

# 真空钎焊对金属橡胶芯材与面板结合强度的影响

魏雨函, 葛绍祥, 薛新

(福州大学 机械工程及自动化学院 金属橡胶与振动噪声研究所, 福建 福州 350116)

**摘要:** 为解决新型金属橡胶夹芯板的真空钎焊连接工艺参数与材料性能匹配不明确的问题, 采用仿真与正交试验相结合的方法, 研究了加热速率、最高加热温度以及保温时间对其剪切性能和结合强度的影响规律, 并从宏微观角度分析了金属橡胶夹芯板的剪切损伤行为。结果表明, 采用真空钎焊制备的金属橡胶夹芯板具有良好的剪切和连接强度。真空钎焊过程中, 样件各区域温度相差不超过 10 K。其残余应力主要集中在丝材与钎料结合处, 且越靠近中心区域残余应力越小。最大残余应力与金属橡胶夹芯板的剪切性能和连接强度呈负相关。此外, 通过极差分析得到制备金属橡胶夹芯板的最优钎焊工艺方案为 1090 °C, 4 °C/min 和 20 min。

**关键词:** 真空钎焊; 金属橡胶; 夹芯结构; 剪切性能; 残余应力

中图法分类号: TG425

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)02-0421-08

夹芯结构因其轻质特性与良好的比刚度/比强度等优异性能, 在航空航天、潜艇以及核工业等领域得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。在夹芯结构中, 面板主要起承载作用, 而芯材的选择是实现夹芯结构多元功能化的关键。金属橡胶是将交互铺设的金属螺旋卷通过冷冲压作用形成的一种新型多孔材料, 其内部金属丝之间复杂的接触形式和滑移行为, 使其具有大阻尼、高弹性的特性外, 还兼具金属耐腐蚀、耐高温等特点, 已在航空航天、航海、机械等领域得以应用<sup>[5-8]</sup>。此外, 有研究表明, 在金属波纹夹芯板中填充金属橡胶, 可以显著提升其抗压刚度与抗压强度, 且其抗压强度和吸能性能也与金属橡胶的密度呈现出正相关趋势<sup>[9]</sup>。金属橡胶夹芯板具有良好的应用前景。

夹芯结构在工程应用中常面临多种失效形式, 包括脱粘、屈曲、断裂以及坍塌等。在这些失效形式中, 面/芯连接界面的脱粘问题尤为突出。常见的连接工艺包括铆接、缝合、胶结和焊接等<sup>[10-15]</sup>。但由于金属橡胶特殊的空间结构, 面/芯之间形成具有良好结合强度的连接界面一直是金属橡胶夹芯结构面临的重大难题。其中, 铆结和缝合等连接工艺仅起到紧固作用而难以实现面/芯的稳定连接, 且连接强度与连接个数易受影响, 此外连接处易产生应力集中现象。胶结的连接性能易受到外部环境因素的影响, 如潮湿、高温、辐照等条件都可能导致胶的老化和脱落, 从而导致面/芯连接失效。相比之下, 焊接技术在面/芯连接中展现出了优越的性能。研究表明, 焊接金属橡胶夹芯板的抗剪切能力相较于胶结夹芯板有显著

的提升。此外, 在剪切载荷的作用下, 与胶合夹芯板相比, 焊接夹芯板具有良好的抵抗剪切变形的能力<sup>[16]</sup>。

研究表明钎焊工艺参数对面/芯连接强度有着至关重要的作用<sup>[17]</sup>。Amelzadeh 等<sup>[18]</sup>对不同保温时间对连接性能的影响进行研究, 发现随着保温时间的增加, 连接接头的抗剪切强度下降, 造成这一现象主要与残余应力的消除程度有关。李朋成等<sup>[19]</sup>发现连接强度与钎焊温度呈强相关, 而对搭接间隙不敏感。丁智超等<sup>[20]</sup>改进了加热保温阶段真空钎焊炉温度场模型, 改进后的模型能够较好地拟合实际测量温度。Zhu 等<sup>[21]</sup>研究了钎焊温度对 TZM/石墨接头性能的影响, 发现随着钎焊温度的升高焊接接头的抗剪切强度呈现先上升再下降的趋势。Li 等<sup>[22]</sup>通过热-流-固耦合方法对真空钎焊过程中钛合金板翅式换热器的成型质量进行探究, 发现应力集中在钎焊缝隙和夹具接触区域。因此, 探索钎焊连接工艺对性能的影响对于提升新型金属橡胶夹芯板整体性能有着至关重要的作用。

本研究针对新型金属橡胶夹芯板的真空钎焊连接工艺参数与材料性能匹配不明确的问题, 选择加热速率、最高加热温度及保温时间 3 个因素, 分析真空钎焊连接工艺对金属橡胶夹芯板剪切失效行为的影响。首先, 根据真空钎焊工艺流程设计了制备金属橡胶夹芯板的正交试验; 其次, 建立了不同真空钎焊连接工艺参数下的板丝模型; 最后, 讨论了真空钎焊连接工艺对金属橡胶软夹芯板的剪切性能和连接强度的影响规律。

收稿日期: 2024-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(12272094); 福建省自然科学基金(2022J01541)

