

扩散焊接钨/钢接头残余应力的数值模拟

马运柱, 刘昊阳, 刘文胜, 蔡青山, 余强, 刘书华, 伍镭

(中南大学 粉末冶金研究院, 长沙 410083)

摘要: 采用有限元法分析钨/钢扩散焊接头残余应力, 并探讨添加钒/镍和钒/铜复合中间层对钨/钢扩散焊接头残余应力分布的影响。结果表明: 钨/钢扩散焊接头存在较大的残余应力, 靠近中间层附近的钨处存在极大的径向压应力, 而靠近中间层附近的钢处和整个中间层区域均存在较大径向拉应力; 钨/钢直接扩散焊接头的残余应力极大, 钨/钒/镍/钢扩散焊接头的残余应力有所降低, 钨/钒/铜/钢扩散焊接头残余应力最小; 接头力学性能及断裂特征验证了有限元计算结果的准确性。

关键词: 钨; 钢; 残余应力; 扩散焊; 数值模拟

中图分类号: TG459.6

文献标志码: A

Numerical simulation of residual stress in tungsten/steel diffusion bonded joints

MA Yun-zhu, LIU Hao-yang, LIU Wen-sheng, CAI Qing-shan, YU Qiang, LIU Shu-hua, WU Lei

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A finite element method was employed to evaluate the residual stresses in W/FS (ferritic steel) joints, and the influences of V/Ni and V/Cu composite interlayer on residual stress distribution of W/FS joints were discussed. The results show that large residual stress is generated in W/FS diffusion bonded joints. The maximum compressive residual stress is presented in the tungsten near interlayer, while large tensile residual stress is shown in interlayer and steel near interlayer as well. The residual stress of W/FS direct diffusion bonded joint is the largest, the residual stress of W/V/Ni/FS joint is lower, and the residual stress of W/V/Cu/FS joint is the least. The tensile strength of the joints and fracture characteristics verify the accuracy of calculation results of the FEA.

Key words: tungsten; steel; residual stress; diffusion bonding; numerical simulation

未来的示范聚变堆(DEMO)实验装置采用氦冷偏滤器,其主要功能是收集高温等离子体中的废弃粒子、杂质和转移聚变产生的热量^[1-2],偏滤器的第一壁材料工作过程中要承受高达10 MW/m²的热载荷^[3-5]。高中子流量、高热载荷与机械载荷的结合需要使用高熔点、高热导率、高抗辐照性能与低活性的材料。钨及其合金材料的熔点高、蒸气压低和溅射腐蚀率低,被认为是理想的候选材料。低活化钢具有较强的中子辐照几何稳定性、辐照肿胀和热膨胀系数较低、热导率

高等优点,被认为是氦冷偏滤器的首选热沉材料^[6-7]。据氦冷偏滤器的设计概念,要组成一个完整的偏滤器部件,钨与钢的连接至关重要。然而,钨和钢的物理性能如弹性模量和热膨胀系数(Coefficient of thermal expansion, CTE)等相差很大,常温下低活化钢的热膨胀系数为钨的2.5倍,弹性模量为钨的1/2^[8],钨与钢的连接件在服役过程中将产生较大的热应力。较大的残余应力会引起金属材料产生塑性变形、脆性材料中产生裂纹以及接头界面的失效^[9],一旦焊接接头形成

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50774098)

收稿日期: 2014-01-22; 修订日期: 2014-06-08

通信作者: 马运柱, 教授, 博士; 电话: 0731-88877825; E-mail: zhuzipm@csu.edu.cn

完好的界面, 接头强度就主要取决于残余应力^[10-11]。目前, 钨与钢的连接已经成为制约 DEMO 装置发展的一个重要技术难题^[12]。

钨/钢连接主要采用钎焊^[13]、等离子喷涂^[14]和扩散焊技术, 其中扩散连接技术由于连接温度低、接头使用温度高等优点成为异种材料钨/钢连接的有效方法^[15-17]。钨与钢的直接扩散焊接头残余应力极大^[14, 18], 需添加中间层来缓和接头的残余应力, 钒的热膨胀系数介于钨与钢之间, 且与钨和钢均能形成连续固溶体, 是较好的中间层候选材料, 但 V 易与钢中的 C 生成 VC 脆性相^[19-20], 因此, 可考虑在钒与钢之间添加适当的阻隔层, 如 Ni 和 Cu。为此, 本文作者以 V/Ni 和 V/Cu 为复合中间层扩散焊接钨与钢, 采用 Ansys 商用有限元软件分析钨/钢接头内残余应力的分布特征, 探讨不同中间层对接头残余应力分布规律的影响。最后, 结合接头力学性能及断裂特征来验证有限元计算结果的准确性。

