

喷丸对宽间隙钎焊接头界面元素扩散及性能影响

丁坤英, 杜依蒙, 孙宇博

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 基于Hastelloy X表面喷丸处理, 研究喷丸对宽间隙钎焊接头界面元素扩散及性能的影响。对比了Hastelloy X表面未经喷丸处理及经过弹丸尺寸分别为0.180、0.300、0.500 mm喷丸处理后获得的宽间隙钎焊接头的微观组织和力学性能, 利用SEM、EDS分析扩散层组织和元素分布特征。结果表明, 喷丸处理产生的晶粒细化作用促进了降熔元素Si在Hastelloy X中的扩散, 当弹丸尺寸为0.300 mm时, Si原子在钎焊接头组织中的扩散系数最大, 为 $1.83 \times 10^{-8} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 并且该钎焊接头的扩散层厚度最厚, 为224.97 μm , 其界面抗剪强度最大, 为543.38 MPa, 与未喷丸试样相比提高了19.39%。此外, 通过理论计算得到了3种喷丸工艺下不同晶粒尺寸对Si元素扩散系数的影响, 结合理论计算和实验数据, 阐明了Si在宽间隙钎焊接头组织中的扩散机制。

关键词: 宽间隙钎焊; 喷丸; 元素扩散; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG454

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)06-1511-07

1 引言

镍基高温合金凭借其卓越的耐高温、高压、抗蠕变以及持久性能等^[1], 已成为航空发动机高压涡轮组件的主要构成材料^[2], 其服役温度可高达1600 $^{\circ}\text{C}$, 且在高温燃气冲击、振动和热应力等多物理场耦合作用下, 涡轮叶片表面易产生腐蚀裂纹损伤^[3]。针对裂纹间隙大于250 μm 的损伤通常采用宽间隙钎焊技术修复, 目前的研究结果中, 针对不同镍基合金的理化性能开发了多种钎料体系, 并深入探讨了钎焊温度、保温时间、钎焊压力、合金粉末颗粒尺寸及混合比例对接头微观组织及性能的影响。例如Sun^[4]等人针对Hastelloy X的研究, 揭示了B、Si、P 3种降熔元素在钎焊接头界面处的相互作用层厚度与拉伸强度呈正相关关系, 结果表明随着扩散层厚度从150 μm 减少至80 μm , 拉伸强度相应的从581.69 MPa降至496.09 MPa。钎焊工艺参数的调控也影响着元素扩散能力, Guo^[5]等研究表明当钎焊温度从1130 $^{\circ}\text{C}$ 提升至1160 $^{\circ}\text{C}$ 时, 扩散层厚度从66.7 μm 增加至110 μm ; 谢吉林^[6]等人的研究表明, 扩散层厚度随保温时间的延长而增厚, 当保温时间由5 min增加至120 min的过程中, 扩散层厚度从50 μm 增加至224 μm ; Ghaderi^[7]等人的研究表明当钎焊压力从1 MPa提升至5 MPa时, 扩散层厚度从90 μm 增加至140 μm 。在上述文献的研究结果中, 钎焊接头均在母材与接头界面处断裂, 因此在追求接头整体性能的进一步提升时, 仍面临接头与母材界面结合强度不足的

挑战。

为解决因元素扩散不充分引起的界面难匹配和非均匀性^[8]等问题, 本研究从钎焊的核心即降熔元素在接头与母材界面处扩散引发等温凝固, 且降熔元素通常在晶体材料中以晶界为扩散路径^[9-10]出发, 采用焊前喷丸处理的加工方法产生塑性变形, 形成细小晶粒加强元素扩散。塑性变形的强度决定了表面显微组织变化的程度和深度, 包括晶粒细化^[11-12]、残余应力^[13]、位错密度^[14]和硬度^[15-16]。Zhong^[17]等人对铁表面进行喷丸强化后, Al在纳米晶层中的扩散系数比在粗晶层中的扩散系数高出约4个数量级, 在纳米晶层中扩散的活化能(1.38 eV)远小于在常规Fe中的扩散活化能(2.28 eV)。因此, 采用喷丸强化处理技术来解决降熔元素扩散不充分所引发的界面性能薄弱、组织非均匀性等问题, 进而提升宽间隙钎焊接头的整体性能, 不仅具有理论意义, 也具备实际应用的可行性。

2 实验

本实验所使用的基体材料为Hastelloy X, 其化学成分见表1, 选用1.2 mm厚的板材和 $\Phi 11$ mm棒材两种规格, 其中板材用于喷丸后表面粗糙度、显微硬度、残余应力测试, 棒材用于钎焊接头剪切强度测试及微观组织观察。喷丸介质为陶瓷弹丸, 喷丸速度为60 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 覆盖率为100%, 采用0.180、0.300、0.500 mm 3种不同弹丸尺寸。