作者简介: 魏雨函, 女, 1995 年生, 博士生, 福州大学金属橡胶与振动噪声研究所, 福建 福州 350116, E-mail: 220210011@fzu.edu.cn

# 1 实验

金属橡胶材料制备过程为制备螺旋卷、缠绕制坯以及冲压成型,如图1所示。在制备金属橡胶夹芯板时,将金属橡胶z方向(法向)的两个表面作为金属橡胶夹芯板的面/芯连接面。其中,选用直径为0.3 mm的GH4169高温合金金属丝作为原材料制备金属橡胶芯材。夹芯板的上/下面板均为0.8 mm的GH4169板,其化学成分和物理参数见表1和表2所示。钎料选用厚度0.5 mm的箔状BNi-2,箔状材料具有使用方便、连接界面均匀等优点,且其化学成分和GH4169高温合金材料相似,并不会引入差异较大的元素,从而影响连接质量。其固相线和液相线温度分别为970和1000 °C,其化学成分和热物理参数如表1和表2所示。

真空钎焊工艺制备金属橡胶夹芯板流程如图2所示,主要包括焊前准备、焊接过程和后处理3个步骤:(1)通过超声波清洗将面板/芯材表面的油污、杂质去除,以确保焊接接头的强度不受影响。将夹具、上/下面板、芯

材、钎料等按图2的预设装配流程完成装配,此外,为了便于后续脱模需在夹具表面涂止焊剂。(2)将组装好的待焊件放入GSL-1400X真空烧结炉,待炉内真空度降至 $2 \times 10^{-3}$  Pa以下,根据试验的具体需求设置运行参数,并选用随炉冷却。(3)当炉内温度降至室温后,取出焊接完成的样件。为探明真空钎焊工艺参数对金属橡胶夹芯板剪切性能的影响,设计了正交试验方案如表3所示。由于最适合BNi-2钎料的钎焊温度区间为1010~1177 °C,因此设定了3个不同的最高加热温度,分别为1010、1050和1090 °C。

金属橡胶夹芯板的剪切试验(I)在日本岛津AG-Xplus高速电子材料试验机上完成,试验工装及试验过程示意图,如图3a所示。在剪切试验开始前,准备垫块以保证金属橡胶夹芯板的中心线与加载方向平行。试验预紧力为100 N,上夹头的加载速率为1 mm/min,下夹头保持不动,加载位移控制为60 mm。

金属橡胶是一种具有特殊空间结构的多孔材料,螺旋金属丝可视为其内部单元结构,且其与面板的接触形式为点接触和线接触。为更好地研究真空钎焊工艺参数

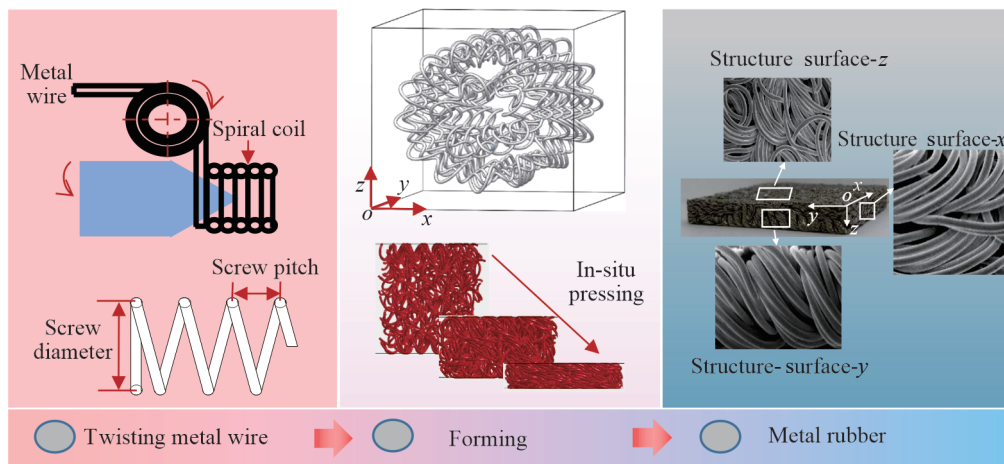


图1 金属橡胶材料成型过程

Fig.1 Fabrication process of the metal rubber material

表1 GH4169及BNi-2的化学成分

Table 1 Chemical compositions of GH4169 and BNi-2 (ω/%)

Material	Si	Co	Cr	B	Nb	C	Al	P	NI	Fe
GH4169	0.13	0.03	17.72	0.02	5.11	0.042	0.55	-	51.83	Bal.
BNi-2	4-5	0.1	6-8	2.75-3.5	-	0.06	-	0.02	Bal.	2.05-3.5

表2 GH4169及BNi-2的热物理参数

Table 2 Thermal physical parameters of GH4169 and BNi-2

Material	Density/g·cm <sup>-3</sup>	Elastic modulus/ GPa	Thermal expansion coefficient/×10 <sup>-6</sup> K	Specific heat capacity/ J·(kg·K) <sup>-1</sup>	Thermal conductivity/ W·(m·K) <sup>-1</sup>
GH4169	8.19	204	11.8	481.4	13.4
BNi-2	14.1	180	11	490	8