1 实验

1.1 实验材料

实验所采用的母材为宝鸡市弘宇金属材料有限公司生产的纯钨棒(纯度为 99.9%)和宝钢集团生产的铁素体钢(FS), 两种材料均被制成直径为 35 mm、高为 13 mm 的圆饼形焊接样。实验过程中所使用的中间层材料为厚度为 0.2 mm 的 V、厚度为 0.1 mm 的 Ni、厚度为 0.1 mm 的 Cu, 纯度均高于 99%, 中间层的组合形式为 0.2 mm V/0.1 mm Ni 和 0.2 mm V/0.1 mm Cu, 这两种中间层组合的加入主要起到缓和接头残余应力、促进接头元素扩散的作用。

1.2 实验方法

扩散焊接头各材料按图 1 所示排列在真空烧结炉中, 以 10 °C/min 的加热速率从室温加热至 1050 °C, 然后在 1050 °C 下保温 60 min。整个焊接过程加压 $p=10$ MPa, 炉内真空度约为 1×10^{-3} Pa。焊接完成后, 接头以较慢的冷却速度 $v=5$ °C/min 冷至室温。待焊接完成后, 采用线切割法从焊接接头中心轴附近区域取标准拉伸试样(见图 2), 并使中间层区域位于拉伸试样中心部位。采用美国 Instron3369 型力学试验机测试接头的拉伸强度, 并采用扫描电镜对拉伸断口及接头界面进行观察。

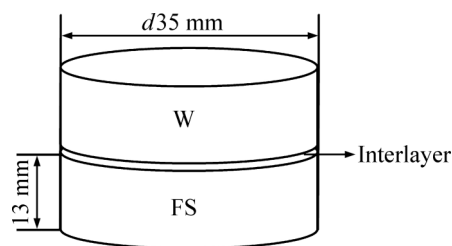


图 1 扩散焊试样装配示意图

Fig. 1 Schematic diagram of assembled sample for diffusion bonding

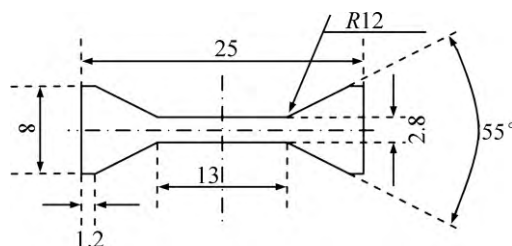


图 2 标准拉伸试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of standard tensile specimen (Unit: mm)

2 有限元模型的建立

2.1 简化与假设

实际的钨/钢扩散焊过程十分复杂, 为了简化计算, 做如下几点假设。

1) 接头升温过程中, 界面仅发生微弱反应或不发生反应, 母材和中间层材料可以自由伸展, 在此过程中接头产生的残余应力很小, 将其忽略。

2) 在焊接温度为 1050 °C 下保温 1 h 的过程中, 接头界面形成完好的扩散层以及金属间化合物层, 假定各层之间结合良好、没有缺陷, 并且因这 1 h 内接头温度一直为 1050 °C, 各材料没有膨胀与收缩效应, 因此, 同样不产生残余应力。

3) 接头在由 1050 °C 冷却至室温的过程中, 因接头各材料间已经形成完好的反应层, 母材及中间层材料不能自由伸展, 各材料间热膨胀系数的差异使各材料收缩速度不一致而产生残余应力。

4) 通过扫描电镜对扩散焊接头焊缝截面分析可知, 扩散焊过程中钨与钒、钒与镍、钒与铜、铜与钢之间会形成界面反应层, 但是这些界面反应层都极薄, 对扩散焊接头整体残余应力的分布影响较小, 因而本研究中在对接头残余应力进行有限元计算时忽略了这些反应层的影响。

