



珊瑚礁砂地基无填料振冲密实加固工艺分析

徐 雄¹, 梁小丛², 冯振周¹, 毕金华¹

(1. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 珊瑚礁砂是一种广泛分布于“一带一路”沿岸各个国家的特殊岩土材料, 由于其易破碎、变形大、高压缩性的工程特性, 其地基处理所适用的工艺与最终加固效果也与普通的陆源砂存在一定差异。依托实际工程, 对吹填珊瑚礁砂地基进行多种不同工艺参数的无填料振冲试验。结果表明, 对于珊瑚礁砂表层增加反插和提高留振时间工艺, 可有效提高桩间土密实度; 而对于底部中密珊瑚礁砂层, 如须进一步提高加固效果, 应使振冲点间距 ≤ 3 m; 对于高细粒含量松散珊瑚礁砂层, 增加反插和提高留振时间工艺能有效提高桩间土密实度, 但在此基础上进一步减少振冲间距不能明显提升最终的加固效果。

关键词: 珊瑚礁砂地基; 无填料振冲; 加固工艺

中图分类号: TU 472; U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0215-06

Analysis on vibro-compaction technique for reinforcement of coral sand foundation

XU Xiong¹, LIANG Xiao-cong², FENG Zhen-zhou¹, BI Jin-hua¹

(1. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Coral sand is a special kind of geotechnical material widely distributed in countries participating in the Belt and Road Initiative. Due to its engineering characteristics of breakability, large deformation and high compressibility, the applicable technology and final reinforcement effect of the foundation treatment are different from those for the ordinary terrestrial sand to some extent. In an actual project, we carry out vibro-compaction tests to investigate the various technological parameters of filling the coral sand foundation. The results show that for the surface of coral sand, reverse insertion and vibration time increase can effectively improve the soil compactness between piles. Regarding the bottom medium-density coral sand layer, if the reinforcement effect needs to be further improved, the distance between vibro-compaction points should be reduced to less than or equal to 3 m. For the loose coral sand layer with high-content fine particles, the optimized process of reverse insertion and vibration time increase can effectively improve the soil compactness between piles, but further reducing the distance between vibro-compaction points on this basis cannot significantly improve the final reinforcement effect.

Keywords: coral sand foundation; vibro-compaction; reinforcement process

珊瑚礁砂是一种广泛分布于“一带一路”沿岸各个国家的特殊岩土材料, 由于其易破碎、变形大、高压缩性的工程特性^[1-3], 珊瑚礁砂地基处理所适用的工艺与普通的陆源砂存在一定差异。目前, 学者对珊瑚礁砂工程性质方面已有较为深入的研究, 但关于吹填珊瑚礁砂地基处理的工程应用研究仍较少。贺迎喜等^[4]对珊瑚礁砂浅表层

地基进行低能强夯和振动碾压相结合的浅表层地基压实技术, 结果表明该技术能显著提高地基强度; 滕爱国等^[5]对珊瑚礁砂地基进行大量的原位测试, 结果表明珊瑚礁砂地基原位测试的结果换算与普通陆源砂存在较大的区别; 邱伟健等^[6-7]对吹填珊瑚礁砂地基进行振冲现场试验, 结果表明采用正确施工参数的加填料振冲法能够有效加固

吹填珊瑚礁砂地基；秦志光等^[8]对不同区域的珊瑚礁砂地基采用振动碾压、强夯、振冲方法进行地基处理，结果表明珊瑚礁砂地基采用振冲加固后可以达到中密、密实状态，加固后的珊瑚礁砂地基具有较高的强度和承载力。

本文依托实际工程，针对现场吹填珊瑚礁砂地基进行不同工艺的无填料振冲现场试验，测定不同工艺振冲后的标准贯入试验改变量，得出不同振冲间距与留振时间对振冲加固效果的影响。最后根据试验结果，确定后续大面积地基处理最适宜的振冲工艺。本工程的振冲工艺参数选取与试验结果可为类似工程提供参考。