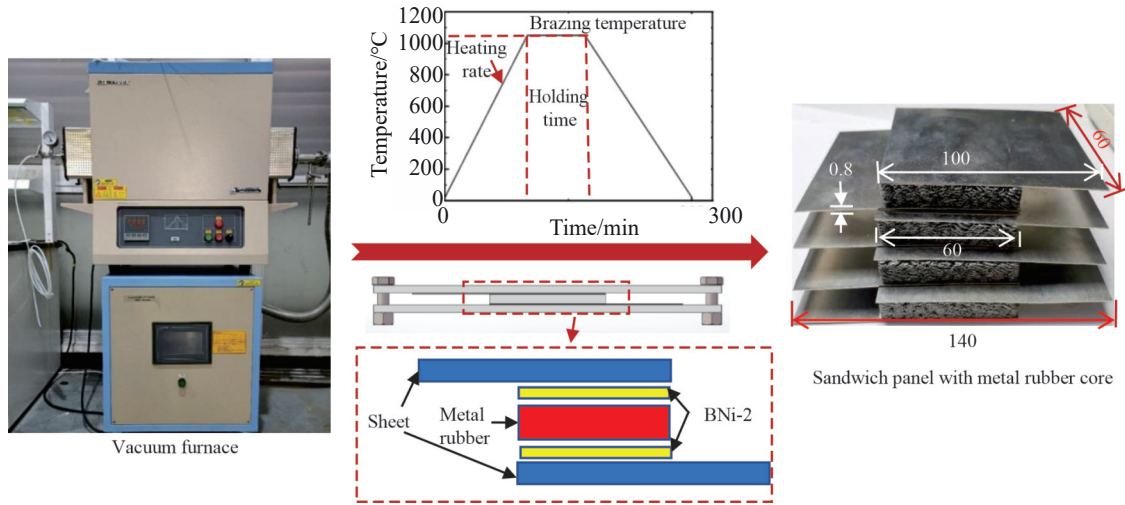


图2 真空钎焊工艺制备金属橡胶夹芯板流程

Fig.2 Vacuum brazing process of sandwich panel with metal rubber core

表3 制备金属橡胶夹芯板真空钎焊工艺正交试验

Table 3 Orthogonal experiment setting of vacuum brazing process for fabricating sandwich panel with metal rubber core

Test	A: brazing temperature/°C	B: heating rate/°C·min <sup>-1</sup>	C: holding time/min
S1	1 (1010)	1 (4)	1 (10)
S2	1	2 (7)	2 (20)
S3	1	3 (10)	3 (30)
S4	2 (1050)	1	2
S5	2	2	3
S6	2	3	1
S7	3 (1090)	1	3
S8	3	2	1
S9	3	3	2

与结合强度之间的内在联系,设计板丝样件(图3b)以简化金属橡胶芯材与面板之间的连接形式。板丝样件是采用真空钎焊连接方式实现3根等距拉伸后螺旋状的

GH4169金属丝与面板的复合连接。设计II型剪切试验以测试其连接强度,试验在日本岛津AG-Xplus高速电子材料试验机上完成。试验的加载速率为1 mm/min,直至金属丝与面板的连接失效。

## 2 有限元模型的建立

真空钎焊金属橡胶夹芯板的过程涉及复杂的传热传质现象,是在多个物理场(如热场、流体场和固体结构场)的耦合作用下实现面/芯连接。通过建立真空钎焊金属橡胶夹芯板的有限元模型研究在不同的真空钎焊工艺参数下面/芯连接面的温度及应力演变过程,以便于研究工艺参数对结合强度的影响规律。此外,为了保证仿真的准确性和效率,忽略金属橡胶件内部独特的结构,仅考虑金属丝与面板的结合关系,根据板丝样件进行仿真模型建立(如图4所示)。其中,压板代替钎焊过程中的夹具,并提供10 N的初始预紧力。此外,对整体仿真模型进行如下简化:

- (1)在真空钎焊过程中忽略钎料融化的流动;
- (2)假设钎焊环境是绝对真空;
- (3)忽略真空条件下元素的挥发;
- (4)忽略模型中不同相之间的化学反应。

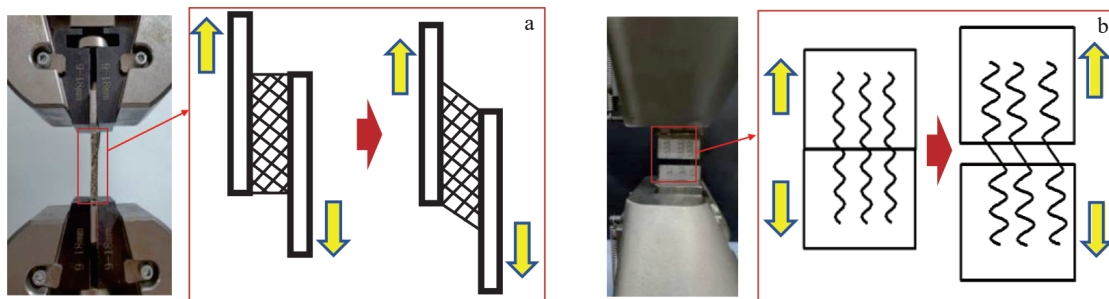


图3 剪切试验工装及示意图

Fig.3 Setup and schematic diagram of model shear experiment: (a) model I and (b) model II

