



# 城市大口径供水管道爆管三维 扫描建模精细化分析与模拟

**胡群芳** 同济大学土木工程学院 防灾研究所，教授  
上海防灾救灾研究所，所长助理/研究室主任  
中国土木工程学会工程风险与保险研究分会，副秘书长

2018年9月14日星期五



## 目录

1. 上海11·16爆管事件概况
2. 供水管道爆管三维建模与分析
3. 结论与讨论



## 一、上海11·16爆管事件概况

2017年11月16日14:35，上海市四平路溧阳路口供水管网DN1200铸铁水管发生爆管。



5 Confidential

海克斯康  
HEXAGON

## 一、上海11·16爆管事件概况

### ● 爆管事故全过程情况（约18h）：

#### ➢ 2017年11月16日

- 下午13:30，四平路溧阳路局部地面发生**冒气突水事故**，路面有局部积水。
- 下午14:40，四平路溧阳路附近**突发爆管**，路面发生大面积积水，造成67户沿线民居和商铺进水，四平路**交通中断**。
- 下午15:35，水务等部门接警后进行**紧急处置**，关闭四平路-四川北路水阀，开启周边排水泵站抢排和抢修。
- 下午16:30，确认破损DN1200上方有横穿的**2根燃气管**。
- 晚上19:00，四大管道部门到场**紧急抢修**，路面积水已排除，完成**燃气管保护措施**，其它管线交底也已完成。
- 晚上22:00，四平路南向北交通全面恢复，制定抢修方案，**拆除破损管道**。

#### ➢ 2017年11月17日

- 凌晨0:00，**新管道安装完成**，半小时后逐步开启阀门灌水。
- 凌晨1:37，事故管道抢修完成，管网进行**通水测试**，完成冲水和浊度0.9NTU。
- 清晨6:40，现场**抢修完成**，经路面平整划线，四平路北向南**交通正式恢复正常**。

6 Confidential

海克斯康  
HEXAGON

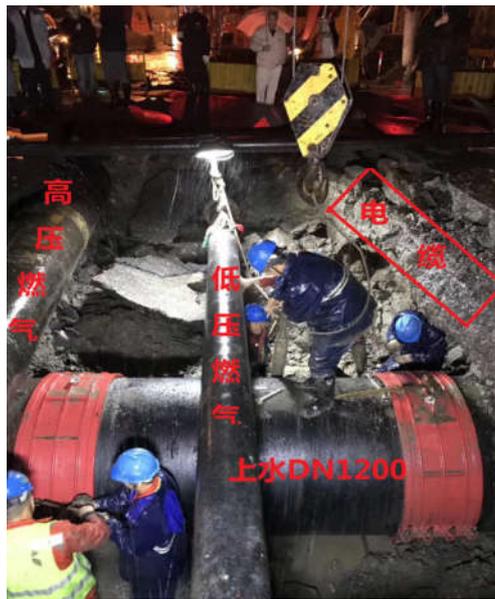
### 一、上海11·16爆管事件概况 爆管事故现场照片：



7 Confidential



### 一、上海11·16爆管事件概况

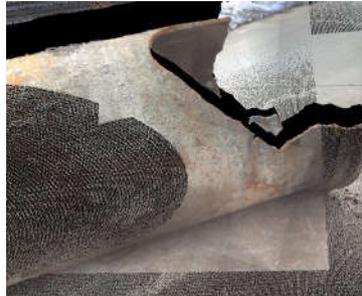
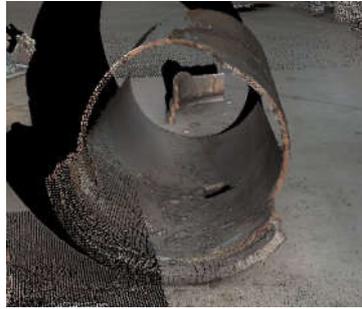


