

# 煤层气井造穴射流破岩试验研究

王 力

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:**通过水射流造穴进行洞穴完井是煤层气井重要的完井方式。为了优选造穴射流工具的喷嘴,提高射流造穴直径和效率,通过制备相似煤岩试样,采用室内试验的方法,进行了连续射流和空化射流的破岩效果试验,并在现场造穴施工中进行了应用。结果表明:自由射流条件下,连续射流在喷距为 200 mm 时破岩效果最好,空化射流在喷距为 300 mm 时破岩效果最好。淹没射流条件下,连续射流未能冲蚀煤岩试样;空化射流的冲蚀直径则呈先增加后减小并趋于稳定的状态,在淹没深度为 200 mm 时冲蚀直径达到最大,冲蚀深度随着淹没深度的增加而增加,在淹没深度为 300 mm 以后,冲蚀深度趋于稳定缓慢减小。研究结果为造穴射流工具的喷嘴选型及结构优化设计提供了依据。

**关键词:**煤层气井;造穴;喷嘴;空化射流

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)08-0001-05

**Experimental Study on Rock Breaking by Water Jet for Cavity Building in Coal Bed Methane Well/WANG Li (Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an Shaanxi 710077, China)**

**Abstract:** The cavity building by water jet is the important way of coal bed methane well completion. In order to optimize the nozzle for water jet tools to enlarge cavity diameter and improve cavity building efficiency, the similar coal samples were prepared, rock breaking effects were tested by continuous jet and cavitating jet in laboratory and the application was carried out in the field. The results showed that under the condition of free jet, the best rock breaking effects were at jet distance of 200mm and 300mm for continuous jet and cavitating jet respectively. Under the condition of submerged jet, the continuous jet could not erode the coal sample; the eroding diameter of cavitating jet increased first, then decreased tending to be stable; and when the submerged depth was 200mm, the eroding diameter reached the maximum. The eroding depth increased with the increase of submerged depth; by the submerged depth of 300mm, the eroding depth was tending to be stable and decreased slowly. This research provides the basis for nozzle selection and optical design of water jet tools.

**Key words:** coal bed methane well; cavity building; nozzle; cavitating jet

洞穴完井是煤层气开发有效的完井方式,在国内外得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。洞穴完井就是通过工具扩眼或压力“激动”的方式,在煤层段形成比井眼大得多的洞穴,增加煤层裸露面积,在洞穴周围形成较大面积的卸载区,提高煤层的渗透性以达到增产的目的<sup>[5]</sup>。近年来,煤矿开采领域在地面选择石门揭煤区域施工造穴煤层气井,进行大范围煤层卸压、增透,不仅能开采煤层气,还能为石门揭煤辅助消突,减少在煤矿井下待揭煤层打钻消突引起的安全隐患<sup>[6]</sup>。

目前煤层气井造穴工艺技术主要有机械造穴,空气动力造穴以及水射流造穴。单纯采用机械造穴,造穴半径小,造穴工具设计难度大;空气动力造穴操作难度大、需要专门装备且存在井底燃爆和环境污染等问题<sup>[2,7-8]</sup>。水射流造穴可以利用现有钻

井装备,工艺和工具简单,但造穴工具的射流性能直接影响造穴直径和效率。针对淮南谢一矿地面石门揭煤辅助消突井煤层造穴射流工具喷嘴的选型问题,根据不同射流形式的破岩机理与施工设备及工艺的便利性,选择在不同喷距与淹没条件下,对连续射流与空化射流进行了试验研究,得出了两种射流分别在自由射流和淹没射流时,不同喷距与破岩效果的关系以及淹没深度与破岩效果的关系。采用装有优选出的空化射流喷嘴的水射流造穴工具,在现场造穴作业中取得了良好的应用效果。

## 1 水射流破岩理论

在高压水射流破岩研究方面,前人进行大量理论和试验研究<sup>[9-13]</sup>,主要观点有准静态弹性破碎理

收稿日期:2016-05-16;修回日期:2016-06-15

**基金项目:**中煤科工集团有限公司创新基金项目“极短半径直井侧钻煤层气井开发技术与装备”(编号:2015ZD005);中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目“煤层气 TRD 煤层气增产技术与装备研究”(编号:2014ZD017)