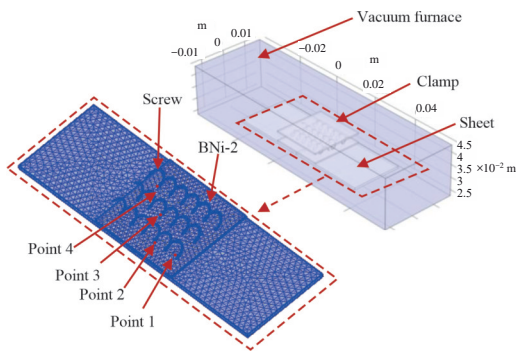


图4 真空钎焊板丝仿真模型

Fig.4 Vacuum brazing simulation model with sheet-wire

### 3 结果与讨论

#### 3.1 真空钎焊制备板丝样件的仿真结果

为更好地展示真空钎焊过程中板丝模型的温度演变过程,以S1制备工艺为例分别选取了初始时间、加热过程中的两个时间、保温时间以及冷却过程及最终时间,如图5所示。在整个过程中,温差不超过10 K。其中,板丝表面温度分布呈现对称模式,在中心区域温度分布均匀,且在升温和降温过程中均是两侧面板温度略低于中心温度。在加热过程中,面板热量主要是由两侧面板向中间区域传递及金属丝向下传递,而降温时温度由中间区域向外扩散。这是由于面板与金属丝的热导率均高于钎料,因此两侧面板和金属丝对热量的传导大于混合了钎料及面板的中间区域。

此外,由图6所示的应力仿真结果可知,在真空钎焊过程中面/芯连接点处的应力变化呈现先上升后下降最后趋于稳定的变化趋势。点1处的应力明显高于其余各

点,这与温度的传递规律有着密切联系。此外,不同工艺参数下样件的平均应力差别不大,因而最大应力较大的模型在钎焊过程中产生了较大的残余应力。综上所述,最大应力对真空钎焊工艺参数的变化较为敏感。

#### 3.2 不同的真空钎焊工艺对连接界面的影响

为了进一步阐述钎焊连接强度与剪切性能的内在联系,选取了3种真空钎焊工艺参数(即S3、S5和S9)以制备板丝试样,并进行II型剪切试验。由图7可知,在剪切试验中,板丝样件表现出两种不同失效模式,即金属丝剥离失效(模式I)和金属丝断裂(模式II)。其中,失效模式I和模式II两种失效模式均在出现在S3和S5板丝试样中显示,而采用S9工艺参数制备的样件则仅表现出失效模式II。在试验初始时,在位移载荷的作用下螺旋状金属丝呈现被不断拉直的现象,但钎焊接头并未显现出明显的失效现象。然而,随着位移加载的持续作用,在失效模式I中,金属丝逐渐从面板上剥离,面板上呈现剥离痕迹。与之不同的是,在模式II中,金属丝呈现断裂现象,且有少量的钎料附着在金属丝断裂处,断裂表面呈现出明显的裂纹。这主要归因于连接强度高于金属丝所能承受的剪切破坏载荷,导致金属丝在载荷的作用下破坏。此外,螺旋状金属丝的外表面并不能与面板完全连接,这使得连接界面为非规则平面,因而金属丝的断裂位置往往发生在连接较为薄弱区域。

图8为II型试验得到的力-位移曲线。在II型剪切试验中出现,两种不同的力与位移曲线变化趋势,这与图7中所对应的两种失效模型相对应。两曲线均分成3个阶段:线弹性变形、非线性弹性和峰后失效。这两种曲线在前两个阶段呈现出相似的趋势,但由于真空钎焊工艺的不同,使得不同样件在峰值载荷上有所差异。在第3阶

