

蜂窝板式换热器焊接工艺优化与性能分析*

王世光¹ 李树君¹ 杨炳南¹ 李子明¹ 杜新武² 金鑫²

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 河南科技大学农业工程学院, 洛阳 471003)

摘要: 为改善蜂窝板式换热器机械强度,提高蜂窝板冲压成型极限,对板片焊接极限粘结力和冲压破裂极限强度的主要影响因素:焊点形状、焊接功率、焊接速度、焊接点距和焊点分布形式进行了优化,利用数控激光焊接机、拉力试验台和水压泵等试验设备,进行了单因素和多因素焊接薄板机械强度测试试验。单因素试验结果表明:相同工况下,螺旋焊点的薄板极限机械强度最大,表现为随焊接功率、焊接速度的增大,焊点极限机械强度先增加后减小;等边三角形焊点分布薄板冲压破裂的极限压强较大,随焊点距离增大迅速减小。正交试验表明:在螺旋焊点和等边三角形焊点分布下,焊接点距为50 mm、焊接功率为2.2 kW、焊接速度为2.5 m/min时,薄板冲压成型破裂极限最大,为8.6 MPa。较现有焊接工艺的冲压成型极限提升了7.5%。

关键词: 蜂窝换热板 焊接工艺 优化 正交试验

中图分类号: TQ051.5; TG44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0359-06

Welding Technology Optimization and Capability Analysis of Honeycomb Panel Heat Exchanger

Wang Shiguang¹ Li Shujun¹ Yang Bingnan¹ Li Ziming¹ Du Xinwu² Jin Xin²

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. College of Agricultural Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: To improve the mechanical strength of the honeycomb panel heat exchanger and ameliorate the limit of swell-crush forming, the main factors which affecting the welding limit cohesion and limit strength of stamping rupture were optimized. These factors included the welding shape, welding power, welding speed, welding distance, and welding arrangement. The single factor experiment and multi factors experiment for welding sheet mechanical strength were carried out with digital controlled laser welder, pulling test rig, hydraulic pressure pump and other apparatuses. The results of the single factor experiment showed that the sheet limit mechanical strength of spiral welding spot was the largest. With the increase of welding power and welding speed, the limit mechanical strength of spiral welding spot first increased then decreased. The limit strength of stamping rupture of equilateral triangle arranged welding spot was relatively good. With the increase of welding distance, the strength decreased rapidly. The result of orthogonal experiment showed that: with the spiral welding spot and equilateral triangle arranged welding spot, the maximum limit strength of stamping rupture reached 8.6 MPa which was improved by 7.5% compared with current welding technology when the welding distance was 50 mm, welding power was 2.2 kW, and welding speed was 2.5 m/min.

Key words: Honeycomb panel heat exchanger Welding technology Optimization Orthogonal experiment

收稿日期: 2015-05-10 修回日期: 2015-05-27

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD53G01)

作者简介: 王世光, 博士生, 主要从事机械强度理论与先进制造技术研究, E-mail: wangsg@caams.org.cn

通讯作者: 李树君, 研究员, 博士生导师, 主要从事高新技术装备在现代农业领域中的应用研究, E-mail: lisj@caams.org.cn

引言

蜂窝板式换热器是根据薄膜传热理论和板式换热器原理,在水平管喷淋式降膜蒸发器基础上发展起来的新型传热设备,具有传热效率高、可承受压力大、结构紧凑等优点,是目前我国工业和能源领域的一个研究热点^[1-2]。国外蜂窝板式换热器研究比较早,形成了上千种产品,广泛应用在大型冷藏保鲜库、中央空调等工程,并逐步应用到各种压力容器中。我国在该领域研究和制造尚处于起步阶段,缺乏基础理论和试验数据,从而限制了该技术应用发展。蜂窝换热板是蜂窝板式换热器的核心部件,其质量直接决定了换热器的综合传热性能。目前,蜂窝换热板主要有单面鼓泡式和双面鼓泡式两种类型,均是由不锈钢薄板(厚度为 0.2~2 mm)采用特殊工艺焊接,然后利用相应模具通过冲压而成型^[3-5]。

