引用格式：丁怀博，陈嘉诚，蔡权，等. 核级 Cr-Ni-P 钎膏特性及其不锈钢钎焊接头组织性能[J]. 材料工程，2026，54(8)：329-337.
DING Huaibo，CHEN Jiacheng，CAI Quan，et al. Characteristics of nuclear-grade Ni-Cr-P brazing paste and microstructure and mechanical properties of its brazed joint of stainless steel[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(8)：329-337.

核级 Cr-Ni-P 钎膏特性及其不锈钢钎焊接头组织性能

丁怀博[1]，陈嘉诚[1]，蔡　权[1]，李嘉辉[1]，杨卫岐[2]，林金城[2*]，李昊岳[3]
（1 中广核铀业发展有限公司 中广核先进燃料研制中心，广东 阳江 529500；
2 中山大学 中法核工程与技术学院，广东 珠海 519082；3 哈尔滨工业大学 郑州研究院，郑州 450046）

摘要：随着第四代核反应堆和小型模块化反应堆的快速发展，核燃料元件的服役温度和辐照环境更为苛刻，对钎焊材料的性能提出了更高的要求。为推动核用镍基钎膏的高质量和自主化发展，系统研究了进口核级 Ni-Cr-P 钎膏的基本特性。结果表明：钎膏中含有 12.7%（质量分数，下同）的黏结剂，其沸点或热分解温度低于 300 ℃，氮、氧和硫残留量小于 0.015%，碳残留量小于 0.055%。钎粉为 120～230 目的球形粉体，由 Ni_3P 化合物和 Ni 基固溶体组成，化学成分接近 Ni-13Cr-10.5P，硬度为(626±23)$HV_{0.3}$。钎焊核级 304L 不锈钢时，接头主要由 Fe-Ni-Cr 固溶体和 Ni_2P 型化合物组成，其室温拉剪强度和压剪强度分别为(226±14) MPa 和(184±10) MPa，350 ℃高温拉剪强度为(130±5) MPa，断裂发生在焊缝区域且呈现脆性模式。在应力比为 0.1、最大应力为 $0.45F_{max}$ 的条件下，接头疲劳寿命大于 10^6 次。

关键词：Cr-Ni-P 钎膏；基本特性；微观组织；接头强度；疲劳性能
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000413　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000413
中图分类号：TG425　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)08-0329-09

Characteristics of nuclear-grade Ni-Cr-P brazing paste and microstructure and mechanical properties of its brazed joint of stainless steel

DING Huaibo[1]，CHEN Jiacheng[1]，CAI Quan[1]，LI Jiahui[1]，YANG Weiqi[2]，LIN Jincheng[2*]，LI Haoyue[3]
（1 CGN Advanced Fuel Development Center，CGN Uranium Development Co.，Ltd.，Yangjiang 529500，Guangdong，China；
2 Sino-franco Institute of Nuclear Engineering and Technology，Sun Yat-sen University，Zhuhai 519082，Guangdong，China；
3 Zhengzhou Research Institute，Harbin Institute of Technology，Zhengzhou 450046，China）

Abstract：With the swift advancement of fourth-generation nuclear reactors and small modular reactors，the operating conditions for nuclear fuel elements，including temperature and irradiation environment，have become increasingly harsh，which in turn places higher demands on the performance of brazing materials. To promote the high-quality and self-sufficient development of nuclear-grade Ni-based brazing paste，a comprehensive and systematic investigation is carried out on the fundamental characteristics of imported nuclear-grade Ni-Cr-P brazing pastes. The findings reveal that the brazing paste contains 12.7 % (mass fraction，the same below) of a binder that decomposes or volatilizes at temperatures below 300 ℃. The residual amounts of nitrogen，oxygen，and sulfur are less than 0.015%，and the residual amount of carbon is less than 0.055%. The filler powders are spherical particles within the mesh size range of 120-230，composed of a Ni_3P-type compound and a Ni-based solid solution. The filler composition is Ni-13Cr-10.5P，and it has a hardness of (626±23) $HV_{0.3}$. When using this paste to braze nuclear-grade 304L stainless steel，the joints mainly consist of a Fe-Ni-Cr solid solution and a Ni_2P-type compound. At room temperature，the joints demonstrate a tensile shear strength of(226±14) MPa and a compressive shear

strength of(184±10) MPa. However, the tensile shear strength drops to (130±5) MPa at 350 ℃. All fractures occur within the seam area and exhibit a brittle fracture mode. Under a stress ratio of 0.1 and a stress amplitude of $0.45F_{max}$, the joint shows a fatigue life exceeding 10^6 cycles.

Key words: Cr-Ni-P brazing paste; fundamental characteristics; microstructure; joint strength; fatigue performance

核能以清洁低碳、安全可靠的优势,在我国能源领域的高质量发展以及“碳达峰、碳中和”进程中发挥着独特的作用[1-2]。核燃料元件作为核反应堆的核心部件,其制造质量直接关乎核反应堆的安全性、可靠性和运行效率。在核燃料元件的制造过程中,钎焊技术因高效可靠而被广泛应用,而镍基钎料则凭借高强度、耐腐蚀、耐热、抗氧化以及耐辐照等特性成为不锈钢定位架、燃料组件下管座、星形架等关键零部件制造的首选钎料[3-7]。

为满足核燃料元件复杂结构的钎焊需求,镍基钎料主要以钎膏的形式应用[8-9]。然而,我国核燃料制造领域的镍基钎膏长期依赖进口,不仅价格高昂,增加了核燃料组件的制造成本,而且还可能因国际局势变化导致供应链中断,从而制约我国核工业的自主发展。此外,钎膏中的黏结剂对其涂覆特性和焊接性能均具有重要影响[10-11],而国外厂商将黏结剂成分、配比等视为核心技术,实施严格的技术封锁,致使关键信息缺失,这在一定程度上也对核安全构成了潜在风险。同时,随着第四代核反应堆和小型模块化反应堆的快速发展,核燃料元件的服役温度和辐照环境将更为苛刻,这也对钎焊材料的性能提出了更高的要求[12]。此外,随着ODS钢、FeCrAl和新型镍基合金等先进核材料的开发与应用,现有镍基钎料难以完全满足新材料的钎焊需求,在成分设计和性能匹配上面临着新的挑战[13-15]。因此,开发高性能、自主化的镍基钎膏已成为推动我国核燃料组件制造领域高质量发展的关键任务。

