。①水泥:一种特种水泥;②超细矿物掺合料:A、B、C 3 种纳米级超细矿物掺合料;③膨胀剂:D、E 分别为塑性和硬化膨胀剂;④聚合物:一种具有遇水可再分散聚合物粉体;⑤石英砂和天然砂骨料:采用多种不同细度石英砂与精选优质天然砂复配;⑥化学改性剂:十多种稳定剂、消泡剂、抗水分散组分、早强组分、缓凝组分以及黏度改性组分等。

1.2 主要指标与试验方法

本研究中灌浆料主要关键指标与试验方法如下。①表观密度(容重)、流动度、含气量、泌水率、竖向膨胀率:试验参考《水泥基灌浆材料应用技术规范》(GB/T50448)以及《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080);②抗压强度、抗折强度和弹性模量:参考 GB/T 50448、《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)以及《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T50081);③电通量、氯离子扩散系数、抗冻等级、疲劳试验:参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082)。④材料自收缩、材料与钢管之间粘结强度参考类似文献研究资料方法。

2 超高性能灌浆料研发

2.1 超细粉体改性研究

根据图 3 及表 1 中数据,粉体材料颗粒细度由大到小依次为:水泥颗粒、超细粉体 B 颗粒、超细粉体 A 颗粒、超细粉体 C 颗粒,3 种超细粉体的粒径比水泥低一个数量级。水泥主要粒径分布 10~100 μm;超细粉体 A 主要粒径分布 0.05~1 μm 和 1~15 μm 两个区段;超细粉体 B 主要粒径分布 0.3~12 μm;超细粉体 C 主要粒径分布 0.05~5 μm。超细粉体 A 在 1 μm 附近部分颗粒是部分间断的,为探讨不同超细粉体与水泥的密实填充效应,将不同超细粉体按照设计的比例混合,然后分析其粒径分布。由图 4 可知,掺超细粉体后胶凝粉体级配比纯水泥在 3 μm 以下细颗粒大大增多,同时大于 10 μm 的颗粒数量也有所减小,粉体材料的微级配比纯水泥有一定改善,微级配更趋于合理。

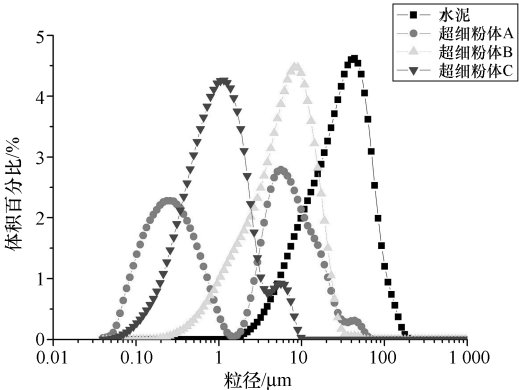


图 3 水泥与 3 种超细粉体的粒度分布对比

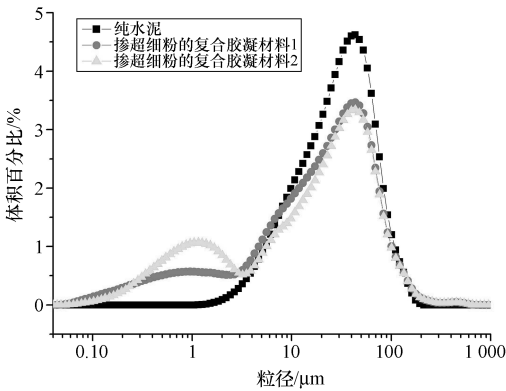


图 4 纯水泥与复合粉体粒度分布对比

表 1 粉体材料激光粒度分析结果 μm

粉体材料名称	平均值	中位值	索太尔平均径 D
特种水泥	42.936	28.883	12.86
超细粉体 A	5.583	2.69	0.414
超细粉体 B	7.905	6.495	3.351
超细粉体 C	1.464	1.005	0.647