收稿日期: 2025-06-03

基金项目: 天津市教委科研计划项目(自然科学)(2022KJ073)

作者简介: 丁坤英, 男, 1981年生, 博士, 教授, 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300, E-mail: dingkunying@162.com

表 1 Hastelloy X 化学成分

Table 1 Chemical composition of Hastelloy X (wt%)

Chemical composition	Required value	Measured value
C	0.05/0.15	0.084
Si	1.0*	0.45
Mn	1.0*	0.43
Al	0.50*	0.20
W	0.2/1.0	0.52
Fe	17.0/20.0*	18.12
Mo	8.0/10.0*	8.30
Cu	0.070	0.012
P	0.025*	0.006
S	0.015*	0.009
Co	0.5/2.5	1.03
Ti	0.15*	0.09
B	0.010*	0.003
Cr	20.5/23.0	21.20
Ni	Bal.	Bal.

Note: * indicates the maximum value

使用的钎料为 MICROBRAZ 的 BNi-5, 其化学成分见表 2, 粉末粒径为 45~75 μm。用于宽间隙钎焊填充的合金粉末是基体材料通过气雾化的方法制得, 粉末粒径选取 45~75 μm。将钎料与合金粉末按质量比 40:60 均匀混合, 后加入适量粘合剂。通过压片机施加约 15 MPa 的压力, 制成 Φ10 mm 的预制片, 调整混合粉末总质量使预制片厚度约为 1.5 mm。通过热压炉进行钎焊, 将预制片置于两棒材间, 放入热压炉腔体内, 真空度达到 2×10⁻² Pa 时, 全程施加 10 MPa 压力, 升温至 1150 °C 后保温 30 min, 完成钎焊循环后, 随炉冷却, 获得 4 种宽间隙钎焊接头试样, 分别记为原始试样、SP_{0.180}、SP_{0.300}、SP_{0.500}。将钎焊后的 Φ11 mm 棒材试样通过线切割制备成直径 11 mm、高 4.5 mm 的圆柱形剪切试样, 放入模具中, 如图 1 所示。参考 GB/T7124-2008 拉伸剪切强度测试标准, 使用 INSTRON-8802 材料试验机在室温下以拉伸速率为 1 mm/min 完成钎焊接头剪切试验。

3 结果与讨论

3.1 喷丸对钎焊接头组织及性能的影响

图 2a~2d 为原始试样及 3 种不同弹丸尺寸喷丸处理后母材表面三维轮廓, 粗糙度分别为 1.028、2.146、2.891、

表 2 钎料 BNi-5 的化学成分和熔点

Table 2 Chemical compositions and melting point of BNi-5 brazing filler metals

GB/T	AWS	Chemical composition/wt%			Melting point/°C
		Cr	Si	Ni	
10859-2008	BNi-5	18.5~19.5	9.75~10.5	Bal.	1135

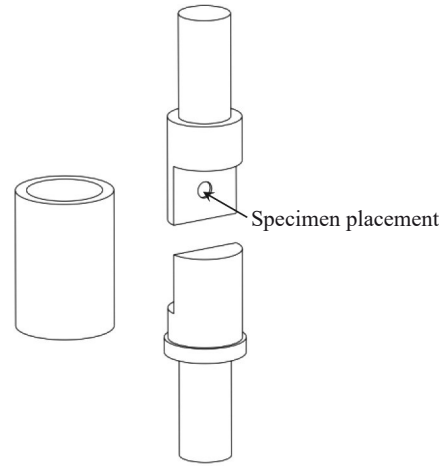


图 1 剪切模具示意图

Fig.1 Schematic diagram of shearing mold

3.177 μm。随着弹丸尺寸的增加, 撞击母材能量越大, 产生的塑性变形就越大, 导致表面起伏越大, 即面粗糙度增加。图 3 为原始试样与 3 种喷丸处理后表面显微硬度统计图, 其平均显微硬度分别为 254.9、388.6、436.0、443.0 HV_{0.3}, 相对于母材平均显微硬度分别提高了 52.5%、71.0%、73.8%; 当弹丸尺寸大于 0.500 mm 时, 弹丸尺寸的增加对母材表面显微硬度的提升作用不再明显。

原始试样母材的金相显微组织如图 4a 所示, 通过 Image-J 软件测得平均晶界宽度为 0.25 μm, 平均晶粒尺寸约为 85.290 μm, 如图 4b 所示; 经喷丸强化处理后母材平均晶粒尺寸分别为 58.655、47.072、47.631 μm, 如图 4c~4e 所示。表层晶粒细化、晶界密度提升, 为 Si 元素扩散提供短程扩散通道^[18]; 同时, 晶粒细化程度随弹丸尺寸的增加而增加, 但当弹丸尺寸大于 0.500 mm 时晶粒细化程度趋于饱和。