镍基钎料通常以B、P、Si作为降熔元素。由于硼具有较大的中子吸收截面[16],含硼钎料在反应堆堆内构件中的应用受到限制。在Ni-Si和Ni-P等钎料体系方面,尽管近年来国内外研究人员已开展了大量研究,但这些研究主要聚焦于航天航空、汽车等领域的应用需求[17-19],针对核能领域的应用研究仍较为有限,而核级镍基钎膏的开发更是鲜有报道。

为此,本工作以核级Ni-Cr-P钎膏为研究对象,系统研究钎膏熔点、黏结剂分解行为、钎粉-黏结剂比例、钎粉形貌和粒径分布、焊后残留等基本特性,结合核级不锈钢钎焊接头的微观组织、力学性能及疲劳特性分析,系统评估核用Ni-Cr-P钎膏的综合性能。相关研究结果可为新型膏状镍基钎料的自主研发提供重要借鉴,加快新型钎焊材料的创新发展,促进我国核工业领域核心竞争力的有效提升。

1 实验材料与方法

选用国外某公司生产的核级Cr-Ni-P钎膏。首先,采用HB-SSR型黏度计对钎膏黏度进行测试,测试选用28号转子在室温下进行,转速设置为30 r/min。随后,采用同步热分析仪(TG-DSC)在氩气氛围下分析黏结剂热分解行为和钎料熔点,升温速率设置为10 ℃/min。最后,通过失重法对黏结剂含量进行测量,取少量钎膏置于干燥后的氧化铝坩埚中,在真空中以10 ℃/min升温至850 ℃(低于钎料熔点)并保温30 min,充分去除黏结剂,通过计算质量损失率确定黏结剂含量。

为了研究钎粉的基本特性,首先,采用无水乙醇作为清洗剂溶解和去除黏结剂,经5次清洗、沉淀分离和干燥后获得钎粉;随后,采用激光粒度仪分析粒径分布,通过扫描电镜(SEM)对粉体形貌进行观察,采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)对粉体化学成分进行测定。同时,在真空环境中将钎膏加热到1000 ℃保温30 min,使其重熔为块状钎料。在此基础上,采用维氏硬度计测量钎料硬度(载荷为3 N,加载时间为15 s),通过SEM对钎料组织形貌进行分析。最后,采用硫碳分析仪、氮氧分析仪对重熔钎料进行分析,确定C、S、N和O等杂质元素的残留情况。

不同类型的测试样件如图1所示。为确定Cr-Ni-P钎膏的焊接性能,选取化学成分为Fe-19.3Cr-9.9Ni-1.21Mn-0.44Si的核级304L奥氏体不锈钢作为实验母材。母材的抗拉强度为741 MPa,屈服强度为500 MPa。在连接前,通过机械加工获得不同样品所需的零件,具体包括:工字块(图1(a))、拉剪测试样件(20 mm×55 mm×4 mm)、疲劳测试样件(20 mm ×70 mm × 3.5 mm)、压剪测试样件(15 mm ×25 mm ×5 mm和7 mm×25 mm×5 mm)。由于钎焊间隙对接头组织性能具有显著影响,在涂覆钎膏前使用激光点焊固定板材和板材、板材和工型件的相对位置,确保钎焊间隙为50 μm。在涂覆钎膏后,在真空钎焊炉中采用优选工艺进行钎焊连接:真空度优于10^{-3} Pa,升温速率为10 ℃/min,钎焊温度为1000 ℃,保温时间为30 min,

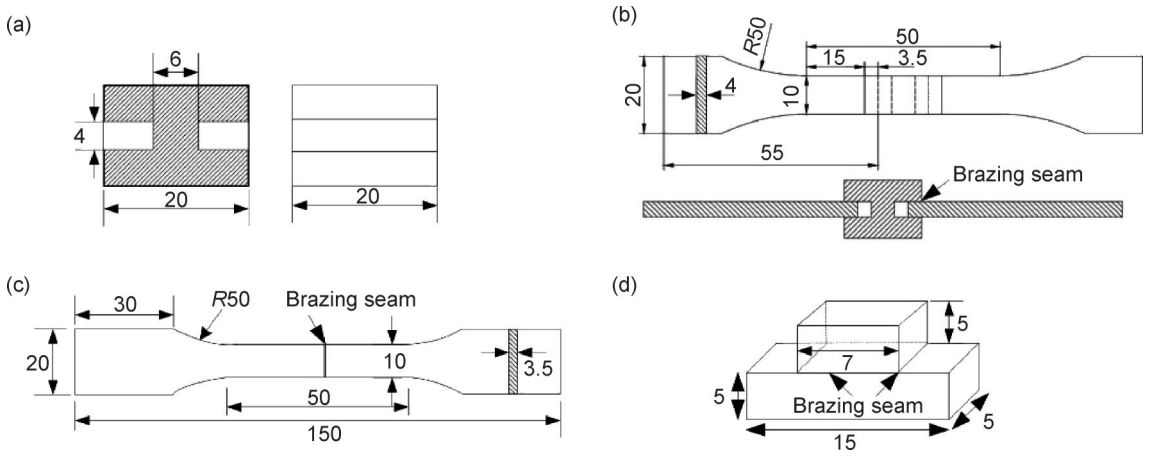


图 1　不同类型的测试样件

(a)工字块;(b)拉剪测试样件;(c)疲劳测试样件;(d)压剪测试样件

Fig.1　Schematic diagram of various samples

(a)I-beam block;(b)sample for tensile shear test;(c)sample for fatigue test;(d)sample for compressive shear test

