

基于交互正交试验的塑料热风铆接工艺参数优化

郭春东 韩涛

(河北科技大学经济管理学院, 石家庄 050018)

摘要: 针对塑料热风铆接成形过程中出现的不良情况, 以提高墩头质量为目的, 探究热风铆接工艺最优参数设置。通过改变热风铆接设备的加热时间、加热温度、气缸压力, 开展考虑交互作用的热风铆接墩头质量正交试验。建立塑料热风铆接墩头多指标评价过程, 采用逼近理想解排序法(TOPSIS)将多个评价指标的结果整理形成综合得分, 作为正交试验的响应变量, 并综合极差分析和方差分析法分析正交试验结果。结果表明: 当该热风铆接设备的加热时间为3 s、加热温度为190 °C、气缸压力为0.7 MPa时, 所得到的塑料热风铆接墩头质量综合得分最高, 为0.835 7。

关键词: 塑料热风铆接 正交试验 组合赋权法 TOPSIS法 质量优化

中图分类号: TQ320.66 **文献标志码:** B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20240329

Optimization of Plastic Hot Air Riveting Process Parameters Based on Interactive Orthogonal Test

Guo Chundong, Han Tao

(School of Economics and Management, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018)

Abstract: Aim at the undesirable situations occurring during the forming process of plastic hot-air riveting, with the purpose of improving the quality of the rivet head, this paper explores the optimal parameter settings of hot air riveting process to improve the quality of rivet head. By changing the heating time, heating temperature and cylinder pressure of the hot air riveting equipment, the orthogonal test of hot air rivet head quality considering the interaction is performed. The multi-index evaluation process of plastic hot air rivet head is established. TOPSIS method is used to sort out the results of multiple evaluation indexes as the response variables of orthogonal test, and the results of orthogonal test are analyzed by range analysis and variance analysis. The results show that the comprehensive score of the quality of the plastic hot air rivet head is the highest, which is 0.835 7 when the heating time of the hot air riveting equipment is 3 s, heating temperature is 190 °C and cylinder pressure is 0.7 MPa.

Key words: Plastic hot air riveting, Orthogonal test, Combination weighting method, TOPSIS method, Quality optimization

1 前言

材料替代作为结构轻量化的重要途径, 已成为汽车和航天飞行器发展的重要研究主题^[1]。由于塑料具有轻量性和高延展性等特点, 采用塑料材料代替金属材料是轻量化的一个主流趋势^[2]。

作为一种成本低廉、加工高效的永久性固定装配技术, 塑料热风铆接技术常用于塑料件与其他元件之间的紧固连接, 并广泛应用于宇航军工、电子电气、汽车等行业的生产中^[3]。在实际生产过程中, 热风铆接墩头常常出现墩头表面龟裂、拉丝, 墩头明显歪斜, 墩头强度不足等不良情况。

作者简介: 郭春东(1974—), 男, 博士学位, 副教授, 主要研究方向为创新管理、数据挖掘、科技评价、工业工程、质量管理与可靠性。

通信作者: 韩涛(1998—), 男, 硕士学位, 主要研究方向为工业工程与管理。

参考文献引用格式:

郭春东, 韩涛. 基于交互正交试验的塑料热风铆接工艺参数优化[J]. 汽车工艺与材料, 2025(6): 32-40.

GUO C D, HAN T. Optimization of Plastic Hot Air Riveting Process Parameters Based on Interactive Orthogonal Test[J]. Automobile Technology & Material, 2025(6): 32-40.

王晓东等^[2]提出了一种基于计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的热空气加热下ABS塑料的熔化模型,根据预试验得到的各因素参数范围进行了正交试验,建立了多元非线性回归模型,对不同参数下的熔化速率进行了预测,并验证了预测模型的有效性。曾晓天^[4]采用分子动力学模拟方法从微观尺度分析了高分子材料的焊接过程,并且以拉伸强度作为焊接质量的衡量指标,利用Design-Expert软件设计了多焊接参数交互作用试验方案,通过响应面法建立焊接强度与焊接参数的数学模型,可预测不同焊接参数下的焊接强度。崔军勇^[5]对塑料铆钉热铆接压铆过程进行了分析,研究了压铆过程中塑料铆钉被铆粗时遵循的材料流动规律,在此基础上,分析了热铆接过程中产生的塑料铆钉的变形状态以及铆钉变形的影响因素。