图 5 为未经喷丸处理原始试样钎焊接头 SEM 照片, 圆形中为局部放大图, 对图中 4 点分别采集点能谱结果见表 3。接头中存在深浅两相, 通过对比点能谱结果与钎料、合金粉末化学成分对比可知, 点 1 所在浅色相为高熔点合金粉末, 降熔元素 Si 是由溶质浓度高的钎料向浓度低的合金粉末扩散, 主要集中在合金粉末边缘, 使得高熔点合金粉末表面发生熔化; 点 2 所在深色相为凝固钎料, 其中 Mo、Co、Fe 元素来源于熔融合金粉末, 表明钎料与合金粉末存在相互扩散行为, 因此在两相间的点 3 位置出现了 Si、Mo 等元素聚集现象。点 4 为母材中白色颗粒析出相, 元素组成主要富含 Ni、Cr、Mo, 文献[18]表明该区域能够形成多种不同种类的析出相, 其中主要为 TCP(topologically close-packed phases)相(如 Cr₁₈Mo₃₁Co₅₁、Ni₄₀Cr₁₈Mo₄₂等), 这些相通常具有层状结构、高配位数、四面体堆垛等特点, 且机械性能表现为硬而脆。通过 FIJI 软件对原始试样、3 种弹丸尺寸试样钎焊接头 SEM

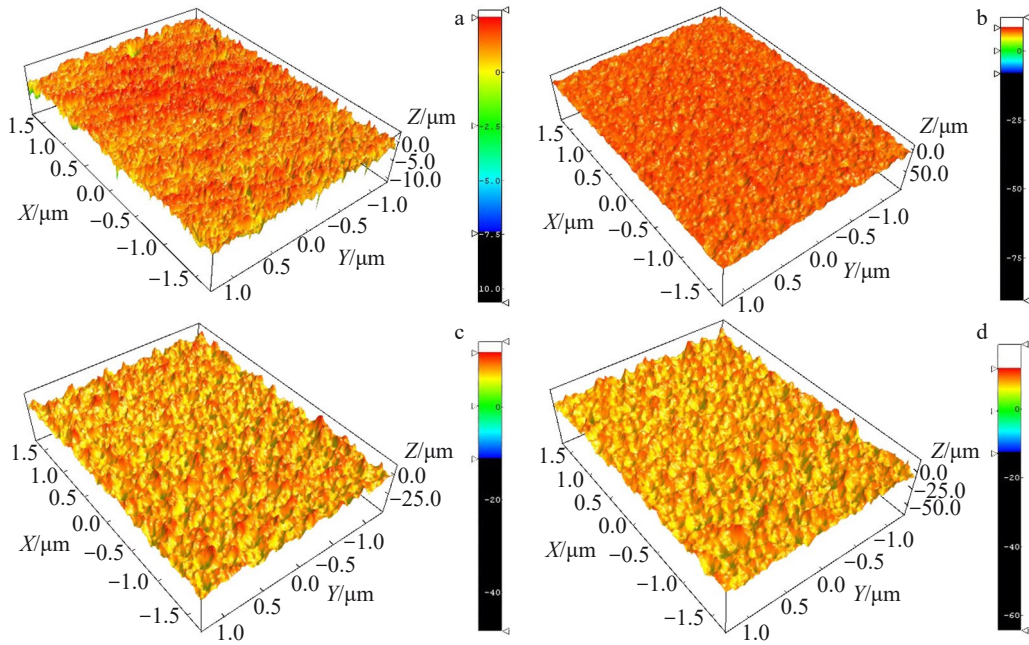


图2 不同试样母材表面三维轮廓及粗糙度

Fig.2 3D profiles and surface roughness of base material of different specimens: (a) original specimen, (b) SP_{0.180}, (c) SP_{0.300}, and (d) SP_{0.500}

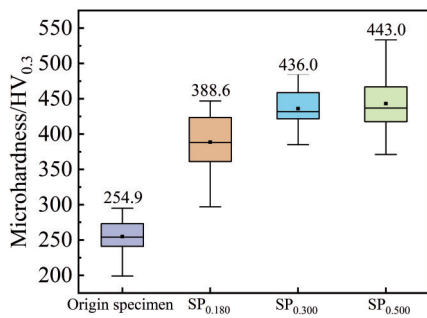


图3 不同试样表面显微硬度

Fig.3 Microhardness of different specimen surfaces

图像进行处理,获得4种试样母材中TCP相含量分别为1.938%、1.504%、0.916%、1.675%。4种试样母材中TCP相含量反映了强化元素Cr、Mo向接头扩散的能力,含量越少表明母材中Cr、Mo元素向钎焊接头的扩散能力增强,进一步表明了喷丸处理有助于促进界面处的元素扩散能力。