随炉冷却。

在焊接完成后,将不同焊件机械加工为如图 1(b)~(d)所示的试样,以匹配不同测试需求。采用电子万能力学试验机在室温下进行压剪测试,加载速率为 0.5 mm/min。分别在室温和 350 ℃下进行拉剪测试,拉伸速率为 0.3 mm/min。在高温拉剪测试时,样件在放入炉内后至少保温 10 min 方可测试,确保样品温度达到目标值,每组实验测试 3 个样品。采用疲劳试验机对接头疲劳性能进行测试,固定应力比和频率为 0.1 Hz 和 25 Hz,最大应力分别设置为 2.25、1.75 kN 和 1.50 kN,分别对应接头断裂力(记为 F_{max})为 0.66F_{max}、0.52 F_{max} 和 0.45 F_{max},每组参数测试 2 个样品。此外,还测试了接头在应力比为 −1、最大应力为 0.66F_{max} 条件下的疲劳性能,用于对比分析。

2　结果与分析

2.1　核级 Ni-Cr-P 钎膏的基本特性

钎膏的基本特性见表 1,由表可知,Ni-Cr-P 钎膏中约含 12.7%(质量分数,下同)的黏结剂,室温下黏度为 67 400 mPa·s。黏结剂的 TG-DSC 曲线如图 2 所示,从图中可见,黏结剂中含有三种类型的物质。物质 1 在钎膏中的质量分数为 7.5%,易挥发,沸点在 85 ℃左右,应为黏结剂的溶剂;物质 2 的质量分数为 2%,沸点在 140 ℃左右,可能为黏结剂溶剂或者沸点调节剂;物质 3 较难挥发,质量分数仅为 0.9%,可能用于提供黏性,其沸点或分解温度在 300 ℃左右。同时,黏结剂的焊后残留量较低,重熔钎料中氮、氧和硫等元素的残留量小于 0.015%,而碳残留量则为 0.053%。

表 1　钎膏的基本特性

Table 1　Fundamental properties of brazing paste

Viscosity/(mPa·s)	Binder content/%	Vickers hardness($HV_{0.3}$)	O residual/%	N residual/%	S residual/%	C residual/%
67400	12.7	(626±23)	0.013	0.04	0.04	0.053

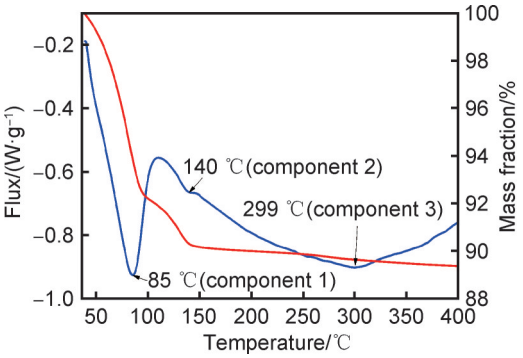
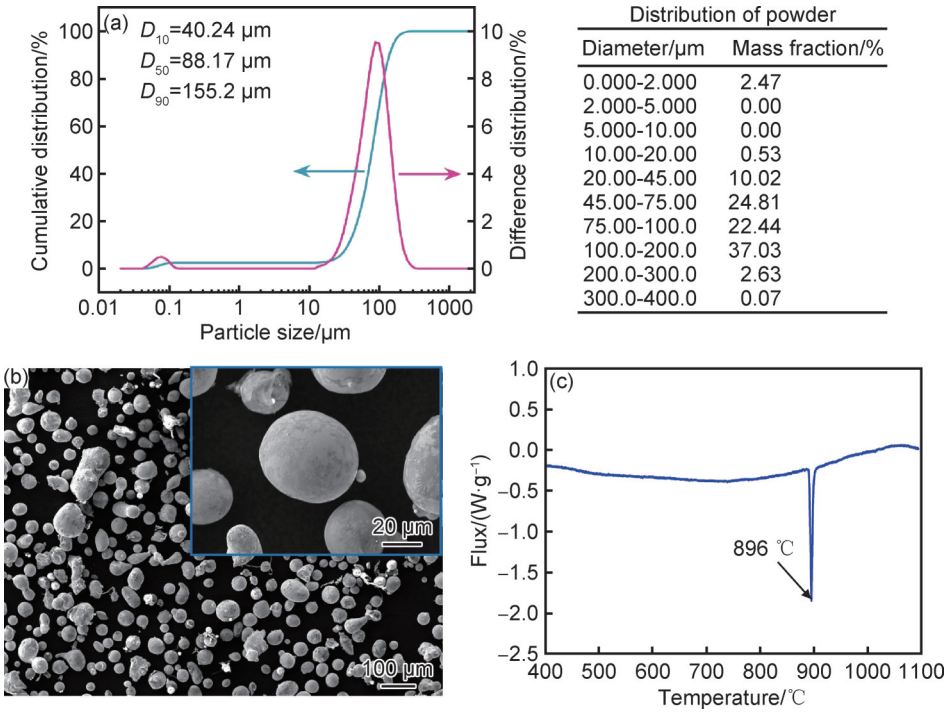


图 2　黏结剂的 TG-DSC 曲线

Fig.2　TG-DSC curves of binder

钎粉的基本特性如图 3 所示。由图 3(a)可知,钎粉粒径较为均一,中值粒径(D_{50})为 88 μm,且 80% 的钎粉粒径处于 60~120 μm。结合图 3(b),(c)的分析结果,钎粉为 120~230 目的球形粉体,熔点约为 896 ℃,与文献[20]中 Ni-13.4Cr-11.6P 钎料熔点接近(892 ℃)。钎料粉体的 ICP-OES 分析结果见表 2,根据表中的 ICP-OES 分析结果,钎粉主要由 Ni、Cr 和 P 等 3 种元素组成,化学成分接近 Ni-13Cr-10.5P,符合国标中 BNi-7 钎料的成分要求。同时,Fe、Co 和 Zr 等杂质元素含量也符合核燃料组件《制