在热风铆接的工艺研究中还存在以下不足:一是目前在探究热风铆接效果的影响因素研究中,对影响因素之间的交互作用考虑较少,如果忽略交互作用,则会影响最终因素水平选定的准确性;二是目前对于热风铆接产品质量的判定指标较为单一,未考虑铆接墩头质量的多指标评价问题。

因此,以某产品塑料铆接墩头为试验材料,设计考虑因素间交互作用的正交试验方案,建立热风铆接产品质量多指标评价过程;通过直观分析法和方差分析法得出各因素及其交互作用对热风铆接质量的影响程度,最终确定工厂热风铆接工艺过程关键参数水平设置。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

研究选定试验产品为汽车转向功能模块中某金属弹片开关,其主要由塑料底座与金属弹片通过热风铆接紧固连接而成。塑料底座中预留了定位柱和铆柱,金属弹片中包含4个弹性臂,金属弹片通过不同的触点实现电路导通和对应功能^[6]。铆接成形墩头不良会影响金属弹片紧固效果,从而影响其电路导通效果,严重时可能造成汽车部分功能失效。底座主要材料为共聚甲醛

(POM/C M90)材料,金属弹片材料为磷锡青铜(CuSn6),通过热风铆接紧固后的产品结构关系如图1所示。

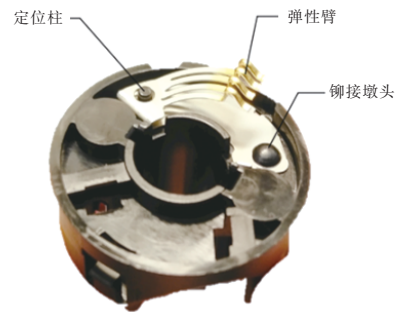


图1 塑料底座与金属弹片紧固连接示意

2.2 试验设备

试验采用工厂现有的热风铆接设备,其主要由热熔模块和冷铆头压铆模块2个功能模块组成。热熔模块是由热熔机构产生的加热气体通过热风型腔导入出风管再由出风管导出,热风对材料进行热传导,使其自身的分子在热运动的作用下发生迁移和扩散,达到熔融的状态^[7]。冷铆头压铆模块是由熔融状态的铆柱与压铆模块的金属冷铆头发生接触,熔融状态的铆柱在压力的作用下被挤压成形;金属成形冷铆头保压一段时间,使铆柱在保压的过程中,自身的分子随着温度的下降和外在压力的作用再次发生缠绕、冷却、结晶和定型^[7]。

试验设备除工厂现使用的热风铆接设备外,还包括工业温度计(气体热电偶探头)、高精度数显式游标卡尺、高精度数显式高度计、万能拉力试验机等。

2.3 试验内容

由于实际生产条件和需求不同,热风铆接设备的开发与设计往往具有一定的独特性。根据工厂热风铆接设备实际情况、实际生产经验以及加工材料的特性,结合相关研究,确定在试验条件下所要研究的影响因素,验证所选定的因素对热铆质量的影响是否显著,探究所选因素及其交互作用对热风铆接质量影响程度和规律。

2.4 质量目标

目前,工厂对于热风铆接的墩头质量要求主要包括2个方面:一是产品的外观,要求墩头外观良好、圆润、无拉丝、位置无偏斜;二是

强度方面,要求热风铆接后的墩头强度越高越好。

根据工厂对热风铆接产品质量的实际要求建立质量评价流程,并对交互正交试验的产品质量目标进行定义。产品质量评价包括3个阶段:第一阶段为外观检测,在外观合格的基础上进行后续检测;第二阶段为墩头的外观测量;第三阶段为拉拔力测试,测量墩头能承受的最大破坏力。最终对所得到的检测结果进行逼近理想解排序法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutuion, TOPSIS)综合评价,输出综合得分,并定义墩头质量评价综合得分最大化作为此次试验的质量目标。铆接质量评价流程图如图2所示。