8 Conf



### 一、上海11·16爆管事件概况

- 爆管事故管道高精度采样



- 事故管段3D三维建模分析
- 事故管道开裂破坏过程
- 事故管道接口腐蚀及开裂时间推断
- 事故管道材质物理力学测试

9 Confidential



### 一、上海11·16爆管事件概况

- 爆管事故现场供水管道图：



对象编号	管径	管材	覆土厚度	年份
ID6344	300	铸铁	1m	-
ID6694	300	铸铁	1m	-
ID2310	1200	钢	-	1994
ID208	1500	钢	0.6m	1983
<b>ID901</b>	<b>1200</b>	<b>铸铁</b>	<b>1.1m</b>	<b>1977</b>
ID3502	300	铸铁	0.8m	-
ID1719	1200	铸铁	-	1977

根据现场估计



DN1200铸铁水管上方正交DN700和DN300燃气管各一根，分别在承插口两侧。

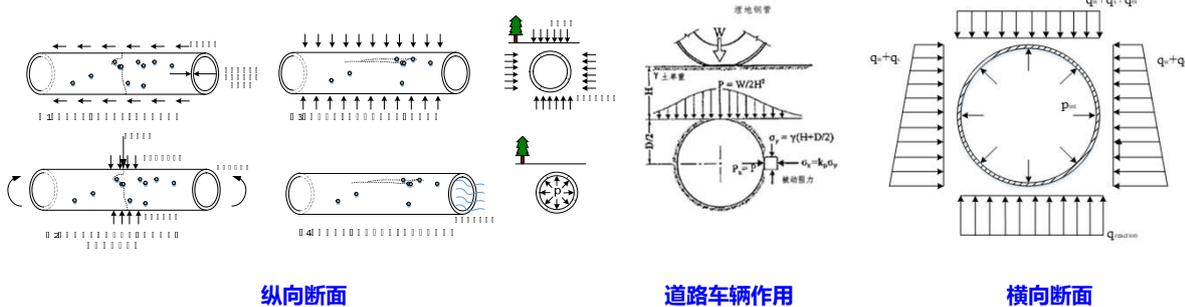
10 Confidential



## 二、供水管道爆管三维建模与分析

### ● 管道力学分析

埋地管道铺设于道路地表以下，考虑**纵向断面**和**横向断面**，主要承受荷载包括：**结构自重、输送介质（水或者气）、周边土体荷载、地面荷载（车辆）、温度荷载和自然灾害荷载等**，现行国内外规范对其设计荷载进行了详细的规定。



纵向断面

道路车辆作用

横向断面

**精细化建模分析难点是：管道爆管裂口几何特征，管道爆管物理过程模拟**

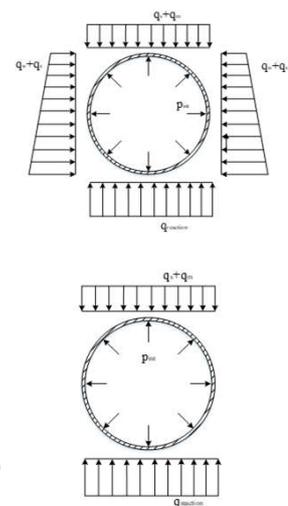
11 Confidential



## 二、供水管道爆管三维建模与分析

根据现场情况，对事故管道物理建模分析假定如下：

- **管道：**  
公称直径DN1200，外径1255mm，管壁厚度15.2mm  
管材灰口铸铁，双折线模型，弹性模量65GPa，应变0.2%屈服/0.5%失效
- **荷载：**  
主要考虑覆土层荷载+道路车辆荷载  
荷载模式简化为右图所示（分为有约束、无约束两种）  
覆土层厚1.1m；道路等级一级，土体重量18.5kN/m<sup>3</sup>
- **破损工况**  
假定管道破口在接口附件环向最大弧线长度1/3圆周（参考3D scanning）  
考虑燃气管道对事故管道垂直荷载作用



12 Confidential

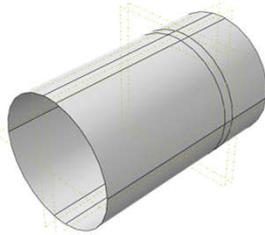
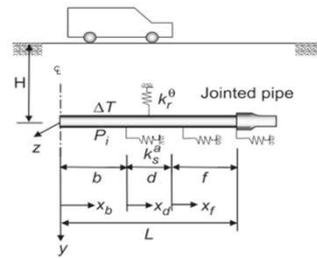