Distribution of powder

Diameter/μm	Mass fraction/%
0.000-2.000	2.47
2.000-5.000	0.00
5.000-10.00	0.00
10.00-20.00	0.53
20.00-45.00	10.02
45.00-75.00	24.81
75.00-100.0	22.44
100.0-200.0	37.03
200.0-300.0	2.63
300.0-400.0	0.07

图3 钎料粉体的基本特性

(a)粒径分布;(b)形貌;(c)熔点分析

Fig.3 Fundamental properties of brazing filler powder

(a)diameter distribution;(b)morphology;(c)analysis of melting point

表2 钎料粉体的ICP-OES分析结果(质量分数/%)

Table 2 ICP-OES analysis results of brazing filler powder(mass fraction/%)

Cr	P	Fe	Co	Si	Zr	Ti	B	Al	Mo	Sr	Ni
13.15	10.48	0.039	0.038	0.020	0.013	0.011	0.010	0.003	0.008	0.012	Bal.

造工艺技术条件—不锈钢钎焊》中对钎焊材料的成分要求。

图4为钎料的微观组织形貌和元素分布图。钎料主要由灰色基体和白色相组成,白色相呈现块状或者细小颗粒状,且弥散分布于灰色基体中,呈现均匀的共晶组织状。灰色基体主要含有Ni、P 2种元素,而白色相则富含Ni和Cr。根据能谱点分析结果,灰色基体(点A)的化学组成,原子分数为65.0% Ni、10.9% Cr以及24.1% P,(Ni+Cr)和P的原子比接近3∶1,属于Ni_3P型的化合物,是Cr原子部分取代Ni元素而形成的$(Ni,Cr)_3P$相。白色相(点B)中的原子分数分别为78.6% Ni和20.2% Cr。由于Ni和Cr可无限互

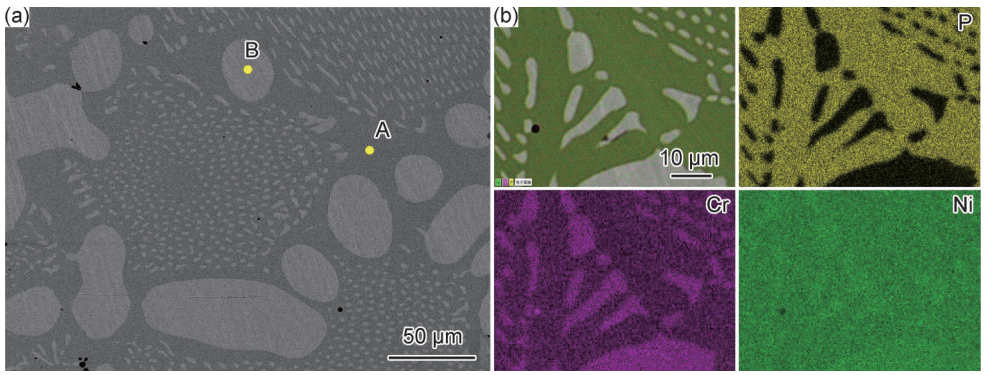


图4 重熔Ni-Cr-P钎料的微观组织及元素分布

(a)微观组织图;(b)元素面分布图

Fig.4 Microstructure and elemental distribution of re-melted Ni-Cr-P brazing filler

(a)microstructure diagram;(b)element face distribution map

溶，白色相应为 Ni 基固溶体，固溶含有原子分数约为 1.2% 的 P 元素。因此，Ni-Cr-P 钎料主要由 Ni 基固溶体与 $(Ni,Cr)_3P$ 构成的共晶组织组成，这与所观察到的钎料熔点接近 Ni_3P/Ni 共晶温度的现象相符合[21]。

2.2　接头微观组织分析

图 5 为 Ni-Cr-P 钎膏连接 304L 的接头组织形貌和元素分布情况。由图 5(a)可知，焊缝区主要包含黑色和亮白色 2 种物相，黑色相中富含 Cr 和 P 2 种元素，而亮白色相主要由 Fe 和 Ni 元素组成。接头不同区域的 EDS 分析结果见表 3，根据表中给出的能谱点分析结果，黑色相(点 A)中 Ni、Cr、P 和 Fe 的原子分数分别为 18.8%、31.4%、33.3% 和 16.5%，其(Ni+Fe)∶Cr∶P 原子比接近 1∶1∶1，应为 Ni_2P 型化合物，记为(Ni,Fe)CrP；亮白色相(点 B)则是由母材和钎料互扩散形成的(Fe、Ni、Cr)固溶体。

