

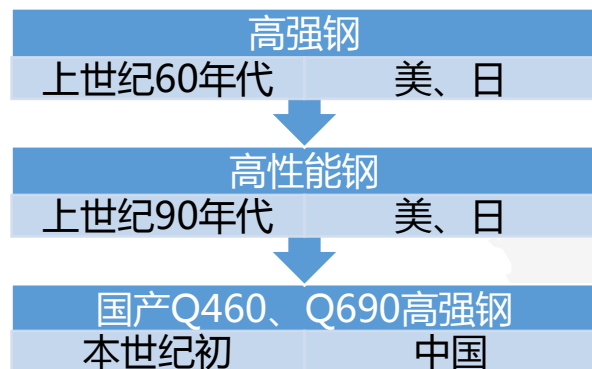


高强钢角焊缝力学性能研究

汇报人：赵琛 1630643

指导老师：孙飞飞 教授

研究背景



1	4
2	
3	5



序号	建筑名称	构件类型	钢材名义屈服强度 (MPa)
1	德国, Berlin, Sony Center大厦	屋顶桁架	460 / 690
2	法国, Millau大桥	箱形主梁	460
3	中国, 北京, 国家体育场	承重构件	460
4	日本, Yokohama Landmark Tower	H形截面柱	600
5	中国, 央视新台址	角钢构件	460



同济大学
TONGJI UNIVERSITY

多高层钢结构及钢结构抗火研究室

Research Group for Multi-Storey and Tall Steel Buildings and Fire-Resistance of Steel Structures

高强钢角焊缝—计算方法

Butler和Kulak

考虑焊缝方向与受力方向的夹角 θ 的情况下，选取了夹角为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 进行了拉伸试验

$$R_{ult} = \frac{10 + \theta}{0.92 + 0.0603\theta}$$

Miazga和Kennedy

采用E7014焊条，选取两种焊脚尺寸进行了两组共42个试件的试验，结果表明，5mm焊脚尺寸的正面角焊缝极限强度是侧面角焊缝的**1.28倍**，而9mm焊脚尺寸则为**1.60倍**。

Lesik和Kennedy

综合了以上研究成果，提出了正面角焊缝和侧面角焊缝的统一协调公式如下。但是上述均为**普通钢材的焊缝连接强度**

$$P_{\theta} = P_0(1 + 0.5 \sin^{1.5} \theta)$$

研究现状

角焊缝设计规范

欧洲规范Eurocode 3 Part 1-12、美国规范AWS D1.1/D1.1M2015以及新版中国规范GB50017-2017中均有针对高强钢角焊缝连接的相应设计条款，适用的钢材等级分别为S690（名义屈服强度690MPa），ASTM A514（名义屈服强度690MPa），Q460（名义屈服强度460MPa），

- 欧洲规范

Eurocode 3 Part 1-8 和 Eurocode 3 Part 1-12 给出了高强钢角焊缝的承载力计算公式

$$F_{EC3} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} h_e l = 0.46 f_u A_e \quad (1.1)$$

式中， f_u 为焊缝材料的名义极限强度； h_e 为焊喉尺寸，取为 $h_f / \sqrt{2}$ ； l 为焊缝长度； β_w 为相关参数，对于高强钢材取值为 1.0； γ_{M2} 为针对高强钢的强度折减系数，取为 1.25。 A_e 为理论破坏面，也就是焊喉对应的破坏面。

- 美国规范

美国钢结构焊接规范 AWS D1.1/D1.1M2015 给出了高强钢角焊缝的承载力计算公式

$$F_{AWS} = 0.30 f_u A_e (1 + 0.5 \sin^{1.5} \theta) \quad (1.2)$$

- 中国规范

中国钢结构设计标准 GB 50017-2017 给出了 Q460 及其以内强度等级的钢材的角焊缝的承载力设计公式如下：

对于正面角焊缝：

$$\sigma_f = \frac{N}{h_e l} \leq \beta_f f_f^w \quad (1.3)$$

对于侧面角焊缝：

$$\tau_f = \frac{N}{h_e l} \leq f_f^w \quad (1.4)$$

在各种力的综合作用下：

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_f}{\tau_f}\right)^2 + \tau_f^2} \leq f_f^w \quad (1.5)$$

式中， σ_f 和 τ_f 分别表示垂直于焊缝长度方向的正应力和沿焊缝长度方向的剪应力； f_f^w 为角焊缝的强度设计值，按公式 $f_f^w = 0.41 f_u^w$ 计算， f_u^w 表示焊缝的极限强度； β_f 表示正面角焊缝的强度设计值增大系数，静力荷载下取为 1.22，汇总公式 (1.3) - (1.5)，可以得到在任意加载角度下，接头承载力设计值为

$$F_{GB} = 0.41 f_u A_e (1 - 0.328 \sin^2 \theta)^{-1/2} \quad (1.6)$$





研究方法及研究内容



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

多高层钢结构及钢结构抗火研究室

Research Group for Multi-Storey and Tall Steel Buildings and Fire-Resistance of Steel Structures

研究对象

本文为研究高强钢角焊缝的力学性能，主要采用了试验研究和有限元分析相结合的研究方法。

1) 高强钢单调拉伸材性试验

钢材：Q890高强钢

2) 高强钢角焊缝试验

钢材：Q890高强钢

焊材：ER120S-G

接头形式：角焊缝

焊缝和荷载二者之间的夹角： 0° （正面角焊缝）、 15° 、 30° 、 45° （单边单条&单边双条）、 60° 、 75° 、 90° （侧面角焊缝）



研究对象

试件编号 x-y-z-n 的命名规则如下：x 表示母材强度，y 表示焊材强度，z 表示焊缝与加载力方向的角度，n 表示重复性试件编号，试件编号汇总如下表 1，共加工 24 个试件。

表 1 试件编号汇总表

试件类型	编号	状态	试件类型	编号	状态
0°	890-120-00-1	切平	45° S	890-120-45-1s	切平
	890-120-00-2	切平		890-120-45-2s	切平
	890-120-00-3			890-120-45-3s	
15°	890-120-15-1	切平	60°	890-120-60-1	切平
	890-120-15-2	切平		890-120-60-2	切平
	890-120-15-3			890-120-60-3	
30°	890-120-30-1	切平	75°	890-120-75-1	切平
	890-120-30-2	切平		890-120-75-2	切平
	890-120-30-3			890-120-75-3	
45° D	890-120-45-1d	切平	90°	890-120-90-1	切平
	890-120-45-2d	切平		890-120-90-2	切平
	890-120-45-3d			890-120-90-3	