**作者简介:**王力,男,汉族,1981 年生,助理研究员,地质工程专业,硕士,主要从事煤矿井下钻探工艺开发与推广工作,陕西省西安市高新区锦业一路 82 号, wangli2@cctegxian.com。

论、应力波破碎理论、水射流脉冲负荷引起疲劳破坏理论、水楔破碎理论、裂纹扩展破碎理论、气蚀(空化)破碎理论等。在射流形式对破岩效果的影响方面,连续射流的对岩石的主要破坏形式是卸载及射流冲击所产生的拉伸破坏;脉冲射流与连续射流的破岩过程相似,但破岩效率高于连续射流,是由于脉冲射流载荷持续的时间较短,岩石的压缩能量释放较为充分<sup>[14-15]</sup>;旋转射流具有较强的破岩能力,主要是因为旋转射流的每一质点均具有三维速度,易于在岩石表面形成拉伸和剪切破坏,且回流的干扰较少,提高了射流的能量利用率,降低了破岩比能,从而提高了破岩效率<sup>[16]</sup>。

空化射流的空泡在物体表面及其附近破裂时产生的能量高度集中,在表面许多局部区域产生极高的冲击压强和应力集中,使物体表面迅速破坏。在相同条件下,空化射流的局部压力放大效应使其切割效果大幅优于非空化射流<sup>[17-18]</sup>,是提高机械钻速的有效手段<sup>[19]</sup>。

以上大多都是石油钻井领域对高压水射流钻进时的破岩机理和过程以及钻进效率等方面的研究,对于不同射流形式的煤层气井造穴破岩效果研究较少。研究区煤层为松软煤层,强度小、易于射流剥落;目前常用的造穴射流工具大多为连续射流式,而理论上空化射流的破岩效果更好,同时这两种的喷嘴结构改进简便、可靠性高,采用现有钻井设备就能实现射流造穴。因此,选择连续射流喷嘴与空化射流喷嘴进行室内两种射流破岩的试验研究,并采用装有优选喷嘴的射流造穴工具进行实际工程应用试验。

## 2 试验研究

试验研究是射流破岩能力常用且直接的方法,通过对比自由和淹没条件下射流冲蚀直径、冲蚀深度,可以得到不同射流的破岩造穴能力和效果。

### 2.1 煤岩试样制备

为了接近实际煤岩层物理力学性质,采用相似材料的方法,采取了研究区煤矿井下的煤样,按照水:水泥:粉煤灰:煤粒:煤块为812:550:650:1800:3000的比例制备了煤岩试样,其中,煤块5~30 mm,大部分 $\geq 20$  mm;煤粒0.16~5 mm,大部分 $\geq 1.25$  mm。试样规格为150 mm $\times$ 150 mm $\times$ 200 mm。共计制备了6块试样,编号为1~6号,经养护后测得其容重分别为:1.310、1.316、1.306、1.310、1.296、1.298

g/cm<sup>3</sup>,平均抗压强度18 MPa,煤岩试样见图1。



图1 煤岩相似材料试样

### 2.2 试验装置

试验装置连接示意如图2所示,主要由水箱、泥浆泵、高压胶管、射流造穴工具、压力表等组成。试验装置中泥浆泵由液压泵站驱动,经过滤器把水箱的水加压经过高压胶管进入射流造穴工具经喷嘴喷射在煤岩试样上进行破岩,通过溢流阀可以调节泥浆泵输出压力,由压力表可以记录喷射压力,通过调节射流工具和试样与试验箱上的调节横杆连接位置(包括水平和垂直移动),即可调节喷距、淹没深度等参数。图3(a)是造穴射流工具,泵压作用下,射流工具水平喷射段(根据射流破岩距离,更换或加接)可以绕销轴转90°呈水平状态进行射流破岩造穴。图3(b)是试验用泥浆泵,最高压力10 MPa,流量200 L/min。图3(c)是试验用连续射流喷嘴与空化射流喷嘴,两种喷嘴的直径均为3 mm,连续射流喷嘴为圆孔型结构,空化射流喷嘴为缩放型结构(见图4),该结构喷嘴空化效果好,在较小压力时即可产生空化效果<sup>[20]</sup>。