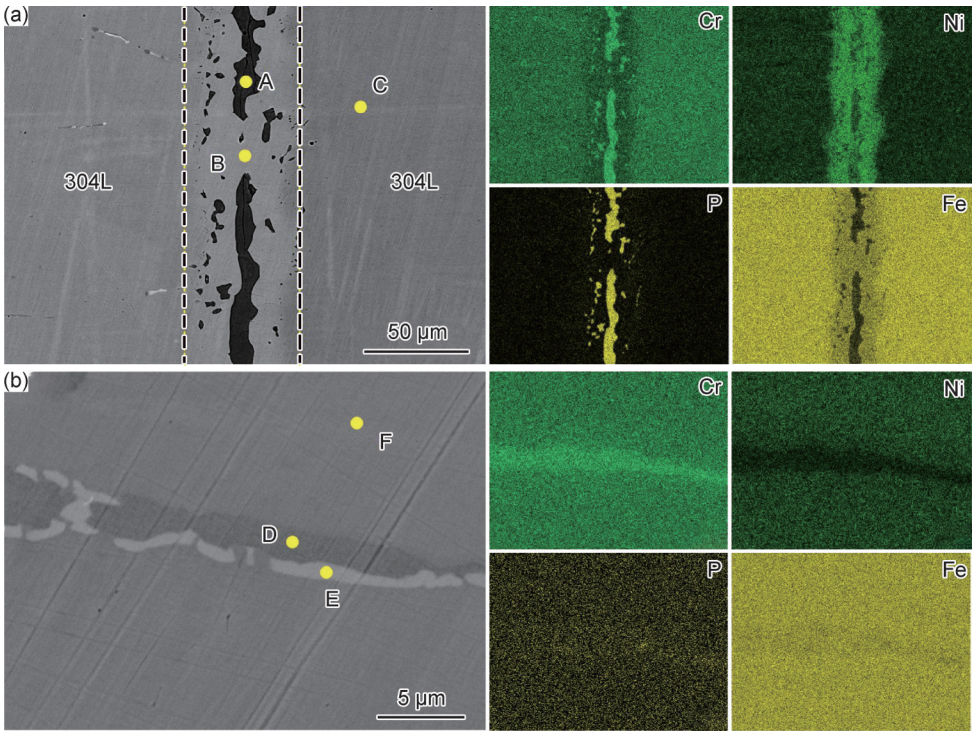


图 5　Ni-Cr-P 钎膏连接 304L 的接头组织形貌和元素分布

(a)整体形貌和元素分布；(b)晶界区放大图

Fig.5　Microstructure and elemental distribution of 304L joint using Ni-Cr-P brazing paste

(a)overall image and elemental distribution；(b)magnified image of grain-boundary region

表 3　接头不同区域的 EDS 分析结果

Table 3　EDS analysis results of various regions in joint

Region	Atomic fraciton/%				Possible phase
	Ni	Cr	P	Fe	
A	18.8	31.4	33.3	16.5	(Ni,Fe)CrP
B	38.9	16.5	2.1	42.5	(Fe,Ni,Cr)
C	8.2	21.4	0.6	69.8	304L
D	4.4	26.4	0.7	68.5	304L+Cr-P
E	4.5	27.9	2.3	65.3	304L+Cr-P
F	10.7	18.7	0.4	70.2	304L

同时，在连接过程中母材出现了轻微的晶界溶蚀现象。由图 5(b)可知，晶界渗透区存在 2 种具有不同衬度的物相(点 D 和 E)，其 Cr 含量显著高于不锈钢基体(点 F)，而 Ni 含量相对较低，并检测到微量 P 元素(0.7%～2.3%)存在。因此，该溶蚀区可能是由于 P 元素沿不锈钢晶界发生扩散，进而引发 Cr-P 化合物的偏析所形成的。该现象与采用 Ni-Cr-Si-B 钎料钎焊不锈钢时 B 元素沿晶界扩散引发的 CrB 晶间渗透相似[22]，但由于 P 元素的原子半径较大，扩散速率较低，Cr-P 偏析的程度相对较轻。此外，考虑到 Ni_2P 型化合物的脆性高，如何改进钎料成分，抑制脆性化合物的形成和连续分布，是 Ni-Cr-P 体系钎料研发的重要方向之一。

2.3　接头力学性能分析

为评估接头力学性能，在室温和 350 ℃高温下进行了接头的拉剪测试。结果表明：采用 Cr-Ni-P 钎膏连接 304L 不锈钢时，接头的室温拉剪强度为(226±14) MPa，满足压水堆燃料组件对不锈钢钎焊接头抗

剪强度>113 MPa的要求[3]。值得注意的是，在350 ℃高温下拉剪强度发生明显下降，为(130±5) MPa，仅为室温强度的58%，这可能与接头中固溶体在高温下的软化行为有关。接头的拉剪测试结果如图6所示，根据图中的拉剪强度-位移曲线及宏观图片可知，焊后的接头光滑饱满，无明显缺陷；在拉剪测试中随着载荷的增加，母材发生屈服，而钎角外表面逐渐产生裂纹，最后接头沿着焊缝发生脆性断裂。

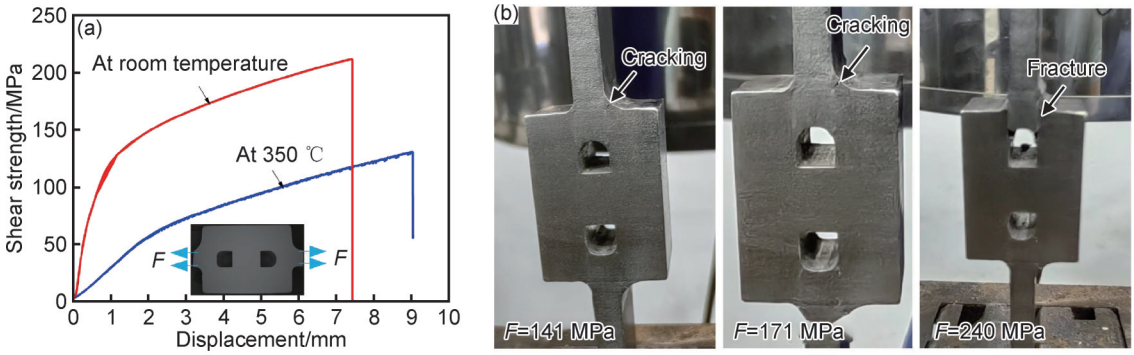


图6 接头的拉剪测试结果

(a)拉剪强度-位移曲线；(b)测试过程中接头的宏观形貌变化

Fig.6 Shear test results of joint

(a)shear strength-displacement curves；(b)macroscopic morphological variation of joint during testing process