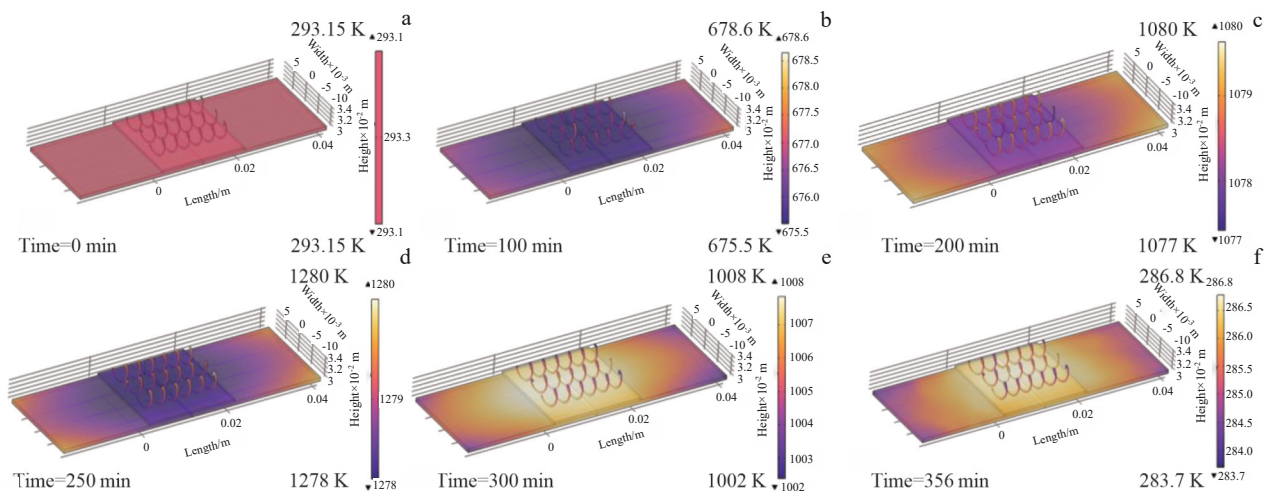


图5 真空钎焊制备板丝样件过程中不同时间下温度场的分布

Fig.5 Distribution of temperature field during vacuum brazing of sheet-wire specimen at various time: (a) 0 min, (b) 100 min, (c) 200 min, (d) 250 min, (e) 300 min, and (f) 356 min

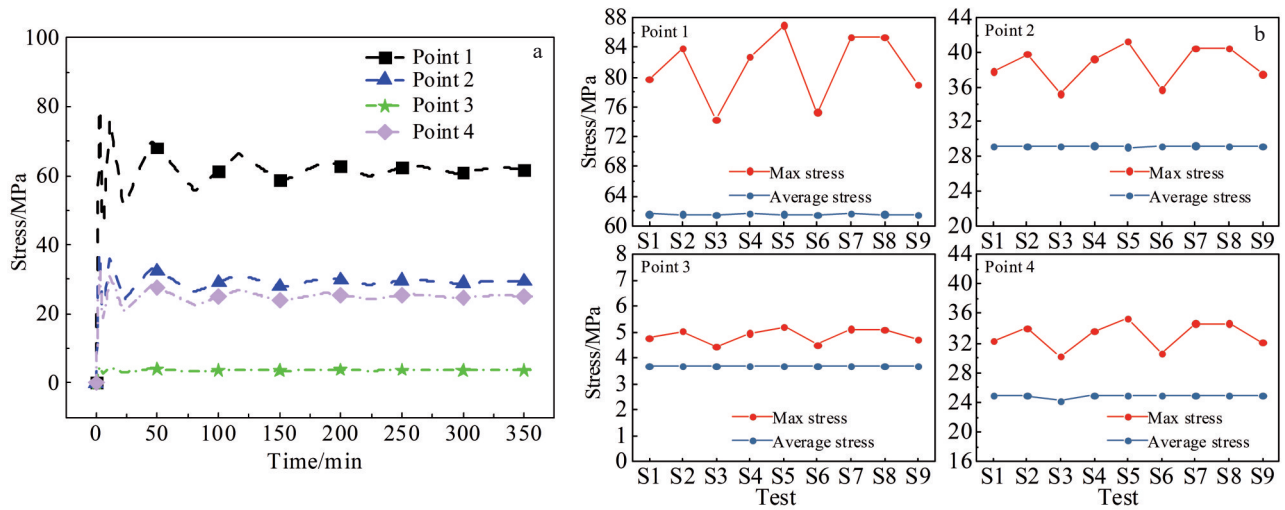


图6 应力仿真结果

Fig.6 Stress simulation results: (a) stress vs time at different points; (b) stress under different vacuum brazing parameters

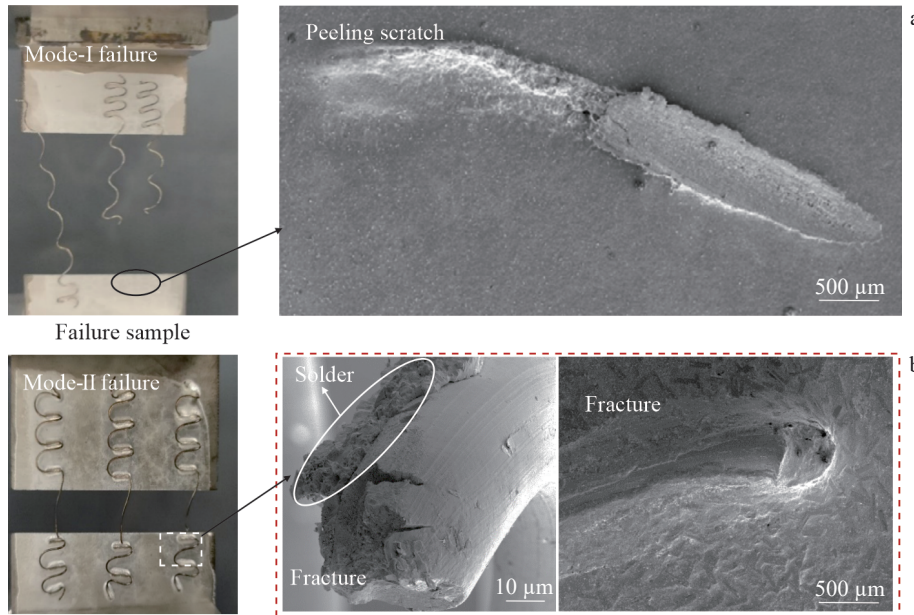


图7 II型剪切试验的板丝样件失效行为

Fig.7 Failure behavior of sheet-wire specimens under model II shear test: (a) mode-I failure and (b) mode-II failure

