

Ti(C, N)/40Cr 钎焊接头残余应力数值计算

吴铭方, 周小丽, 马 骋, 杨 沛

(江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室, 江苏 镇江 212003)



吴铭方

摘 要: 使用有限元法模拟计算了 Cu 箔、Mo 箔对缓解 Ti(C, N)/40Cr 钎焊接头残余应力的效果。结果表明, 无缓冲层直接钎焊, 在 Ti(C, N) 金属陶瓷外侧靠近钎缝的狭小区域内产生较高的拉伸残余应力, 其峰值达到 268 MPa; 使用屈服极限低的 Cu 箔, 接头最大残余拉应力下降到 98 MPa, 缓解应力效果显著, 但最大残余拉应力所处区域与无缓冲层相比没有明显变化; 使用线膨胀系数小的 Mo 箔, 应力峰值出现在 Mo 箔中, 同时缓解应力效果不如 Cu 箔; 无论使用 Cu 箔还是 Mo 箔, 最佳厚度约为 0.8 mm 左右, 大于或小于该厚度值, 应力得不到有效释放。

关键词: Ti(C, N)基金属陶瓷; 40Cr 钢; 钎焊; 应力; 数值计算

中图分类号: TG407 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2006)12-065-04

0 序 言

Ti(C, N)金属陶瓷是在 TiC 基金属陶瓷基础上发展起来的一种具有高硬度、高强度、优良的高温 and 耐磨性能、良好的韧性以及密度小、导热率高的新型材料, 其主要成分是 TiC—TiN, 以 Co—Ni 为粘结剂, 以其它碳化物为添加剂, 如 WC, Mo₂C, (Ta, Nb)C, Cr₃C₂, VC 等。用其替代 WC 基硬质合金刀具, 并与 40Cr 钢焊接, 对于加工普通碳素钢、合金钢及铸铁等效果显著^[1]。

金属陶瓷由金属相和陶瓷相构成, 说明金属陶瓷中即存在共价键、离子键, 同时也存在金属键^[2]。由此可知, Ti(C, N)金属陶瓷与 40Cr 钢钎焊的主要难点不是 Ti(C, N)金属陶瓷润湿性问题, 而是如何解决由于两者线膨胀系数、屈服极限、弹性模量等参数不匹配所造成的高应力梯度问题。可以说, 计算分析 Ti(C, N)金属陶瓷/40Cr 钢钎焊接头残余应力, 优化其应力分布状态是实现其连接的关键所在。

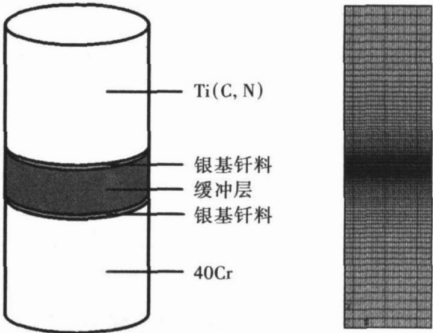
为了探讨残余应力的分布, 文中以 Ti(C, N)金属陶瓷/钎料/应力缓冲层/钎料/40Cr 钢圆柱形钎焊接头为研究对象, 采用有限元分析软件, 模拟计算不同厚度的 Cu 箔、Mo 箔应力缓冲层材料对缓解接头残余应力的作用机制, 分析比较在特定的钎焊工艺参数条件下, 力学、物理性能不同的中间层对缓解接头残余应力的作用效果, 以期寻求最佳的

匹配条件。

1 有限元模型及计算假设

模拟结构如图 1a 所示, 选择典型的 Ti(C, N) 金属陶瓷和 40Cr 钢作为研究对象, 尺寸均为: 直径 $\Phi 10$ mm, 高度 10 mm; 采用 Cu 箔和 Mo 箔作为应力缓冲层, 厚度为 0.6 mm, 0.8 mm, 1 mm 和 3 mm; 钎料选用 Ag 基钎料。

二维有限元网格划分如图 1b 所示, 采用非均匀的网格划分方式, 在界面和应力缓冲层附近网格划分较密集, 以确保计算结果的精确性, 在离界面较远处采用较疏的网格划分。该模型使用 8 节点等参平面应力单元。由于研究对象为圆柱形对称结构, 因此文中只在二维坐标下选取其一半作为研究对象。



(a) 模型图 (b) 有限元网格划分图

图 1 接头模拟结构及其二维有限元网格划分图

Fig. 1 Configuration and 2 dimensional FEM mesh map of joint

使用 ANSYS 有限元分析软件进行计算, 采用弹塑性有限元理论进行求解, 边界条件包括在中心轴上施加径向位移为 0 的拘束, 在模型底边施加轴向位移为 0 的拘束。