1 工程概况

1.1 地质概况

依托东帝汶 Tibar 港地基处理工程，设计地震加速度 $0.53g$ ，原地层细粒含量较高，处理深度范围内平均细粒含量为 22%，采用无填料振冲密实法难以满足抗液化要求，故原地层采用碎石桩进行排水抗液化地基处理。但依托工程的西南泻湖吹填场地，地基处理深度范围内均为吹填珊瑚礁砂，细粒含量低，拟替换采用无填料振冲进行地基处理。

西南泻湖吹填场地设计高程为 5.5 m，地下水位在 2.4 m 附近。根据现场补勘钻孔，除了局部区域的局部深度细粒含量较高导致可振冲性较差之外，大部分吹填砂料细颗粒均小于 15%，级配曲线适宜无填料振冲，可振冲性好。局部细粒含量高，在 15%~50% 之间，大部分分布在高程 -0.5~2.5 m 的区域，厚度 2~3 m，可振冲性较差，但仅存在于局部区域，对整体加固效果影响应结合现场试验做进一步分析。

1.2 地基处理验收准则

根据技术规格书，该吹填珊瑚礁砂地基的验收指标为：地基允许承载力应至少满足 250 kPa ；工后长期沉降须满足 25 a 小于 35 mm ；回填区地震加速度为 $0.53g$ ，抗液化安全系数须大于 1.1。

根据设计文件，振冲地基处理后应满足水上相对密度 $D_{r1} \geq 75\%$ 、水下相对密实度 $D_{r2} \geq 80\%$ 的要求，参照 Idriss 等^[9]提出的 D_r 与标贯击数经验关

系，建立基于标贯击数的验收曲线，见图 1。

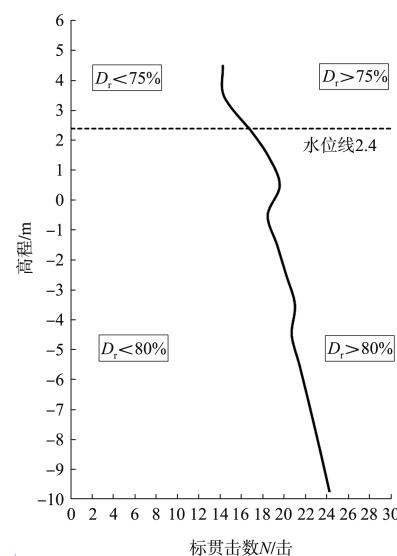
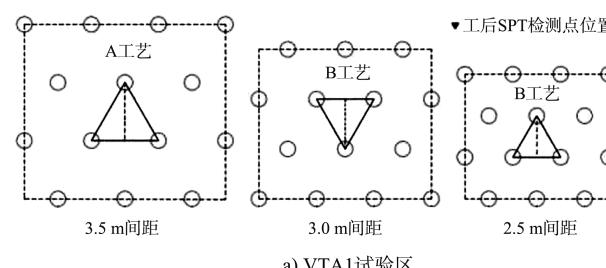


图 1 吹填珊瑚礁砂地基验收曲线

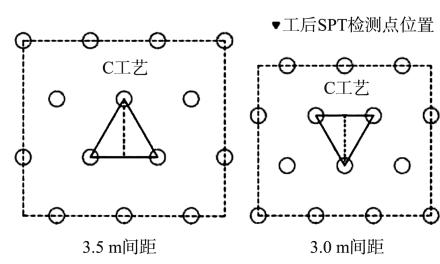
2 珊瑚礁砂无填料振冲工艺

2.1 试验区概况

为了验证泻湖区无填料振冲密实法的适用性，获取不同工艺参数、不同桩间距的加固挤密效果，选取典型吹填层的试验区 VTA1 和 VTA2 进行试验。试验开始前针对每个试验区进行了工前检测，试验结束后分别对每个试验区不同桩间距试验分区开展了标准贯入试验 (standard penetration test, SPT) 检测，试验区振冲点位平面布置以及检测点位见图 2。试验区工况见表 1。