段,由于金属丝不同的失效形式,因此出现了两种截然不同的变化趋势。在失效模式II下,由于峰值载荷就是金属丝及钎焊强度叠加所能承受的最大抵抗剪切变形能力。因此,一旦金属丝被拉断,载荷便呈现急剧下降的现象。而在失效模式I下,尽管载荷在达到峰值后出现下降,但随后仍表现出明显的上升且波动的变化趋势,主要是因为金属丝与面板之间存在多个连接点。因而,即使一个接点失效,其他接触点仍具有抵抗剪切变形的作用,直至一侧接点完全失效。

### 3.3 金属橡胶夹芯板典型的剪切失效行为

图9所示为金属橡胶夹芯板的力与位移曲线。在I

型剪切试验中,其失效过程呈现出阶段变化特征,主要包括线弹性、非线性渐软、损伤变形和稳定失效4个阶段。(1)在线弹性阶段,金属橡胶夹芯板受到较小的剪切力作用时,其内部金属丝之间的滑动作用较小,主要以静摩擦为主。整体上,金属橡胶夹芯板呈现出线弹性的变化特性。在线弹性阶段,试样表现出较小的变形和相对稳定的力学行为。(2)随着不断地加载,试样进入了非线性渐软阶段。在此阶段中,部分金属丝所承受的载荷超过了其弹性极限,开始展现塑性特性。这使得金属橡胶芯材的刚度逐渐降低,呈现出非线性变化的趋势。同时由于金属丝之间的相对滑动和摩擦作用增强,导致夹芯板内

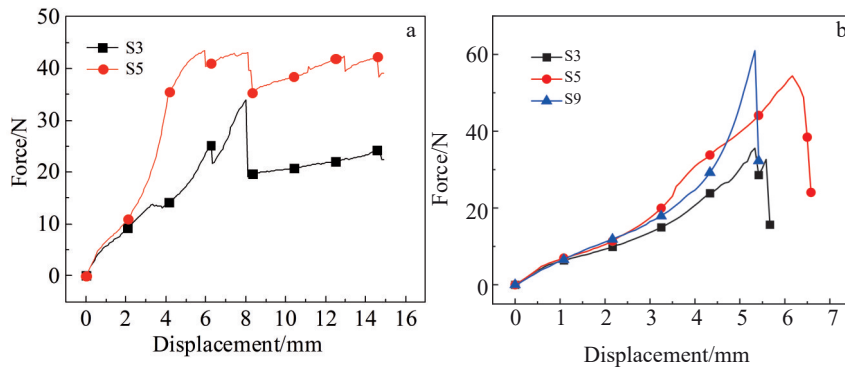


图8 在II型剪切试验下板丝样件的载荷-位移曲线

Fig.8 Force-displacement curves of sheet-wire specimens under model II shear test: (a) mode-I failure behavior and (b) mode-II failure behavior

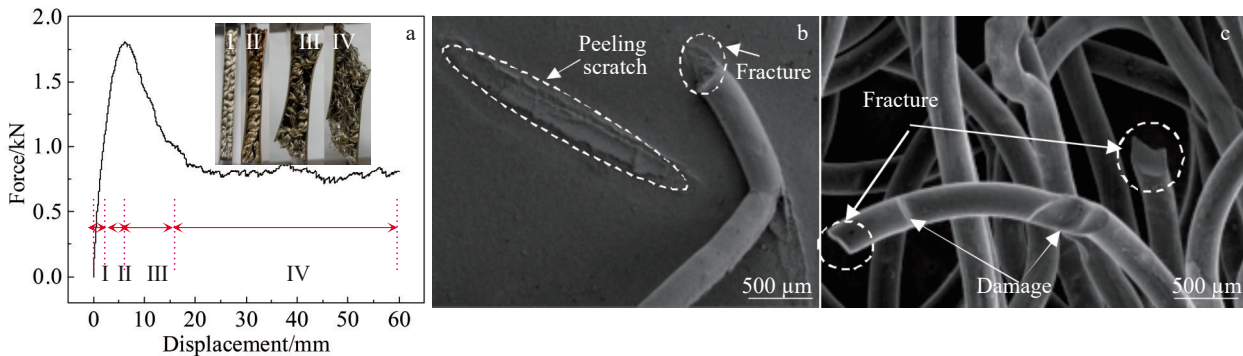


图9 金属橡胶夹芯板在I型剪切试验下典型的载荷-位移曲线;面芯失效行为和金属橡胶变形损伤

Fig.9 Force-displacement curve of sandwich panel with metal rubber core under model I shear test (a); failure behavior of sheet-core (b); deformation of metal rubber (c)