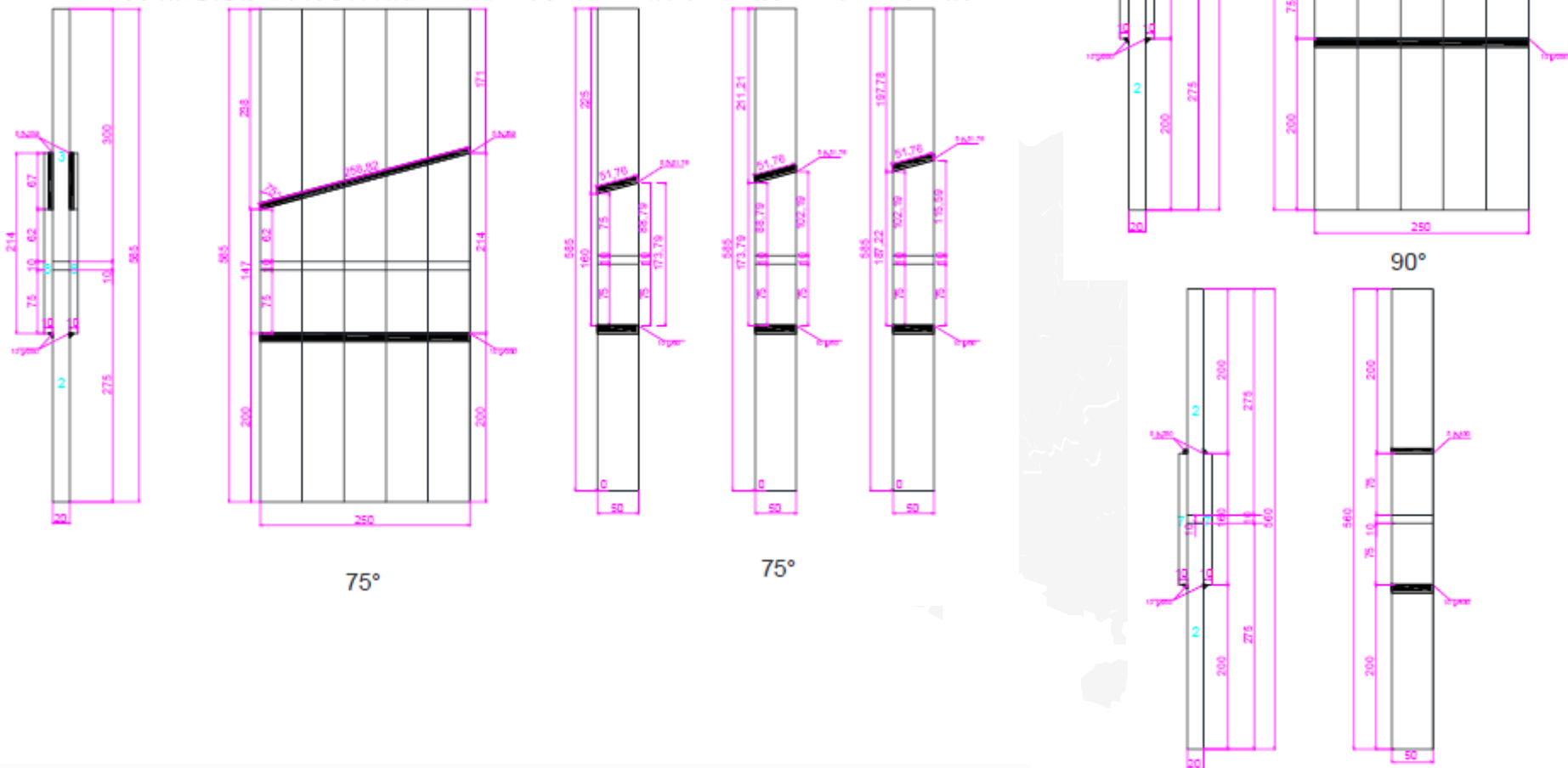
试验2：高强钢角焊缝试验

[illegible]