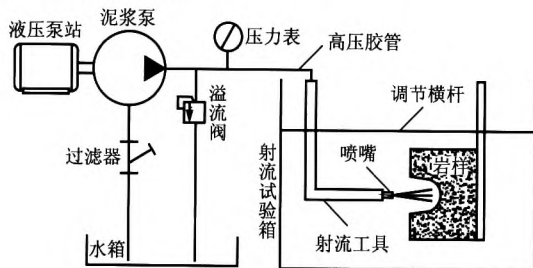


图2 试验装置连接示意图

### 2.3 试验结果及分析

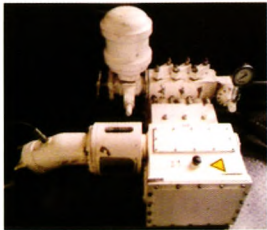
#### 2.3.1 自由射流条件下破岩效果对比

结合松软煤层射流造穴经验、射流工具可更换段的设计及造穴施工设计,分别用连续射流和空化射流喷嘴进行喷距为100、150、200、250、300、350和400 mm时的破岩试验,破岩效果以射流冲蚀直径和冲蚀深度的乘积表示。试验喷射压力为8 MPa,射流时间为30 s,测得各试验结果如表1所示,破岩试验见图5。





(a) 射流造穴工具



(b) 泥浆泵



(c) 连续与空化射流喷嘴

图 3 主要试验设备

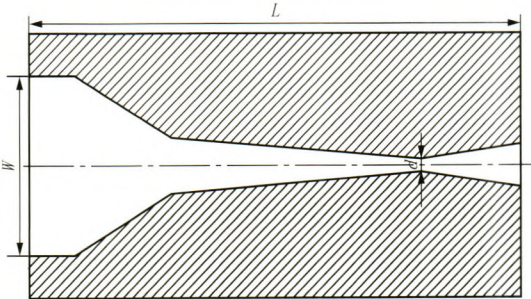


图 4 缩放型空化喷嘴结构示意图

表 1 自由射流条件下不同喷距时试验结果

| 喷距/<br>mm | 试样<br>编号 | 射流<br>类型 | 时间/<br>s | 压力/<br>MPa | 冲蚀直<br>径/mm | 冲蚀深<br>度/mm | 破岩效<br>果/mm <sup>2</sup> |
|-----------|----------|----------|----------|------------|-------------|-------------|--------------------------|
| 100       | 1        | 连续       | 30       | 8          | 41          | 34          | 1394                     |
|           |          | 空化       | 30       | 8          | 23          | 51          | 1173                     |
| 150       | 2        | 连续       | 30       | 8          | 50          | 28          | 1400                     |
|           |          | 空化       | 30       | 8          | 26          | 60          | 1560                     |
| 200       | 3        | 连续       | 30       | 8          | 60          | 29          | 1740                     |
|           |          | 空化       | 30       | 8          | 36          | 94          | 3384                     |
| 250       | 4        | 连续       | 30       | 8          | 52          | 25          | 1300                     |
|           |          | 空化       | 30       | 8          | 42          | 106         | 4452                     |
| 300       | 4        | 连续       | 30       | 8          | 48          | 18          | 864                      |
|           |          | 空化       | 30       | 8          | 46          | 122         | 5612                     |
| 350       | 1        | 连续       | 30       | 8          | 50          | 10          | 500                      |
|           |          | 空化       | 30       | 8          | 46          | 117         | 5382                     |
| 400       | 2        | 连续       | 30       | 8          | 60          | 9           | 540                      |
|           |          | 空化       | 30       | 8          | 48          | 83          | 3984                     |

在试验条件下,自由射流时在 100 ~ 400 mm 的喷距范围内,连续射流随着喷距的增加冲蚀直径逐渐增大而后又减小,最大冲蚀直径对应的喷距约为 200 mm。空化射流的冲蚀直径随喷距的增加而增加,但在不同喷距时,空化射流的冲蚀直径均小于连续射流。冲蚀深度方面,连续射流随喷距的增大而



