一组椭圆形截面吊臂折弯间隙、步进及折弯刀数计算公式

王战锋
（中联重科股份有限公司，长沙 410006）

摘要：目的 研究椭圆形截面吊臂折弯时折弯间隙和折弯步进的关系。**方法** 构建了一组吊臂折弯间隙、步进及折弯刀数的计算公式。**结果** 结果表明，通过该公式所得折弯工艺参数与实践较吻合，同时，折弯效率也可以得到极大提高，以 180 t 产品为例，增大折弯步进后，折弯效率提高了 20.3%～56.4%。**结论** 建立了折弯间隙、折弯步进及折弯刀数的数学模型，可以据此得出所需的最优工艺参数，该模型对实际生产具有很好的工艺指导和支撑作用，可极大提高生产效率。

关键词： 椭圆形截面；吊臂；折弯；步进；折弯间隙
DOI： 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.008
中图分类号： TG386 **文献标识码：** A **文章编号：** 1674-6457 (2016)04-0043-06

A Set of Calculation Formulas of the Bending gaps, Steppers and Bending Numbers in Elliptical Cross-section Crane Boom Bending

WANG Zhan-feng
(Zoomlion Heavy Industry Science &Technology Co., Ltd., Changsha 410006, China)

ABSTRACT: To study the relationship between bending gaps and steppers in elliptical cross-section crane boom bending，a set of calculation formulas of bending gaps, steppers and bending numbers were established. The results showed that: the bending process parameters calculated by these formulas were relatively consistent with actual conditions. At the same time, bending efficiency could be greatly improved. For example, for a 180t product, its bending efficiency could be increased by 20.3%~56.4% after increasing the bending step. Mathematic models of bending gaps, steppers and bending numbers can obtain the optimized process parameters, thus they provide guidance and support for the actual production of the part and will supply a huge boost in productivity.

KEY WORDS: elliptical cross-section; crane boom; bending; stepper; bending gap

吊臂作为轮式起重机的主要受力构件，其重量一般占整机的 13%~20%，而其在大型起重机的重量中所占的比例则更大[1]。随着用户需求的不断提高，起重机逐渐地向大吨位和大起升高度方向发展。随着汽车起重机制造技术的发展，吊臂截面形状已经从之前的四边形、八边形逐步发展为十边形、十二变形等多边形，并最终演变为椭圆形截面[2—5]，见图 1。

目前国内外大吨位汽车吊截面都朝着椭圆形截面发展[1—9]，其压型制作，尤其是大吨位椭圆形吊臂压型制作，一直是行业的制造瓶颈及核心难点技术[7,9]。

吊臂板压型中，选择合适半径的上模，可以有效地减少压型刀数，尤其是在椭圆形吊臂压型中，在保证压型圆度的前提下，选择合适的上模，可以放大压型步进，减少压型刀数，效率提升明显，故