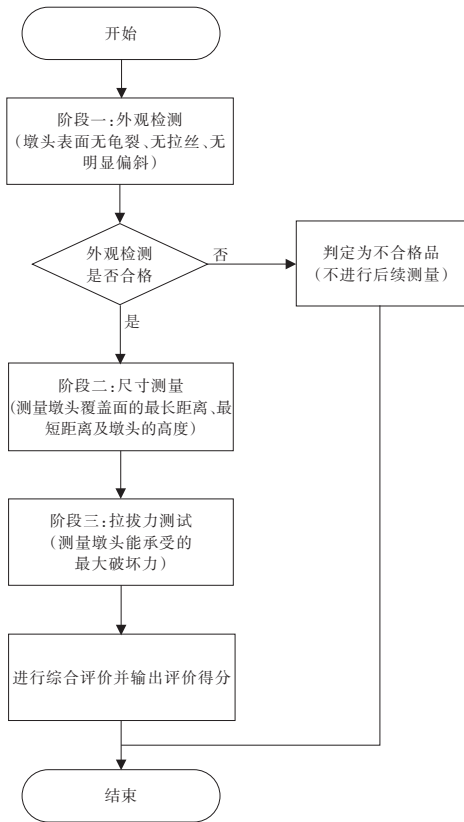


图2 塑料热风铆接墩头质量评价流程

2.5 塑料热风铆接常见不良

常见的塑料热风铆接不良有墩头歪斜、墩头表面拉丝、墩头表面龟裂、墩头表面有破坏性压痕、铆钉溢料等。在工厂实际生产过程中,常见的铆接外观不良主要是铆钉溢料和铆接不充分。工厂铆接墩头常见不良情况如图3所示,良好铆接墩头如图4所示。

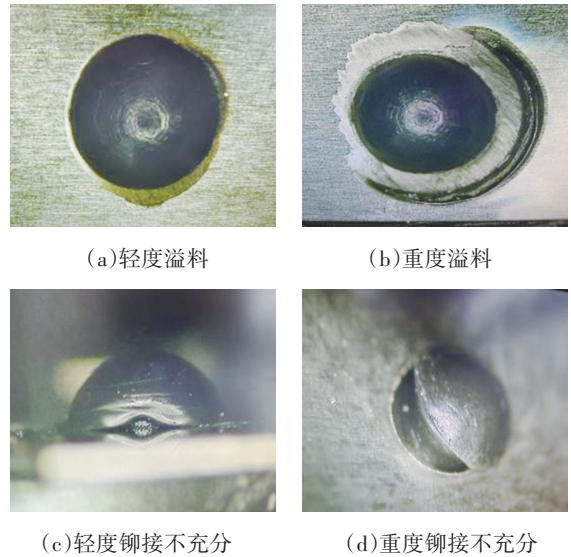


图3 不良铆接墩头

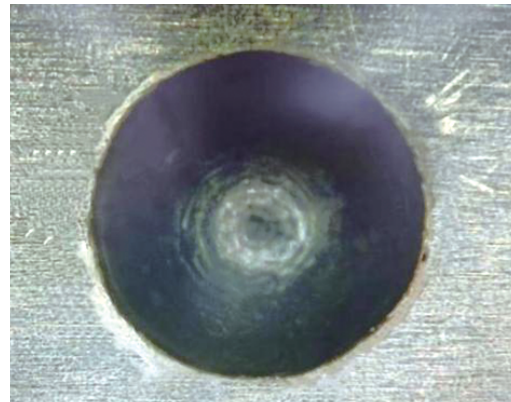


图4 良好铆接墩头

3 塑料热风铆接工艺正交试验设计

3.1 正交试验因素水平

为准确制定正交试验因素水平,设计单因素热风铆接试验方案以获取工艺参数水平区间,单因素试验以外观检测结果作为判定指标,依据单因素试验结果进行后续正交试验因子水平范围和取值的确定,并进一步分析各工艺参数对热风铆接产品质量的影响程度。

经过单因素试验,本次正交试验最终选定了3个因素进行研究,分别为加热时间(A)、加热温度(B)与气缸压力(C),研究所选定因素对塑料热风铆接墩头质量的影响程度,每个因素根据单因素试验结论结合工厂实际情况选取3个水平,作考虑交互作用的正交试验表,最终确定的正交试验因素和水平情况如表1所示。用 $A_1\sim A_3$ 、 $B_1\sim B_3$ 、 $C_1\sim C_2$ 表示对应水平因素。