图6分别为4种钎焊接头中Si元素从界面至母材一侧线扫描结果,根据母材中Si元素含量为0.45wt%,在界面到线扫描结果中出现Si元素含量低于0.45wt%时的位置定义为扩散层厚度,获得4种钎焊接头扩散层厚度分别为102.09、147.44、224.97、122.65 μm,其中当弹丸尺寸为0.300 mm时,对应的扩散层厚度最大且Si含量最高。表4为4种宽间隙钎焊接头中界面近母材10 μm处点能谱测试结果,Si元素含量分别为1.49wt%、1.69wt%、2.12wt%、1.54wt%,与未喷丸试样相比Si元素含量均有所提升,表明喷丸处理增强元素扩散且当弹丸尺寸为

0.300 mm时强化效果最显著,与上文扩散层厚度结果相符。

3.2 喷丸对降熔元素Si有效扩散系数的影响

喷丸对Hastelloy X表层组织产生了亚晶、晶界增殖及压应力两种影响,缺陷增殖有利于元素扩散,而压应力却抑制了元素扩散^[19]。因此基于本实验数据分别计算3种喷丸工艺引起的晶粒尺寸与残余压应力耦合作用对Si元素在Hastelloy X中的扩散系数 D_M 及仅考虑晶粒尺寸对Si元素在Hastelloy X中的扩散系数 D_{eff} 。 D_M 和 D_{eff} 扩散系数计算方法如下:

D_M 可由式(1)估算:

$$\omega(x, t) = \omega_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_M t}} \right) \right] \quad (1)$$

其中 $\omega(x, t)$ 通过点能谱(见表4)测得距界面10 μm处Si元素质量分数,分别为1.69%、2.12%、1.54%; x 为10 μm; t 为30 min; ω_s 为钎料中Si含量,9.75wt%。3种弹丸尺寸对应Si元素在Hastelloy X中的扩散系数实测值 D_M 通过式(1)计算,其结果分别为 1.48×10^{-8} 、 1.83×10^{-8} 、 $1.39 \times 10^{-8} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,未喷丸试样扩散系数 D_0 值为 $1.33 \times 10^{-8} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,3种弹丸尺寸喷丸处理后Si元素扩散系数 D_M 与 D_0 相比仅分别提高了11.28%、37.6%、4.51%。