收稿日期： 2016-04-18
作者简介： 王战锋（1982—），男，长沙人，硕士，中级工程师，主要研究方向为吊臂折弯成形及制作工艺。

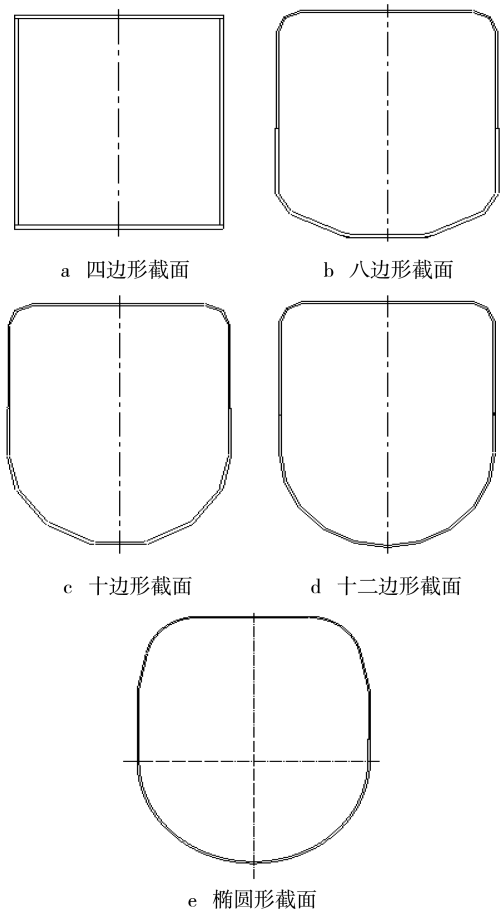


图 1 吊臂截面的演变

Fig. 1 Evolution of crane boom section

掌握不同压型参数对应不同材料的折弯情况(回弹半径、折弯间隙)，是减少压型刀数、提高效率的前提之一。

1 现状分析

通常，工程机械上高强板钢材在进行椭圆形截面吊臂折弯时，折弯刀数越多，折弯步进越小，成形后越接近圆，但折弯效率下降；折弯刀数越少，折弯步进越大，折弯效率得到提高，但成形后圆度较差，与理论圆弧(图纸尺寸)的间隙也越大。如何在保证折弯精度(质量)的同时兼顾折弯效率，一直是行业内关注的焦点[10]，也是产品生产过程的主要竞争力所在。

由于之前开发新产品时，在工艺制作上无法一次直接得到最佳折弯步进以及折弯间隙，通常只能根据已有经验，先投料做小件正交实验[11]：选取各个厚度规格的板材，并预设一系列的折弯步进距离，通过不同的上模压型半径进行试压，记录压型过程参数。通过正交实验一系列数据，摸索出一套能同时控制折弯间隙及折弯步进的最佳参数以及折弯回弹半径，然后再在产品上使用。因而现有技术主要有以下缺点：

1）每次均需采用小件实验方能得到所需的准确数据；每次均需策划和制定实验方案，实验需要协调工艺、采购、生产等多部门，占用很多人力和精力。

2）因为每次小件实验需要模拟实际生产，需在现有加工设备上完成，这就需要根据生产情况安排折弯设备，对正常生产经营活动有干扰和冲击。

3）实验所需规格材料因为是进口板材，需提前临时采购，因而实验周期很不固定，同时实验材料后续只能做报废处理，产生成本损耗。

4）现有折弯技术更多的是建立在大量实验基础上的经验汇总和摸索，是对实际实验数据整理后的简单提炼，十分依赖实验，一旦离开小件折弯实验，则无法快速得到折弯步进以及折弯间隙。

5）对折弯效率提升缺少理论支持。

2 折弯过程分析

吊臂板材折弯通常采用自由折弯，根据实际情况，可以采用 V 型下模，也可以采用 U 型下模[10]。已有折弯资料表明：折制大圆弧时，仍应使下模 V 型槽开口宽度 V=(8 ~ 12)t (t 为板材厚度) [12—13]。采用 V 型模折弯时，由于受制于下模开口宽度，所需折弯力较大，对设备吨位要求较高。对于吊臂板这种高强度、超长的巨形工件，采用 U 型下模自由折弯为最佳的折弯方式[10]，上模及下模开口可依据实际折弯需求选择，不受前述公式限制。公司根据实际需求，生产中采用的是大模头配置 U 型开口下模进行自由折弯。

折弯材料一定(屈服强度、弹性模量固定)的情况下，反弹半径主要取决于凸模压型半径及压型板厚[10,14]。高强钢在折弯时存在较大的弹性变形，当模头压力回撤时，板材产生弹性变形，特别是对于大半径上模时，反弹更大，见图 2 。例如对于 7 mm 厚 Weldox960 材料，采用半径为 160 mm 的上模，反弹后半径为 258 mm。