近年来,国内外学者在蜂窝换热板的制造工艺、传热特性、阻力性能和结构强度等方面开展了大量研究,获得了诸如板内传热系数变化规律、热传递理论模型、流传热特性数值模拟模型、焊接应力分布规律、凹坑换热的强化机理等成果^[6-11];但研究多集中于蜂窝换热板的流动传热特性和强化换热机理方面,而对其自身机械强度和成型性能的研究鲜见报道。

焊接和压力成型的工艺参数对蜂窝换热板的机械强度和成型性能有较大影响,进而影响换热效果^[12-13]。本文以焊点形状、焊接点距与分布方式、焊接速度和焊接功率为因素,开展蜂窝换热板强度和成型性能的试验研究,分析因素变化对板片粘结力和成型极限压强影响的规律,优选最佳参数组合,使得在此工艺条件下,蜂窝换热板具有良好的机械强度与冲压成型极限。

1 试验材料与方法

蜂窝板式换热器是采用凹凸变化的壁面作为传热元件,中空凹凸变化壁面传热元件是这种换热器的核心部件。采用激光焊接工艺,由两块长方形不锈钢薄板周边缝焊后,在薄板上按一定分布规则进行点焊,将校平后的叠焊金属板放到模具上,用模具将焊接部位或焊接部位周边夹紧在两板间,通入高压液体冲胀,使之成为表面凹凸相间具有酒窝状波纹表面的中空元件,传热元件的焊点可增加传热元件的刚度和强度,凹凸相间的酒窝状则强化了传热,其结构简图如图 1 所示。

换热板具有封闭式蜂窝状的流道,板片内外具

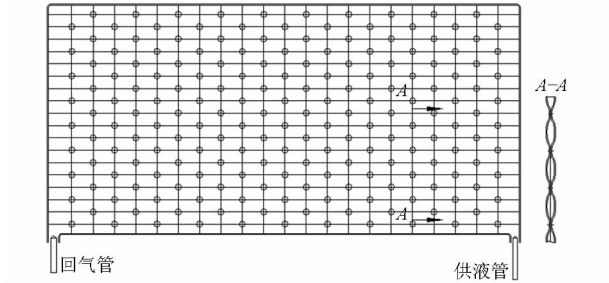


图 1 蜂窝板式换热器结构简图

Fig. 1 Schematic structure diagram of honeycomb plate heat exchanger

有独立的流体通道,冷、热流体通过蜂窝板片的壁面实现热量传递;换热板片不平整的表面结构,使流体的速度不断发生变化,流体在雷诺数较小的条件下便可达到湍流状态,从而使流动边界层和传热边界层大大减薄,使得换热效率较高。

1.1 试验材料

试验焊接板材为 304 不锈钢薄板,长×宽为 2.4 m×1.2 m,厚度 $\delta=1.2\text{ mm}$,根据试验方案需求切割成合适尺寸(如图 2);试验前,先用丙酮将两钢板的结合面擦拭干净,消除灰尘和塑胶等的影响。

304 不锈钢圆管外径 25 mm,壁厚 1.5 mm;45 号钢轴直径 22 mm,用于薄板焊点结合强度的拉伸试验。



图 2 试验板材

Fig. 2 Sheet metal in experiment

1.2 仪器设备

LW-2160B 型数控激光焊接机:焊接功率最高为 3.5 kW,焊接速度最大为 4 m/min;通过改变相应参数值,实现不同试验方案下两薄板的激光深熔焊接(试验现场如图 3 所示)。