根据表 2 设计的试验方案,1#~3# 分别采用

表 2 纯水泥与超细粉体复合胶凝材料对比试验方案

编号	胶凝材料设计	用水量/%	含气量/%	容重/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	流动度/mm			状态 描述
					初始	0.5h	1.0h	
1#	纯水泥+膨胀剂+各类化学添加剂	9.1	2.0	2349	300	260	235	黏稠
2#	掺超细粉体的复合胶凝材料 1+膨胀剂+各类化学添加剂	8.5	2.2	2349	290	260	230	和易性好
3#	掺超细粉体的复合胶凝材料 2+膨胀剂+各类化学添加剂	7.8	1.9	2374	300	270	240	和易性更好 流态好

表 3 纯水泥与超细粉体复合胶凝材料配制灌浆料性能指标

编号	抗压强度(GB/T 31387—2015)/MPa						电通量/C		RCM 法扩散系数/ ($10^{-12}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	
	1d	3d	7d	14d	28d	56d	28d	56d	28d	56d
1#	84.8	102.3	105.8	110.5	115.8	119.5	607	302	0.50	0.38
2#	58.3	84.6	100.0	108.5	118.9	125.8	205	154	0.25	0.10
3#	68.9	96.4	111.0	120.0	133.2	142.5	354	203	0.28	0.14

2.2 聚合物改性研究

研究^[8]表明聚合物可改善灌浆料工作性。本研究通过聚合物使灌浆料浆体黏度增大,黏聚性和抗水分散性增强,同时改善浆体与钢材界面黏结强度。聚合物使灌浆料浆体表面成膜,消除泌水。从图 7 可见聚合物使浆体含气量提高,聚合物与塑性膨胀剂复合使浆体在塑性阶段中引入大量微小、均匀稳定气泡,防止材料塑性收缩。浆体黏度变化抑制微小气泡移动和释放,对减少塑性收缩起到积极作用,但使硬化浆体强度下降。通过大量试验优化聚合物掺量确保其正效应大于负效应。

2.3 灌浆料微膨胀特性

材料微膨胀性对灌浆连接至关重要^[9],只有材

纯水泥、掺超细粉体的复合胶凝材料 1 和掺超细粉体的复合胶凝材料 2 配制灌浆料,掺超细粉体后灌浆料的用水量有 9.1%降低至 8.5%和 7.8%,浆体黏度和易性更利于泵送。根据表 3 和图 5 可知,掺入超细矿物粉体后灌浆料早期强度降低,后期强度较纯水泥灌浆料强度大大提高,耐久性指标优于高性能混凝土。3# 配方力学性能指标和耐久性指标达到超高性能混凝土(UHPC)材料指标。

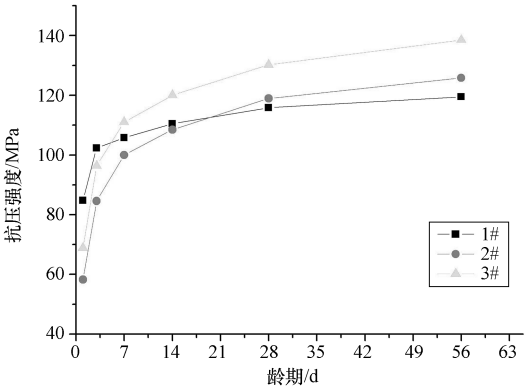


图 5 超细矿物粉体改善灌浆料抗压强度

料无收缩才能确保灌浆连接有效。研究使用 D、E 两种不同类型膨胀剂,通过双重膨胀确保材料在塑

性和硬化后无收缩并产生微膨胀。

2.3.1 竖向膨胀率

根据膨胀剂 D 掺量对竖向膨胀率影响试验曲线(图 6)优化掺量,使灌浆料 3 h 竖向膨胀率 0.10%~0.20%、24 h 竖向膨胀率 0.20%~0.30%,24 h 与 3 h 竖向膨胀率之差 0~0.10%,满足 GB/T 50448—2008 规范要求。实际上对于风电灌浆连接而言,竖向膨胀率满足规范《钢筋连接用套筒灌浆料》(JG/T 408—2013)的 3 h 膨胀率大约 0.02%即可。