采用大半径(通常大于 85 mm) 上模折弯，折弯步骤如图 3 所示，由于上模半径较大，模具圆弧部分较长，每一刀折弯时板材参与塑性变形的区域

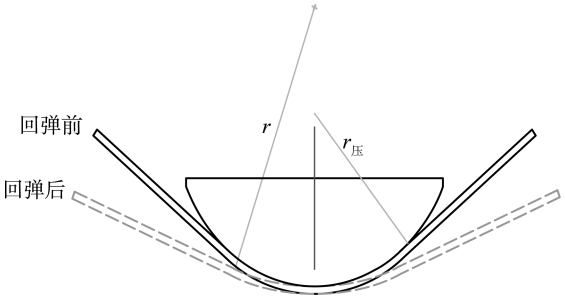
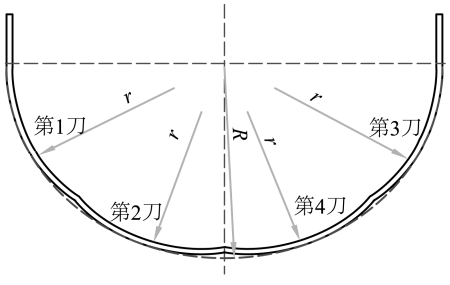
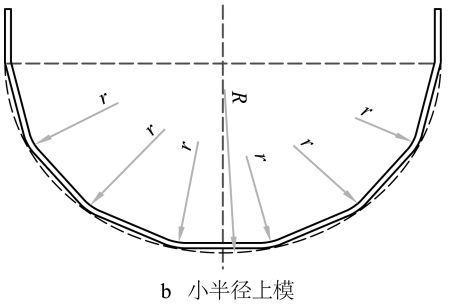


图 2　折弯回弹示意图
Fig.2 Schematic diagram of bending springback

较大，前后两刀折弯时已成形圆弧部位有重叠和交集，与采用小半径上模折制多条内接折线形成内接多边形逼近圆弧的方法[7,11,12](如图 3b 所示)有本质区别。大半径上模折弯，其本质上是利用包络线内接圆的原理(图 4 所示)实现椭圆形截面吊臂的制造和生产。



a　大半径上模



b　小半径上模

图 3　大半径上模和小半径上模折弯椭圆形臂的步骤示意图
Fig.3 Schematic diagrams of large and small radius upper die bending

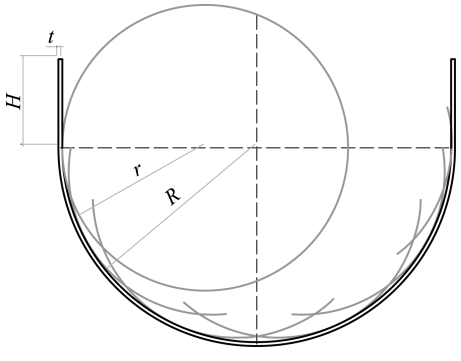


图 4　包络线内接圆原理示意图
Fig.4 Schematic diagram of an inscribed circle within the envelope

3　公式推导

根据公开发表的相关文献[12,14—15]：

$$r=\frac{1}{\dfrac{1}{r_p}-\dfrac{3\sigma_s}{Et}} \tag{1}$$

其中：r 为回弹半径(mm)；t 为折弯板材厚度(mm)；r_p 为上模压型半径(mm)；σ_s 为材料的屈服强度(MPa)；E 为材料弹性模量(MPa)。

通过对椭圆形吊臂折弯过程的仔细分析，构建了一组椭圆形截面吊臂折弯间隙、折弯步进及折弯刀数的几何模型，通过计算可快速得到所需工艺实验参数，并为折弯质量与折弯效率提供强有力的技术支持和依据。具体推导过程如下。

如图 5 所示，假设采用 r_p 上模头折弯后反弹半径为 r，两次连续折弯后其所在圆心分别为 O_1, O_2，图纸要求圆弧半径(即压型模拟半径)为 R，其所在圆心为 O。M, N 分别为折弯时模头与板材接触位置，也即圆 O_1, O_2 与圆 O 的切点位置。P 为圆 O_1, O_2 的交点，从 O_1 向 OP 引垂线，垂足为 Q，S 为 OP 延长线与圆 O 的交点，记 OO_1, OO_2 夹角为 β。则两次连续折弯步进 L 即 $\widehat{MN}$ 长度，折弯间隙 h 即 PS 长度。