研究方法

试验2：高强钢角焊缝试验

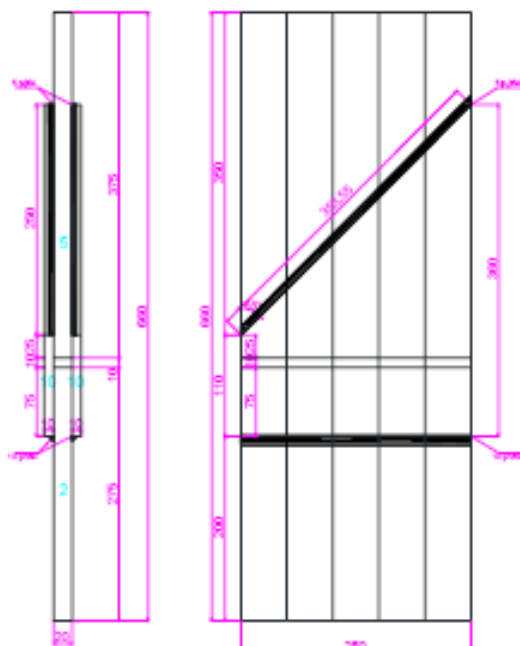
试件尺寸



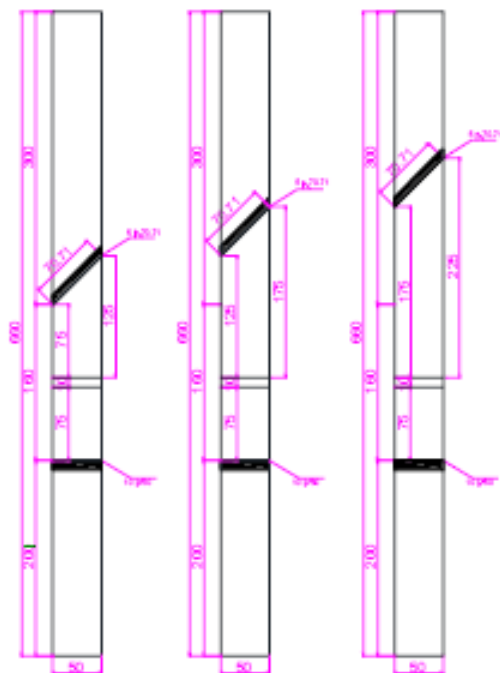
研究方法

试验2：高强钢角焊缝试验

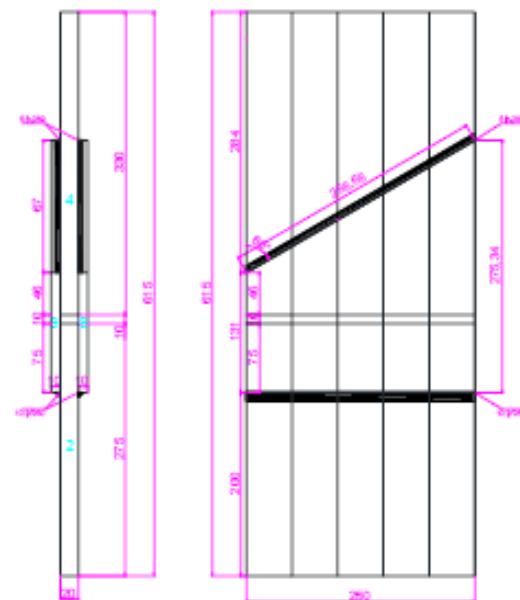
试件尺寸



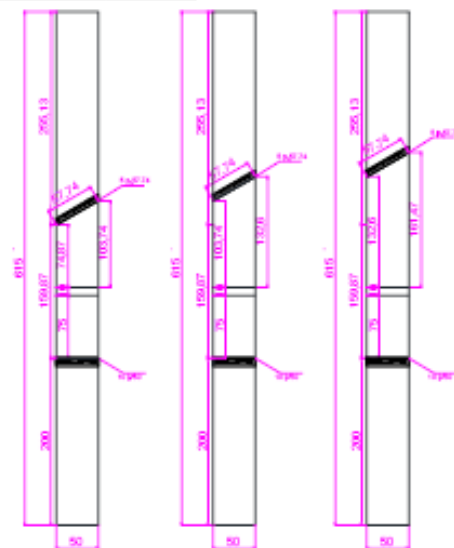
45°S



45°S



60°



60°



同济大学
TONGJI UNIVERSITY

多高层钢结构及钢结构抗火研究室

Research Group for Multi-Storey and Tall Steel Buildings and Fire-Resistance of Steel Structures

试验仪器

本试验在同济大学南校区的结构实验室进行,加载机采用液压伺服控制的MTS 多功能试验机,加载能力为 2000kN。加载全程采用 0.5mm/min 的位移控制来模拟静力加载过程,应变及位移数据每秒采集一个点。

ARAMIS Digital Image Correlation (DIC) -ARAMIS 三维光学全场变形和应变测量分析系统(简称“DIC 测量系统”)是一种全新的应变位移测量手段。在物理力学性能测试中,使用 DIC 系统,有助于深入了解材料和零件的力学行为和性能,特别适用于测量瞬时和局部应变。DIC 技术采用非接触测量方式,适用于各种材料的静态和动态试验,获取完整的力学性能参数。



图 15 MTS 多功能试验机

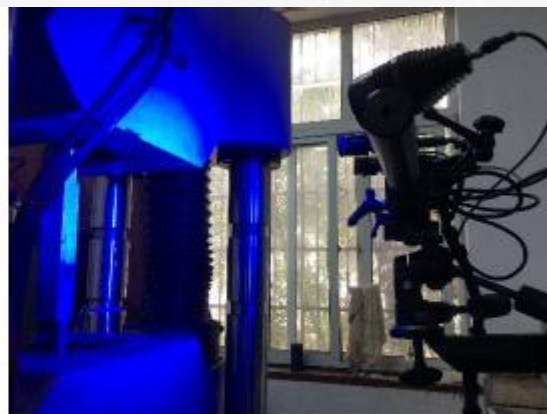


图 16 DIC 试验机

试验仪器

- ◆ **数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC)** 技术是一种非接触式现代光学测量实验技术。
- ◆ **优点**：由具有光路简单、环境适应性好、测量范围广以及自动化程度高。
- ◆ **应用范围**：广泛应用于土木工程、机械、材料科学、电子封装、生物医学、制造、焊接等许多科学及工程领域。对于材料领域的材料人来说，DIC目前在材料研究的许多方面尤其是力学性能表征方面得到越来越广泛的应用。
- ◆ **基本原理**：就是通过跟踪（或匹配）物体表面变形前后两幅散斑图像中同一像素点的位置来获得该像素点的位移向量，从而得到试件表面的全场位移。
- ◆ **组成**：该系统一般由CCD摄像机、照明光源、图像采集卡及计算机组成。首先，需要使试件的成像表面具有可以反映变形信息的随机散斑图，然后在实验过程中对试件表面在加载前后的图像进行采集并存入计算机，最后利用软件程序采取相关的数学算法得到试件表面的位移信息。



研究方法

试验2：高强钢角焊缝试验

试验试件



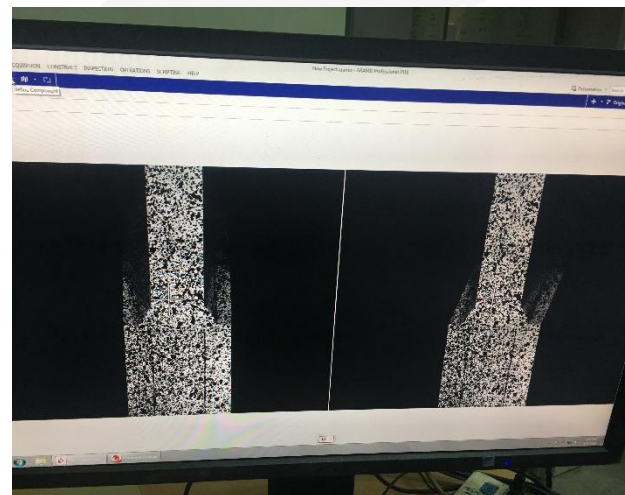
图 17 试件打磨



图 18 喷白色底漆



图 19 喷黑色散斑漆



研究方法

试验2：高强钢角焊缝试验

断口



890-120-45-1D



890-120-30-1



890-120-15-1



890-120-00-1



同济大学
TONGJI UNIVERSITY

多高层钢结构及钢结构抗火研究室

Research Group for Multi-Storey and Tall Steel Buildings and Fire-Resistance of Steel Structures

研究方法

试验2：高强钢角焊缝试验

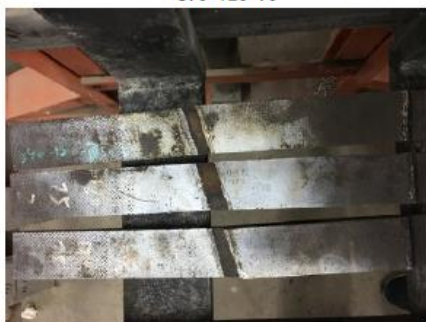
断口



890-120-90



890-120-60



890-120-75



890-120-45S



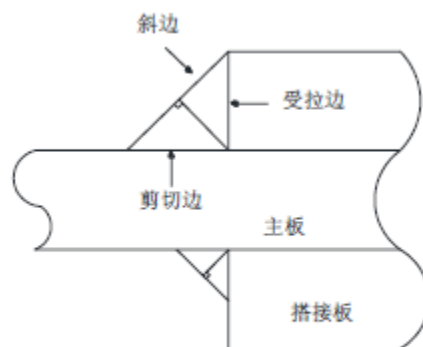
同济大学
TONGJI UNIVERSITY

多高层钢结构及钢结构抗火研究室

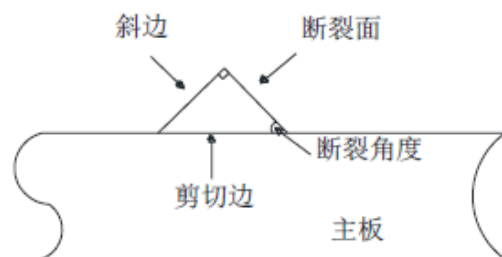
Research Group for Multi-Storey and Tall Steel Buildings and Fire-Resistance of Steel Structures