## 二、供水管道爆管三维建模与分析

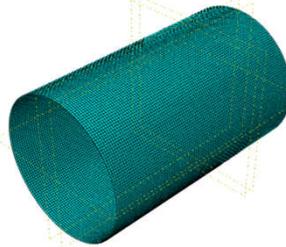
### ● 力学计算工况

- a) 正常受力（土体和道路荷载条件）
- b) 管道横跨集中力（附加燃气管道影响）
- c) 管道损坏（损坏开裂及破坏过程）
- d) 管道爆管（渗漏过程及爆管影响）

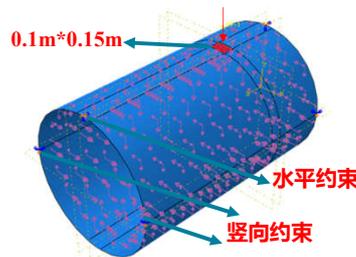
### ● 数值建模过程



几何模型：取中线直径  
0.619m，长度方向取2m。



网格：取0.02为网格尺寸  
单元：典型壳体单元S4R



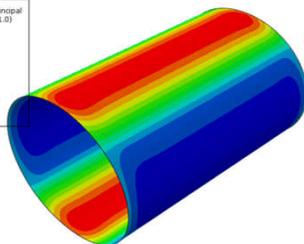
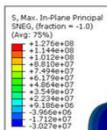
0.1m\*0.15m  
荷载与边界条件：施加规定荷载；  
管末端关键点施加位移约束。



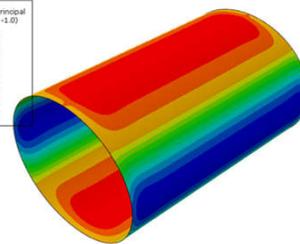
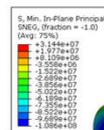
13

## 二、供水管道爆管三维建模与分析

### A-1) 正常受力：管道未破损，两侧无土体约束，管道极限承载力



主应力 $\sigma_1$ 云图



主应力 $\sigma_3$ 云图

应力：铸铁为脆性材料，考察其材料拉压主应力。

最大拉应力出现在管道顶部约127.6MPa

最大压应力出现在管道侧壁约108.6MPa

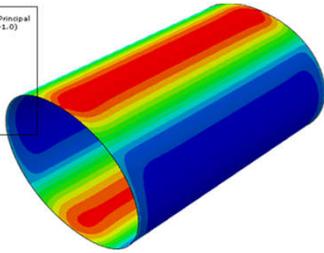
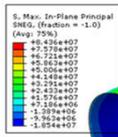
受拉区均接近**临界不安全状态**



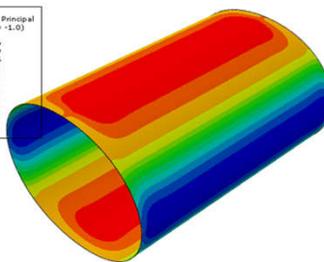
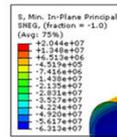
14 Confidential

## 二、供水管道爆管三维建模与分析

A-2) 正常受力: 管道未破损, 两侧有土体约束, 管道极限承载力



主应力 $\sigma_1$ 云图



主应力 $\sigma_3$ 云图

**应力:** 铸铁为脆性材料, 考察其材料拉压主应力。

最大拉应力出现在管道顶部约84.3MPa

最大压应力出现在管道侧壁约63.1MPa

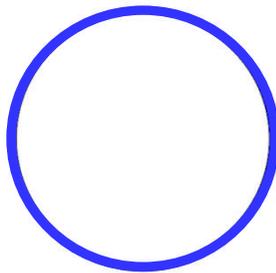
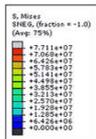
拉压均处于**安全状态**