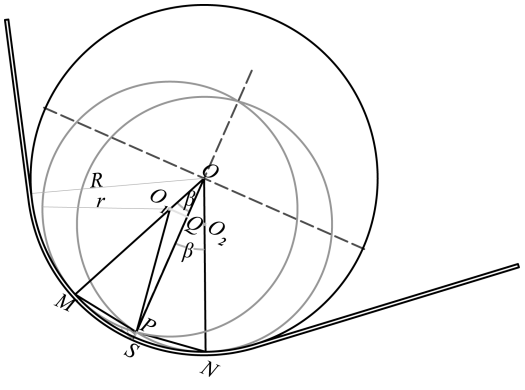


图 5　折弯、反弹示意图
Fig. 5 Schematic diagram of bending and rebounding

由图示位置关系可知：

$$O_1P^2=O_1Q^2+QP^2=O_1Q^2+\left(OS-QO-PS\right)^2 \tag{2}$$

即：

$$r^2=\left[\left(R-r\right)\sin\beta\right]^2+\left[R-h-\left(R-r\right)\cos\beta\right]^2 \tag{3}$$

故折弯间隙 h：

$$h = R - (R - r)\cos\beta - r\sin\left[\arccos\left(\frac{R-r}{r}\sin\beta\right)\right] \tag{4}$$

由三角形知识，可知：

$$L = 2R\beta \tag{5}$$

由式(3)—式(5)可知：

$$h = R - \sqrt{r^2 - \left[(R-r)\sin\left(\frac{L}{2R}\right)\right]^2} - (R-r)\cdot\cos\left(\frac{L}{2R}\right) \tag{6}$$

同样由式(5)可知：

$$L = 2R\beta = 2R\arccos\left[\frac{(R-h)^2 + (R-r)^2 - r^2}{2(R-h)(R-r)}\right] \tag{7}$$

对于椭圆形截面吊臂，折弯刀数为：

$$N = \frac{\pi\frac{R+t}{2} + 2H}{L} \tag{8}$$

其中：H 为 U 形吊臂直边长度。

通过该方法，根据式(1)，给定折弯材料(E，σ_s)、板材厚度 t、折弯对应上模半径 r_p，则可以得到不同压模对应的板材反弹半径 r。根据式(6)，给定设计半径 R，设定压型步进 L，可计算折弯后折弯间隙 h 是否满足工艺制作要求。同理，根据式(7)，设定折弯间隙 h，则可以计算得出折弯所需步进距离 L。例如：给定某型号产品的某一臂节，材料为 Weldox960(E =206 000 MPa，σ_s=960 MPa)，板厚 t 为 7 mm，设计半径为 R351 mm。根据现有 3 套折弯上模，依据上述公式可快速得到折弯参数，见表 1。

表 1 折弯间隙、折弯步进及折弯刀数理论对照表

Table 1 Theory comparison of bending gap, bending stepper and bending numbers

上模半径 r_p / mm	反弹半径 r/mm	折弯间隙 h/mm	折弯步进 L/mm	折弯刀数 N
160	258	0.60	80	18
		0.339	60	24
		0.15	40	36
120	172	0.60	40.2	36
		0.339	30.2	48
		0.15	20.1	72
85	106	0.60	27	54
		0.339	20.3	71
		0.15	13.5	107

4 公式验证

实验选取 Weldox960 材料(E =206 000 MPa，σ_s =960 MPa)，在工厂内进行验证，为节约成本，选取表 2 参数(给定板厚、上模半径、设计半径)进行小件折弯实验验证，图 6 分别为小件实验图，不同步进情况下实测间隙与理论间隙的对比验证结果见表 2。由表 2 对比数据可知，理论间隙与实际最大间隙之间误差不超过 0.2 mm，完全满足生产需求。