图 5 喷射破岩试验

减小,空化射流冲蚀深度呈现先增加后减小的趋势,喷距为 300 mm 冲蚀深度最大,这表明,空化射流的有效破岩距离要优于连续射流。且综合破岩效果看,空化射流破岩效果在喷距为 200 mm 后要明显优于连续射流。图 6 为 200 mm 喷距自由射流下冲蚀后试样的照片。



(a) 连续射流



(b) 空化射流

图 6 200 mm 喷距自由射流下冲蚀后的试样

另外,根据图 7 所示破岩效果曲线,空化射流在喷距为 300 mm 时破岩效果最好,连续射流在喷距为 200 mm 时破岩效果最好,但在试验喷距内,连续射流的破岩效果与空化射流的破岩效果差距很大。

2.3.2 淹没射流条件下破岩效果对比

淹没深度较浅时,射流会受到扰流的影响,随着



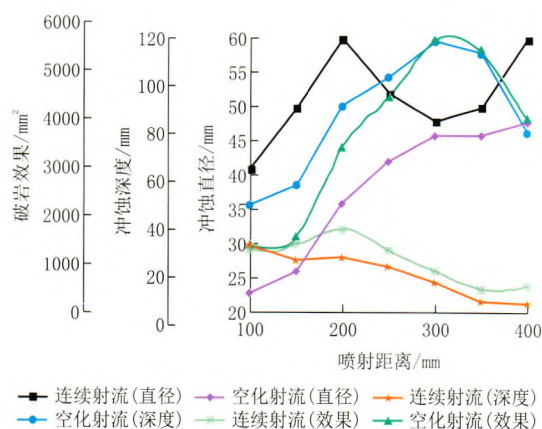


图7 自由射流下2种喷嘴的破岩效果对比

深度的增加,扰流影响会趋于稳定,试验对两种射流进行了100、200、300、400和500 mm等淹没深度下的破岩效果对比,试验喷射压力为8 MPa,射流时间为60 s,测得各试验参数如表2所示,破岩效果见图8。

表2 淹没射流条件下相同喷嘴不同射流时的试验结果

| 淹没深度/mm | 试样编号 | 射流类型 | 时间/s | 压力/MPa | 冲蚀直径/mm | 冲蚀深度/mm | 破岩效果/mm <sup>2</sup> |
|---------|------|------|------|--------|---------|---------|----------------------|
| 100     | 5    | 连续   | 60   | 8      | 0       | 0       | 0                    |
|         |      | 空化   | 60   | 8      | 30      | 10      | 300                  |
| 200     | 5    | 连续   | 60   | 8      | 0       | 0       | 0                    |
|         |      | 空化   | 60   | 8      | 85      | 23      | 1955                 |
| 300     | 6    | 连续   | 60   | 8      | 0       | 0       | 0                    |
|         |      | 空化   | 60   | 8      | 55      | 98      | 5390                 |
| 400     | 6    | 连续   | 60   | 8      | 0       | 0       | 0                    |
|         |      | 空化   | 60   | 8      | 48      | 96      | 4608                 |
| 500     | 6    | 连续   | 60   | 8      | 0       | 0       | 0                    |
|         |      | 空化   | 60   | 8      | 50      | 95      | 4750                 |

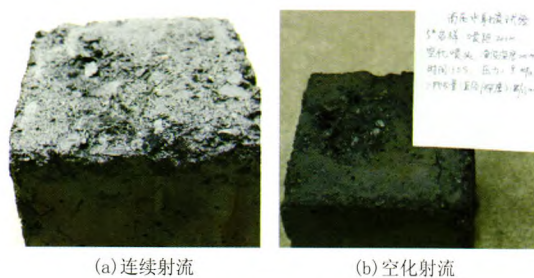


图8 淹没深度200 mm下冲蚀后的试样

由图9可见,在试验条件下,淹没深度为100~500 mm时,连续射流未能冲蚀煤岩试样,而空化射流的冲蚀直径则呈现先增加后减小并趋于稳定的状态,在淹没深度为200 mm时冲蚀直径达到最大。

另外,空化射流的冲蚀深度随着淹没深度的增加而增加,在淹没深度为300 mm以后,冲蚀深度趋于稳定缓慢减小的状态。这是由于空化射流是利用大量空化泡遇到阻滞爆裂来破碎岩石,其水力动能