15 Confidential

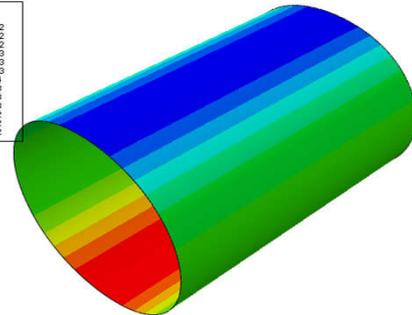
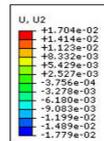


## 二、供水管道爆管三维建模与分析

A-2) 正常受力: 管道未破损, 两侧有土体约束, 管道极限承载力



Step: Step1 Frame: 0  
Total Time: 0.000000



ODB: shellpipe.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Tue Nov 28 12:39:33 GMT+08:00 2017  
Step: Step-1  
Increment: 0 Step Time = 0.000  
Primary Var: U, U2  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+01

**变形:** 竖向变形为管顶管底位移和约34.7mm

\*规范未对灰口铸铁竖向变形做规定

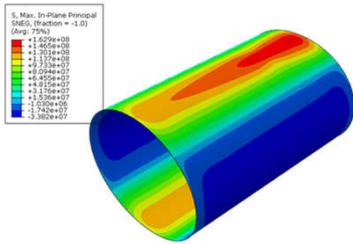
采用球墨铸铁的规定, DN1200管道限值为24~36mm。

16 Confidential

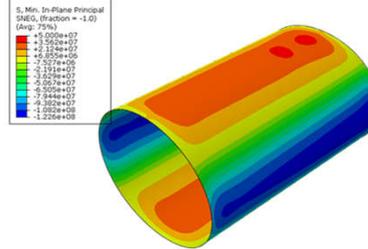


## 二、供水管道爆管三维建模与分析

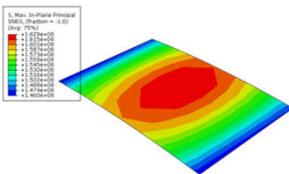
**B-1) 管道横跨燃气管道 (附加影响) : 管道未破损, 两侧无约束, 管道极限承载力**



主应力 $\sigma_1$ 云图



主应力 $\sigma_3$ 云图



受压迫区域 $\sigma_1$ 云图

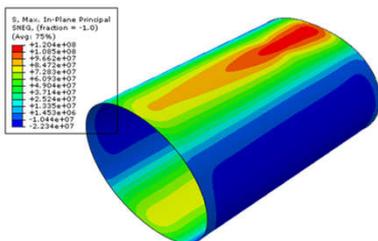
**应力:** 施加10kN的上压管道集中力  
 最大拉应力在管线顶部受压迫处约162.9MPa  
 最大压应力出现在管线侧壁约122.2MPa  
 拉压均处于**不安全状态**  
 (由于集中力已经很大, 不再提高)



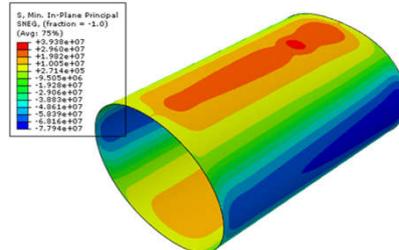
17 Confidential

## 二、供水管道爆管三维建模与分析

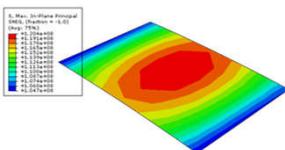
**B-2) 管道横跨燃气管道 (附加影响) : 管道有破损, 两侧有约束管, 管道极限承载力**