表 2 实测间隙与理论间隙的对比

Table 2 Comparison of measured gap and theoretical gap mm

实验	板厚 t	上模半径 r_p	设计半径 R	实验步进 L	理论间隙 h	实测最大间隙 h	误差
a	8	160	351	43	0.32	0.4	−0.03
b	7	160	352	50	0.33	0.4	−0.07
c	10	160	387	40	0.38	0.35	−0.04
d	8	160	389	53	0.58	0.6	0.02
e	12	160	424	37	0.45	0.3	-0.15
f	7	160	352	80	0.83	0.9	0.06

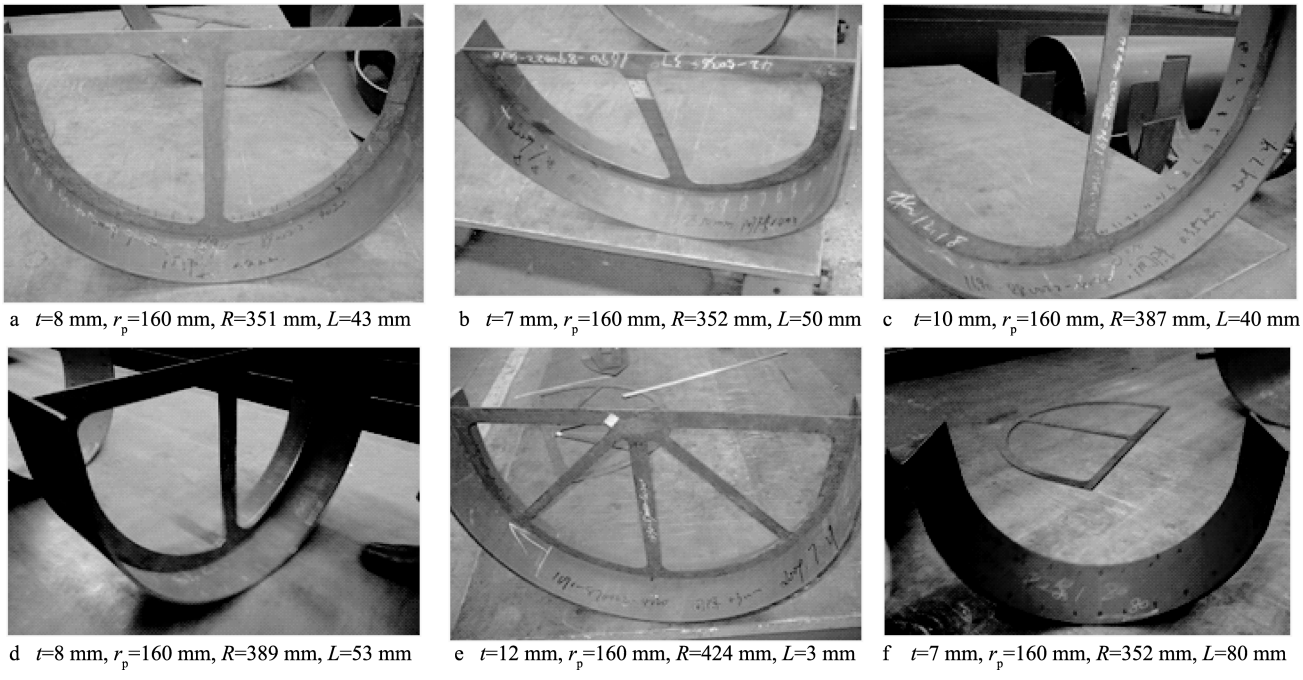
5 取得成果

相比原来小件正交实验，本技术取得成果如下。

1） 成本降低。通过上述一组计算公式，根据已有产品技术参数，可快速实现折弯间隙及折弯步进计算，不需要作大量正交折弯实验来获得相关工艺参数，节约了大量科研费用及时间精力。以原 180 t 产品为例，单块板材实验费用为 0.4 万元(含材料费、人工费、加工费、设备折旧费等)，对应正交实验(板厚 4~15 mm，共 12 种规格：上模 R160，120，85，75，45，共 5 种规格；材质 Weldox1100，Weldox1030，Weldox960，Weldox900，Domex700，HG785，HG70 共 7 种规格)共计 420 组，节省费用 168 万元。