DSB-25 型电动试压泵:输出水压强 0~40 MPa,用于薄板的冲压成型试验。

DNS100 型电子万能材料试验机:测量范围 0~100 kN,用于不同焊接工艺下薄板焊点粘结力测试。

氩弧焊机:薄板焊接后为测试其焊点机械强度需进行拉伸试验,由于板片较薄在材料试验机上无可夹持点,为方便夹持施压且不影响测试结果,在焊点外采用氩气保护焊将 304 不锈钢圆管焊接在两板片侧边,再分别装入 45 号钢轴(图 4)。



图 3 激光焊接试验
Fig. 3 Laser welding test plot



图 4 焊点机械强度测试的前处理
Fig. 4 Pretreatment of mechanical strength of welding spot

1.3 试验方法及方案设计

结合前期研究与现有蜂窝板焊接工艺方法,确定本文试验共计 4 个批次:①激光焊接功率对 3 种焊点形状(环形焊点、螺旋焊点和 C 形焊点)薄板粘结力影响的单因素对比试验。②激光焊接速度对 3 种焊点形状薄板粘结力影响的单因素对比试验。③ 2 种焊点分布(矩形分布和等边三角形分布)对薄板破裂极限压强影响的单因素对比试验。④焊接点距、功率和速度对薄板冲压性能影响的正交试验。

试验时室内温度 25 ~ 27℃,激光焊接高度 10 mm,焊点形状如图 5 所示,其中螺旋焊点比环形焊点多出 60°角位移,C 形焊点为 3/4 圆,直径为 10 mm。结合现有工艺参数与数控激光焊接机可调参数范围,在试验 1 时,将激光焊接速度设定为 2.5 m/min,进行焊接功率为 1.6 ~ 3.0 kW 的单因素 15 水平完全随机试验,每个水平重复 3 次,焊后标记分割,进行拉力测试与统计;试验 2 时,将激光焊接功率设定为 2.05 kW,焊接速度范围 1.7 ~

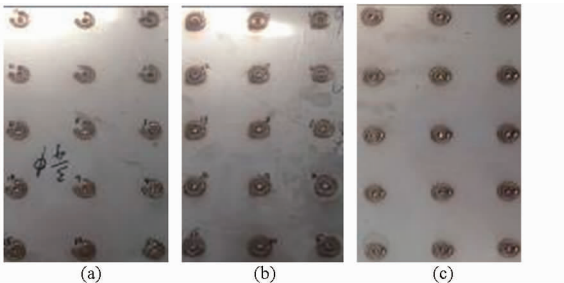


图 5 3 种焊点形状实物图
Fig. 5 Three types of welding shape
(a) C 形 (b) 螺旋形 (c) 环形

3.1 m/min,方法与试验 1 相同(焊后板片粘结力测试见图 6);试验 3 时,在试验 1 和 2 结果分析的基础上固定一种较好的焊点形状,采用矩形和等边三角形两种分布方式焊接 15 个点(见图 7,其中焊接功率 2.05 kW、焊接速度 2.5 m/min、直线焊点功率 2.16 kW),进行点距为 30 ~ 70 mm 的单因素 5 水平完全随机试验,每个水平重复 3 次,焊后标记分割,随后进行水压冲压测试(图 8)与统计(焊点崩裂会发出“咔”的声音,记录此时压强,其中剔除封边焊点先裂开数据);试验 4 基本参数设定与试验 3 相同,以焊接点距、功率和速度为试验因素,进行 3 水平正交试验,测试方式与试验 3 相同,重复测试 3 次取均值。

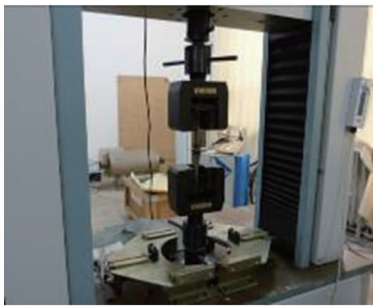


图 6 焊后板片粘结力测试
Fig. 6 Test of plates cohesion force after welding

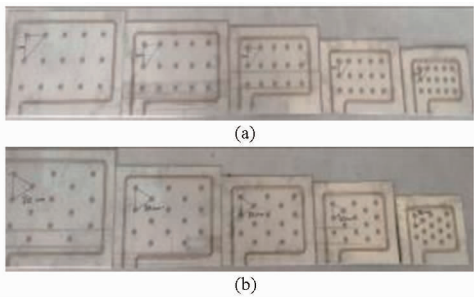


图 7 不同点距 2 种焊点分布方式
Fig. 7 Different welding distances in two types of welding arrangement
(a) 矩形分布 (b) 等边三角形分布