2.2 材料性能参数

影响钨/钢扩散焊接头残余应力的主要材料参数如弹性模量、热膨胀系数、屈服强度、泊松比等均考虑了温度变化的影响(见表1),表1中未显示的温度对应的材料性能均通过线性拟合得到。并对钢、镍、钒和铜采用双线性模型,考虑应变强化对接头残余应力的影响。

2.3 有限元模型

钨、钢和中间层皆为轴对称的圆柱形,焊接过程

中接头上施加的均匀分布载荷也呈轴对称分布。此外,钨/钢接头尺寸较小,在真空炉温度变化过程中,接头温度可视为与炉内温度一致且均匀分布。因此,可以采用二维轴对称模型分析接头扩散焊过程。取钨/钢扩散焊接头半截面建立模型,采用Plane 182单元(选择轴对称属性)对模型进行网格划分。因中间层、中间层附近的母材以及接头的自由边界处残余应力变化梯度较大,因此,在这3个位置采用Ansys网格局部细化功能进行网格细化,中间层及其附近单元划分极细,模型自由边界处网格划分较细,整个钨/钢扩散焊接头

表1 有限元模拟所使用材料的物性参数

Table 1 Physical and mechanical properties of materials employed in FEA

Material	Temperature/°C	Elastic modulus/MPa	Poisson ratio	CTE/ $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Yield strength /MPa
W	20	397938	0.275	4.65	1360.5
	200	397270	0.28	4.71	1154.17
	400	394480	0.283	4.86	947.86
	600	389508	0.286	5.0	764.79
	700	386210	0.289	5.07	681.67
	900	377970	0.292	5.22	531.74
	1050	370370	0.3	5.31	433.09
FS	20	217260	0.31	10.4	500
	200	207327	0.31	11.2	453
	400	197123	0.31	11.9	402
	600	177589	0.31	12.5	194
	700	161024	0.31	12.6	100
	900	155800	0.31	12.8	21
	1050	130000	0.31	12.9	15
Ni	20	208000	0.31	15.45	148
	127	204000	0.31		153
	227	197000	0.31		140
	327	190000	0.31	16.1	138
	427	183000	0.31		115
	527	174000	0.31	16.65	100
	627	166000	0.31		69
	727	158000	0.31	17.75	59
	827	150000	0.31		45
	1100	142000	0.31	19.85	20
V	20	127600	0.365	7.8	380
	1050	110000	0.365	10.0	100
Cu	20	130000	0.35	17.2	350
	200	106000	0.35	18.5	150
	400	70735	0.35	20.0	80
	600	20151	0.35	20.1	10
	800	7000	0.35	20.2	5
	1050		0.35	20.3	

的二维轴对称模型及其网格划分如图 3 所示。

整个模型的对称轴为 Y 轴, 焊接过程中 Y 轴上的节点不能在 X 轴方向产生位移, 因此, 对 Y 轴上的节点施加位移边界条件 $X=0$ 。钢的下表面(X 轴所在面)位于固定支座上, 不产生 Y 方向的位移, 因此, 对 X 轴上的节点施加位移边界条件 $Y=0$ 。模型的外部载荷主要包含施加在钨上表面的均匀分布载荷 $p=10$ MPa 与温度载荷。模型的初始温度设定如下: 扩散焊温度 1050 $^{\circ}\text{C}$, 冷却速度 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