a) VTA1 试验区



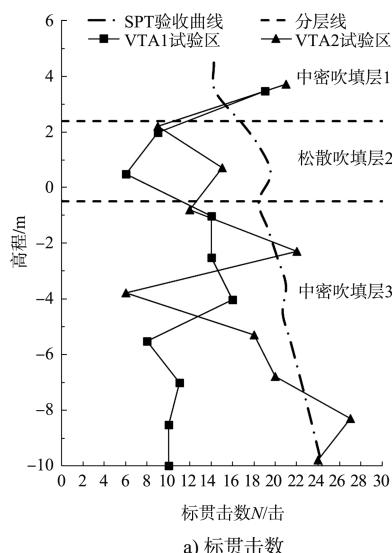
b) VTA2 试验区

图 2 试验区平面布置

表1 试验区工况

试验区	振冲工艺	布置形式	间距/m	振冲深度/m	检测点分布
VTA1	A			3.5	
	B			3.0	
	B	正三角形布置	2.5	15	形心、2等分点、3等分点
VTA2	C			3.5	
	C			3.0	

根据泻湖吹填场地试验区工前钻孔勘探情况分析,吹填场地根据密实度大致可分为3层:表层中密吹填层1的平均细粒含量为6.1%,平均标贯击数20击;松散吹填层2的平均细粒含量为26.1%,细粒含量较高,平均标贯击数为10击;中密吹填层3的平均细粒含量7.8%,平均标贯击数15击。试验区场地标贯击数与细粒含量(小于0.075 mm)随深度分布见图3。



a) 标贯击数

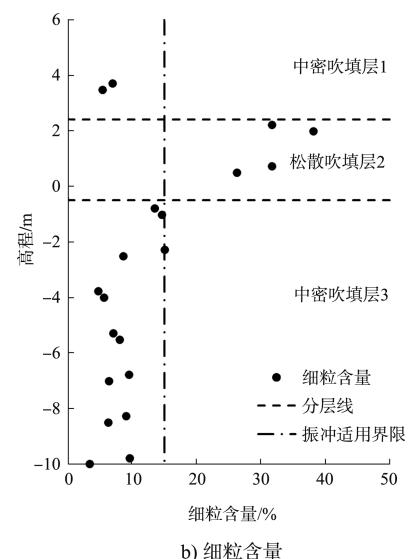


图3 试验场地标贯击数和细粒含量随深度分布

2.2 振冲工艺

无填料振冲设备选用的振冲器为北京振冲公司所生产的BJV180E-426型振冲器,参数为:功率180 kW,额定电流350 A,最大转速1 450 r/min,最大振幅18.9 mm,激振力276 kN,振冲头质量2.586 t,成桩直径1.0~1.2 m。

为了研究无填料振冲对吹填珊瑚礁砂的适用性、探讨不同施工工艺对加固效果的影响,采用A、B、C共3种施工工艺进行施工。为保证施工效果,3种施工工艺均采用振动下沉、底部留振、提升反插的施工工序。3种工艺在振动下沉、底部留振阶段大致相同,对于提升反插阶段则在不同地层设置存在差异,主要在细粒含量较高的松散吹填层2及其他低密实电流区采取加强振密措施,施工工艺对比见表2。

表2 施工工艺对比

工艺	振动下沉	底部留振	上提挤密		密实电流控制
			吹填层2底部至地表 (-0.5~5.5 m)	桩底至吹填层2底部 (-9.5~-0.5 m)	
A	缓慢振动下沉, 速率1~2 cm/s; 当密实电流大于 250 A时,降低下 沉速率		每次提升0.5 m,留振45 s	每次提升0.75 m,留振30 s	
B		孔底留振 时间90 s	每次提升0.5 m,留振45 s,再反 插0.5 m,留振45 s	每次提升0.75 m,留振30 s	振冲过程中,若发现 密实电流小于120 A, 则将振冲头提升0.5 m 再进行贯入密实,直 至密实电流大于120 A
C			每次提升0.5 m,留振60 s,再反 插0.5 m,留振60 s	每次提升1 m,再反插0.5 m并留 振30 s	

由表 2 可知, A、B 工艺区别主要在于松散吹填层底高程至地表提升反插振密阶段。B 工艺在 A 工艺每次提升阶段增加反插密实阶段。C 工艺则在 A、B 工艺基础进一步增强, 即将桩底至松散吹填层 2 底部工艺改为提升 1 m, 反插 0.5 m, 并留振 30 s, 而松散吹填层底部至地表则将提升反插留振时间加长, 增加至 60 s。A 工艺先行开展, 在完成后, 发现表层地基处理相比振前反而还松散, 因此在后续其他试验区及时调整了表层处理方案, 分别在振冲前对地表进行灌水, 提高地表层(水位以上)饱和度, 且振冲完毕之后再采用压路机进行碾压, 进一步提高表层振冲后表层密实度。