表1 正交试验因素水平设计

水平	加热时间/s	加热温度/°C	气缸压力/MPa
1	2.5	175	0.3
2	3.0	190	0.5
3	3.5	205	0.7

3.2 正交试验响应变量

根据工厂实际需求,外观方面评价指标包括墩头覆盖面的最长距离、最短距离以及墩头的高度,强度方面测量成形墩头所能承受的最大拉拔力。为更加合理地进行热风铆接工位产品质量评价,采用层次分析(Ahalytic Hierarchy Process, AHP)-熵值法确定所选定的4个评价指标的综合权重,既保证了数据经过客观、系统的处理,又添加了主观意识,使评价指标的权重值更为科学合理。TOPSIS能够通过有限个评价指标与理想目标的接近程度进行排序,对评估对象的相对优劣程度进行评价^[8],故使用TOPSIS对所得试验数据进行各组间试验的综合评分,将结果作为正交试验的响应变量。

3.3 交互正交试验设计方案

针对3因素3水平且考虑因素间交互作用的正交试验,选用交互正交表 $L_{27}(3^{13})$ 进行试验设计,对加热时间、加热温度、气缸压力3个因素进行正交试验,以探究各因素及各因素间的交互作用对热风铆接产品质量的影响,采用TOPSIS将多指标评价结果整合为综合得分作为正交试验的响应变量,并结合极差分析与方差分析法得到所选定影响因素的最佳参数水平组合。

每组试验进行3次平行试验,试验结果以3次试验的平均值表示,最终的交互正交试验指标测量结果如表2所示。

根据产品开发阶段设计的铆柱实际尺寸,结合试验过程中对不同工艺条件下的产品评价,对4个热风铆接质量评价指标分别进行了评价和最优状态的确定,墩头覆盖面最佳状态为直径为2.75 mm的圆形覆盖面,墩头高度最佳状态为0.90 mm,拉拔力为望大型指标。

表2 交互正交试验各指标测量结果

墩头覆盖最 长距离/mm	墩头覆盖最 短距离/mm	墩头高度 /mm	拉拔力 /N
2.620	2.513	0.947	38.700
2.643	2.523	0.940	37.067
2.703	2.553	0.940	33.400
2.633	2.577	0.877	51.300
2.637	2.577	0.893	46.467
2.637	2.583	0.903	50.667
2.643	2.607	0.887	52.600
2.657	2.620	0.880	53.200
2.650	2.567	0.887	54.933
2.587	2.523	0.880	43.300
2.650	2.557	0.877	42.267
2.640	2.567	0.907	40.750
2.710	2.663	0.870	39.860
2.727	2.683	0.880	48.200
2.727	2.717	0.887	46.467
2.733	2.640	0.863	45.667
2.717	2.663	0.863	44.367
2.730	2.657	0.863	43.300
2.593	2.520	0.880	40.433
2.647	2.573	0.883	41.200
2.600	2.573	0.880	40.600
2.833	2.667	0.860	59.233
2.827	2.703	0.870	50.267
2.840	2.790	0.873	50.000
2.887	2.817	0.843	50.667
2.900	2.823	0.853	50.767
2.953	2.827	0.840	53.533

3.3.1 AHP方法确定指标主客观权重

将热风铆接质量判定作为一级指标,4个评价指标要素设定为二级指标,建立层次分析法模型如图5所示,通过德尔菲专家赋分法得到各因素的相对重要比。

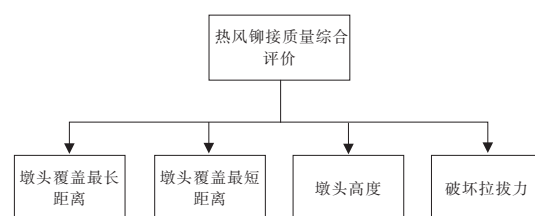


图5 层次分析法模型

层次分析法对指标赋权时,信息来源于专家对每层次各元素之间的相对重要性所作的判断^[9]。各元素之间的相对重要性用1~9及其倒数进行标度,得到判断矩阵后需要计算判断矩阵的最大特征值并进行矩阵一致性检验。