研究方法

试件尺寸



试验前测量



试验后测量

试件类型	编号	状态	断裂角度	平均值
0°	890-120-00-1	切平	44.35	47.20
	890-120-00-2	切平	50.64	
	890-120-00-3		46.61	
15°	890-120-15-1	切平	37.15	42.95
	890-120-15-2	切平	45.08	
	890-120-15-3		46.62	
30°	890-120-30-1	切平	49.11	51.59
	890-120-30-2	切平	57.39	
	890-120-30-3		48.27	
45° D	890-120-45-1d	切平	41.44	31.09
	890-120-45-2d	切平	31.35	
	890-120-45-3d		20.48	
45° S	890-120-45-1s	切平	23.01	31.59
	890-120-45-2s	切平	23.54	
	890-120-45-3s		48.22	
60°	890-120-60-1	切平	34.06	29.62
	890-120-60-2	切平	21.51	
	890-120-60-3		33.28	
75°	890-120-75-1	切平	21.61	19.89
	890-120-75-2	切平	17.61	
	890-120-75-3		20.46	
90°	890-120-90-1	切平	24.65	22.14
	890-120-90-2	切平	22.01	
	890-120-90-3		19.77	

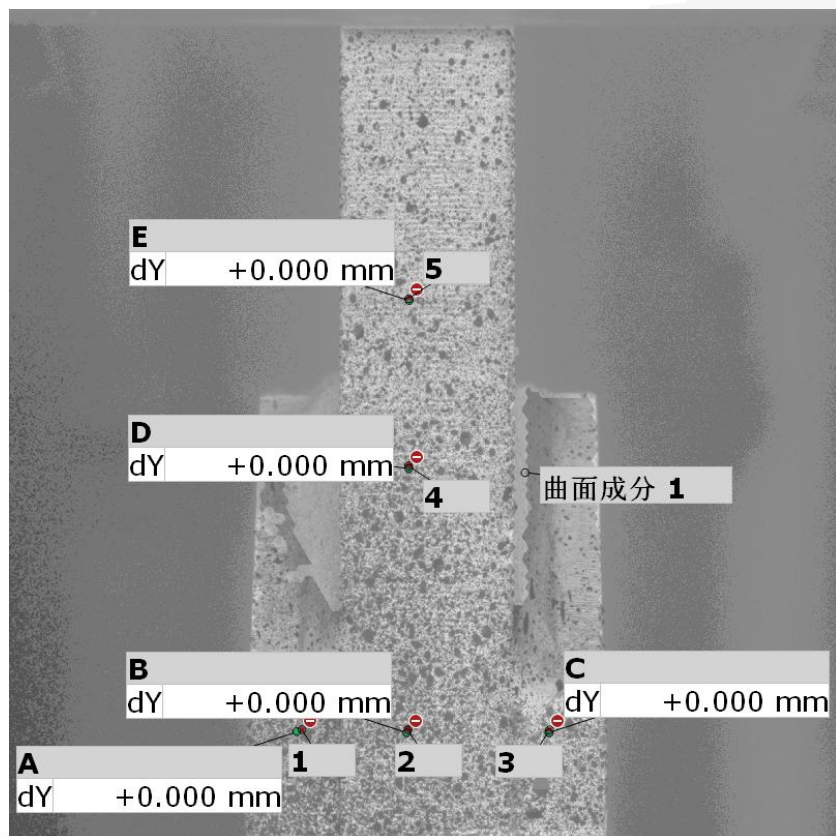


研究方法

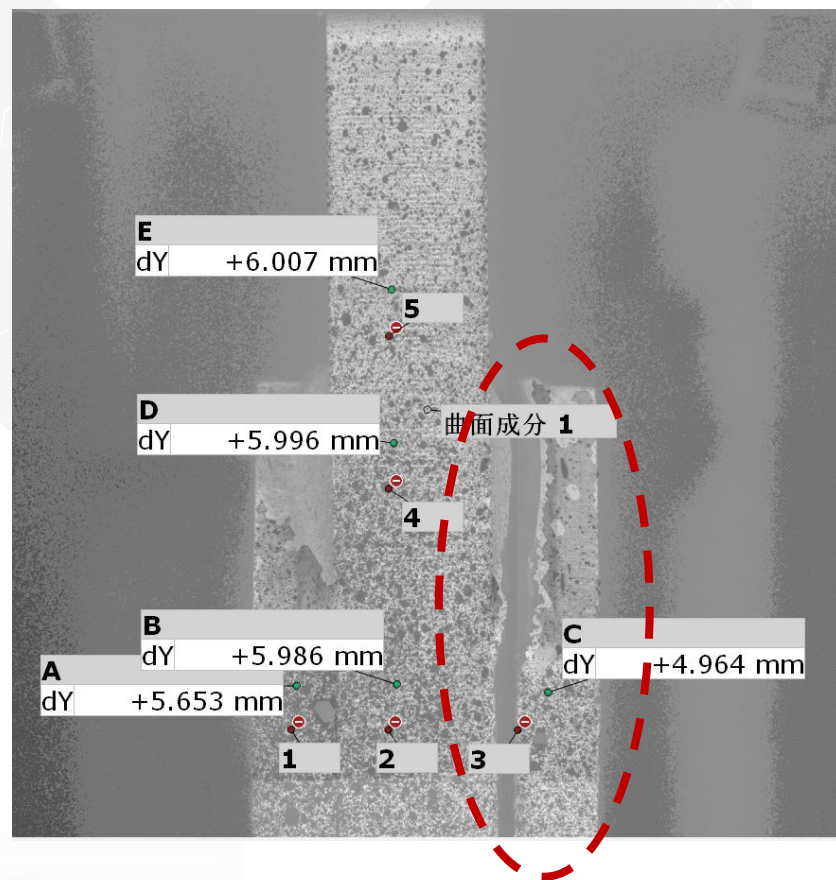
试验2：高强钢角焊缝试验

试验处理

第一帧



最后一帧



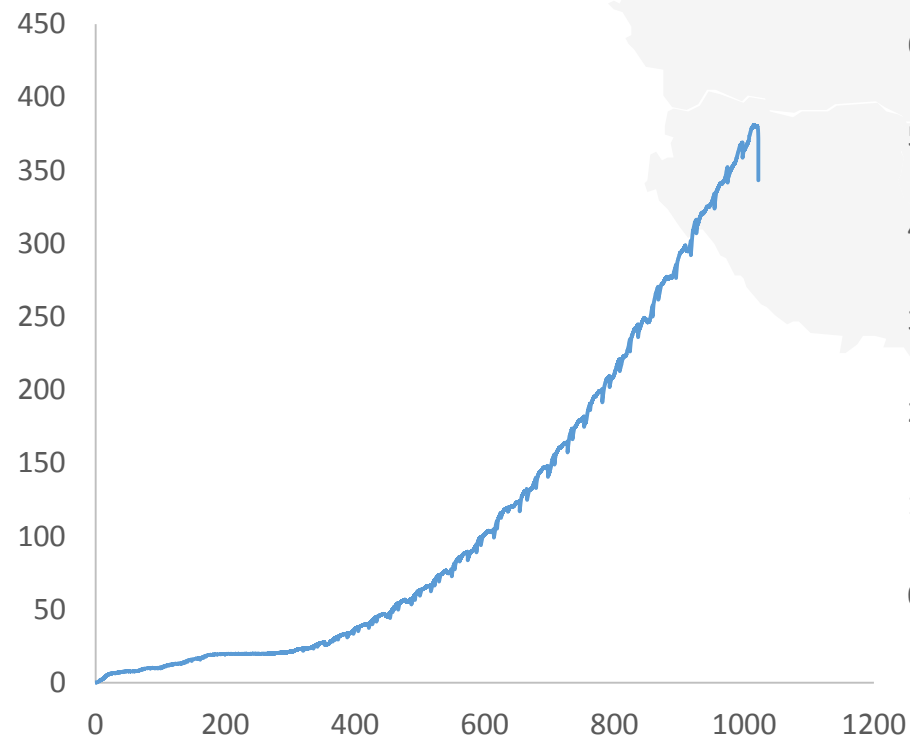
研究方法

试验2：高强钢角焊缝试验

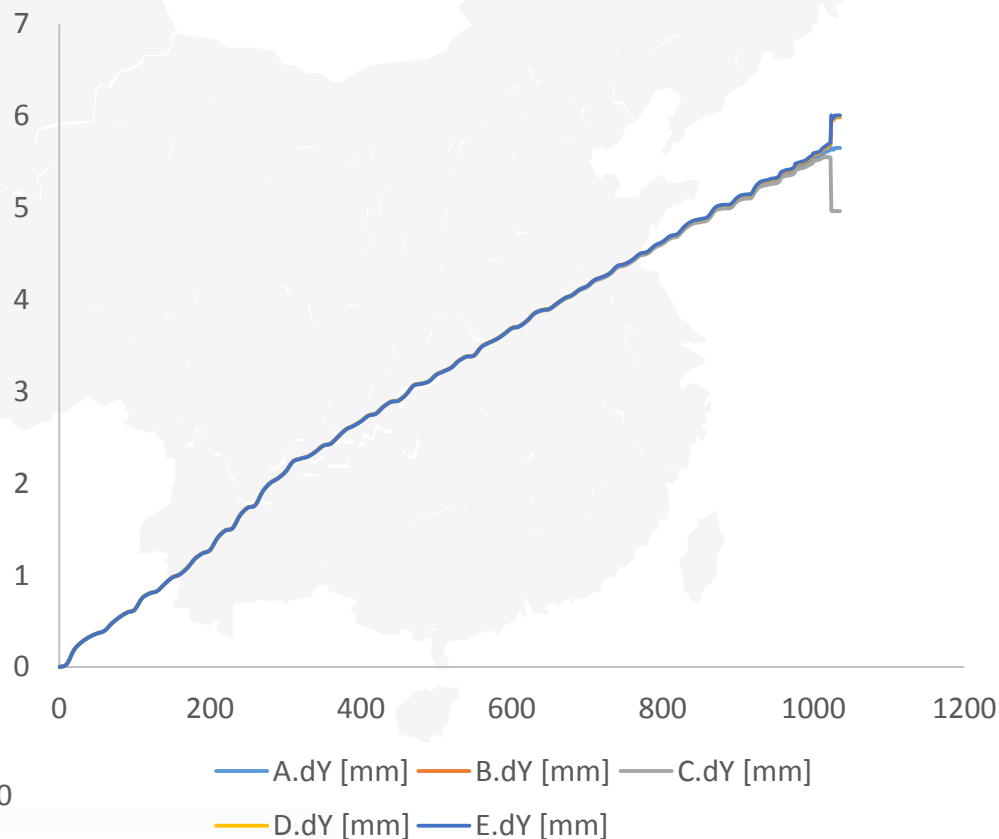
试验结果（以Q890-120-45为例）

力数据

Load (kN)