2）适用广泛。可推导得出不同材质、不同折弯反弹半径、不同设计半径等条件下的折弯间隙及折弯步进等实际折弯压型工艺参数，工作效率显著提高。

3）效率提升。可根据计算结果，优化现有工艺方案。在保证质量的情况下加大折弯步进，进而显著提高生产效率。



a　t=8 mm, r_p=160 mm, R=351 mm, L=43 mm　b　t=7 mm, r_p=160 mm, R=352 mm, L=50 mm　c　t=10 mm, r_p=160 mm, R=387 mm, L=40 mm

d　t=8 mm, r_p=160 mm, R=389 mm, L=53 mm　e　t=12 mm, r_p=160 mm, R=424 mm, L=3 mm　f　t=7 mm, r_p=160 mm, R=352 mm, L=80 mm

图 6　小件实验

Fig.6 Small work pieces experiments

以 180 t 产品为例，采用本技术后，在保证吊臂压型质量(折弯间隙)的前提下，压型效率得到大幅度提高，见表 3。

以 90 t 产品为例，之前折弯上模半径 r_p 为 85 mm，采用步进均为 25 mm，采用本技术后，折弯上模半径 r_p 为 120 mm，在保证吊臂压型质量(折弯间隙)的前提下，步进加大，压型效率前后对比见表 4。

表 3　改进前后折弯效率对比

Table 3 Comparison of bending efficiency before and after improvement

臂节	板厚/mm	现折弯步进/mm	原来折弯刀数	现折弯刀数	节约刀数	效率提升/%
90 臂	7	60	39	17	22	56.4
89 臂	8	43	45	25	20	44.4
89 臂	7	50	45	23	22	48.9
88 臂	10	40	49	31	18	36.7
88 臂	8	50	49	25	24	49
87 臂	12	37	55	37	18	32.7
87 臂	9	45	55	31	24	43.6
86 臂	12	32	59	47	12	20.3
86 臂	10	40	59	37	22	37.3
85 臂	8	40	63	39	24	38.1
85 臂	9	40	63	39	24	38.1

表 4　采用不同折弯上模前后折弯效率对比

Table 4 Comparison of bending efficiency before and after using different bending punch

臂节	板厚/mm	现折弯步进/mm	原折弯间隙/mm	现折弯间隙/mm	原折弯刀数	现折弯刀数	节约刀数	效率提升/%
85 臂	7	35	0.55	0.54	60	43	17	28.33
86 臂	9	35	0.57	0.56	56	40	16	28.57
87 臂	8	35	0.52	0.51	51	37	14	27.45
88 臂	7	35	0.48	0.49	47	34	13	27.66
89 臂	6	35	0.41	0.41	43	31	12	27.91

6 结语

研究并建立了一组椭圆形截面吊臂折弯间隙、折弯步进及折弯刀数的计算公式，探明了压型参数、材料参数的关系，并建立了数学模型。给定折弯材料、板材厚度、折弯上模半径及设计值，可以得到不同压模对应的折弯步进以及折弯间隙；同时，也可以根据成形间隙质量要求，反推折弯所需折弯步进。

该理论模型公式经实践检验，理论间隙与实际间隙之间误差很小，完全满足生产需求。根据该理论模型公式可快速得到任意材质、任意板厚条件下的最优折弯间隙及折弯步进等工艺参数，对实际生产起到了很好的工艺指导和支撑。根据计算结果，可优化现有工厂折弯工艺参数，在保证质量(折弯间隙)的情况下加大折弯步进，进而大幅提高生产效率。

参考文献：

[1] 黄琳. 起重机伸缩臂结构优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
HUANG Lin. Optimization Research of Structure for Crane Telescopic Boom[M]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.