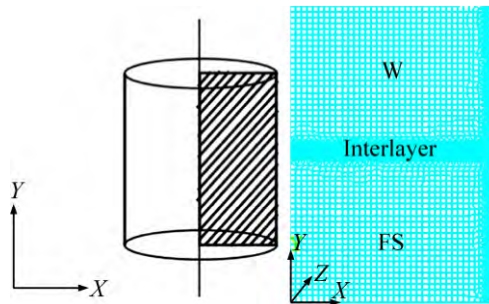


图 3 钨/钢扩散焊接头的二维轴对称模型及其网格划分
Fig. 3 2D model and grid of W/Steel joint

3 结果与讨论

3.1 残余应力分布

BASUKI 等^[18]研究了钨与钢直接扩散焊, 发现钨/钢接头残余应力极大, 进行热处理时, 接头因扩散界面产生裂纹而失效。THOMAS 等^[14]在钢基体上进行钨涂层时, 发现在钨与钢界面及其附近会产生极大的残余应力, 极大的残余应力使得靠近钢基体附近的钨中产生大量裂纹, 并对钨与钢界面及其附近的应力场进行了数值模拟, 结果表明残余应力最大值达 1.1 GPa。本文作者对不添加中间层的钨/钢扩散焊接头进行了残余应力的数值模拟, 发现靠近钨/钢界面附近的钨内部最大径向残余压应力 σ_x 达 -1093 MPa, 与 THOMAS 等^[14]的模拟值较为接近。由于钨/钢直接扩散焊接头残余应力极大, 为了缓和接头残余应力, 考虑在钨与钢之间添加一层 V 层, 但 V 易与钢中的元素 C 形成脆性金属碳化物, 且 V 的塑性较差, 单独采用 V 层仍会导致接头残余应力较大, 因此, 考虑在钨与钢之间添加一层塑性较好的过渡层, 如塑性较好的 Ni 层, 并对钨/钒/镍/钢扩散焊接头进行了残余应力的有限元分析。

钨和扩散焊过程中形成的金属间化合物都是脆性材料, 不能承受较大的应力与应变, 且接头残余应力

较大的部位主要在中间层及其附近(无中间层钨/钢接头为钨与钢界面附近)^[10, 18], 这样接头中间层及其附近的钨基体中的残余应力比其他部位残余应力的危害大得多。又因实验所取抗拉标准试样均取自钨/钢接头中心轴附近 8 mm 以内区域, 因此, 本文作者只分析接头中心轴附近 8 mm 以内中间层及其附近的钨基体内的残余正应力 σ_x 、 σ_y 和 σ_z 。

因接头为轴对称模型, 与对称轴垂直的两个方向的残余应力 σ_x 和 σ_z 在靠近中心轴 8 mm 以内区域的大小及分布均极为相似, 因此, 只分析 σ_x 与 σ_y 。图 4(a) 和(b)所示分别是钨/钒/镍/钢扩散焊接头径向残余应力 σ_x 与轴向残余应力 σ_y 的分布云图。由图 4(a)可知, 中间层附近的钢内 σ_x 均为较大的拉应力, 且其在中心轴附近取最大值 577.395 MPa; 中间层附近的钨内 σ_x 均为极大的压应力, 且其在中心轴附近取最大值 -951.361 MPa(较无中间层钨/钢扩散焊接头最大 σ_x 值降低 142 MPa); 整个中间层区域内 σ_x 均为较大拉应

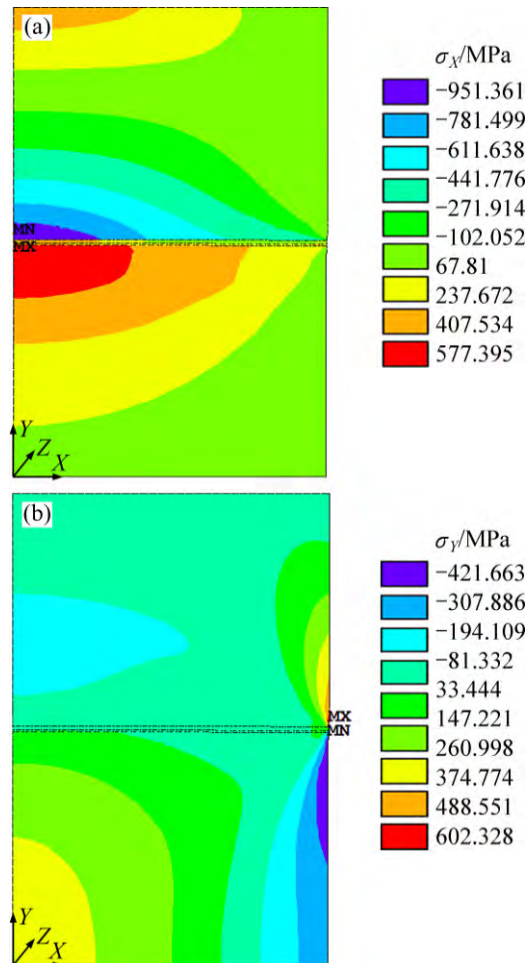


图 4 钨/钒/镍/钢接头残余应力分布图
Fig. 4 Residual stress distribution of W/V/Ni/FS joint:
(a) Radial stress σ_x ; (b) Axial stress σ_y