DIC数据

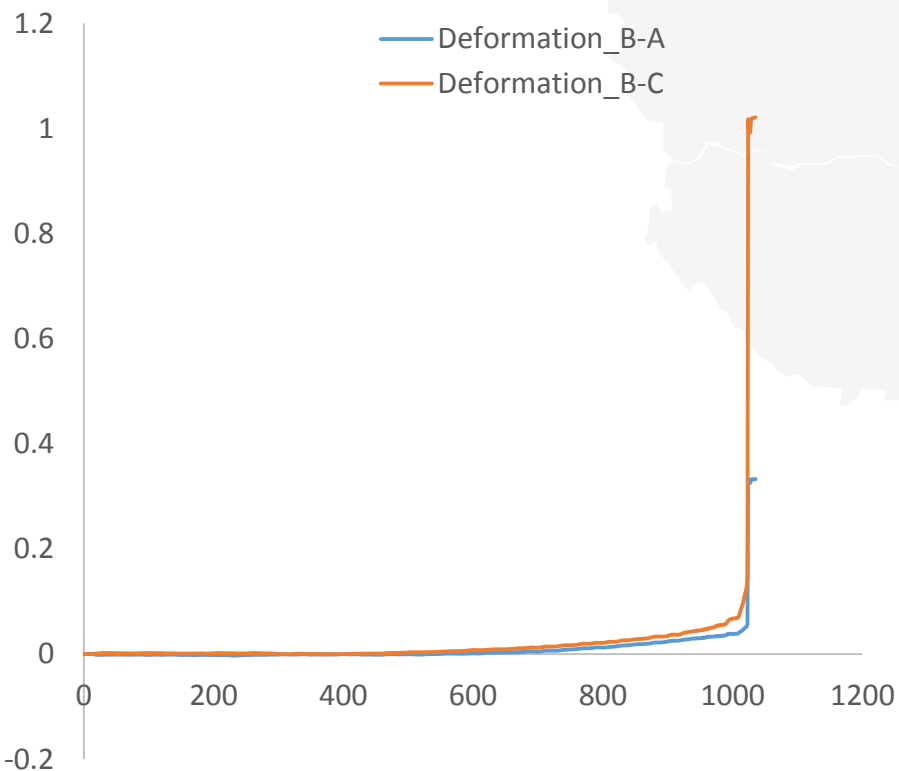


研究方法

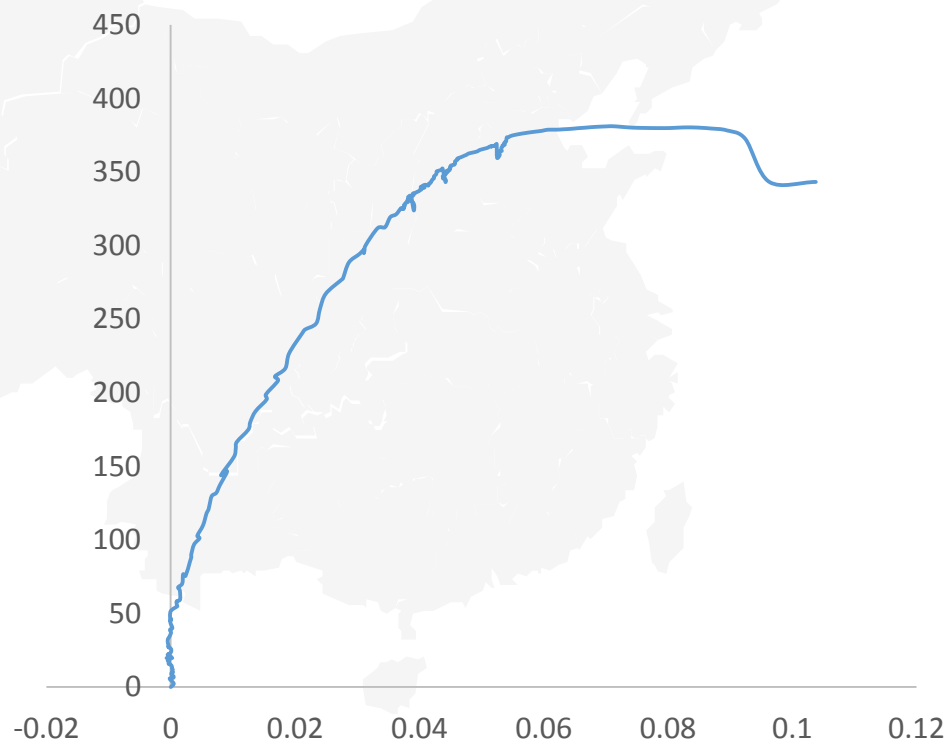
试验2：高强钢角焊缝试验