部出现轻微的分层现象。(3)随着加载的继续,上下两个面板之间的相对位移不断增加,导致金属丝受到的载荷作用进一步增强。当试验达到峰值载荷后,试样进入了损伤变形阶段。在此阶段,金属橡胶芯材出现了明显的分层现象且分层程度随着加载位移的增加而不断加剧。由于芯材内部的损伤变形和分层现象,金属橡胶夹芯板抵抗剪切变形的能力迅速下降。(4)在剪切试验的最后阶段,即稳定失效阶段。此阶段,虽然试样内部金属丝出现了一定的变形损伤、断裂以及剥离行为(图5所示),但金属橡胶夹芯板并未完全丧失其抵抗变形的能力。这与金属橡胶芯材内部的金属丝之间勾连纠缠作用、真空钎焊连接的良好连接强度以及未完全失效的金属丝有关。因此,金属橡胶夹芯板可在大变形和强载荷作用下呈现出稳定的抵抗变形能力。

### 3.4 不同的真空钎焊工艺参数对面/芯连接界面的影响

为全面评估其性能,选取了峰值载荷、能量吸收以及剪切模量( $G_{eq}$ )作为关键评价指标,并确保所有数据均基于3个条件一致的试验进行平均处理,以确保结果的可靠

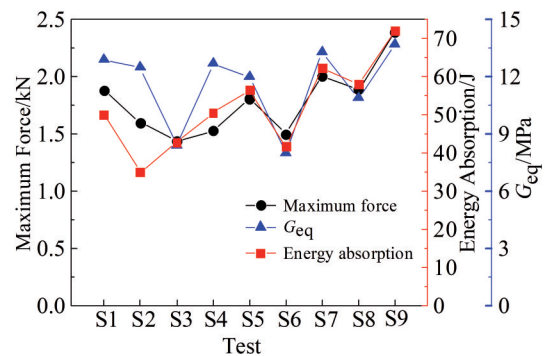


图10 I型剪切试验下金属橡胶夹芯板的评价指标

Fig.10 Evaluation index of sandwich panel with metal rubber core under model I shear test

性。图10反映了这9个金属橡胶夹芯板试样的剪切性能特点。峰值载荷、能量吸收以及 $G_{eq}$ 三者呈现出相似的变化趋势。其中,试样S9在所有数据中表现出较高的性能,而试样S3则呈现较低的性能。在不同的真空钎焊工艺参数下金属橡胶夹芯板的3个性能指标均与图6各点处的最大应力的变化趋势呈现相反的趋势。因而,金属

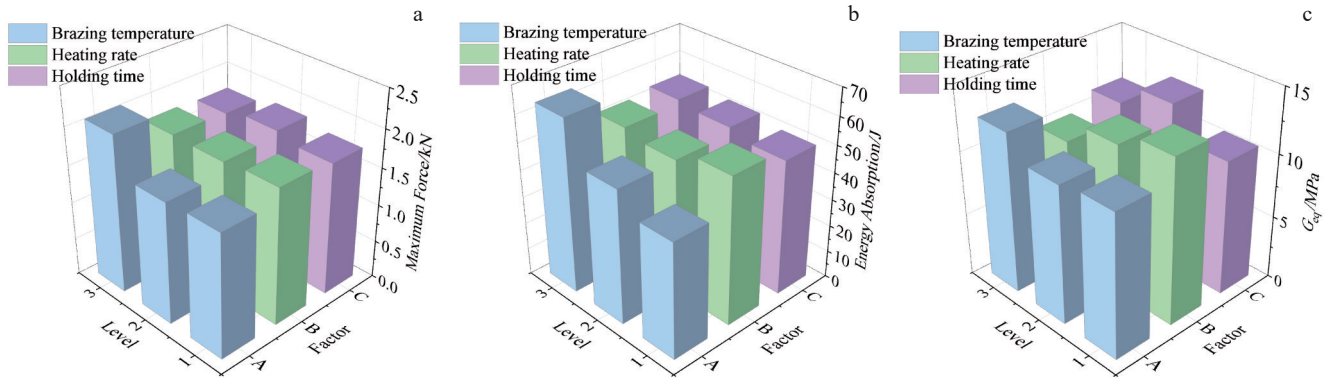


图11 正交试验与多指标的极差分析趋势

Fig.11 Orthogonal test and multi-index under range analysis trend: (a) maximum force; (b) energy absorption; (c)  $G_{eq}$

表4 多指标下的极差结果

Table 4 Range analysis results with multi-index

Multi-index	Factor		
	A	B	C
Maximum force/kN	0.48	0.40	0.09
Energy absorption/J	21.5	4.41	3.92
$G_{eq}$ /MPa	1.73	2.93	2.36

橡胶夹芯板剪切性能的变化趋势与仿真得到的最大应力的变化趋势基本上呈负相关。主要残余应力的存在会影响金属丝与面板之间的连接强度,使得金属丝更易从面板上剥离,从而降低了金属橡胶夹芯板的剪切强度。

极差分析下评价指标与三因素三水平正交试验结果之间的关系与结果如图11和表4所示。根据峰值载荷和 $G_{eq}$ 两个评价指标得到最优金属橡胶夹芯板的真空钎焊工艺参数均为1090 °C, 4 °C/min和20 min,而在吸能表征量下的最优工艺参数为1090 °C, 4 °C/min和30 min。但由表4可知,在吸能表征参数下的因素主次关系为:钎焊温度>加热速度>保温时间。因而,真空钎焊连接金属橡胶夹芯板的最优工艺为1090 °C, 4 °C/min和20 min。