2.3 加固效果分析

2.3.1 工艺参数对振冲加固效果的影响

振冲的工艺参数对最终的加固效果存在一定的影响, 选取相同间距、不同工艺参数的试验组进行对比分析, 如图 4 所示。加固后的平均标贯击数对比见表 3。

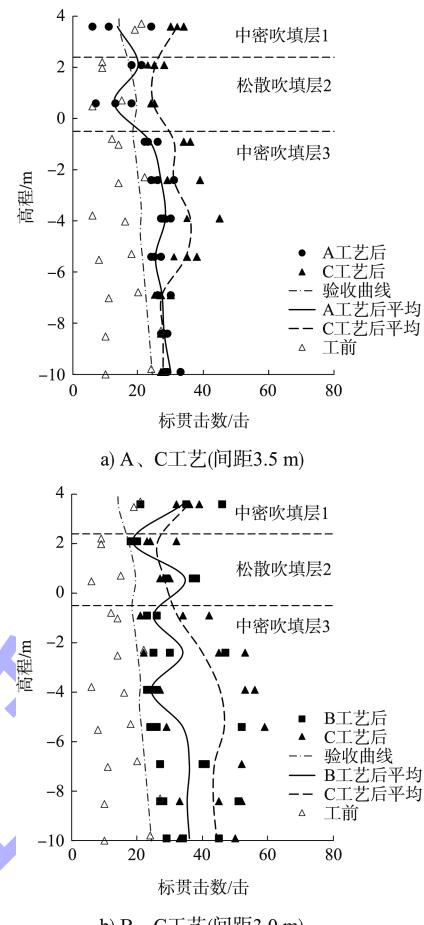


图 4 不同工艺加固效果对比

表 3 平均标贯击数对比

桩间距/m	地层	A 工艺		B 工艺		C 工艺	
		振前平均 N 值/击	振后平均 N 值/击	振前平均 N 值/击	振后平均 N 值/击	振前平均 N 值/击	振后平均 N 值/击
3.5	中密吹填层 1	19.0	13.7	-	-	21.0	32.0
	松散吹填层 2	7.5	16.3	-	-	12.0	25.0
	中密吹填层 3	11.9	27.1	-	-	18.4	30.8
3.0	中密吹填层 1	-	-	19.0	34.0	21.0	35.7
	松散吹填层 2	-	-	7.5	26.7	12.0	27.3
	中密吹填层 3	-	-	11.9	32.1	18.4	42.2

由图 4 和表 3 可知, 对于高细粒含量松散吹填层 2, C 工艺比 A 工艺在提升挤密阶段增加了反插, 振后平均 N 值可达 25 击, 远大于 A 工艺振后的 16.3 击, 加固效果提升幅度明显, 但进一步对比 B、C 工艺, C 工艺将留振时间由 45 s 增加至 60 s, 加固后平均 N 值分别为 26.7 和 27.3 击, 加固效果变化不明显, 且在高程约 0.5 m 位置, C 工艺加固效果反而比 B 工艺差, 由此可见对于高细粒

含量松散砂层, 过长留振时间未必能继续提高加固效果, 高细粒含量松散砂层存在最佳留振时间, 当大于最佳留振时间时, 加固效果反而出现降低, 这与叶观宝等^[10]对振冲提出的临界液化时间现象一致。对于底部中密吹填层 3, 当采用 3.5 m 间距时, C 工艺振后的平均 N 值达到 30.8 击, 相比 A 工艺的 27.1 击, 增加反插工艺加固效果提升幅度不明显, 但通过对比 B、C 工艺, 当采用 3.0 m 间

距时, C 工艺加固后平均 N 值可达 42.2 击, 远大于 B 工艺的 32.1 击, 可见对于中密砂吹填层 3, 当缩小振冲间距时, 增加反插工艺能显著提高桩间土密实度。