主应力 $\sigma_1$ 云图



主应力 $\sigma_3$ 云图



受压迫区域 $\sigma_1$ 云图

**应力:** 施加10kN的集中力  
 最大拉应力在管线顶部受压迫处约120.4MPa  
 最大压应力出现在管线侧壁约77.9MPa  
 仍处于**安全状态** (由于集中力已经很大, 不再提高)



18 Confidential

## 二、供水管道爆管三维建模与分析

**B-2) 管道横跨燃气管道 (附加影响) : 管道有破损, 两侧有约束管, 管道极限承载力**



**变形: 竖向变形为管顶管底位移和**

**最大变形位于靠近集中力的管端截面, 约43.4mm**

\*规范未对灰口铸铁竖向变性做规定: 采用球墨铸铁的规定, DN1200管线限值为24~36mm。

19 Confidential

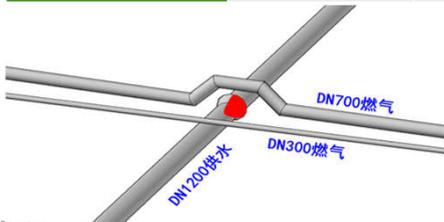


## 二、供水管道爆管三维建模与分析

➢ **正常状态力与管道横跨集中力受力状态对比: 管道极限承载力**

管道荷载状态	正常状态		管道横跨影响	
	无约束	有约束	无约束	有约束
管顶-最大拉应力 $\sigma_{t,max}$ (MPa)	127.6	84.3	162.9	120.4
管底-最大压应力 $\sigma_{c,max}$ (MPa)	108.6	63.1	122.2	77.9
管体变形 $u_{max}$ (mm)	--	34.7	--	43.4

灰口铸铁管道屈服应力 $\leq 130$ MPa



DN1200铸铁水管上方正交DN700和DN300燃气管各一根, 分别在承插口两侧。

20 Confidential

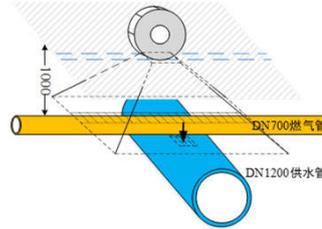


## 二、供水管道爆管三维建模与分析

➤ **横跨附加燃气管道影响分析：**管道未破损，两侧有约束，管道极限承载力

✓ **计算假定图示：**考虑由于轮压使DN300燃气管受压变形后，在事故管线上作用附加集中力，假定四种荷载作用程度（按照25%~100%折减。

✓ **模拟结果表明：**考虑轮压作用时，管顶最大拉应力 $\sigma_{t,max}$ 会发生提高，甚至直接导致管体破坏。



集中力 物理量	0	6kN(25%)	12kN(50%)	18kN(75%)	24kN(100%)
$\sigma_{t,max}$ (MPa)	84.3	105.3	127.9	150.6	173.2
$\sigma_{c,max}$ (MPa)	63.1	71.7	82.5	96.3	110.3
$u_{max}$ (mm)	34.7	39.9	45.2	50.4	54.7

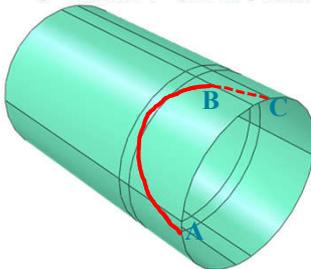
注：蓝色表示超限（变形）或破坏（应力），铸铁管道屈服压力 $\leq 130$ MPa。