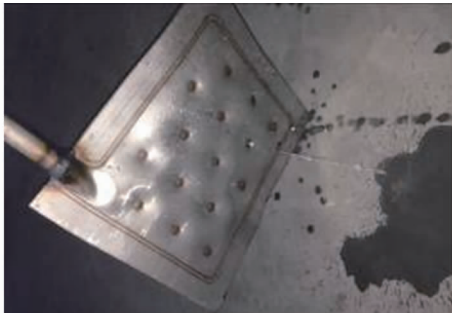


图 8 焊后薄板水压胀型测试
Fig. 8 Test of sheet bulging by hydraulic pressure after welding

1.4 试验过程

试验在中机西南能源科技有限公司进行,研究

板式冰蓄冷设备中蜂窝换热板的机械强度和成型受压极限。为方便测试,根据设定的不同焊接工艺参数,采用小板一次完成一组焊接作业,然后根据试验需要标记分割。本研究包括焊点形状、焊接功率、焊接速度对薄板机械强度影响的对比试验,不同焊接点距与分布方式对薄板受压性能的对比试验,以及基于上述试验的焊后薄板冲压性能正交试验;其中点焊的作用是使两薄板初始粘结和定位,直线焊点是为了封边便于压力成型,均较为简单不做研究。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 激光焊接功率对焊点机械强度的影响

为了研究不同的焊接功率对焊点机械强度的影响,保持激光焊接速度 2.5 m/min 不变的情况下,分别采用环形焊、C 形焊和螺旋焊进行板片焊接并完成拉力测试,数据见表 1。

由表 1 得出 3 种焊点形态下焊接功率对两薄板极限粘结力(即拉断力)的影响曲线,如图 9 所示。从图 9 中可以看出,在焊接速度一定的情况下,两薄板不论以环形、C 形还是螺旋形焊点焊接,其极限粘结力基本是随着焊接功率增大先增加后减小。除了焊接功率在 2.3 kW 左右外,同一焊接功率下,采用螺旋焊点焊接的薄板极限粘结力较大,环形焊点次之,C 形焊点最小。据此结果,稳定焊接速度 2.5 m/min 左右,选择螺旋焊点焊接,功率 2.0 kW 时,可获得较高的薄板粘结力。

表 1 不同焊接功率薄板焊点机械强度测试值

Tab.1 Test values of weld bond strength for two plates by different welding powers

kN

焊接功率/ kW	焊点形状		
	环形焊点	螺旋焊点	C 形焊点
1.6	43.81	49.55	10.13
1.7	45.88	53.95	19.36
1.8	47.21	57.29	21.82
1.9	48.33	58.58	28.30
2.0	49.66	59.86	21.67
2.1	53.70	57.69	31.24
2.2	43.52	54.69	33.54
2.3	24.44	47.97	37.18
2.4	23.49	44.17	17.32
2.5	21.96	41.20	14.46
2.6	15.29	36.09	11.92
2.7	14.87	26.16	10.13
2.8	14.11	24.47	9.43
2.9	13.89	24.00	7.76
3.0	13.51	14.50	7.47