对于表层中密吹填层 1 加固效果分析可知, 加固前表层 1 平均 N 值已达 19 击, 处于中密状态, 当完成 A 工艺后, 表层不进行额外处理, 加固后效果反而比加固前松散。结合已有文献资料进一步分析, 这主要由于表层 1~2 m 上覆地层应力小、振冲器时周边土受到水平侧限压力小原因所致, 这与 Kirsch 等^[11]的研究成果一致。当采取措施后, 即振前对地表灌水, 提高表层(水位以上)饱和度, 且振冲完毕之后再采用压路机进行碾压, 表层加固效果提高明显, 加固后平均 N 值可提高至 32.0~35.7 击。

2.3.2 间距对振冲加固效果的影响

绘制 B、C 工艺不同振冲间距对不同的吹填珊瑚礁砂层的影响, 见图 5。B、C 工艺不同振点间距的加固效果对比见表 4。

表 4 B、C 工艺不同振点间距的加固效果对比

工艺	地层	3.5 m 间距		3.0 m 间距		2.5 m 间距	
		振前平均 N 值/击	振后平均 N 值/击	振前平均 N 值/击	振后平均 N 值/击	振前平均 N 值	振后平均 N 值
B	中密吹填层 1	-	-	19.0	34.0	19.0	45.3
	松散吹填层 2	-	-	7.5	26.1	7.5	29.5
	中密吹填层 3	-	-	11.9	30.8	11.9	37.7
C	中密吹填层 1	21.0	32.0	21.0	35.7	-	-
	松散吹填层 2	12.0	25.0	12.0	27.3	-	-
	中密吹填层 3	18.4	30.8	18.4	42.2	-	-

由图 5 和表 4 可知, 当采用相同 B 工艺加固时, 对于选取 3.0 和 2.5 m 间距均能明显提高桩间土密实度, 满足验收曲线要求。但在不同层位缩小间距对桩间土密实度提高幅度不同。对于低细粒含量中密吹填层 1 和 3, 减小振冲间距振后平均 N 值可分别由 30.8~34.0 击提升至 37.7~45.3 击, 整体加固效果增幅显著。除局部位置异常点, 如高程约-7.0 m 位置, 3.0 m 间距加固反而不如 2.5 m, 经分析可能由于 2.5 m 间距试验区存在局

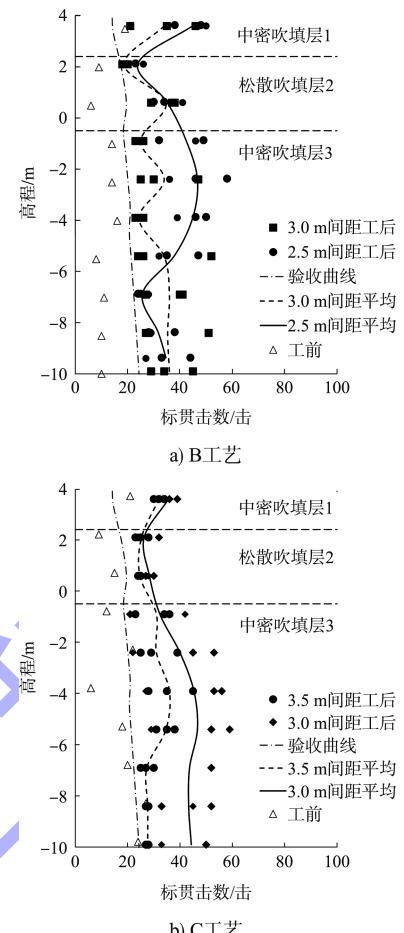


图 5 不同振点间距加固效果对比

部高细粒含量所致。对于细粒含量较高吹填层 2, 缩小间距其振后平均 N 值可由 26.1 击进一步提高至 29.5 击, 增幅不明显。

当采用 C 工艺加固时, 选取不同间距 3.5 和 3.0 m 加固也均能明显提高桩间土密实度, 满足验收曲线要求, 与 B 工艺加固后密实规律接近。对于低细粒含量中密吹填层 1 和 3, 缩小间距振冲平均 N 值可分别由 30.8~32.0 击提升至 35.7~42.2 击, 增幅明显。但对于细粒含量较高的松散吹填层 2, 缩