图7对比了接头在高温和室温条件下的断口形貌。由图7(a)可知，在室温拉剪测试中，接头表现出脆-韧混合的断裂模式特征。其中，脆性断裂区主要由(Ni,Fe)CrP化合物构成，呈连续分布，表面光滑，并显示出明显的解理台阶(如图7(b)所示)；韧性断裂区则主要由固溶体组成，呈岛状分布于断口中，可见大量的剪切痕迹(如图7(c)所示)。相比之下，在350 ℃条件下进行拉剪测试时，如图7(d)，(e)所示，断口更为平整，且韧性断裂所占比例显著增加。此外，如图7(f)所示，在韧性断裂区域不仅观察到剪切痕迹，还出现了大量细小的韧窝。这些现象表明，在高温条件下，固溶体的塑性变形能力增强，从而提升了接头的塑性。该结果与应力-行程曲线中所显示的断裂行程增加相吻合。

压剪测试后的接头断口形貌如图8所示。通过压剪测试表明：接头的压剪强度为(184±10) MPa，略低

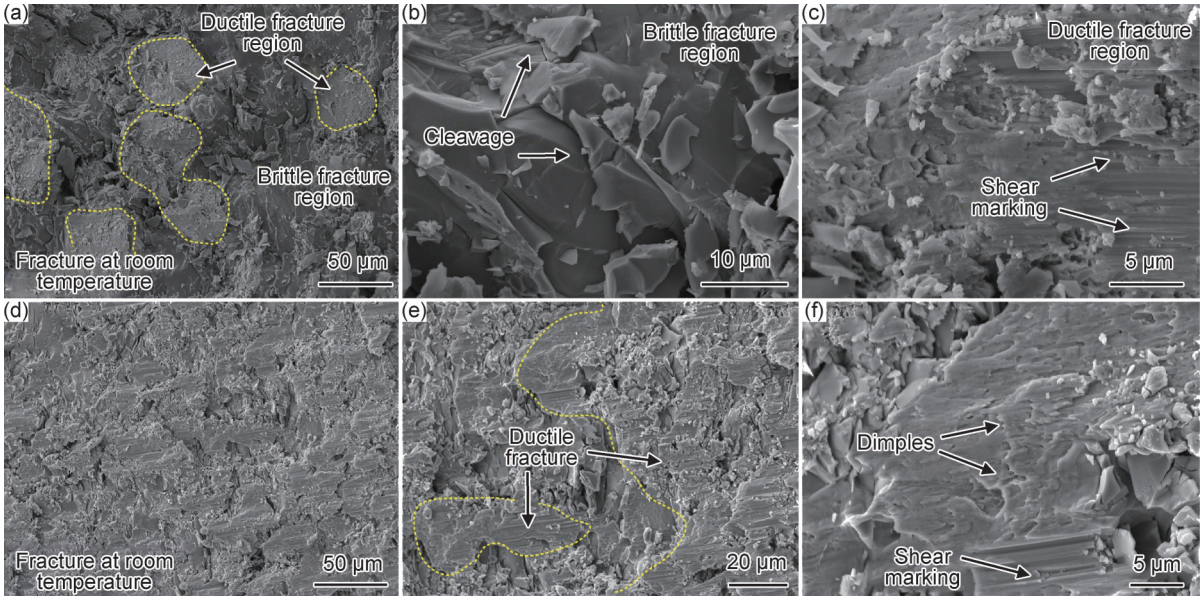


图7 拉剪测试后的接头断口形貌

(a)～(c)室温断口形貌；(d)～(f)高温断口形貌

Fig.7 Fracture morphology of joint after tensile-shearing test

(a)-(c)fracture morphology at room temperature；(d)-(f)fracture morphology at high temperature

于拉剪强度。该现象主要与样件结构和加载方式相关。在拉剪测试时，工字型试样的焊接面主要承受面内剪切力，应力分布相对均匀；而在压剪测试时，焊缝区域受到垂直压力与剪切力的共同作用，这种复合应力状态容易引发局部应力集中，削弱接头的有效承载能力[23]。此外，根据图8所示的断口形貌，压剪测试时接头断裂发生在焊缝区域。当裂纹穿过大块(Ni,Fe)CrP化合物时，如图8(c)所示；断口光滑平整且存在许多微裂纹，呈现典型的脆性断裂模式；当裂纹靠近固溶体区域时，如图8(d)所示，断口中可观察到少量韧窝和剪切痕迹，表现为混合断裂模式。然而，由于接头中(Ni,Fe)CrP化合物呈现连续分布，接头整体表现为脆性断裂。后续可通过工艺或者成分调控，促进脆性化合物的弥散分布，强韧化接头。