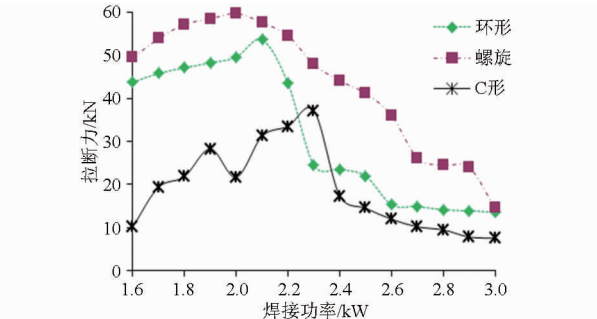


图 9 3 种焊点下焊接功率对薄板机械强度的影响

Fig.9 Effect of welding power on plates mechanical strength in three kinds of welding shape

2.1.2 激光焊接速度对焊点机械强度的影响

为了研究不同的焊接速度对焊点机械强度的影响,保持激光焊接功率 2.05 kW 不变的情况下,分别采用环形焊、C 形焊和螺旋焊进行薄板焊接并完成拉力测试,数据见表 2。

由表 2 得出 3 种焊点形状下焊接速度对两薄板极限粘结力的影响曲线,如图 10 所示。从图 10 中可以看出,在焊接功率一定的情况下,无论采用环形焊点、螺旋焊点还是 C 形焊点焊接,两薄板间的极限粘结力均随焊接功率的升高先增大后减小,其中 C 形焊点下的极限粘结力波动较大。除焊接速度在 2.3 ~ 2.5 m/min 外,同一焊接速度下,螺旋焊点的极限粘结力较大,环形焊点次之,C 形焊点较小。据此结果,稳定焊接功率 2.0 kW 左右,选择螺旋焊点焊接,焊接速度 2.5 m/min 时,可获得较高的薄板粘结力。

表 2 不同焊接速度薄板焊点机械强度测试值

Tab.2 Test values of weld bond strength for two plates by different welding speeds

kN

焊接速度/ (m·min ⁻¹)	焊点形状		
	环形焊点	螺旋焊点	C 形焊点
1.7	33.38	33.60	20.64
1.8	33.78	38.49	21.59
1.9	35.59	40.13	29.39
2.0	36.54	42.56	30.58
2.1	37.00	43.93	31.46
2.2	37.09	45.00	34.64
2.3	37.45	45.83	40.42
2.4	40.41	48.59	49.73
2.5	41.45	50.30	41.62
2.6	31.59	46.68	18.89
2.7	29.71	43.26	12.03
2.8	16.54	36.27	11.50
2.9	13.52	34.83	11.43
3.0	12.24	24.78	9.51
3.1	12.19	21.45	8.56

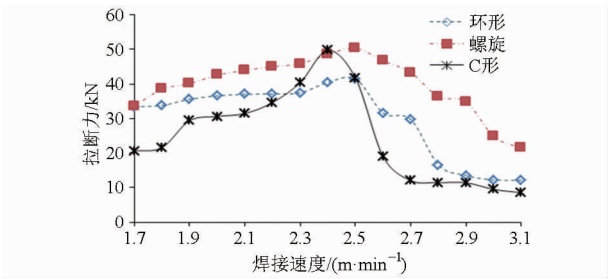


图 10 3 种焊点下焊接速度对薄板机械强度的影响
Fig. 10 Effect of welding speed on plates mechanical strength in three kinds of weld shape

2.1.3 焊接点距对薄板冲压破裂极限压强的影响

在试验得到焊接功率和焊接速度对薄板焊接焊点粘结力影响规律之后,分别采用等边三角形和矩形分布方式,以功率 2.0 kW、速度 2.5 m/min 和螺旋焊点的形式完成 15 个焊点的薄板焊接,然后利用电动试压泵分别进行点距为 30、40、50、60、70 mm 的薄板冲压试验,并记录破裂极限压强,数据见表 3。由表 3 发现,无论采用等边三角形焊点分布还是矩形焊点分布,薄板冲压破裂的极限压强均随着焊接点距的增大而减小;在焊接点距一定的情况下,等边三角形焊点分布的破裂极限压强较矩形焊点分布的要大。根据此结果,选择等边三角形焊点分布方式,点距尽量小可获得较大的冲压成型极限压强。