D_{eff} 可由式(2)估算^[20]。

$$D_{eff} = (1 - f)D_L + fD_{GB} \quad (2)$$

$$f = \frac{2\delta}{d} \quad (3)$$

其中, D_{GB} 和 D_L 分别为晶界扩散系数和晶粒扩散系数, f

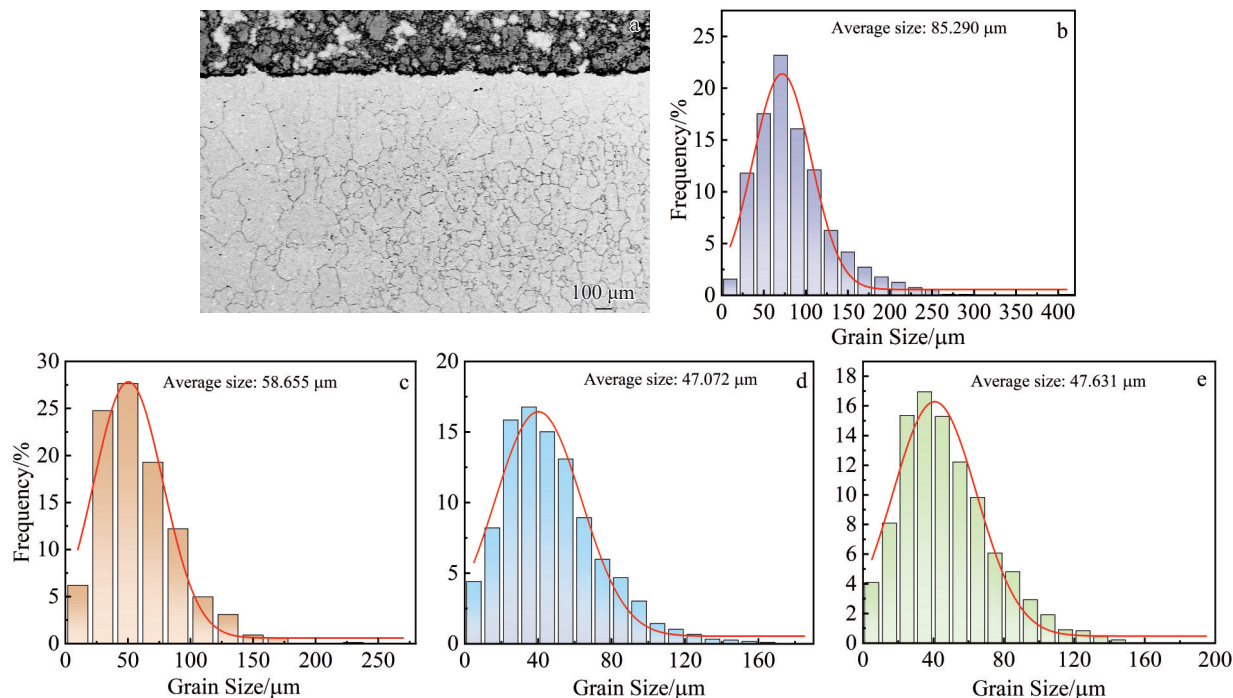


图4 原始试样显微组织及各试样晶粒尺寸分布图

Fig.4 Microstructure of the original specimen (a); grain size distribution diagrams of various specimens: (b) original specimen, (c) $SP_{0.180}$, (d) $SP_{0.300}$, and (e) $SP_{0.500}$

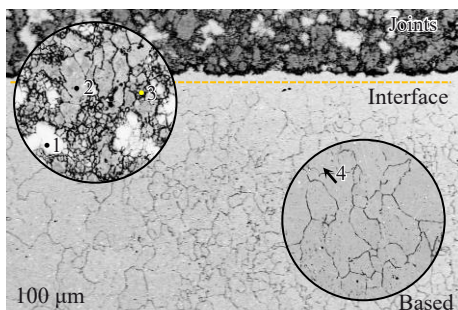


图5 原始试样钎焊接头显微组织

Fig.5 Microstructure of the brazing joint in the original specimen

表3 原始试样钎焊接头EDS元素分析结果

Table 3 EDS element analysis results of the brazing joint in the original specimen (wt%)

Position	Si	Cr	Mo	Ni	Co	Fe	Possible composition
1	3.18	20.11	6.05	60.04	2.36	8.26	Alloy powder
2	9.29	18.81	2.23	64.44	0.28	4.95	Filler metal
3	8.06	20.78	35.37	29.34	2.54	3.92	tcp phase
4	3.82	17.54	45.95	21.75	3.08	7.86	Mo-rich phase

为晶界的体积分数, d 和 δ 分别为晶粒尺寸和晶界宽度, d 取值见图4b~4e中的平均值, δ 通过图5的SEM图像多次测量取平均值 $\delta=2.5 \mu\text{m}$ 。由于降熔元素 Si 在镍基合金晶体中以晶界扩散为主, 则 $D_{GB} \gg D_L$, 与本研究所用母材材料相符, D_{GB} 和 D_L 关系可从文献[21]中得到: $D_{GB}/D_L \approx 10^6$ 。

式(2)可改写为:

$$D_{\text{eff}} \approx D_{\text{GB}}(10^{-6} + f) \quad (4)$$

因此 D_{eff} 随着晶粒尺寸 d 的减少而增加。 D_{GB} 可由未喷丸处理试样获得, 数值为 $2.25 \times 10^{-7} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。不同晶粒尺寸下 Si 元素在 Hastelloy X 中的扩散系数 D_{eff} 通过式(4)计算得出分别为 1.92×10^{-8} 、 2.39×10^{-8} 、 $2.25 \times 10^{-8} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 与原始试样扩散系数 D_0 相比分别提高了 44.36%、79.70%、69.17%。

表5为3种弹丸尺寸影响下 D_{eff} 和 D_M 统计表。结果表明: 喷丸处理引起的晶粒细化为降熔元素 Si 提供了更多的短程扩散通道, 提高扩散系数, 起到促进扩散的作用; 而 $D_{\text{eff}} > D_M$, 则表明残余压应力对元素扩散起抑制作用, 与文献[22]吻合; 同时从 D_M 和 D_{eff} 的相对差值来看, 喷丸产生的晶粒细化对元素扩散的促进作用要强于残余压应力对元素扩散的抑制作用。通过 XRD 测量了3种喷丸处理后母材表面残余应力分别为 -801、-826、-947 MPa, 随着弹丸尺寸的增加, 撞击能量越大, 产生的塑形变形就越大, 形成的残余压应力也越大, 对 Si 元素扩散抑制效果越显著。

3.3 喷丸对钎焊接头界面性能的影响

图7为热压工艺制备的宽间隙钎焊接头剪切应力-应变曲线, 未喷丸试样与 0.180、0.300、0.500 mm 弹丸尺寸喷丸试样对应的宽间隙钎焊接头界面抗剪切强度分别为 455.12、512.67、543.38、510.72 MPa, 结果表明经喷丸