小间距其振后平均 N 值仅由 25.0 击提高至 27.3 击, 增幅不明显。

综上所述, 对于细粒含量较高的松散吹填层 2, 随着振点间距的减小, 振冲加固效果的提升幅度较小, 振点间距对其加固效果的影响有限; 但对于细粒含量较低的中密吹填层 1 和 3, 随着振点间距的减小, 振冲加固效果有明显提升。

2.3.3 后续振冲施工建议

由上述分析可知, 当设计振冲间距为 3.5 m 时, 仅 C 工艺整体能够满足验收要求; 当设计振冲间距为 3.0 m 时, B、C 工艺均能满足验收要求, 但 C 工艺所能达到的处理效果比 B 工艺更好。考虑到振冲功效以及经济性, 在确保加固效果满足前提下, 尽可能采用大间距进行施工, 但由于 3.5 m 间距采用 C 工艺时, 局部点位加固后标贯击数接近临界曲线, 为了确保后续工程保质完成、减少返工的情况, 建议吹填珊瑚礁砂大面积地基处理选用 C 工艺且振冲间距为 3.0 m。

3 结论

1) 对于松散珊瑚礁砂吹填层 2, 增加反插和提高留振时间工艺, 对桩间土密实度提高效果明显; 但对于底部中密珊瑚礁砂吹填层 3, 改进工艺对提升桩间土密实效果作用有限, 如须进一步提升加固效果应减小振点间距至 ≤ 3.0 m。而对于表层加固吹填层 1, 由于上覆地层应力小, 加固效果较差, 须结合额外的地基处理措施, 如振前灌水以及振后表层振动碾压。

2) 珊瑚礁砂地基的振冲加固效果随留振时间增加先快速增加而后逐渐趋于稳定, 留振时间达到 90 s 时, 振冲加固效果较好, 过长的留振时间对珊瑚礁砂吹填层加固效果影响较小。

3) 珊瑚礁砂地基的细粒含量对振冲加固的选取存在较大影响, 当细粒含量较低的区域进行振

冲加固时, 减少振冲间距可以明显提升最终的加固效果; 当细粒含量较高的区域(平均细粒含量 26.1%)进行振冲加固时, 减少振冲间距不能明显提升最终的加固效果。

参 考 文 献:

- [1] 杨志强, 赵威, 宋朝景. 钙质土层的工程地质调查[J]. 岩土力学, 1994(4): 53-60.
- [2] 崔翔, 胡明鉴, 朱长歧, 等. 珊瑚砂三维孔隙微观特性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3632-3640, 3686.
- [3] 鞠远江, 胡明鉴, 秦坤坤, 等. 珊瑚礁岛钙质砂细颗粒渗透运移规律研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1245-1252, 1265.
- [4] 贺迎喜, 董志良, 杨和平, 等. 吹填珊瑚礁砂(砾)用作海岸工程填料的压实性能研究[J]. 中外公路, 2010, 30(6): 34-37.
- [5] 滕爱国, 黄俊文, 王新, 等. 基于原位测试的珊瑚礁砂地基强度与变形参数关系初探[J]. 土工基础, 2017, 31(5): 576-578, 582.
- [6] 邱伟健, 杨和平, 贺迎喜, 等. 珊瑚礁砂作地基吹填料及振冲加固试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1517-1523.
- [7] 邱伟健, 杨和平, 刘岩, 等. 振冲挤密加固深厚吹填珊瑚礁砂地基试验研究[J]. 地震工程学报, 2021, 43(2): 459-467.
- [8] 秦志光, 袁晓铭, 曹振中, 等. 吹填珊瑚礁砂地基处理方法适用性与加固效果应用研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(1): 78-88.
- [9] IDRISI I, BOULANGER R. Soil liquefaction during earthquakes[M]. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute, 2008.
- [10] 叶观宝, 范红涛, 徐超, 等. 无填料振冲法在液化粉细砂中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 917-921.
- [11] KIRSCH K, KIRSCH F. Ground improvement by deep vibratory methods[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

(本文编辑 王璁)