21 Confidential



## 二、供水管道爆管三维建模与分析

**C-0) 管道损坏（损坏开裂及破坏过程）：**管道发生破裂，两侧有约束，管道破裂

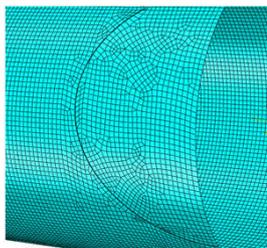


**几何模型：**取中线直径0.619m，长度方向取2m。

**划分网格：**取0.02为网格尺寸

**计算单元：**典型壳体单元S4R

**荷载与边界条件：**按照前文施加荷载；于管末端关键节点施加位移约束。



**管道破口：**破口形式如图中曲线AB所示。

曲线ABC为直径1.2m的半圆柱与管道壁的交线。

AC圆弧长约为圆周的1/3，破口宽度2mm。

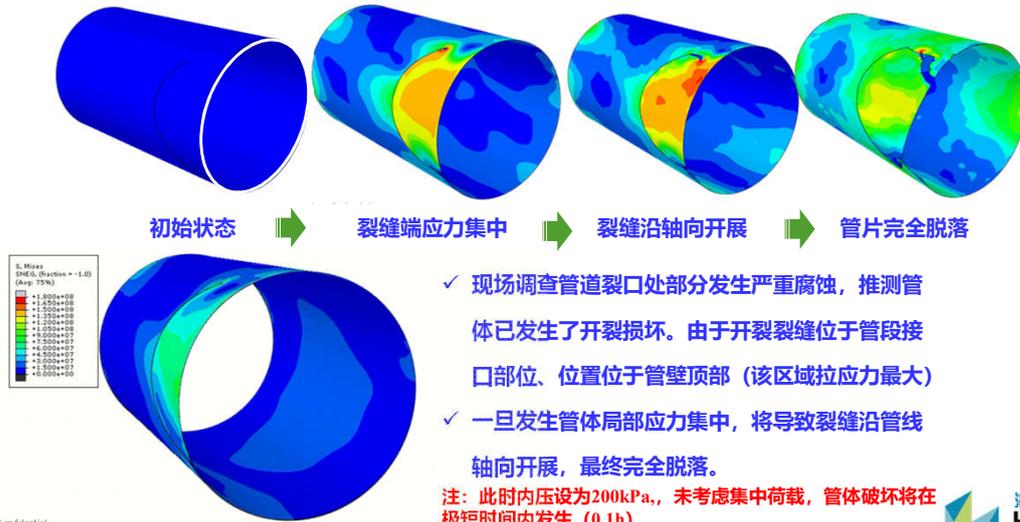
破口局部网格图

22 Confidential



## 二、供水管道爆管三维建模与分析

**C-1) 管道损坏 (损坏开裂及破坏过程) : 管道内压200kPa, 两侧无束管, 管道破裂**

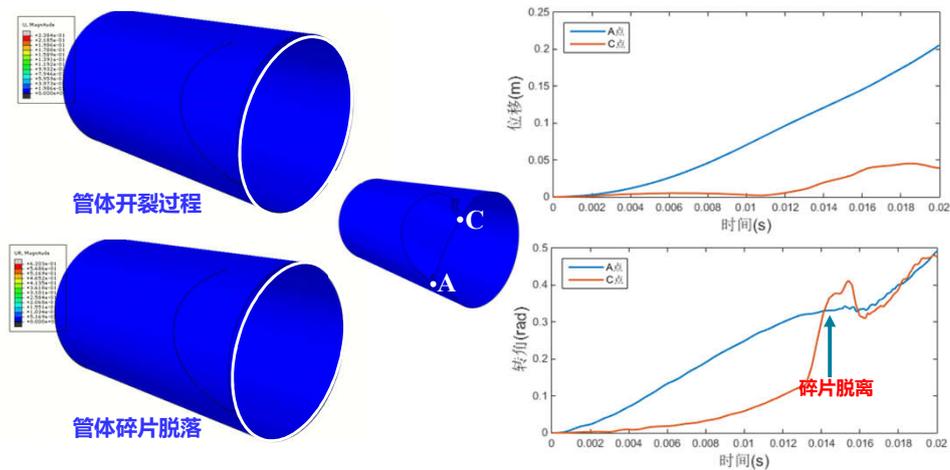


23 Confidential

海克斯康  
HEXAGON

## 二、供水管道爆管三维建模与分析

**C-2) 管道损坏 (损坏开裂及破坏过程) : 管道内压200kPa, 两侧有约束, 管道破裂**



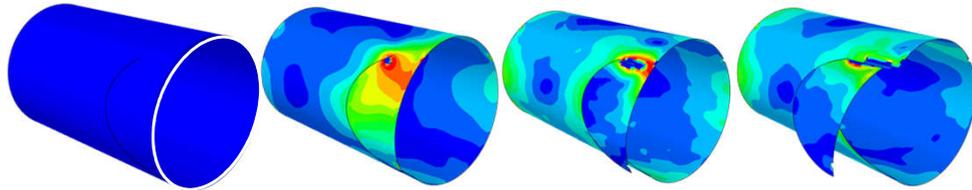
- 碎片完全脱离前, A点位移转角均远大于C点 (碎片向上转动) ;
- 碎片完全脱离后, 两点的转角几乎相同 (碎片仅平动不再转动) ;