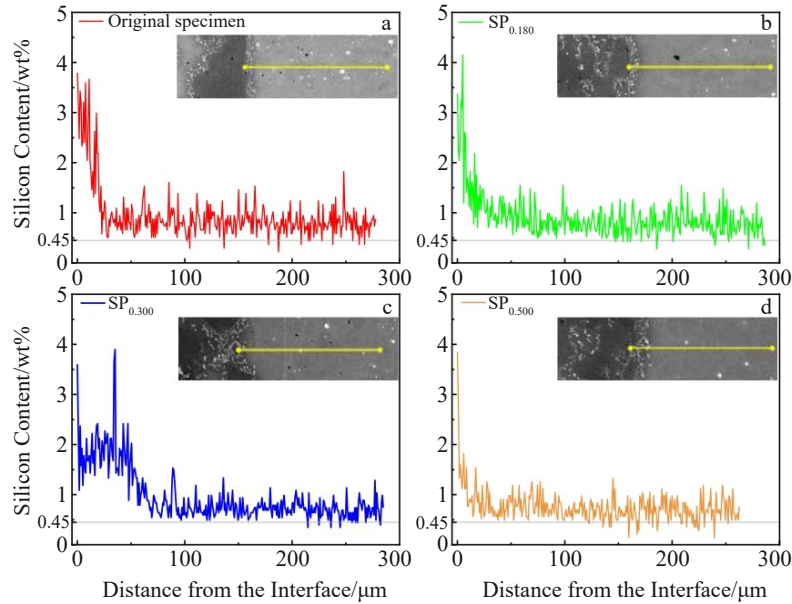


图6 4种钎焊接头母材中Si元素含量分布

Fig.6 Distributions of Si content in the base material of four types of brazing joints

表4 4种钎焊接头中界面近母材10 μm处点能谱结果

Table 4 Point analysis results near the base material at 10 μm away from the interface in four types of brazing joints (wt%)

Specimen	Si	Cr	Mo	Ni	Co	Fe
Original specimen	1.49	21.30	8.4	49.92	3.12	15.76
SP _{0.180}	1.69	21.43	9.16	48.55	3.21	15.96
SP _{0.300}	2.12	20.09	10.02	47.05	3.69	16.22
SP _{0.500}	1.54	21.51	7.91	50.68	3.10	15.26

表5 不同弹丸尺寸影响下Si元素的两种扩散系数D_{eff}和D_M

Table 5 Influence of different shot sizes on the D_{eff} and D_M of Si element (×10⁻⁸ mm²·s⁻¹)

	Original specimen	SP _{0.180}	SP _{0.300}	SP _{0.500}
D _{eff}	-	1.92	2.39	2.25
D _M	1.33	1.48	1.83	1.39

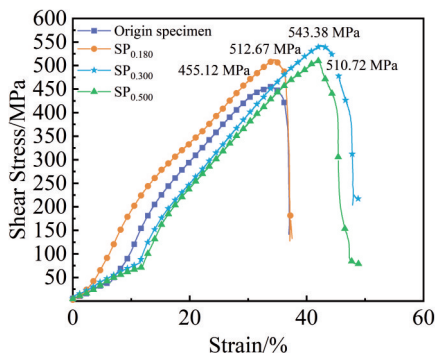


图7 4种宽间隙钎焊接头剪切应力-应变曲线

Fig.7 Shear stress-strain curves of four types of brazing joints

处理的试样界面结合强度相较于未喷丸试样均有提升，其中弹丸尺寸为0.300 mm时结合强度最高，与未喷丸试样相比提高了19.39%，此时Si元素扩散系数以及接头的

扩散层厚度也最大；当弹丸尺寸为0.500 mm时，晶粒细化程度接近饱和且对Si元素扩散促进作用也达到饱和，但残余压应力对Si元素扩散的抑制作用仍在增加，因此此时Si元素扩散系数减小，界面结合强度降低。

另外，Sun^[4]等人采用相同钎焊工艺及BNi-5钎料制备的宽间隙钎焊接头室温拉伸强度为498.45 μm且断裂在界面处，小于本研究中经喷丸强化后获得的钎焊接头剪切强度，其拉伸强度的差异性主要是未进行焊前母材表面强化而带来的晶粒细化效果，可见在宽间隙钎焊等温凝固过程中细化晶粒有助于提高元素扩散以及提升接头在界面处结合强度。