力。由图 4(b)可知, 靠近中心轴(8 mm 以内区域)的中间层和中间层附近的钨及钢中的轴向残余应力 σ_Y 值均很小(-30~110 MPa)。

虽然钨/钒/镍/钢扩散焊接头相比无中间层的钨/钢扩散焊接头残余应力大为降低, 且避免了脆性 VC 的生成, 但 V 与 Ni 仍能形成少量 V-Ni 金属间化合物。因 Cu 不与 V 和钢生成金属间化合物, 且其塑性比 Ni 的塑性更好, 所以, 为了进一步降低接头的残余应力并减少接头金属间化合物的生成, 使用 Cu 层代替 Ni 层, 并对 W/V/Cu/FS 扩散焊接头进行残余应力的有限元分析。

图 5(a)和(b)所示分别是钨/钒/铜/钢扩散焊接头径向残余应力 σ_X 与轴向残余应力 σ_Y 的分布云图。由图 5 可知, 钨/钒/铜/钢扩散焊接头的残余应力 σ_X 和 σ_Y 分布

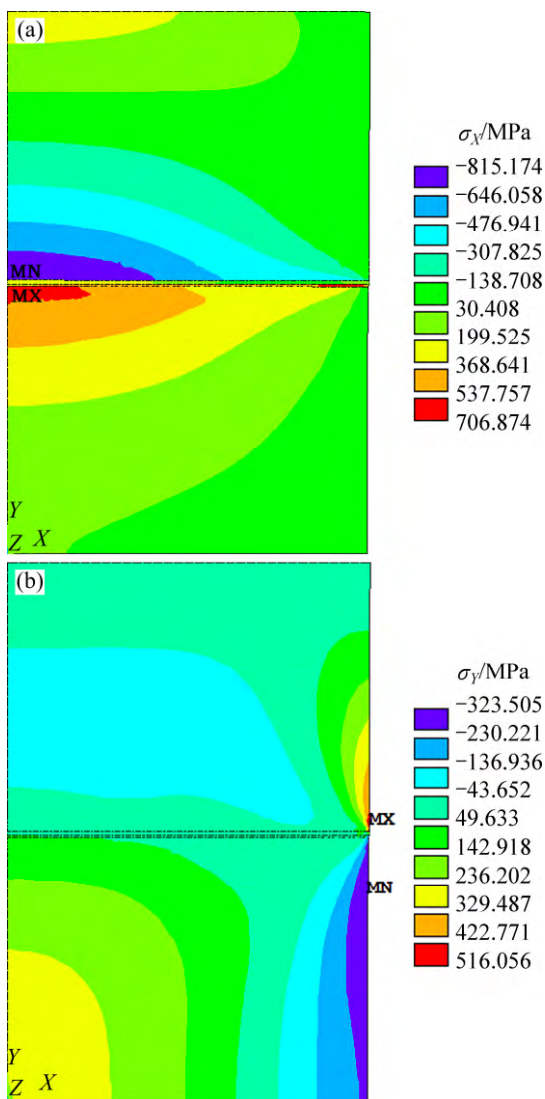


图 5 钨/钒/铜/钢接头残余应力分布
Fig. 5 Residual stress distribution of W/V/Cu/FS joint: (a) σ_X ; (b) σ_Y

状态以及其最大值和最小值所取得的位置与钨/钒/镍/钢扩散焊接头基本一致, 但大小有很大差异, 钨/钒/铜/钢扩散焊接头中间层附近钨内 σ_X 最大值为 -815.174 MPa(较钨/钒/镍/钢扩散焊接头降低 136 MPa)。