24 Confidential

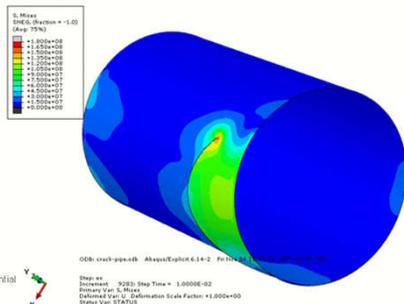
海克斯康  
HEXAGON

## 二、供水管道爆管三维建模与分析

**C-2) 管道损坏 (损坏开裂及破坏过程) :** 管道内压100kPa, 两侧有约束, 管道破裂



初始状态 → 裂缝贯通管体破碎 → 破裂管体向外弹出 → 管道发生爆管



- ✓ 现场调查管道裂口处部分发生严重腐蚀, 推测管体已发生了开裂损坏。由于开裂裂缝位于管段接口部位、位置位于管壁顶部 (该区域拉应力最大)
- ✓ 一旦发生管体局部应力集中, 将导致裂缝沿管线轴向开展, 最终完全脱落。

注: 此时内压设为100kPa, 未考虑集中荷载, 管体破坏将在极短时间内发生 (0.15h)。

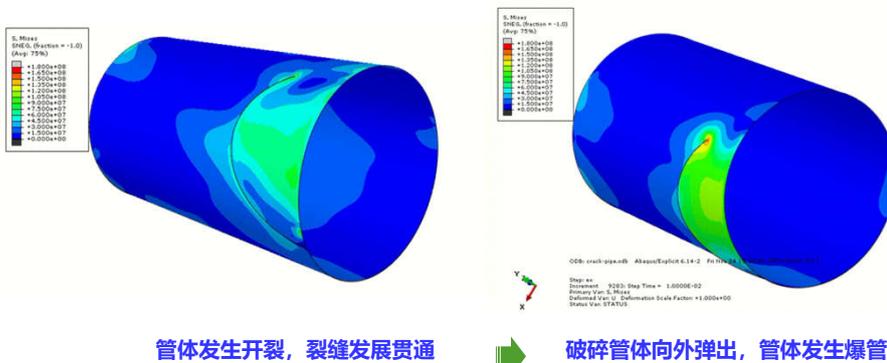


25

Confidential

## 二、供水管道爆管三维建模与分析

➢ **管道损坏开裂及破坏过程对比:** 管道发生破裂, 两侧有约束, 管道内压不同



26

Confidential



## 二、供水管道爆管三维建模与分析

城市市政供水管网爆管事故主要因素分析：

- 管道→材料腐蚀、劣化→结构损坏、强度降低、抗变形差→渗漏/爆管
- 管道→路面车辆超载及邻近施工→外荷载过大、大变形破坏→爆管/服务中断
- 管道日常漏损→水土流失→部分管段无支撑脱空、应力集中→塌陷/爆管
- 极端气候→温差变化大→管道内压负载大或温度应力过大→爆管/服务中断
- 突发性灾害（地震）→管网系统→结构破坏、系统瘫痪→服务中断/系统瘫痪



**管道及管网结构安全是保障管网系统运行安全的基础！**

27 Confidential



## 二、供水管道爆管三维建模与分析

### ➢ 类似事故分析

2016年2月16日晚21:30曹杨、武宁等测压点，真南、真北、金沙江路等泵站压力有较大幅度降低，经现场勘查为金沙江路（近中山北路）DN1200爆管。23:10阀门关闭，关水范围为中江路关至中山北路。



28 Confidential



## 二、供水管道爆管三维建模与分析

### ➤ 管道渗漏及接口连接受力影响分析

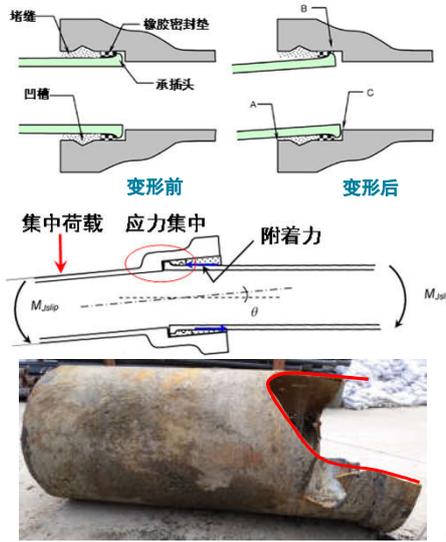


金沙江路DN1200爆管 (2016-2-16)