图8a, 8c, 8e, 8g分别为4种钎焊接头宏观断口特征，图8b, 8d, 8f, 8h分别为4种钎焊接头微观断口特征。分析可知：未喷丸试样钎焊接头由于元素扩散能力较弱，合金粉末颗粒周围由钎料填充良好，因此断口形貌大面积呈现平整特征，局部位置发现韧窝特征，推断该钎焊接头为脆性断裂为主。当弹丸尺寸为0.180 mm时，断口形貌呈现平整与突起交叠排列特征，突起位置主要是液态钎料将粉末颗粒包裹且没有明显的孔洞缺陷，能观察到大量的、明显的韧窝特征，推断该钎焊接头主要以韧性断裂为主。当弹丸尺寸为0.300 mm时，断口形貌呈现少量

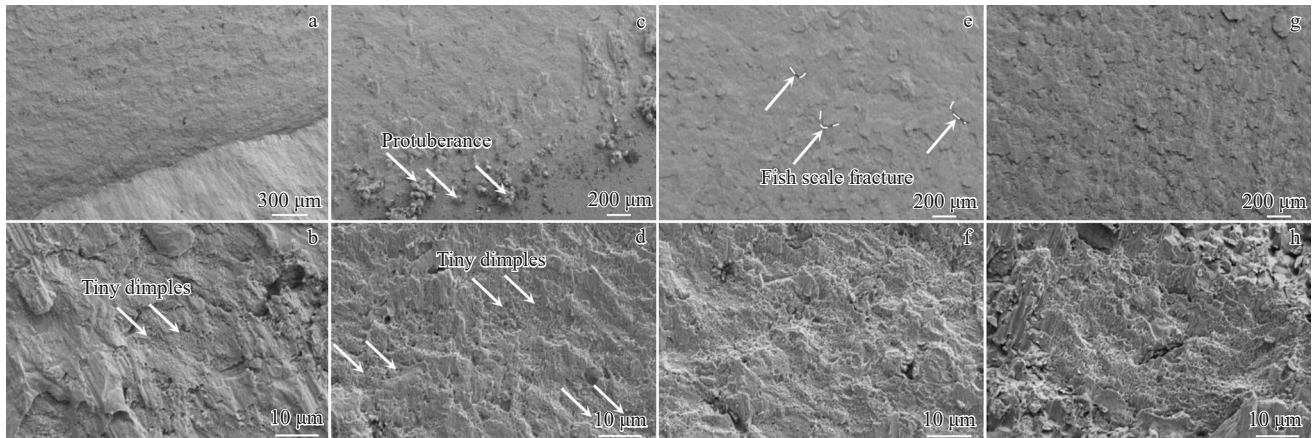


图 8 4 种钎焊接头断口形貌

Fig.8 Fracture surface morphologies of four types of brazing joints: (a-b) original specimen; (c-d) SP_{0.180}; (e-f) SP_{0.300}; (g-h) SP_{0.500}

“鱼鳞状”分层现象，与喷丸处理产生的母材内部残余压应力有关，在温度变化过程中会影响材料的变形行为，导致裂纹扩展严重，但其余平坦区域发现大量韧窝特征，推断该钎接头主要以韧性断裂为主。当弹丸尺寸为 0.500 mm 时，母材中残余应力进一步增加，因此分层现象更为突出，韧窝特征也相应减小，造成剪切强度显著下降。

综上，喷丸后获得的钎接头界面剪切强度均大于未喷丸试样，与喷丸后 Si 元素在母材中扩散系数均大于未喷丸试样的计算结果相吻合，表明了计算结果的可靠性。因此，母材表面经过喷丸处理后，母材缺陷增殖可为元素扩散提供短程通道，明显提升熔元素(Si)及活性元素(Cr、Mo)的扩散能力，但压应力对元素扩散存在一定的抑制作用。

4 结论

1) 喷丸处理会对 Hastelloy X 产生晶粒细化及残余压应力两种影响，当弹丸尺寸为 0.180、0.300、0.500 mm 时，平均晶粒尺寸分别为 58.655、47.072、47.631 μm；残余压应力分别为 -801、-826、-947 MPa；获得的宽间隙钎接头中扩散层厚度分别为 147.44、224.97、122.65 μm。

2) 经 0.180、0.300、0.500 mm 3 种不同弹丸尺寸喷丸处理后，Si 元素在 Hastelloy X 中的扩散系数 D_M 分别为 1.48×10^{-8} 、 1.83×10^{-8} 、 1.39×10^{-8} $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ，与未经喷丸处理时 Si 元素扩散系数 D_0 相比分别提升了 11.28%、37.6%、4.51%。残余压应力对 Si 元素扩散具有抑制作用，且随着应力值增大而增大。

3) 弹丸尺寸为 0.300 mm 时，界面剪切强度最大为 543.38 MPa，与未喷丸处理试样相比提升了约 20%。此时 Si 元素扩散系数实际测量值 D_M 值也最大，表明 D_M 与界面结合强度间存在正相关关系。