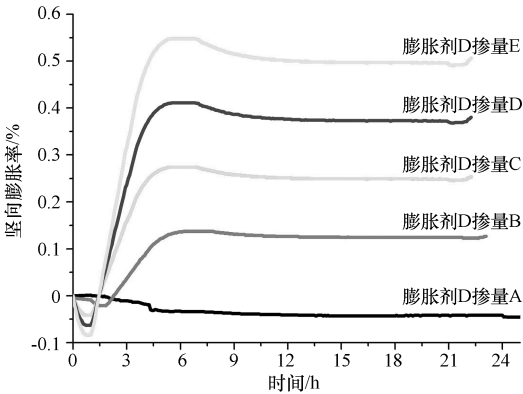


图 6 灌浆料竖向膨胀率试验

2.3.2 硬化浆体收缩/膨胀

根据灌浆料收缩/膨胀试验曲线可见(图 8),随膨胀剂 E 掺量增大硬化浆体由收缩转为膨胀,同时硬化浆体密度降低导致强度下降。综合考虑膨胀剂 E 对材料收缩/膨胀和力学性能指标的影响,优化掺量使其作用最佳。

3 超高性能灌浆料性能

根据上述结果,本研究自主研发的海上风电灌浆料产品具有大流动性、高可泵性、高早强和超高强特性,并具备微膨胀特性、高抗疲劳和高耐久性。材料硬化后的力学指标和耐久性指标达到了超高性能混凝土(UHPC)的标准。

3.1 工作性能

灌浆料具有大流动性、不泌水、抗离析性和抗水分散特性,材料可通过橡胶管线压力泵送(长度超过 100 m 的直径不小于 5 cm 管线)。初始流动度大于 290 mm、0.5 h 流动度大于 260 mm、1.0 h 流动度大于 230 mm,具有 2 h 以上可工作时间,灌

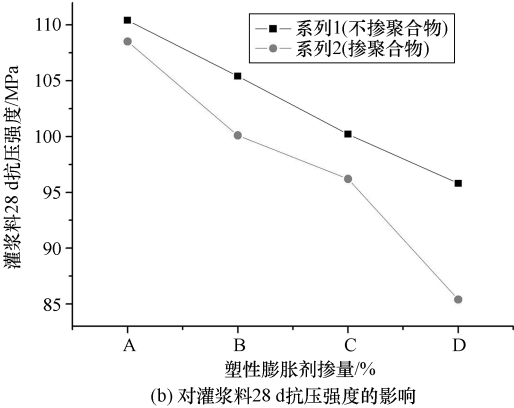
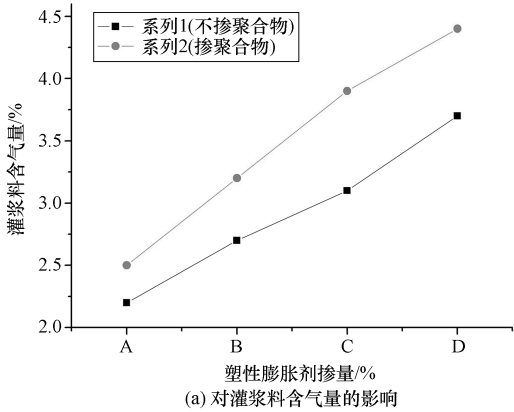


图 7 聚合物和膨胀剂 D 对灌浆料性能影响

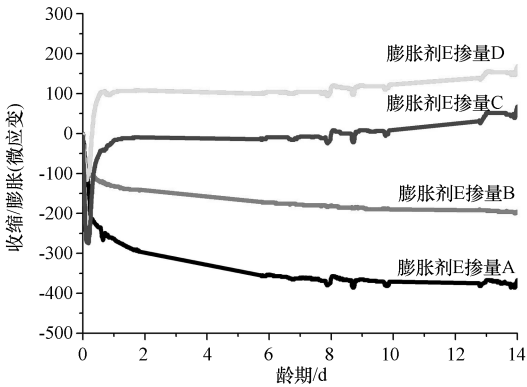


图 8 膨胀剂 E 与灌浆料收缩/膨胀关系

浆料含气量小于 2.5%。

3.2 力学性能

3.2.1 抗压强度

灌浆料具备优异的力学性能,图 9 是灌浆料长龄期抗压强度曲线,图 10 是灌浆料 0~72 h 强度曲线。在 20℃ 条件下,灌浆料 1 d 强度不小于 50 MPa,3 d 强度不小于 85 MPa,7 d 强度不小于