虹梅南路下匝道DN3500爆管 (2016-1-28)



2018年2月1日 浦东南路 张杨路 DN700



四平路溧阳路DN1200铸铁管 (2017-11-16)

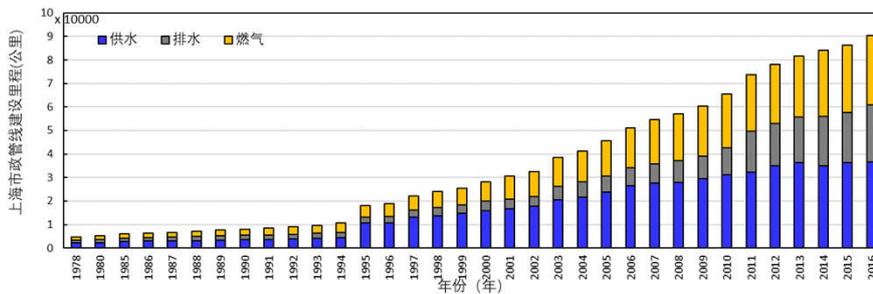


29 Confidential

## 三、结论与讨论

### 上海城市市政管网运行安全面临主要挑战包括：

- ❑ 总体数量庞大、部分敷设年代久，潜在老化病害腐蚀问题严重。
- ❑ 管网系统日常运行中泄漏问题突出，安全隐患或影响大。
- ❑ 管网系统遭受第三方破坏、极端温度、周边荷载影响问题突出。
- ❑ 市政管网供应用户众多，运行调度风险预警及应急能力亟待提升。



30 Confidential



### 三、结论与讨论

➢ 美国政府及ASCE持续对城市市政管网运行安全问题高度关注

**1988-2017年，每四年一次（7次）** —— 不仅仅是我国面临的挑战，全世界问题突出

Category	1988*	1998	2001	2005	2009	2013	2017
Aviation	B-	C-	D	D+	D	D	D
Bridges	-	C-	C	C	C	C+	C+
Dams	-	D	D	D+	D	D	D
Drinking Water	B-	D	D	D-	D-	D	D
Energy							
Hazardous Waste							
Inland Waterways							
Levees							
Ports							
Public Parks & Recreation							
Rail							
Roads							
Schools							
Solid Waste							
Transit	C-	C-	C-	D+	D	D	D-
Wastewater	C	D+	D	D-	D-	D	D+
GPA	C	D	D+	D	D	D+	D+
Cost to Improve**	-	-	\$1.3T	\$1.6T	\$2.2T	\$3.6T	\$4.59T



31

Confidential

<https://www.infrastructurereportcard.org/>



### 三、结论与讨论

- 徕卡ScanStation P40超高速三维激光扫描仪为城市市政管网三维精细化建模分析提供关键技术与工具，可解决城市大口径管道**渗漏、爆管**等机理分析，避免发生影响城市运行安全灾难性的**事件**（如水管喷涌、路面崩塌塌陷及积水）。
- **管道结构安全**是管网系统安全运行的基础和关键，要重视**道路交叉口区域多种管道交叠敷设条件**中的供水管道事故检隐患排查，徕卡P40新一代超高速三维激光扫描仪拥有新的应用场景与需求。
- 供水管道**受力、第三方破坏和外界环境变化**是导致管道发生开裂破坏的**关键因素**。管道开裂后在外部环境和内水压、周围环境变化等**综合因素**作用下易发生**爆管事故**。
- 制订**供水管道和管网保护条例或办法**，实施城市管网和管道安全风险评估，开展管网系统运行安全**预防式养护管理**。

**感谢上海市供水调度监测中心、上海东测科技有限公司等予以大力支持！**

32

Confidential



# 谢 谢

胡群芳 同济大学土木工程学院 防灾研究所，教授  
huqunf@tongji.edu.cn



如果您对此篇PPT感兴趣，请扫描二维码