表 3 不同焊接点距薄板冲压破裂极限压强测试值		
Tab.3 Test values of fracture limit for sheet metal forming with different welding distances MPa		
焊接点距/ mm	焊点分布	
	等边三角形	矩形
30	15.0	14.5
40	11.0	10.0
50	8.5	7.8
60	4.0	3.0
70	1.8	1.5

2.2 正交试验

由上述单因素试验发现,蜂窝板片的机械强度主要与焊接功率、焊接速度、焊点形状、焊点分布及焊接点距等因素有关;相同条件下螺旋焊点的机械强度较高,与焊点的矩形分布相比等边三角形分布的薄板冲压破裂极限值较大。由于影响焊后薄板冲压性能的因素较多,而且各因素水平数是不相同的,本试验在单因素试验分析的基础上,进行三因素三水平正交试验设计($L_9(3^4)$),其因素水平编码如表 4 所示。对试验结果进行分析计算,评价指标为各因素在 i 水平下的总极限压强 $K_i(i=1,2,3)$,其中 K_i 为各因素 i 水平下极限压强;各因素在 i 水平下的平均极限压强 $k_i=K_i/3$;各因素的极差为 R ;计

表 4 试验因素水平			
Tab.4 Levels of experimental factors			
水平	试验因素		
	焊接点距/mm	焊接功率/kW	焊接速度/(m·min ⁻¹)
1	40	1.8	2.0
2	50	2.0	2.5
3	60	2.2	3.0

算结果见表 5。

从表 5 中的数据可知,极差最大的是因素 A,然后是因素 B,其次是因素 C。因此,因素 A 对试验的影响最大,取水平 2 最好,其次是因素 B,取水平 3 最好,因素 C 的影响最小,取水平 2 最好。总之该试验的最优方案为 $A_2B_3C_2$,即焊接点距为 50 mm,焊接功率为 2.2 kW,焊接速度为 2.5 m/min 时最佳。在此参数组合下,进行薄板焊接(采用螺旋焊点、15 个焊点等边三角形焊点分布),水压胀型试验结果为破裂极限压强 8.6 MPa,较公司现有焊接工艺(试验号 6),提升薄板冲压成型极限 7.5%(成型测试见图 11)。

表 5 蜂窝板冲压性能正交试验方案与结果				
Tab.5 Scheme and results of stamping formability for orthogonal test of honeycomb plates				
试验号	试验因素			极限压强/ MPa
	A	B	C	
1	1	1	1	5.0
2	1	2	2	6.1
3	1	3	3	7.0
4	2	1	2	6.5
5	2	2	3	4.6
6	2	3	1	8.0
7	3	1	3	0.7
8	3	2	1	1.8
9	3	3	2	2.5
K_1	18.1	12.2	14.8	
K_2	19.1	12.5	15.1	
K_3	5.0	17.5	12.3	
k_1	6.0	4.1	4.9	
k_2	6.4	4.2	5.0	
k_3	1.7	5.8	4.1	
极差 R	4.7	1.8	0.9	
最优方案	A_2	B_3	C_2	



图 11 薄板水压胀型极限的验证试验
Fig. 11 Verification test of bulge forming limit for sheet

3 结 论

(1)单因素焊点极限机械强度试验表明:只改变焊接功率(焊接速度)情况下,不论环形焊点、螺旋形焊点还是 C 形焊点,薄板间极限机械强度均随着焊接功率(焊接速度)的增大而先增加后减小;在相同工况下螺旋焊点的极限机械强度最大。