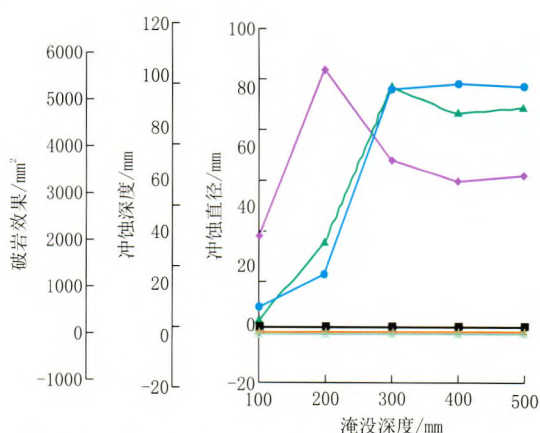


图9 淹没射流下2种喷嘴的破岩效果对比

破碎不占主导作用,同时空化射流喷出时会激发喷口周围空气泡的产生,因此淹没情况下空化射流仍能完成有效冲切破岩。随着淹没深度的增加,减小了射流周围水流扰动的影响,使空化射流的冲蚀深度趋于略有减小的稳定状态。

### 2.3.3 现场应用

采用装有空化射流喷嘴的射流造穴工具在淮南谢一矿石门揭煤辅助消突井的造穴作业中进行了应用。目标造穴地层为该矿-960 m水平运输石门揭B11组煤层(B11b、B11a、B11a下),总厚度6.0 m左右,为强突出煤层,预测瓦斯压力6.5 MPa,瓦斯含量13 m<sup>3</sup>/t。由于洞穴直径无法进行精确测量,现场以掏煤量作为造穴效果的衡量指标。采用装有空化喷嘴的造穴射流工具(3个3 mm空化喷嘴)、F-800泥浆泵在TMII01、TMII02、TMII03与TMII04等4口井共造穴掏煤415 m<sup>3</sup>。综合计算,4口井煤层段平均水射流造穴直径达4.6 m,提高了煤层气抽采率,提高了洞穴周围增透和消突面积,有效地降低了石门揭煤风险。

### 3 结论

(1)试验条件下自由射流时,在150 mm的喷距以内,连续射流破岩效果比空化射流破岩效果略好,但随喷距的增加,空化射流的破岩效果显著优于连续射流。空化射流在喷距为300 mm时破岩效果最好,连续射流在喷距为200 mm时破岩效果最好,但在试验喷距内,连续射流的破岩效果与空化射流的破岩效果差距很大。

(2)试验条件下淹没射流时,连续射流随着淹没深度的增加,均不能破岩。空化射流的冲蚀直径

则呈现先增加后减小并趋于稳定的状态,在淹没深度为 200 mm 时冲蚀直径达到最大,而冲蚀深度随着淹没深度的增加而增加,在淹没深度为 300 mm 以后趋于稳定缓慢减小的状态。