本次专家赋分对象为该产品开发设计师、工艺工程师、质量工程师等相关从业人员,共回收有效问卷15份。各子要素相对重要性按照将15份打分表加和后取平均的方法进行整理,最终得到热风铆接质量评价指标的AHP判断矩阵如表3所示。

	墩头覆盖 最长距离	墩头覆盖 最短距离	墩头高度	破坏 拉拔力
墩头覆盖 最长距离	1	1	2	3.133 3
墩头覆盖 最短距离	1	1	2	3.133 3
墩头高度	0.5	0.5	1	2.333 3
破坏 拉拔力	0.319 2	0.319 2	0.428 6	1

根据整理后的专家打分结果进行数据处理后,计算判断矩阵的最大特征值、一致性指标(Consistency Indicator, CI)和矩阵一致性比率(Consistency Ratio, CR),通常,当CR小于0.1时认为一致性检验通过^[10],此次判断矩阵的CR小于0.1,一致性检验通过,最终得到AHP分析结果如表4所示。

	权重值	最大特征值	CI	CR
墩头覆盖 最长距离	0.351 1	4.020	0.006 7	0.007 5
墩头覆盖 最短距离	0.351 1			
墩头高度	0.195 5			
拉拔力	0.102 4			

3.3.2 熵值法确定指标客观权重

熵值法可以用来度量数据所提供的有效信息。某个评价指标的熵值越小,所能提供的信息越多,相应的权重也就越大,反之,指标权重就越小^[11]。因为信息熵是通过原始数

据所得到的,所以信息熵具有很强的客观性^[9]。

熵值法的具体算法步骤如下:

a. 已知*i*个对象和*j*个属性, z_{ij} 为第*i*个对象的第*j*个属性值。

b. 将属性进行归一化处理,此处采用极差法,确定指标类型及其参数值进行归一化。

c. 计算第*j*个属性下第*i*个对象占该指标的比重 P_{ij} :

$$P_{ij} = z_{ij} / \sum_{i=1}^n z_{ij} (j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

d. 计算第*j*项指标熵值 E_j :

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

当 $P_{ij} = 0$ 时, $P_{ij} \ln P_{ij} = 0$ 。

e. 计算第*j*项指标的差异系数 G_j :

$$G_j = 1 - E_j \quad (3)$$

f. 计算第*j*项指标的权重 W_j :

$$W_j = G_j / \sum_{j=1}^m G_j \quad (4)$$

通过熵值法的计算过程,对交互正交试验的4个评价指标进行客观权重的计算与整理,结果如表5所示。

评价指标	信息熵值 <i>E</i>	信息效用值 <i>d</i>	客观权重
墩头覆盖最长距离	0.964 2	0.035 8	0.190 6
墩头覆盖最短距离	0.927 7	0.072 3	0.384 9
墩头高度	0.960 3	0.039 7	0.211 4
拉拔力	0.960 0	0.040 0	0.213 0

3.3.3 评价指标组合权重

使用AHP-熵值法确定评价指标的权重,既可保证数据自身的客观性,又考虑了相关专家的主观判断,使评价指标的权重的赋值更加科学合理。

层次分析法得到的各因素主观权重为 W_{AHP} ,记为 $W_{an}, n=1, 2, 3, 4$,记

$$W_{AHP} = [W_{a1} \ W_{a2} \ W_{a3} \ W_{a4}]^T \quad (5)$$

熵值法得到的各因素客观权重为 W_{EM} ,记为 $W_{en}, n=1, 2, 3, 4$,记

$$W_{EM} = [W_{e1} \ W_{e2} \ W_{e3} \ W_{e4}]^T \quad (6)$$

将各因素的综合权重 W 记为 $W_n, n=1,2,3,4$, 记

$$W=(W_1 W_2 W_3 W_4)^T \quad (7)$$

则

$$W=\theta W_{AHP}+(1-\theta)W_{EM} \quad (8)$$

式中,综合权重随着 θ 的变化发生改变,研究认为主观权重与客观权重同等重要,因此采取 $\theta=0.5$, 代入式(8)中计算,最终得到各评价指标综合权重如表6所示。