试验结果（以Q890-120-45为例）

位移数据



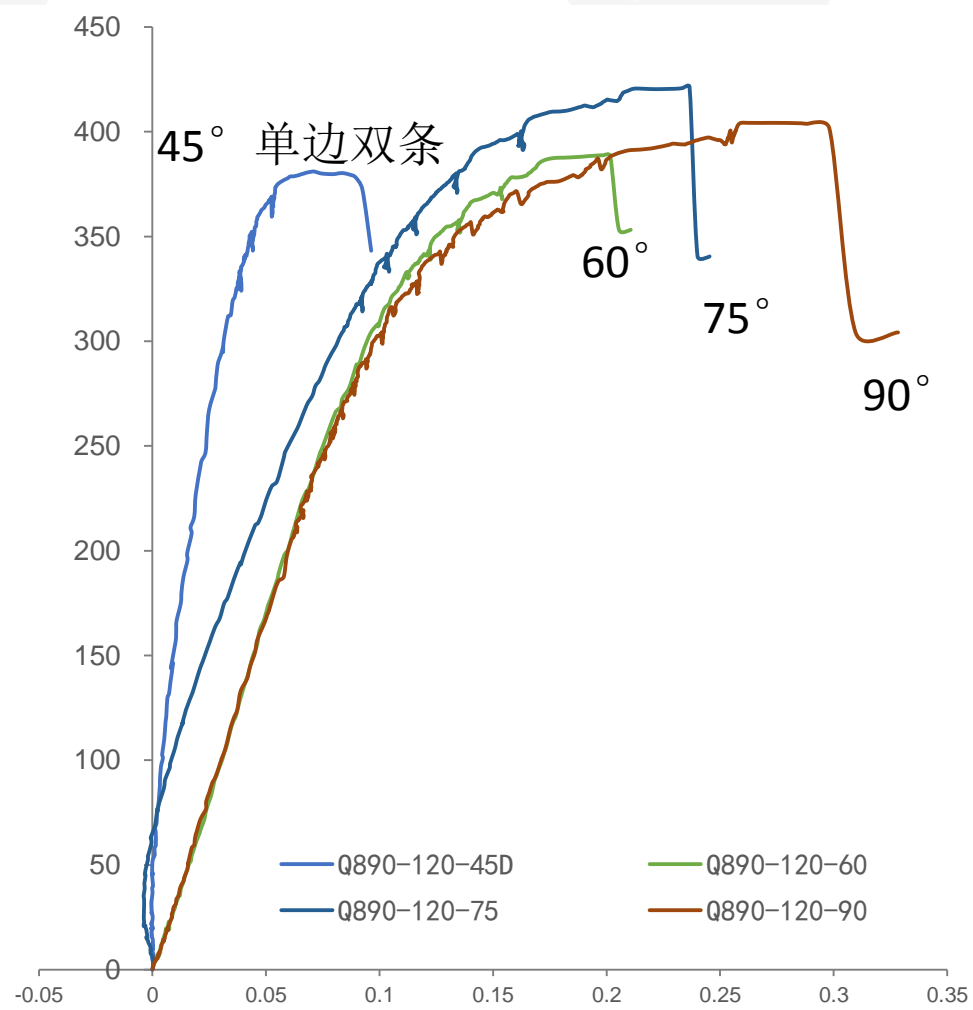
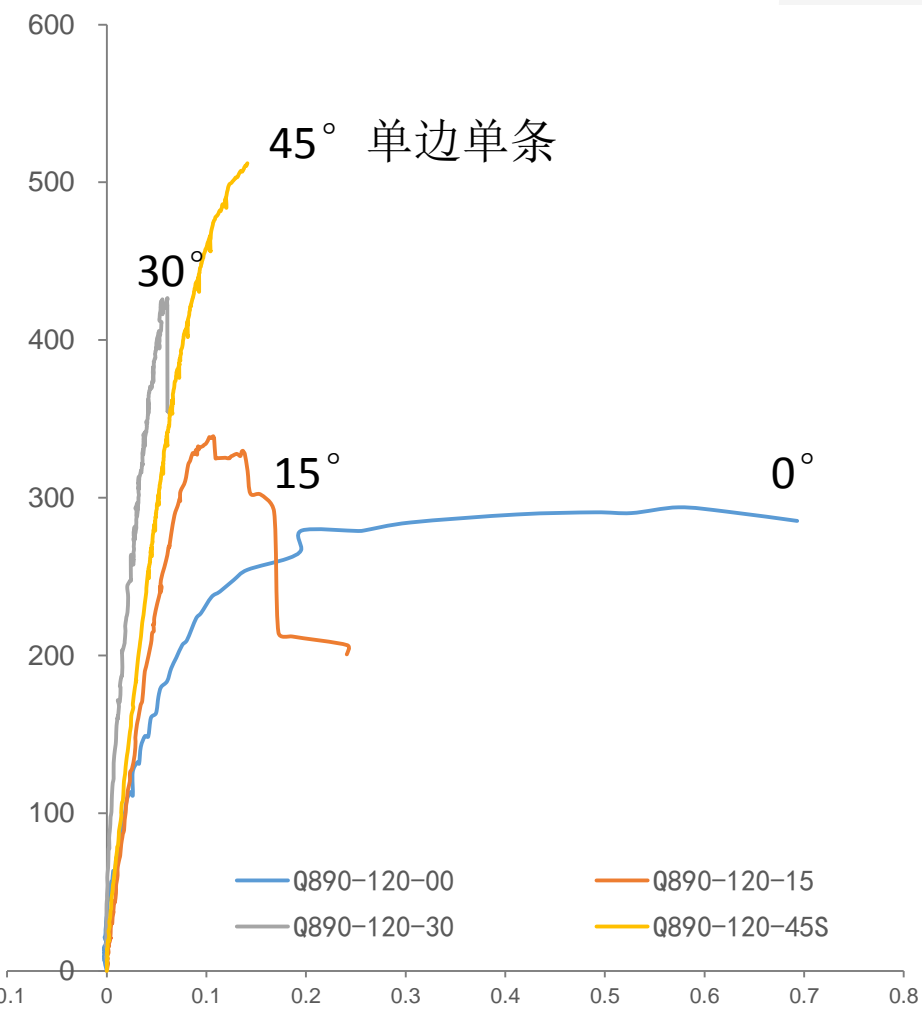
力—位移数据