110 MPa,28 d 强度不小于 130 MPa,长期强度不小于 140 MPa。

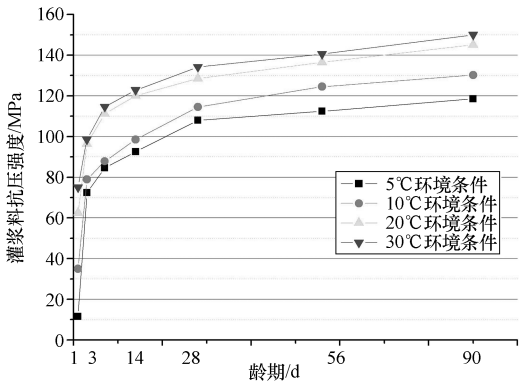


图 9 灌浆料抗压强度发展(0~90 d)

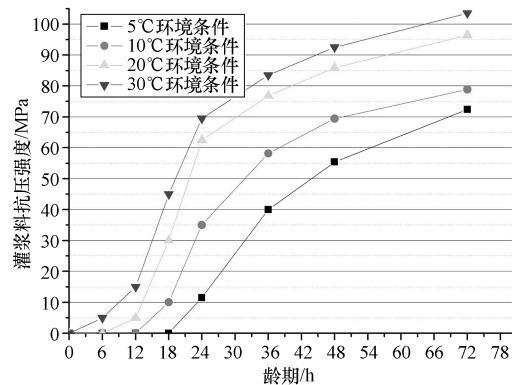


图 10 灌浆料早期抗压强度发展(0~24 h)

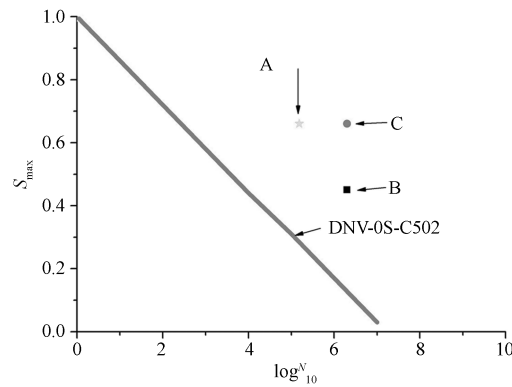


图 11 灌浆材料疲劳试验结果

3.2.2 与钢管之间粘结强度

研究采用与文献[10—12]类似试验方法,自行设计大小钢管组成的环形空间形成灌浆连接构件测试灌浆料与钢管之间的黏结强度,测试剪切黏结强度大

于 8 MPa,而文献中混凝土与钢管之间黏结强度小于 1.0 MPa。可见灌浆料与钢管材料之间黏结强度高。

3.2.3 抗疲劳性能

疲劳试验方法参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082)进行,采用 $\phi 60 \times 120$ mm 小试块进行,试验荷载上限对应最大应力比,试验荷载下线对应 0.10 倍轴心抗压强度,加载频率 8 Hz。根据图 12 试验结果可见,灌浆料的疲劳试验点落在 DNV 规范^[13]规定的 SN 曲线右上方,满足 DNV 设计要求,B 试块在 0.45 应力比下 200 次疲劳试验试样未破坏,C 试块(掺钢纤维)在 0.60 应力比下 200 次疲劳试验试样未破坏,灌浆具极佳的抗疲劳荷载性能。

3.3 耐久性能

根据表 3 中优化配方 3# 的耐久性指标,56 d 电通量 203C,扩散系数 0.14×10^{-12} m²/s。根据《混凝土耐久性检验评定标准》(JGJ/T 193—2009),灌浆料抗氯离子渗透性等级为 Q-V,RCM-V,抗冻等级大于 F800,耐久性指标优异,达到 UHPC 材料标准。