评价指标	AHP方法权重	熵值法权重	综合权重
墩头覆盖最长距离	0.351 1	0.190 6	0.270 9
墩头覆盖最短距离	0.351 1	0.384 9	0.368 0
墩头高度	0.195 5	0.211 4	0.203 5
拉拔力	0.102 4	0.213 0	0.157 7

3.3.4 TOPSIS综合评价结果

TOPSIS是一种理想目标相似性的顺序选优技术,在多目标决策分析中是一种非常有效的方法^[12],其通过归一化后的数据规范化矩阵找出多个目标中最优目标和最劣目标(分别用理想解和反理想解表示),分别计算各评价目标与理想解和反理想解的距离,获得各目标与理想解的贴近度,按理想解贴近度的大小排序,以此作为评价目标优劣的依据^[13]。经过TOPSIS计算与数据处理,最终得到交互正交试验结果如表7所示。

4 试验结果与讨论

4.1 直观分析法

直观分析法利用数据计算极差进行比较分析,根据表7中的数据,计算出每个因子的平均值 k_{ij} 以及各因素的极差。极差(R)越大,表明该因素

A	B	(A×B) ₁	(A×B) ₂	C	(A×C) ₁	(A×C) ₂	(B×C) ₁	空列	空列	(B×C) ₂	空列	空列	得分
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.219 3
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0.284 6
1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0.411 5
1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	0.455 5
1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	0.486 8
1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	0.521 9
1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	0.562 0
1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	0.596 3
1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	0.499 2
2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	0.296 7
2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	0.406 1
2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	0.453 7
2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	0.660 6
2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	0.792 9
2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	0.835 7
2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	0.645 8
2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	0.669 5
2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	0.662 4
3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	0.290 3
3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	0.446 7
3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	0.371 7
3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	0.661 1
3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	0.733 8
3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	0.729 9
3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	0.541 8
3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	0.540 9
3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	0.461 9

对试验指标值的影响越大^[14]。其中, k_{ij} 为因素 j 在水平 i 下各试验结果的平均值, i 为因素的水平, j 为因素的序号。具有交互作用的 R 值为相应列的极差之和, 各因素及其交互作用的直观分析结果见表 8。

分析因素	K_{1j}	K_{2j}	K_{3j}	R
A	0.448 6	0.602 6	0.530 9	0.154 0
B	0.353 4	0.653 1	0.575 5	0.299 7
$(A \times B)_1$	0.557 5	0.462 8	0.561 7	0.098 9
$(A \times B)_2$	0.527 7	0.505 6	0.548 8	0.043 1
C	0.481 5	0.550 8	0.549 8	0.069 4
$(A \times C)_1$	0.545 6	0.503 8	0.532 7	0.041 7
$(A \times C)_2$	0.518 8	0.534 7	0.528 6	0.016 0
$(B \times C)_1$	0.522 3	0.504 2	0.555 6	0.051 3
$(B \times C)_2$	0.493 7	0.552 7	0.535 6	0.059 0

直观分析表明, 不同工艺条件下热风铆接产品质量综合得分表现出明显差异, 其得分变动范围为 0.219 3 ~ 0.835 7, 差值为 0.616 4, 最大值约为最小值的 3.81 倍。热风铆接质量与其工艺参数设置密切相关, 因此, 欲获得具有高质量的热风铆接产品, 优化工艺参数设置十分重要。极差能够反映各因素及因素间交互作用对热风铆接质量综合得分的主次顺序。直观分析结果表明,

A、B 和 C 所产生的 R 值分别为: 0.154 0、0.299 7 和 0.069 4。定义 $A \times B$ 为 A、B 因素的交互作用, 其他依此类推。交互作用 $A \times B$ 、 $A \times C$ 、 $B \times C$ 所产生的 R 值分别为 0.142、0.057 7、0.110 3。其中, 加热温度的 R 值最大, 为 0.299 7, 表明加热温度对热风铆接质量影响程度最高, 各因素及其交互作用对热风铆接产品质量综合得分影响程度由强到弱依次为加热温度(B)、加热时间(A)、加热时间与加热温度的交互($A \times B$)、加热温度与气缸压力的交互($B \times C$)、气缸压力(C)、加热时间与气缸压力的交互($A \times C$)。