研究方法

试验2：高强钢角焊缝试验

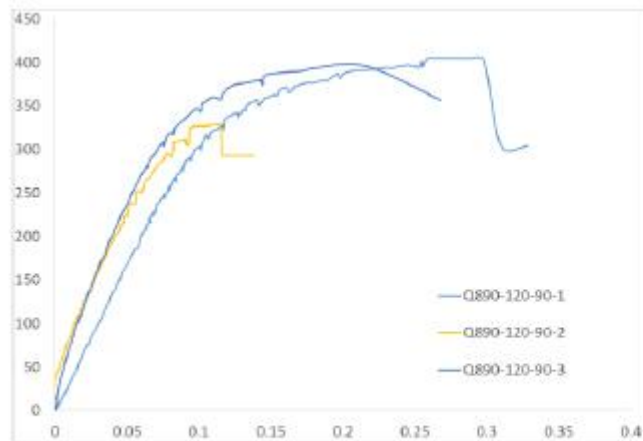
试验结果——力位移曲线



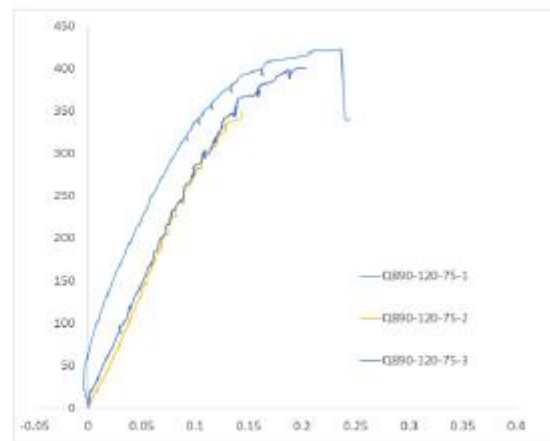
研究方法

试验2：高强钢角焊缝试验

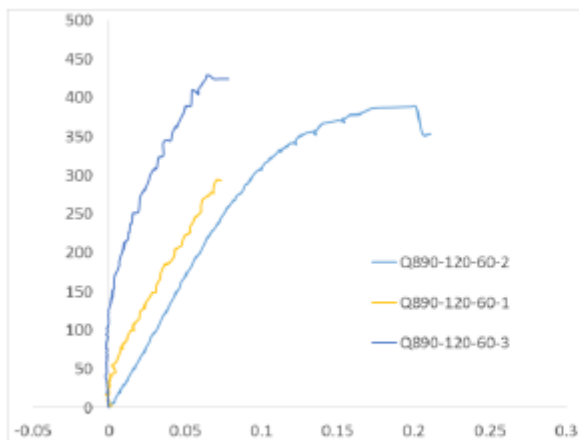
试验结果——力位移曲线



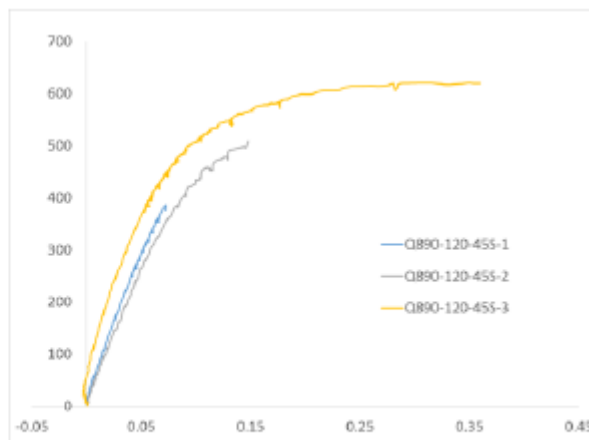
890-120-90



890-120-75

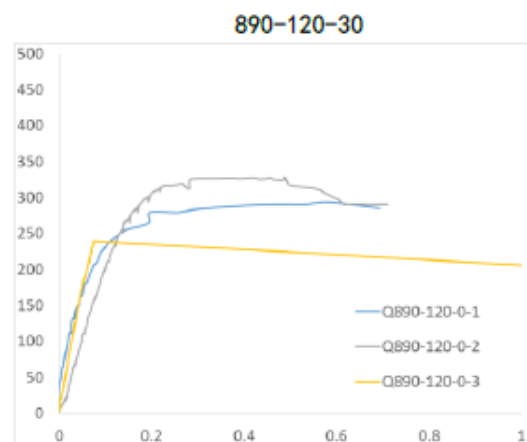
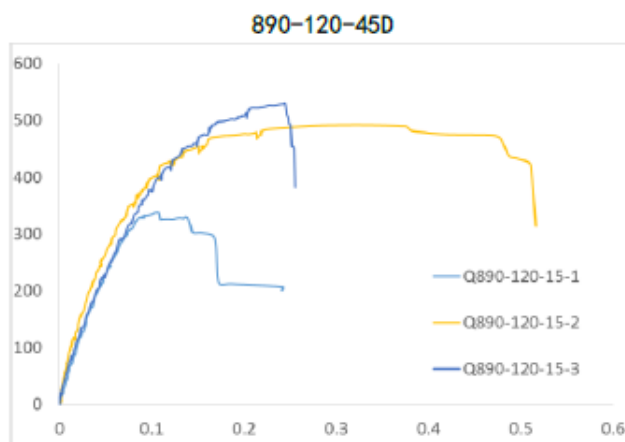
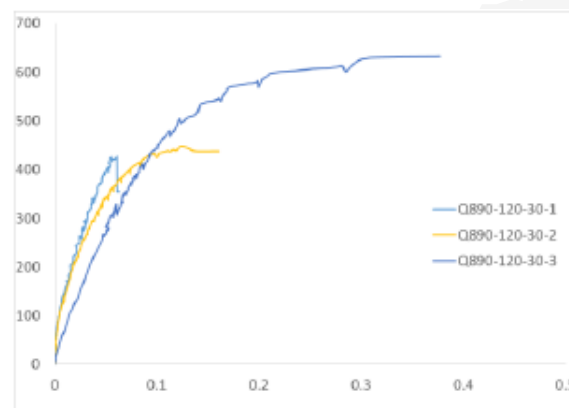
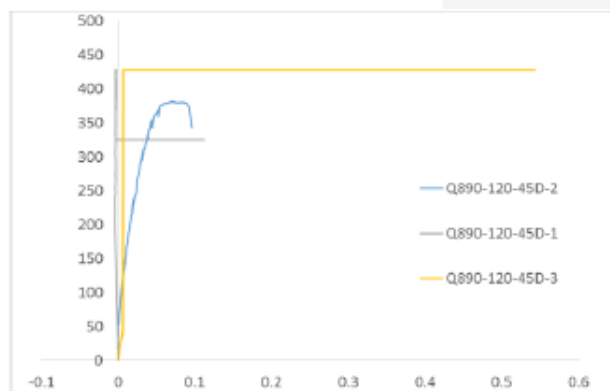