(3)在现场造穴施工应用中,空化射流造穴平均直径达 4.6 mm,取得了良好的应用效果。研究结果为造穴射流工具喷嘴选型及结构设计提供了基础。

### 参考文献:

- [1] 莫日和. 煤层气井造穴技术的实践与研究[J]. 中国煤层气, 2007, 4(3): 35-37, 42.
- [2] 蒋海涛, 周俊然, 董颖, 等. 煤层气井复合造穴技术研究及应用[J]. 中国煤层气, 2011, 8(6): 42-45.
- [3] Palmer I. Coalbed methane completions: a world view[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 82: 184-195.
- [4] 马永峰. 美国西部盆地煤层气钻井和完井技术[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(4): 32-34.
- [5] 万继方, 申瑞臣, 陈添. 煤层气井造穴技术特点分析[J]. 重庆科技学院学报, 2015, 17(2): 73-75, 84.
- [6] 李源, 周伟, 刘昆. 空气动力造穴工艺在石门揭煤钻井中的应用[J]. 煤矿安全, 2015, 46(12): 123-124.
- [7] 段明星, 高德利, 张辉, 等. 煤层气井空气动力洞穴完井力学机理研究[C]// 2008 年煤层气学术研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2008: 282.
- [8] 熊德华, 王珊珊. 煤层气井空气动力造穴工艺的理论与实践[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(10): 26-27, 61.
- [9] 倪红坚. 高压水射流破岩机理的数值模拟研究[D]. 山东东营: 石油大学(华东), 2002.
- [10] 王瑞和, 倪红坚. 高压水射流破岩钻孔过程的理论研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(4): 44-47.
- [11] 程大中. 高压水射流与机械刀具结合破岩初步试验总结[J]. 高压水射流, 1982, 17(2): 1-13.
- [12] 田和金, 李璠, 王爱华, 等. 岩石动力学试验及其在油田开发中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(S1): 889-894.
- [13] 倪红坚. 高压水射流破岩机理的数值模拟研究[D]. 山东东营: 石油大学(华东), 2002.
- [14] 倪红坚, 王瑞和. 脉冲射流破岩规律的数值试验[J]. 石油钻探技术, 2002, 30(6): 15-17.
- [15] 倪红坚, 王瑞和. 脉冲水射流破岩的数值模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(5): 12-14.
- [16] 王瑞和, 倪红坚. 旋转水射流破岩机理的数值模拟分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(1): 33-35.
- [17] 徐依吉. 超高压水射流理论与应用基础研究[D]. 四川成都: 西南石油大学, 2004.
- [18] 向文英. 淹没射流中磨料与空泡的相互关系研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [19] 李根生, 史怀忠, 沈忠厚, 等. 水力脉冲空化射流钻井机理与试验[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 239-243.
- [20] 卢义玉, 李晓红, 向文英. 空化水射流破碎岩石的机理研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1233-1237.

## 第四届探矿工程学术研讨会(EEF China 2016)二号通知

由《探矿工程(岩土钻掘工程)》编辑部和地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室、成都理工大学环境与土木工程学院、2011计划-地质灾害防控协同创新中心共同主办的第四届探矿工程学术研讨会(EEF China 2016)(原“探矿工程学术论坛”)拟定于2016年10月15-18日在成都理工大学怡东国际酒店召开。

### 一、会议的主题

环境·生态·资源——探矿工程服务民生新战场。

### 二、会议内容

●地质灾害监测、预防与治理(滑坡、泥石流、地面沉降、矿山尾矿等)

- 抢险救灾(矿山坍塌与水患、抗旱打井、防洪、地震等)
- 环境污染调查与治理(土壤、地下水等)
- 非常规能源勘探(天然气水合物、页岩气、油页岩、煤层气等)
- 地热资源勘察(中低温深部地热资源、浅层地热能、干热岩等)

### 三、会议报名方式及相关事宜

(1)网络报名:探矿工程在线 [www.tkgc.net](http://www.tkgc.net)—第四届探矿工程学术研讨会—参会报名,按提示填写信息。

(2)微信报名:请扫描本页右下角二维码报名。

(3)回执表报名:探矿工程在线 [www.tkgc.net](http://www.tkgc.net)—第四届探矿工程学术研讨会—下载回执表—填写相关信息后邮件发回至 513802975@qq.com。

由于本届会议会期与成都理工大学校庆同期,酒店客房紧张,请参会代表尽量于2016年9月20日前完成报名程序,以方便安排食宿。

逾期报名人员不能确保会议酒店住房,只能尽量就近安排。

会务费(含资料费、场租、会议期间活动费用)1800元/人,食宿统一安排,费用自理。

### 四、联系方式

#### (1)会议秘书处:

①《探矿工程(岩土钻掘工程)》编辑部,电话:010-68320471, 0316-2096324

②成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,电话:028-84073685

③成都捷丰展览展示服务有限公司,电话:028-86715056

#### (2)联系人:

参会咨询:方 侠([chengdujiefeng2013@163.com](mailto:chengdujiefeng2013@163.com), 15208195667)

张 进(513802975@qq.com, 13661232657)

王建华(396981878@qq.com, 13903167926)

赞助咨询:邓伟伟(601286539@qq.com, 18631689330)

周红军(503581735@qq.com, 13803220507)

报告咨询:李 艺(617140994@qq.com, 13910594230)

陈礼仪([cly@cdut.edu.cn](mailto:cly@cdut.edu.cn), 13658056638)

了解会议详情见本期封二彩页或登录会议官网 [www.tkgc.net](http://www.tkgc.net)。



扫描报名