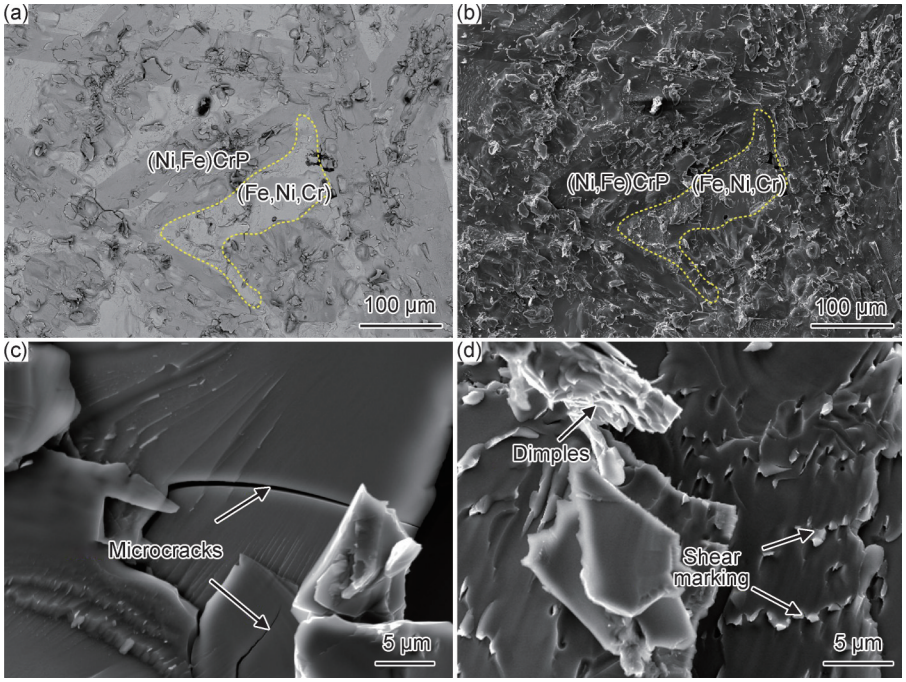


图8　压剪测试后的接头断口形貌

(a)背散射模式的整体形貌；(b)二次电子模式的整体形貌；(c)化合物区域的局部放大图；(d)固溶体周围的放大图

Fig.8　Fracture morphology of joint after compressive shearing test

(a)overall morphology of backscattering mode; (b)overall morphology of secondary-electron mode; (c)magnified image of compounds region; (d)magnified image nearby solid-solution

接头疲劳性能测试结果见表4，表中总结接头在不同应力条件下的疲劳寿命。当R=0.1时，在最大应力为0.66F_{max}时，接头的疲劳寿命为10^4量级；在最大应力为0.52F_{max}时，接头的疲劳寿命为10^5量级；在最大应力为0.45F_{max}时，接头的疲劳寿命大于10^6次。因此，可以推断接头的疲劳极限较低，仅为43 MPa左右。与此同时，当R=−1时，接头在0.66F_{max}的最大应力下疲劳寿命仅为10^3量级。该结果表明接头在拉-压循环载荷下更易发生裂纹扩展，产生疲劳失效。进一步提升接头在拉-压加载条件下的疲劳性能，也是目前核级镍基钎膏国产化研究中需要解决的重要难题之一。

表4　接头疲劳性能测试结果

Table 4　Test results of fatigue performance of joint

Number	Maximal force/kN	Stress ratio	Maximum stress/F_{max}	Fatigue life/cycle
1-1	2.25	0.1	0.66	15118
1-2	2.25	0.1	0.66	26792
2-1	1.75	0.1	0.52	154758
2-2	1.75	0.1	0.52	300517
3-1	1.50	0.1	0.45	1351754
3-2	1.50	0.1	0.45	＞2000000
4-1	2.25	−1	0.66	3060
4-2	2.25	−1	0.66	5086

3　结论

(1)进口核级Ni-Cr-P钎膏的室温黏度为67400 mPa·s，黏结剂含量约为12.7%。黏结剂中含有3种不同类型的物质，沸点或热分解温度分别在85、140 ℃和300 ℃左右。钎粉则为120～230目的球形粉体，化学

成分为Ni-13Cr-10.5P，主要物相为$(Ni,Cr)_3P$化合物和Ni基固溶体，熔点为896 ℃，硬度为(626±23) $HV_{0.3}$。

(2)采用进口Ni-Cr-P钎膏连接304L不锈钢时，接头主要由(Fe,Ni,Cr)固溶体和Ni_2P型化合物(Ni,Fe)CrP组成。接头的室温拉剪强度和压剪强度分别为(226±14) MPa和(184±10) MPa，在350 ℃高温下拉剪强度为(130±5) MPa。接头断裂发生在焊缝处，均呈现脆性断裂模式。

(3)在应力比为0.1，频率为25 Hz的条件下，当最大应力为$0.66F_{max}$时，接头疲劳寿命＞10^4次；当最大应力为$0.52F_{max}$时，接头疲劳寿命＞10^5次；当最大应力为$0.45F_{max}$时，接头疲劳寿命＞10^6次。

参考文献

[1] 吴放.我国碳达峰、碳中和进程中核能的地位和作用[J].核科学与工程,2022,42(4):737-743.
Wu F.The role of nuclear in China's carbon peaking and carbon neutrality course[J].Nuclear Science and Engineering, 2022, 42(4):737-743.

[2] 郭天超,孙善星,张文娟."碳中和"目标下核能积极有序发展策略研究[J].中国能源,2021,43(5):44-50.
Guo T C,Sun S X,Zhang W J.Research on the active and orderly development strategy of nuclear energy under the goal of carbon neutrality[J].Energy of China,2021,43(5):44-50.

[3] 孙效禹,蔡权,陈嘉诚.核级304L不锈钢钎缝显微组织结构及抗剪强度[J].焊接技术,2023,52(5):24-27.
Sun X Y,Cai Q,Chen J C.Microstructure and shear strength of brazed joint of nuclear grade 304L stainless steel[J].Welding Technology,2023,52(5):24-27.

[4] 蔡权,盛国福,叶远东,等.核燃料元件中控制棒星形架组装钎焊工艺[J].中国核电,2022,15(1):2-4,9.
Cai Q,Sheng G F,Ye Y D,et al.Brazing process of RCCA spider in nuclear fuel element[J].China Nuclear Power, 2022, 15(1):2-4,9.

[5] 袁野,周希,李莎.304L不锈钢真空钎焊接头晶间腐蚀性能试验研究[J].热加工工艺,2021,50(11):63-66.
Yuan Y,Zhou X,Li S.Experimental study on intergranular corrosion resistance of 304L stainless steel vacuum brazed joints[J].Hot Working Technology,2021,50(11):63-66.

[6] 李莎,袁野,钟多军.CF3燃料组件下管座钎焊工艺及缺陷控制[J].电焊机,2022,52(12):77-84.
Li S,Yuan Y,Zhong D J.Study on brazing process and defects control of CF3 fuel assembly bottom nozzle[J].Electric Welding Machine,2022,52(12):77-84.