(2)单因素薄板冲压破裂极限压强试验表明:相同焊点数且焊接点距一定的情况下,等边三角形

焊点分布的破裂极限压强比矩形焊点分布大;随着点距的增加,薄板破裂极限压强快速减小。

(3)多因素正交试验表明:薄板冲压成型试验中焊接点距、焊接功率和焊接速度是影响薄板冲压破裂的主要因素。其中,最优组合为螺旋焊点、等边三角形焊点分布、焊接点距 50 mm,焊接功率 2.2 kW,焊接速度 2.5 m/min。在此参数组合下,薄板水压胀型极限压强为 8.6 MPa,较现有焊接工艺提升了 7.5%。

参 考 文 献

1 李隆键,陈欢,吴治娟. 蜂窝板换热器内部流动传热特性研究[J]. 制冷学报,2012, 33(5): 49 – 53.
Li Longjian, Chen Huan, Wu Zhijuan. Research on fluid flow and heat transfer characteristics in channel of honeycombed plate heat exchanger [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(5): 49 – 53. (in Chinese)

2 魏峰. 双蒸发器动态冰蓄冷机组的研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
Wei Feng. Study on the dynamic ice storage unit with double evaporator [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)

3 宋虎堂,李培宁. 蜂窝紧凑结构螺旋板换热器[J]. 压力容器,2010, 27(4): 13 – 15.
Song Hutang, Li Peining. Honeycomb type spiral plate exchangers[J]. Pressure Vessel Technology, 2010, 27(4):13 – 15. (in Chinese)

4 樊卓志,孙勇,彭明军,等. 基于 ANSYS 的金属蜂窝板热性能模拟研究[J]. 航空材料学报,2012, 32(5): 70 – 74.
Fan Zhuozhi, Sun Yong, Peng Mingjun, et al. Simulation and investigation of thermal performance of metallic honeycomb panel on basis of ANSYS[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(5): 70 – 74. (in Chinese)

5 李东辉,夏新林,孙凤贤,等. 气动加热下金属蜂窝板热响应特性数值模拟[J]. 宇航学报,2008, 29(6): 2019 – 2022, 2056.
Li Donghui, Xia Xinlin, Sun Fengxian, et al. Numerical method for thermal response characteristics of metallic honeycomb sandwich panels under aerodynamic heating[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(6): 2019 – 2022, 2056. (in Chinese)

6 陈武滨,江楠. 新型板壳式换热器壳程流动与换热的数值模拟[J]. 化学工程,2012, 40(1): 30 – 34.
Chen Wubin, Jiang Nan. Numerical simulation of shell-side flow and heat transfer characteristics in new type plate-shell heat exchanger[J]. Chemical Engineering, 2012, 40(1): 30 – 34. (in Chinese)

7 王艺玮. 新型蜂窝螺旋板式换热器数值模拟及优化[D]. 郑州:郑州大学,2014.
Wang Yiwei. The numerical simulation and optimization on the new cellular spiral plate heat exchanger [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014. (in Chinese)

8 陈欢. 蜂窝板换热器内部流动与传热特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
Chen Huan. Research on fluid flow and heat transfer characteristics in channel of honeycombed plate heat exchanger [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)

9 Blosser M L. Investigation of fundamental modeling and thermal performance issues for a metallic thermal protection system design [C]//Proceedings of 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit,2002: 14 – 17.

10 Zhang G, Tian M, Zhou S. Simulation and analysis of flow pattern in cross-corrugated plate heat exchangers [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2006, 18(5): 547 – 551.

11 Ciofalo M, Di P I, Stasiek J A. Investigation of flow and heat transfer in corrugated-undulated plate heat exchangers [J]. Heat and Mass Transfer, 2000, 36(5): 449 – 462.

12 唐羽烨,薛明德. 蜂窝夹芯板的热学与力学特性分析[J]. 复合材料学报,2005,22(2): 130 – 136.
Tang Yuye, Xue Mingde. Thermo-mechanical characteristics analysis of sandwich panel with honey comb core[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(2): 130 – 136. (in Chinese)

13 宋虎堂. 蜂窝紧凑结构螺旋板换热器[D]. 上海:华东理工大学,2009.
Song Hutang. Spiral plate heat exchanger of honeycomb type [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)