## 4 结论

1) 在真空钎焊过程中,板丝模型的表面温度分布呈现对称模式,在中心区域温度分布均匀。在不同真空钎焊连接工艺参数下,最大残余应力与金属橡胶夹芯板的结合强度呈负相关。

2) 在I型试验中,金属橡胶夹芯板的典型失效行为包括线弹性、非线性渐软变形、损伤变形和稳定失效4个阶段。然而,在II型剪切试验中,由于真空钎焊工艺参数的变化引起结合强度的改变,使其产生两种不同的失效行为。

3) 通过极差分析得到制备金属橡胶夹芯板的最优真空钎焊工艺参数为1090 °C, 4 °C/min和20 min。

## 参考文献 References

[1] Wu Xueqian(吴学谦), Wu Ruixian(吴瑞先), Xiong Yunlingzi(熊贇玲子) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(3): 1036

[2] Zou Tianchun(邹田春), Guan Yuxi(管玉玺). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与程)[J], 2023, 52(11): 3818

[3] Ganilova O A, Cartmell M P, Kile A. *Composite Structures*[J], 2021, 257: 113159

[4] Zhang C, Qi C, Yan L L et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2022, 51(1): 36

[5] Zhu Y, Wu Y W, Bai H B et al. *Shock and Vibration*[J], 2019(4): 1

[6] Xue X, Yang P, Shao Y C et al. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*[J], 2020, 3(2): 88

[7] Zhang W, Xue X, Bai H B. *Composite Structures*[J], 2021, 255: 11288

[8] Wu Fang(吴芳), Zheng Chao(郑超), Ren Zilin(任子林) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(3): 1103

[9] Wang Y J, Zhang Z J, Xue X M et al. *Thin-Walled Structures*[J], 2020, 154: 106816

[10] Peng F H, Wu Y W, Bai H B et al. *Shock and Vibration*[J], 2020 (9): 1

[11] Mccarthy M A, Mccarthy C T, Padhi G S. *Composite Structures* [J], 2006, 73(1): 78

[12] Yudhanto A, Watanabe N, Iwahori Y et al. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*[J], 2014, 60: 52

[13] Xue X, Wei Y H, Wu F et al. *Thin-Walled Structures*[J], 2022, 170: 108599

[14] Wu Limin(吴利敏), Yang Yongzhong(杨永忠), PAN Xiaoli(潘晓莉) et al. *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2020, 63(12): 80

[15] Yang W, Xiong J, Feng L J et al. *Journal of Sandwich Structures & Materials*[J], 2020, 22(5): 1594

[16] Wang Shanshan(王珊珊), Wei Yuhan(魏雨函), Xue Xin(薛新) et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*(复合材料学报)[J], 2022, 39: 1323

- [17] Li Li(李力), Huang Hui(黄慧), Zhang Wentao(张文涛) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(12): 4205
- [18] Amelzadeh M, Mirsalehi S E. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2019, 47: 1
- [19] Li Pengcheng(李朋成), Lu Qingsong(陆青松), Wang Kai(王凯) *et al.* *Special Issue of Brazing and soldering*(焊接)[J], 2023 (12): 23
- [20] Ding Zhichao(丁智超), Wang Hailong(王海龙). *Welding Technology*(焊接技术)[J], 2024, 53(1): 55
- [21] Zhu H T, Song Y Y, Zhao K H *et al.* *Vacuum*[J], 2023, 215: 112368
- [22] Li Y, Wang J F, Ma L F *et al.* *Vacuum*[J], 2023, 218: 112612

## Effect of Vacuum Brazing on Bonding Strength Between Metal Rubber Core and Panel

Wei Yuhan, Ge Shaoxiang, Xue Xin

(Institute of Metal Rubber & Vibration Noise, School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** To address the unclear matching issue between the vacuum brazing process of sandwich panel with metal rubber core and its material properties, simulation and orthogonal experimental methods were employed to investigate the influence of heating rate, maximum heating temperature, and holding time on the shear performance and connection strength. In addition, the shear damage behavior of the sandwich panel was analyzed by macro and micro method. The results indicate that sandwich panel prepared by vacuum brazing process exhibits excellent shear and connection strength. During the vacuum brazing process, the temperature deviation at all selected sample points is less than 10 K. Additionally, the residual stress is primarily concentrated at the junction of the wire and the solder, and the nearer the distance to central region, the smaller the residual stress. The maximum residual stress is negatively correlated with the shear performance and joining strength of the sandwich panel. Moreover, the optimum technological parameter (1090 °C, 4 °C/min and 20 min) of the brazing process for fabricating the sandwich panel is obtained by range analysis.

**Keywords:** vacuum brazing; metal rubber; sandwich structure; shear performance; residual stress

---

Corresponding author: Xue Xin, Ph. D., Professor, Institute of Metal Rubber & Vibration Noise, School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, P. R. China, E-mail: xin@fzu.edu.cn