4.2 方差分析法

方差分析通过将总离差平方和分解为各因素的离差平方和与误差离平方和, 生成方差分析表, 对因素效应和交互效应的显著性作检验^[15], 显著性水平 α 常用 0.01、0.05、0.1, 本文选用 $\alpha=0.05$ 。在直观分析中, 通过各因素极差的大小来评估实验指标影响的强弱, 属于定性分析, 其中的极差大小没有客观标准, 方差分析弥补了极差分析的不足^[16]。将各因素分析结果列于如表 9 所示的方差分析表中, S_s 为离差平方和, d_f 为自由度, M_s 为均方, F 为 F 统计量, e 为误差项, P 为显著性概率, 当某因子 P 小于 0.05 时, 则认为该因子是显著的。

差异源	S_s	d_f	M_s	F	P	显著性
A	0.106 937 807	2	0.053 468 903	46.381 724 32	0.000 0	显著
B	0.435 615 147	2	0.217 807 573	188.937 685 1	0.000 0	显著
$A \times B$	0.064 692 607	4	0.016 173 152	14.029 437 96	0.001 1	显著
C	0.028 447 162	2	0.014 223 581	12.338 278 45	0.003 6	显著
$A \times C$	0.009 397 498	4	0.002 349 374	2.037 970 316	0.181 7	不显著
$B \times C$	0.028 804 778	4	0.007 201 194	6.246 692 838	0.013 9	显著
e	0.009 222 409	8	0.001 152 801	1		

由显著性分析结果可知, 各因素及其交互作用对热风铆接质量的影响程度由大到小依次为加热温度(B)、加热时间(A)、加热时间与加热温度的交互($A \times B$)、气缸压力(C)、加热温度与气缸压力的交互($B \times C$)、加热时间与气缸压力的交互($A \times C$)。其中加热温度(B)、加热时间(A)、加热时间与加热温度的交互($A \times B$)、气缸压力(C)、加热温

度与气缸压力的交互($B \times C$)为显著影响因子。

由直观分析法可知, 加热时间(A)的最优水平为 A_2 , 加热温度(B)的最优水平为 B_2 , 气缸压力的最优水平为 C_3 , 但方差分析表明, 加热时间和加热温度间交互作用对热风铆接质量得分有显著影响, 为进一步确定 A、B 因素间不同水平如何组合对于获得高质量热风铆接产品十分重要。因而, 对此二者

不同水平组合下的综合得分进行分析,如图6所示。

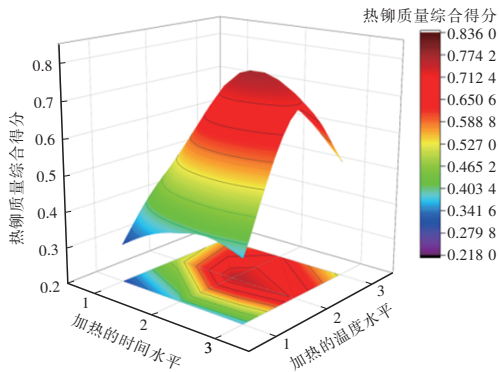


图6 加热时间(A)和加热温度(B)相应水平组合下的综合得分

由图6可知, A_2+B_2 组合下的热风铆接产品质量综合得分最优,该组合下所有试验组平均得分为0.763 1,优于其他水平组合的平均综合得分,为最佳水平组合,与直观分析结果一致。

由于气缸压力(C)为显著项,结合直观分析,其最优水平为 C_3 水平,但方差分析表明,加热温度与气缸压力的交互($B \times C$)为显著因子,故同理,对此二者不同水平组合下的综合得分进行分析,结果如图7所示。

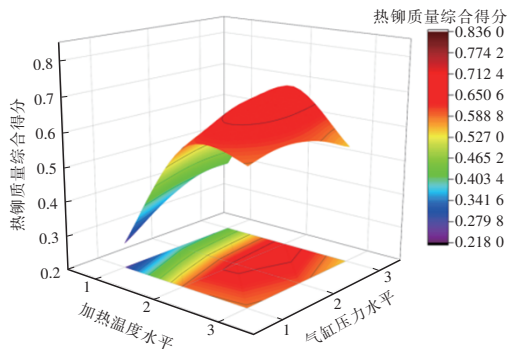


图7 加热温度(B)和气缸压力(C)相应水平组合下的综合得分

由图7可知, B_2+C_3 组合下的热风铆接产品质量综合得分最优,该组合下所有试验组平均得分为0.695 8,优于其他水平组合的平均综合得分,为最佳水平组合,与直观分析结果一致。