图 6(a)和(b)所示分别为不同中间层状态下钨/钢扩散焊接头距离中心轴 8 mm 以内并离中间层 0.2 mm 处(路径见图 4(a), 以下统称路径 A)的钨中 σ_X 和 σ_Y 的分布对比图。由图 6(a)可知, 沿路径 A 3 种不同中间层钨/钢扩散焊接头的 σ_X 值均在中心轴附近($X=0$)取最大值, 其最大值分别为 -1066、-923、-797 MPa, σ_X 随着 X 的增大而降低, 并在 $X=8$ mm 处取得最小值; 在整个 X 区间内, $\sigma_{X1} > \sigma_{X2} > \sigma_{X3}$ ($X1$ 表示无中间层, $X2$ 表示 V/Ni 中间层, $X3$ 表示 V/Cu 中间层)。由图 6(b)可知, 沿路径 A 3 种不同中间层钨/钢接头的 σ_Y 值均很小(-10~15 MPa 之间), 在整个 X 区间内, 各中间层钨/钢扩散焊接头 σ_Y 值相差不大(差值 < 11 MPa)。

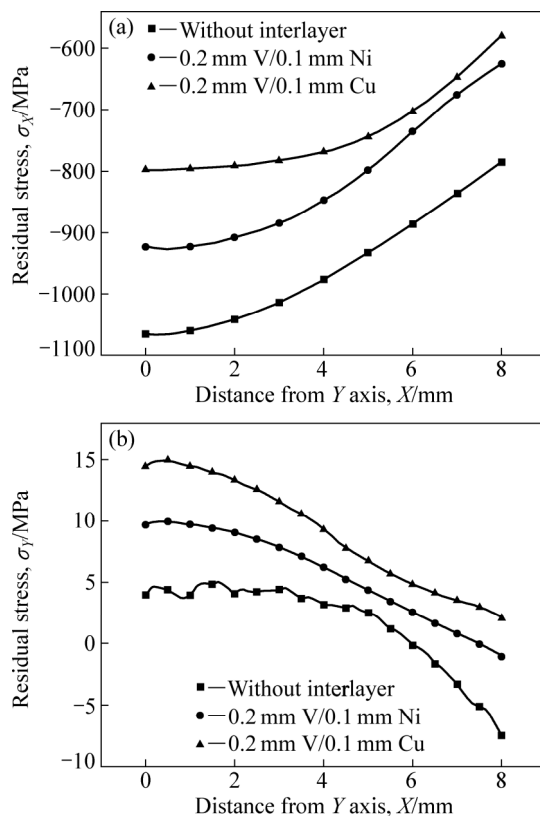


图 6 3 种不同中间层钨/钢扩散焊接头残余应力对比
Fig. 6 Comparison of residual stresses of three different interlayers in W/FS joints: (a) σ_X ; (b) σ_Y

3.2 接头拉伸测试结果与模拟结果对比

抗拉强度为钨/钢焊接接头最重要的性能指标之一, 对 V/Ni 与 V/Cu 两种不同中间层钨/钢扩散焊接头

抗拉标准试样的力学性能进行测试, 测试结果如图 7 所示。由图 7 可知, 钨/钒/镍/钢扩散焊接头平均抗拉强度为 296.3 MPa, 低于钨/钒/铜/钢扩散焊接头的平均抗拉强度(362.6 MPa)。