4 导管架水下灌浆原型试验

为验证自主研发的超高性能灌浆材料工程特性,开展导管架水下灌浆原型试验。制作的灌浆模型按照珠海桂山海上风电示范项目导管架灌浆连接实体 1:1 模型,试验采用水下灌浆工艺完全模型导管架灌浆施工工况条件。原型试验验证自主研发导管架灌浆料的优异特性,通过结构拉拔试验验证水下灌浆结构拉拔承载力满足并超出设计要求。结构加载试验后将灌浆连接模型外筒钢板切开,检查硬化灌浆料的状态(图 12),硬化浆体均匀致密,没有明显大气孔。水下成型的硬化灌浆料结石体结构密实。

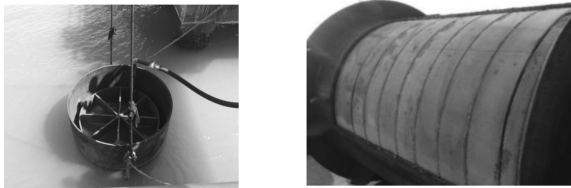


图 12 导管架水下灌浆原型试验与水下成型灌浆连接结构模型剖开后外观

5 海上风电灌浆材料系列产品

在大量研究基础上,形成优固特®品牌海上风电灌浆料系列产品。其中 UHPG-120 导管架灌浆料产品替代进口,用于海上风电风机基础和海上升压站基础导管架水下灌浆;SKG 系列产品广泛用于

高桩承台防撞附属结构灌浆、单桩抗冰锥灌浆和海上测风塔灌浆;SPG 系列产品用于海上风机植入型嵌岩单桩嵌岩段灌浆连接;KLG 系列产品用于锚栓结构灌浆。几个系列产品具体性能指标见表 4。

表 4 优固特®海上风电灌浆料系列产品与性能指标

指标参数	UHPG 系列		SKG 系列			SPG 系列	KLG 系列	
	UHPG-100	UHPG-120	SKG-III	SKG-IV	SKG-V	SPG-I	KLG-I	KLG-II
表观密度/(kg·m ⁻³)	≥2 350	≥2 400	≥2 300	≥2 300	≥2 350	≥2 200	≥2 300	≥2 300
流动度(初始)/ mm	≥290	≥290	≥290	≥290	≥290	≥290	≥290	≥290
流动度(0.5 h)/ mm	≥260	≥260	≥260	≥260	≥260	≥260	≥260	≥260
流动度(1.0 h)/ mm	≥230	≥230	≥230	≥230	≥230	≥230	≥230	≥230
泌水率/ %	0	0	0	0	0	0	0	0
抗压强度(1 d)/MPa	≥40	≥50	≥30	≥35	≥50	≥20	≥20	≥30
抗压强度(3 d)/ MPa	≥70	≥80	≥60	≥65	≥70	≥40	≥50	≥60
抗压强度(7 d)/ MPa	≥90	≥100	≥70	≥75	≥90	≥50	/	/
抗压强度(28 d)/ MPa	≥100	≥120	≥80	≥90	≥100	≥60	≥80	≥90
抗折强度(28 d)/ MPa	≥15	≥18	≥15	≥15	≥15	/	≥15	≥15
弹性模量(28 d)/GPa	≥45	≥50	≥35	≥40	≥45	/	/	/

注:表中表观密度、泌水率指标参照 GB/T50080,流动度指标参照 GB/T 50448,抗压强度指标参照 GB/T 31387—2015,抗折强度和弹性模量参照 GB/T50081。

6 海上风电灌浆工程应用

6.1 优固特®UHPG 系列产品

优固特®UHPG 系列产品已在多个海上升压站导管架灌浆工程中应用,江苏响水海上升压站上部组块灌浆,江苏东台海上升压站导管架灌浆连接,大唐滨海海上升压站导管架灌浆连接,浙江舟山普陀 6 号海上风电场海上升压站灌浆等均使用 UHPG-120 海上风电导管架灌浆材料,性能指标满足设计要求。优固特®UHPG-120 产品可替代 Densit 公司的 S5 产品和巴斯夫公司的 MasterFlow 9500 产品。