[2] 崔晓辉. 起重机半圆形吊臂成形工艺研究及计算机仿真[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
CUI Xiao-hui. Research on the Process of Semi-circular Shape Crane Boom and Computer Simulation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009.

[3] 郭庆义. 汽车起重机臂架结构研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007: 4—7.
GUO Qing-yi. Study of Mobile Cranes' Boom[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007: 4—7.

[4] 刘海波, 周文. 伸缩式吊臂的截面设计[J]. 机械管理开发, 2011(6): 96.
LIU Hai-bo, ZHOU Wen. Section Designing of the Telescopic Boom[J]. Mechanical Management and Development, 2011(6): 96.

[5] 汤茂旭, 刘木南. 轮式起重机起重臂的发展历程[J]. 建筑机械化, 2007(2): 30—31.
TANG Mao-xu, LIU Mu-nan. Development Course of Hoist Boom of Wheel Crane[J]. Construction Mechanization, 2007(2): 30—31.

[6] 卢毅非. 全地面起重机关键技术探析[J]. 工程机械与维修, 2004(10): 69—71.
LU Yi-fei. Analysis of the Key Technology for All-terrain Crane[J]. Construction Machinery & Maintenance, 2004 (10): 69—71.

[7] 唐传良, 赵小刚, 赵海军. U 形截面吊臂制造工艺分析与研究[J]. 装备制造技术, 2012(10): 77—78.
TANG Chuan-liang, ZHAO Xiao-gang, ZHAO Hai-jun. U Shaped Cross Section Boom Manufacturing Technology Analysis and Research[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012(10): 77—78.

[8] 蔡宇子. 现代伸缩臂截面及尺寸优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 1—8.
CAI Yu-zi. Research on Cross-sections and Size Optimization of Modern Telescopic Boom[M]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012: 1—8.

[9] 蔡福海, 高顺德, 王欣. 全地面起重机发展现状及其关键技术探讨[J]. 工程机械与维修, 2006(9): 67.
CAI Fu-hai, GAO Shun-de, WANG Xin. The Status and the Key Technique of All Terrain Cranes [J]. Construction Machinery & Maintenance, 2006(9): 67.

[10] 周陆军, 郭亚军, 李雷阵, 等.高强钢伸臂盖板弯曲成形及回弹控制研究[J]. 工程机械与维修, 2015(S1): 102—106.
ZHOU Lu-jun, GUO Ya-jun, LI Lei-zhen, KONG Xiang-min. Research on Bending Forming and Springback Control of High Strength Steel Cantilever Plate[J]. Construction Machinery & Maintenance, 2015(S1):102—106.

[11] 曾芳英, 张成. 超高强钢 U 形截面起重臂成形工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2014(5): 75—76.
ZENG Fang-ying, ZHANG Cheng. Research on the Forming Process of Ultra High Strength Steel for U Shaped Cross Section Boom[J]. Metal Forming (Hot), 2014(5): 75—76.

[12] 余松敏. 板料折弯机折制大圆弧时折弯角度和挡料位置计算[J]. 锻压技术, 1996(2): 19—21.
YU Song-min. Bending Angle and Back-gauge Position Calculation for Large Circular Arc Bending Using Sheet Metal Bending Machine[J]. Forging Technology, 1996(2): 19—21.

[13] 陈积翠, 毛军明, 肖家扬. 数控折弯成形工艺在机车制造中的应用[J]. 电力机车与城轨车辆, 2006, 29(4): 45.
CHEN Ji-cui, MAO Jun-ming, XIAO Jia-yang. NC Bending Technique Application in Locomotive Manufacturing[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2006, 29(4): 45.

[14] 胡爱萍, 王平, 李德遵. 影响弯曲件回弹的因素及控制方法[J]. 航天制造技术, 2007(2): 57.
HU Ai-ping, WANG Ping, Li De-zun. Affecting Factors of Spring-Back in Bending and Control Methods[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2007(2): 57.

[15] 钟毓斌. 冲压工艺及模具设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
ZHONG Yu-bin. Stamping Process and Die Design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2000.