对钨/钒/镍/钢和钨/钒/铜/钢扩散焊接头拉伸断口进行分析, 接头失效均主要发生在接头界面附近的钨基体内, 断口形貌如图 8(a)所示。钨/钢接头失效原因

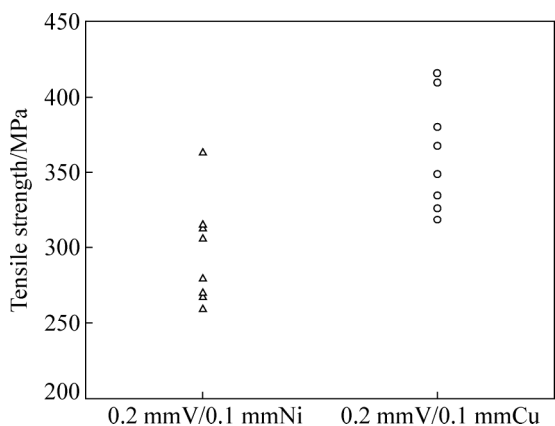


图 7 两种中间层钨/钢接头的抗拉强度分布

Fig. 7 Tensile stress distribution of two interlayers in W/FS joints

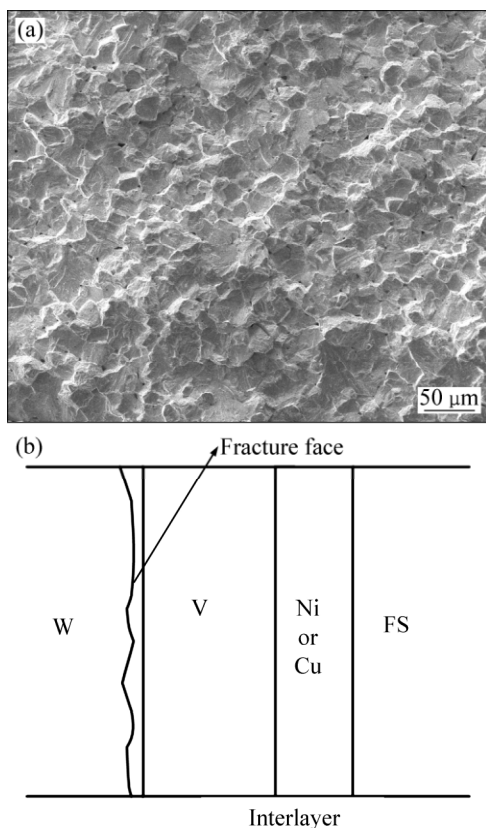


图 8 接头断口的 SEM 像和接头断裂方式示意图

Fig. 8 SEM image of joint fracture (a) and schematic representation of joint fracture model (b)

为靠近 W/V 界面附近的钨基体内部存在最大的残余应力, 这与有限元模拟的钨/钒界面附近的钨基体内部存在最大的径向残余应力的结论相吻合。因此, 可建立钨/钢扩散接头拉伸断裂模型, 如图 8(b)所示。

此外, 钨/钒/镍/钢接头的平均抗拉强度较钨/钒/铜/钢接头的平均抗拉强度约低 66 MPa, 与模拟所得中间层附近钨中径向残余应力 $\sigma_{x2} > \sigma_{x3}$ 相吻合, 进一步证明了有限元分析的可靠性, 有限元分析可以有效地预测接头的断口位置和定性比较不同中间层钨/钢扩散焊接头的抗拉强度。

4 结论

1) 有限元计算结果表明, 钨/钢扩散焊接头存在较大残余应力。靠近中间层附近钨中存在极大的径向压应力, 而在靠近中间层附近的钢处和整个中间层区域均存在较大径向拉应力。

2) 钨/钢直接扩散焊接头残余应力极大; 钨/钒/镍/钢扩散焊接头残余应力有所降低; 钨/钒/铜/钢扩散焊接头残余应力最低。

3) 钨/钢接头抗拉试样断口位置主要处于钨/钒界面附近的钨基体内部, 而此位置为径向残余压应力 σ_x 模拟值最高的部位, 钨/钒/镍/钢扩散焊接头的平均抗拉强度较钨/钒/铜/钢扩散焊接头的平均抗拉强度低, 与模拟所得中间层附近钨中径向残余应力 $\sigma_{x2} > \sigma_{x3}$ 相吻合, 验证了有限元分析的可靠性。

REFERENCES

- [1] NORAJITRA P, GINIYATULIN R, HOLSTEIN N, IHLI T, KRAUSS W, KRUESSMANN R, KUZNETSOV V, MAZUL I, OVCHINNIKOV I, ZEEP B. Status of He-cooled divertor development for DEMO[J]. Fusion Engineering and Design, 2005, 75/79: 307-311.
- [2] NORAJITRA P, GINIYATULIN R, KUZNETSOV V, MAZUL I V, RITZ G. He-cooled divertor for DEMO: Status of development and HHF tests[J]. Fusion Engineering and Design, 2010, 85(10/12): 2251-2256.
- [3] SIMONOVSKI I, KONCAR B, CIZELJ L. Thermo-mechanical analysis of a DEMO divertor cooling finger under the EFREMOV test conditions[J]. Fusion Engineering and Design, 2010, 85(1): 130-137.
- [4] WEBER T, AKTAA J. Numerical assessment of functionally graded tungsten/steel joints for divertor applications[J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86(2/3): 220-226.
- [5] LIU W S, CAI Q S, MA Y Z, WANG Y Y, LIU H Y, LI D X.