故最终得到最佳工艺参数组合为 $A_2+B_2+C_3$,即加热时间为3 s、加热温度为190 ℃、气缸压力为0.7 MPa时,该工厂塑料热风铆接质量综合得分最高。

5 结论

a. 试验过程中所采取的AHP-熵值组合赋权法对于多指标评价的指标权重确定更加合理;试

验所采用TOPSIS进行的多指标评价结果的整合有利于后续正交试验数据的分析,为产品质量多指标评价提供了新的思路。

b. 影响热风铆接质量程度由大到小依次为加热温度、加热时间、加热时间与加热温度的交互作用、加热温度与气缸压力的交互交互作用、气缸压力、加热时间与气缸压力的交互作用。

c. 加热温度、加热时间、加热时间与加热温度的交互、气缸压力、加热温度与气缸压力的交互作用是显著的,所以在设计试验和后续分析时不能忽略因子之间的交互作用对于热风铆接质量的影响。

d. 所研究热风铆接工艺的最佳参数设置组合为加热时间3 s、加热温度190 ℃、气缸压力为0.7 MPa时,所得到的热风铆接产品质量最符合工厂实际需求。

参考文献:

- [1] PARK W G, CHOI S Y, PARK J S, et al. Analysis on the Effects of External Temperature and Welding Speed on the Safety of EVA Waterproofing Sheet Joints by Hot Air Welding[J]. Materials, 2020, 13(23).
- [2] WANG X D, HONG Y, SHA S J, et al. Design of Melting Parameters for Safety Airbag Labels Based on Hot Air Welding Technology: CFD Simulation and Experimental Validation[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024(155).
- [3] 韩新朋. 塑料热风铆接技术在电子产品组装中的应用[J]. 中国高新科技, 2022(4): 86-87.
- [4] 曾晓天. 异质高分子材料热风焊接工艺研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2024.
- [5] 崔军勇. 基于有限元的塑料铆钉热铆接可靠性分析[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- [6] 张若含, 王润楠. 关于薄型弹片结构组件的专利技术分析[J]. 河南科技, 2017(13): 56-57.
- [7] 张明星. 基于热风焊技术的汽车安全气囊标牌装配设备的设计与开发[D]. 长春: 长春工业大学, 2018.
- [8] 张馨予, 胡冰, 施端阳, 等. 基于改进AHP-TOPSIS法的雷达装备维修性评估方法[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(12): 136-141.
- [9] 卜伟. 基于层次分析法和熵值法的多假目标干扰效果评估[J]. 电子信息对抗技术, 2022, 37(1): 81-85.

- [10] 李萍, 彭鸿俊, 吴祐昕. 情感体验视角下的“Z世代”国货品牌设计研究[J]. 包装工程, 2024, 45(16): 220-227+254.
- [11] 刘子琦, 郭炳晖, 程臻, 等. 基于熵值模糊层次分析法的科技战略评价[J]. 计算机科学, 2020, 47(1): 1-5.
- [12] 周峰, 程瑛颖, 肖冀, 等. 融合安全域的电能表状态评估方法及应用[J]. 自动化与仪表, 2016, 31(7): 29-33.
- [13] 俞立平, 万崇丹, 赵丙奇, 等. 我国区域海洋经济竞争力评价研究[J]. 科技与管理, 2012, 14(3): 11-14.
- [14] 张晴晴, 代光辉, 靳国宝. 介入医用薄壁球囊的拉伸吹塑工艺分析与优化[J]. 塑料工业, 2021, 49(9): 91-96.
- [15] 王庆慧, 袁帅, 卫园梦, 等. 基于交互正交实验的玉米淀粉粉尘云最低着火温度的影响因素研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(5): 146-152.
- [16] 刘梦怡, 李梦娟, 葛明桥. 碳纳米管/四氧化三铁复合分散电极对蒽醌染料的脱色研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(11): 217-221.