[7] 郭杰杰,李华鑫,蔡良益,等.采用$BNi_{82}CrSiB$-xCu钎料钎焊304不锈钢接头的微观组织与力学性能[J].材料工程,2026,54(1):168-177.
Guo J J,Li H X,Cai L Y,et al.Microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints brazed by using $BNi_{82}CrSiB$-xCu filler metals[J].Journal of Materials Engineering, 2026, 54(1):168-177.

[8] 戎万,操齐高,郑晶,等.高温钎料焊膏研究进展[J].贵金属,2020,41(增刊1):43-47.
Rong W,Cao Q G,Zheng J,et al.Research progress on high temperature solder paste[J].Precious Metals,2020,41(S1):43-47.

[9] 易振华,冉丽萍,易茂中.Ni-Cr-P焊膏钎焊C/C复合材料的组织和性能[J].材料工程,2020,48(5):127-135.
Yi Z H,Ran L P,Yi M Z.Microstructure and properties of C/C composites brazed with Ni-Cr-P pasty filler metal[J].Journal of Materials Engineering,2020,48(5):127-135.

[10] 陈思伊.新型下管座自动涂料工艺优化及应用[C]//中国核学会2023年学术年会论文集.阳江:中核建中核燃料元件有限公司,2023:65-69.
CHEN S Y.Optimization and application of new automatic coating technology for bottom nozzle[C]//Proceedings of the 2023 Academic Annual Conference of the Chinese Nuclear Society.Yangjiang: China Nuclear Engineering and Construction Corporation Nuclear Fuel Element Co., Ltd, 2023:65-69.

[11] 赵磊,李晓红,侯金保,等.有机胶体黏附力作用下的钎焊工艺[J].材料工程,2015,43(12):63-68.
Zhao L,Li X H,Hou J B,et al.Brazing process assisted by adhesion from organic colloid[J].Journal of Materials Engineering,2015,43(12):63-68.

[12] Allen T R,Sridharan K,Tan L,et al.Materials challenges for generation IV nuclear energy systems[J].Nuclear Technology,2008,162(3):342-357.

[13] 祝国梁,罗桦,贺戬,等.镍基高温合金增材制造研究进展[J].材料工程,2024,52(2):1-15.
Zhu G L,Luo H,He J,et al.Advances in additive manufacturing of nickel-based high-temperature alloys[J].Journal of Materials Engineering,2024,52(2):1-15.

[14] 郑勇,魏连峰,杨灿湘,等.ODS钢焊接技术研究进展与展望[J].焊接学报,2024,45(12):117-128.
Zheng Y,Wei L F,Yang C X,et al.Research progress and prospects of ODS steel welding technology[J].Transactions of the China Welding Institution,2024,45(12):117-128.

[15] 陈闰洛,叶锦淼,郑磊,等.核电用Inconel 690合金管微动磨损损伤机理研究[J].材料工程,2024,52(11):150-157.
Chen R L,Ye J M,Zheng L,et al.Fretting wear damage mechanism of Inconel 690 alloy tube in nuclear power plant[J].Journal of Materials Engineering,2024,52(11):150-157.

[16] 沈华亚,韩毅,李国栋,等.大尺寸铝基高硼复合材料制备与中子屏蔽性能研究[J].功能材料,2025,56(6):6180-6185.
Shen H Y,Han Y,Li G D,et al.Research on the fabrication and neutron shielding performance of large-size aluminum-based high-boron composite materials[J].Journal of Functional Materials,2025,56(6):6180-6185.

[17] Li W W,Chen B,Xiong Y,et al.Joining of C_f/SiBCN composite with two Ni-based brazing fillers and interfacial reactions[J].Journal of Materials Science & Technology,2017,33(5):487-491.

[18] 徐彦强,梅寒,马广璐,等.Haynes 214合金与GH5188合金钎焊界面组织分析[J].精密成形工程,2025,17(6):74-81.

Xu Y Q, Mei H, Ma G L, et al. Microstructure analysis of brazing interface between Haynes 214 alloy and GH5188 alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(6): 74-81.

[19] 李云月，栗卓新，李红，等. 耐腐蚀性镍基箔带钎料钎焊不锈钢接头性能[J]. 焊接学报，2019，40(9)：30-38.
Li Y Y, Li Z X, Li H, et al. Properties of 316L stainless steel joints brazed with corrosion resistant nickel-based filler metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(9): 30-38.

[20] Liu S B, Shohji I, Kobayashi T, et al. Microstructure and properties of SUS304 stainless steel joints brazed with electrodeposited Ni-Cr-P alloy coatings[J]. Materials, 2021, 14(15): 4216.

[21] Schmetterer C, Vizdal J, Ipser H. A new investigation of the system Ni-P[J]. Intermetallics, 2009, 17(10): 826-834.

[22] 付伟，陈斌，宋晓国，等. 保温时间对 BNi-2 非晶钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 不锈钢接头组织和性能的影响[J]. 火箭推进，2024，50(1)：147-153.
Fu W, Chen B, Song X G, et al. Effect of holding time on microstructure and mechanical properties of 1Cr18Ni9Ti stainless steel joint brazed by amorphous BNi-2 filler metal[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(1): 147-153.

[23] Shi J M, Ma N, Zhang L X, et al. Residual stress and fracture strength of brazed joint of ceramic and titanium alloy with the aid of laser deposited functionally graded material layers[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 495-502.

基金项目：中广核铀业发展有限公司企业科研项目(CGNPC-URC-T-2024-004)；中国博士后科学基金(2024M763744，2024M764175)
收稿日期：2025-07-17；**录用日期**：2025-09-04
通讯作者：林金城(1994—)，男，助理研究员，博士，研究方向为新材料及异种材料连接，联系地址：广东省珠海市香洲区中山大学珠海校区瀚林 3 号 C558 房间(519082)，E-mail：linjincheng@mail.sysu.edu.cn

(本文责编：张宝玲)