- Microstructure and mechanical properties of diffusion bonded W/steel joint using V/Ni composite interlayer[J]. *Materials Characterization*, 2013, 86: 212–220.
- [6] NORAJITRA P, GERVASH A, GINIYATULIN R, HIRAI T, JANESCHITZ G, KRAUSS W, KUZNETSOV V, MAKHANKOV A, MAZUL I, OVCHINNIKOV I, REISER J, WIDAK V. Helium-cooled divertor for DEMO: Manufacture and high heat flux tests of tungsten-based mock-ups[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, 386/388: 813–816.
- [7] MISSIAEN J M, RAHARIJAONA J J, ANTONI A, PASCAL C, RICHOU M, MAGAUD P. Design of a W/steel functionally graded material for plasma facing components of DEMO[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, 416(3): 262–269.
- [8] CHEHTOV T, AKTAA J, KRAFT O. Mechanical characterization and modeling of brazed EUROFER-tungsten-joints[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 367/370: 1228–1232.
- [9] 张小英, 张福勤, 夏莉红, 于奇. 连接温度对 C/C 复合材料及 Cu 连接接头残余应力的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(5): 1298–1303.
ZHANG Xiao-ying, ZHANG Fu-qin, XIA Li-hong, YU Qi. Effect of joining temperature on residual stress of C/C composites and Cu joints[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(5): 1298–1303.
- [10] TRAVESSA D, FERRANTE M, OUDEN G. Diffusion bonding of aluminium oxide to stainless steel using stress relief interlayers[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 337(1/2): 287–296.
- [11] 黄达, 赵熹华, 宋敏霞, 冯吉才. TC4/ZQSn10-10 扩散连接接头残余应力的数值模拟[J]. *吉林大学学报*, 2007, 37(5): 1078–1082.
HUANG Da, ZHAO Xi-hua, SONG Min-xia, FENG Ji-cai. Finite element modeling of residual stresses in the diffusion bonding joints of TC4/ZQSn10-10[J]. *Journal of Jilin University*, 2007, 37(5): 1078–1082.
- [12] ZHONG Z H, HINOKI T, KOHYAMA A. Effect of holding time on the microstructure and strength of tungsten/ferritic steel joints diffusion bonded with a nickel interlayer[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 518(1/2): 167–173.
- [13] KALIN B A, FEDOTOV V T, SEVRJUKOV O N, MOESLANG A, ROHDE M. Development of rapidly quenched brazing foils to join tungsten alloys with ferritic steel[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2004, 329/333: 1544–1548.
- [14] THOMAS G, VINCENT R, MATTHEWS G, DANCE B, GRANT P S. Interface topography and residual stress distributions in W coatings for fusion armour applications[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 477(1/2): 35–42.
- [15] ZHONG Z H, JUNG H C, HINOKI T. Effect of joining temperature on the microstructure and strength of tungsten/ferritic steel joints diffusion bonded with a nickel interlayer[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(13): 1805–1810.
- [16] BASUKI W W, AKTAA J. Investigation of tungsten/EUROFER97 diffusion bonding using Nb interlayer[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2011, 86(9/11): 2585–2588.
- [17] 杨宗辉, 沈以赴, 李晓泉. 自生成钨基高密度合金中间层的钨/钢真空扩散连接[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(4): 58–63.
YANG Zong-hui, SHEN Yi-fu, LI Xiao-quan. Diffusion bonding tungsten to steel in vacuum with tungsten heavy alloy interlayer formed on tungsten surface[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 49(4): 58–63.
- [18] BASUKI W W, AKTAA J. Investigation on the diffusion bonding of tungsten and EUROFER97[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, 417: 524–527.
- [19] BASUKI W W, AKTAA J. Diffusion bonding between W and EUROFER97 using V interlayer[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2012, 429: 335–340.
- [20] 马运柱, 王艳艳, 刘文胜, 蔡青山. 扩散焊接钨/钒/钢体系的界面结构及力学性能[J]. *焊接学报*, 2013, 34(12): 17–20.
MA Yun-zhu, WANG Yan-yan, LIU Wen-sheng, CAI Qing-shan. Microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints between tungsten and ferritic steel using a vanadium interlayer[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(12): 17–20.

(编辑 陈卫萍)