890-120-60



890-120-45S

试验结果——力位移曲线



890-120-15

890-120-0

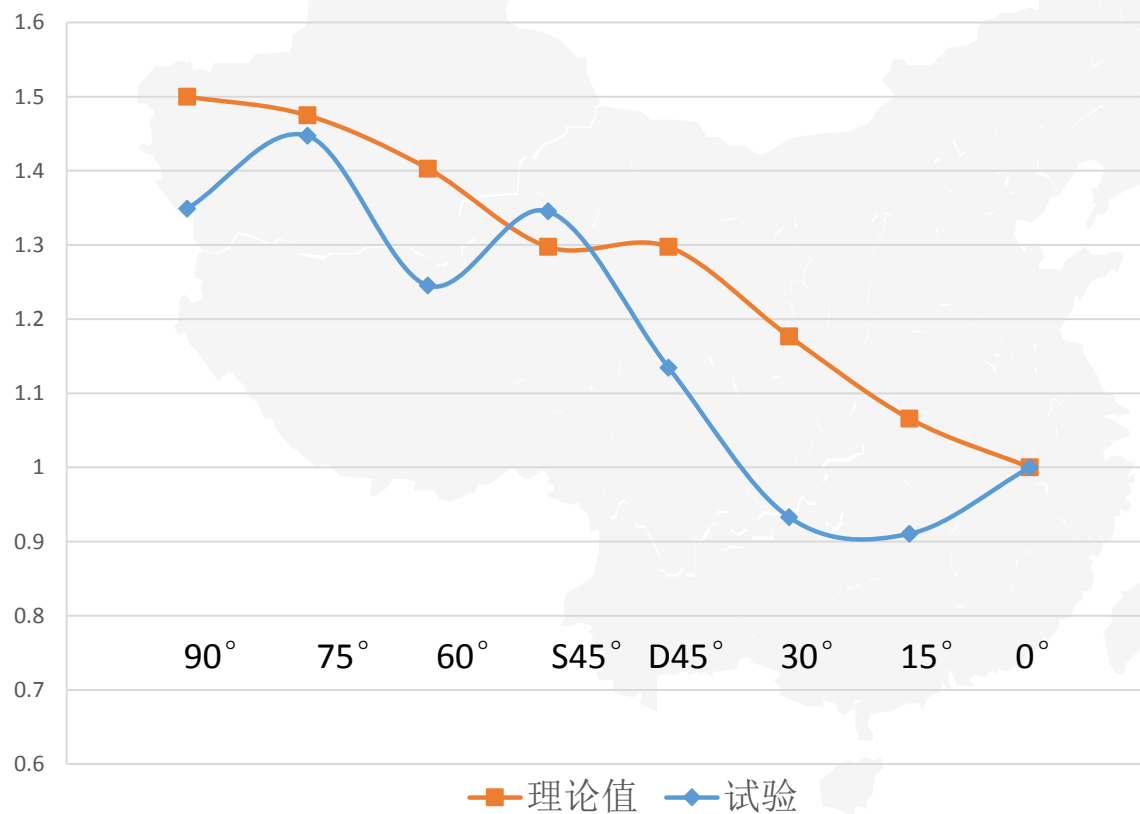
试验结果

试件类型	编号	极限强度 kN	平均值 kN	用时/s	用时/min
0°	890-120-00-1	295.595	327.77	898	15
	890-120-00-2	327.981		964.5	16
	890-120-00-3	359.747		1020.9	17
15°	890-120-15-1	339.04	453.93	1022	17
	890-120-15-2	492.151		1149	19
	890-120-15-3	530.606		1193	20
30°	890-120-30-1	426.769	504.79	1006.2	17
	890-120-30-2	446.813		1070.6	18
	890-120-30-3	640.8		641	11
45° D	890-120-45-1d	428.978	494.47	1085	18
	890-120-45-2d	381.108		1022	17
	890-120-45-3d	673.328		1334	22
45° S	890-120-45-1s	570.227	583.75	1389.2	23
	890-120-45-2s	561.086		1353.3	23
	890-120-45-3s	619.931		1503.8	25
60°	890-120-60-1	413.899	411.26	1166	19
	890-120-60-2	388.803		1117	19
	890-120-60-3	431.073		1210	20
75°	890-120-75-1	421.581	409.25	1204	20
	890-120-75-2	357.058		1018	17
	890-120-75-3	449.097		1225	20
90°	890-120-90-1	404.388	376.77	1088	18
	890-120-90-2	329.407		1046	17
	890-120-90-3	396.511		1094.9	18



后续工作

$$P_{\theta} = P_{long} \cdot \left(1 + 0.5 \cdot \sin^{1.5}(\theta)\right)$$



1) 高强钢单调拉伸材性试验

钢材: Q690高强钢

2) 高强钢角焊缝试验

钢材: Q690高强钢

焊材: ER120S-G (超强)、ER110S-G (等强)、ER50 (欠强)

接头形式: 角焊缝

焊缝和荷载二者之间的夹角: 0° (正面角焊缝)、 15° 、 30° 、 45° (单边单条&单边双条)、 60° 、 75° 、 90° (侧面角焊缝)



问题

1) 速度:

slow : $1/10\text{Hz} \Rightarrow 10\text{s}$ 拍一张

Fast: $1/5\text{Hz} \Rightarrow 5\text{s}$ 拍一张

Faster: $2\text{Hz} \Rightarrow 1\text{s}$ 拍两张

2) DIC: 只能拍800张, 之前平均一个试件要用20min, 后续设定拍照频率在2s拍一张左右。





谢 谢 !