参考文献 References

- [1] Wang Lulu, Liu Yankuan, Fei Yujie *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2023, 52(2): 470
- [2] Li Danyang(李丹阳), Yin Fengshi(殷凤仕), Wang Xiaoming(王晓明) *et al.* *Surface Technology*(表面技术)[J], 2020, 49(8): 105
- [3] Liu Ming(刘鸣), Jiang Weiguo(姜卫国), He Hongtao(何洪涛) *et al.* *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2011, 31(4): 345, 397
- [4] Sun Yubo, Wang Zhiping. *Welding in the World*[J], 2023, 67(5): 1299
- [5] Guo Wei, Xin Jingru, Hao Ding *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2024, 30: 25
- [6] Xie Jilin(谢吉林), Huang Yongde(黄永德), Chen Yuhua(陈玉华) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(12): 4348
- [7] Ghaderi S, Karimzadeh F, Ashrafi A *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 60: 213
- [8] Cheng Zhun(程准), Li Xiaoqiang(李小强), Qu Shengguan(屈盛官) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(9): 3262
- [9] Liu Yongchao(刘永超), Pan Hui(潘晖), Zhao Haisheng(赵海生) *et al.* *Electric Welding Machine*(电焊机)[J], 2015, 45(6): 10
- [10] Pan Hui(潘晖), Zhao Haisheng(赵海生). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2017, 45(5): 86
- [11] Malekan A, Mirsalehi S E, Farvizi M *et al.* *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2022, 32(5): 1548
- [12] Bai Zhixiong, Wu Xiaochun. *Surface & Coatings Technology*[J], 2024, 478: 130448
- [13] Han Mingxing, Du Juan, Chen Yun *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2024, 980: 173633
- [14] Sundaresan C, Ghule B, Dey H C *et al.* *Corrosion Science*[J], 2024, 235: 112214
- [15] Peral L B, Ebrahimzadeh P, Guti'erez A *et al.* *Journal of Electroanalytical Chemistry*[J], 2023, 932: 117207
- [16] Ebrahimzadeh P, Peral L B, Gonzalez-Martinez R *et al.*

- Corrosion Science*[J], 2024, 231: 111988
- [17] Zhong Cheng, Liu Lei, Wu Yating *et al. Materials Letters*[J], 2010, 64(12): 1407
- [18] Yuan Xingdong(袁兴栋), Li Zizhe(李子哲), Fang Tonghui(方同辉) *et al. Surface Technology*(表面技术)[J], 2022, 51(9): 335
- [19] Reed R C. *The Superalloys*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 35, 53
- [20] Li Yuxing(李玉星), Yu Yuanxing(宇元星), Liu Cuiwei(刘翠伟) *et al. Journal of China University of Petroleum, Edition of Natural Science*(中国石油大学学报, 自然科学版)[J], 2024, 48(5): 160
- [21] Wang Songlin, Li Xin, Wang Jiamin *et al. Surface & Coatings Technology*[J], 2024, 494(P1): 131347
- [22] Fisher J C. *Applied Physics*[J], 1951, 22: 74

Influence of Shot Peening on the Elemental Diffusion and Properties of Wide-Gap Brazed Joints

Ding Kunying, Du Yimeng, Sun Yubo

(School of Aeronautics and Astronautics, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Based on the surface shot peening treatment of Hastelloy X, this study investigated the impact of shot peening on the interfacial element diffusion and properties of wide-gap brazing joints. The microstructure and mechanical properties of wide-gap brazing joints obtained from Hastelloy X surfaces without shot peening and those treated with shot peening using ball sizes of 0.180, 0.300, and 0.500 mm were compared. SEM and EDS were used to analyze the diffusion layer structure and element distribution characteristics. The results indicate that the grain refinement effect from shot peening strengthening treatment promotes the diffusion of the melting-reducing element Si in Hastelloy X. When the shot size is 0.300 mm, the diffusion coefficient of Si in the brazing joint structure is the highest of $1.83 \times 10^{-8} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; at this time, the diffusion layer is the thickest of 224.97 μm in thickness; the interface shear strength of the wide-gap brazing joint is the greatest of 543.38 MPa, which shows a 19.39% increase compared to that of the non-shot-peened sample. Additionally, theoretical calculations were conducted to determine the impact of different grain sizes under three shot peening processes on the diffusion coefficient of Si element. Theoretical calculations are combined with experimental data to elucidate the diffusion mechanism of Si in the microstructure of wide-gap brazing joints.

Key words: wide gap brazing; shot peening; elemental diffusion; microstructure; mechanical properties

Corresponding author: Sun Yubo, Ph. D., Associate Professor, School of Aeronautics and Astronautics, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, P. R. China, E-mail: yb-sun@cauc.edu.cn