6.2 优固特®SKG 系列产品

优固特®SKG 系列产品在多个海上风电项目的高桩承台防撞装置灌浆连接、测风塔结构灌浆连接和北方风机单桩基础抗冰锥灌浆连接等多个工程应用。SKG-III 型产品在华能如东高桩承台靠泊防撞结构灌浆连接工程应用,优固特®SKG-IV 型

产品在山东昌邑海上测风塔等多个项目应用;优固特®SKG-V 型产品在大连庄河海上风电项目大量应用。SKG 系列产品性能优异,施工效果良好。

6.3 优固特®SPG 系列和 KLG 系列产品

针对海上风电大直径嵌岩单桩嵌岩段灌浆,研究开发 SPG 嵌岩桩专用灌浆材料产品,该产品具有较强的抗水分散性能和较长凝结时间,具备优异的抗离析性能,尤其适合超深水、高落差、大方量灌浆。针对海上风电高桩承台锚栓结构和陆上风机塔筒底部少量灌浆,研究开发 KLG 系列灌浆产品,产品可分别替代巴斯夫 MasterFlow 9200 和 MasterFlow 872 产品。

7 结论

本研究采用纳米超细矿物粉体改性技术、聚合物改性技术和高性能膨胀剂双重膨胀设计,基于超高性能混凝土(UHPC)配制技术,成功研发超高性能海上风电灌浆料。研究形成优固特®品牌海上风

电灌浆料系列产品,广泛用于海上风电导管架灌浆,海上风电附属结构、测风塔、大直径嵌岩桩嵌岩灌浆,工程应用效果好。本研究通过专利技术成果转化形成国产品牌优固特®产品系列化和灌浆连接核心技术国产化,其中 UHPG—120 导管架灌浆料产品打破国外垄断,填补国内空白。该产品具有低用水量(每吨灌浆料用水量仅 75~85 kg)、大流动性(灌浆料初始流动度大于 290 mm)、早强高强(1 d 抗压强度大于 50 MPa)、高最终强度(28 d 抗压强度大于 120 MPa)、微膨胀性、抗腐蚀性、高抗氯离子渗透性、高抗冻性、高抗疲劳性能等特点。本研究形成的海上风电灌浆料产品及灌浆连接核心技术促进我国海上风电施工技术进步,引领国内海上风电灌浆技术发展。

参考文献

[1] Gaetano Gaudiosi. Offshore wind energy prospects [J]. Renewable Energy,1999,16(1/2/3/4):828—834.
[2] 林鹤云,郭玉敬,孙蓓蓓,等.海上风电的若干灌浆技术综述[J].东南大学学报,2011,(7):882—888.

[3] Det Norske Veritas;DNV—OS—J101-Design of offshore wind turbine structures.Det Norske Veritas,2011.
[4] 鲁进亮.,张羿,任敏.海上风电重力式基础结构灌浆工艺[J].电力建设.,2012,(7):95—98.
[5] 高安庆,朱清华,化子龙.超高强钢筋接头灌浆料的试验研究[J].混凝土与水泥制品,2013,(1):16—19.
[6] 黄政宇,钱峰.DSP 早强高强灌浆料综合性能研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2009,(8):18—22.
[7] 管品武,邵平,陈萌.新型预应力混凝土孔道高强灌浆料应用技术研究[J].河南科学,2012,(11):1620—1623.
[8] 钟世云,刘应刁,王培铭.聚合物改性特种水泥灌浆料的性能.建筑材料学报,2004,(3):102—108.
[9] 贺奎,王万金等.ANG—II 新型高强无收缩灌浆料的研究及应用[J].建筑技术,2008(6):462—464.
[10] 刘永健,池建军.钢管混凝土界面抗剪粘结强度的推出试验[J].工业建筑,2006(4):78—80.
[11] 薛立红,蔡绍怀.钢管混凝土柱组合界面的粘结强度(上)[J].建筑科学,1996(3):22—28.
[12] 薛立红,蔡绍怀.钢管混凝土柱组合界面的粘结强度(下)[J].建筑科学,1996(4):19—23.
[13] Det Norske Veritas DNV—OS—C502.offshore standard;Off-shore concrete structure 2009.