在进行有限元计算时作如下简化: 模型温度场均匀一致; Ti(C, N)金属陶瓷的物理及力学性能参数固定不变, 40Cr 钢、Cu 箔、Mo 箔的物理和力学性能参数是温度的函数, 计算中所用数据如表 1 所示; 不考虑材料应变强化效应对残余应力的影响; 外加载荷仅有温度载荷; 升温、保温及降温至 1 053 K 的过程无热应力, 仅对 1 053 K 冷却至室温 293 K 的过程进行数值计算。

表 1 材料物理及力学性能参数					
Table 1 Physical and mechanical properties of materials					
材料	温度 T/K	线膨胀系数 $\alpha_l/(10^{-6}K^{-1})$	弹性模量 E/GPa	规定非比例延伸 强度 $\sigma_{0.2}/MPa$	泊松比 μ
Ti(C, N)	—	5.6	450	650	0.24
	293	13.0	211	789	
	473	13.2	202	706	
40Cr	573	13.4	195	681	0.28
	673	13.9	186	613	
	773	14.2	177	490	
	873	14.4	165	431	
	293	17.1	108	69	
Cu	473	17.2	—	—	0.36
	573	17.8	105	62	
	673	18.1	—	56	
	773	18.3	101	—	
	873	20.3	98	27	
Mo	293	4.9	337	380	0.30
	473	5.7	322	340	
	673	6.0	312	320	
	873	6.2	301	280	

由于钎焊结构件应力分布往往呈现复杂的三轴应力状态, 精确计算和描述应力大小及分布状态难度较大。大量研究证实, 轴向残余应力是造成结构破坏的主要因素, 因此文中重点探讨轴向残余应力的大小及分布特征。

2 模拟结果及分析

2.1 无缓冲层接头轴向残余应力分布

在无缓冲层条件下, Ti(C, N)金属陶瓷/40Cr 钢钎焊接头轴向残余应力等值分布如图 2 所示, Ti(C, N)金属陶瓷一侧承受拉应力, 且残余拉应力峰值位于 Ti(C, N)金属陶瓷的外侧, 靠近钎缝的很小区域

内, 呈现典型的高拉伸残余应力现象。40Cr 钢一侧承受压应力, 从拉应力到压应力存在很大的应力梯度。Ti(C, N)金属陶瓷的线膨胀系数为 $5.6 \times 10^{-6} K^{-1}$, 而 40Cr 钢为 $13.5 \times 10^{-6} K^{-1}$, 两者线膨胀系数相差 1 倍左右, 接头从 1 053 K 冷却到室温的过程中, 造成试样径向收缩不均匀, 即 Ti(C, N)金属陶瓷收缩量较小, 而 40Cr 钢的收缩量较大, 由此在接头中产生剪应力和附加弯矩, 并由附加弯矩在 Ti(C, N)金属陶瓷靠近钎缝一侧产生轴向拉应力、周向压应力和径向压应力, 同时在 40Cr 钢中生成与之相平衡的残余应力。

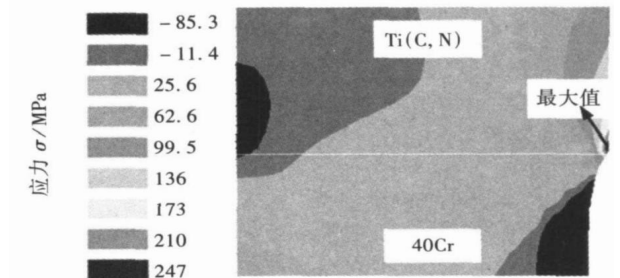


图 2 无应力缓冲层接头轴向应力等值分布图
Fig. 2 Longitudinal residual stress distribution of brazed joint without stress reduction interlayer

大量研究证实^[3~5], 异种材料连接、特别是线膨胀系数、屈服极限、弹性模量相差较大的异种材料连接, 其接头残余应力的分布特征表现在拉应力出现在线膨胀系数小、屈服极限高、弹性模量大的材料一侧, 且残余应力峰值高, 往往达到材料的强度极限。加入应力缓冲层对于改善接头残余应力的分布, 有效降低残余应力峰值将起到积极的作用。

2.2 不同缓冲层材料及厚度对轴向残余应力大小及分布的影响

图 3 反映了不同缓冲层材料及厚度对轴向残余应力分布的影响。选用 Cu 箔作为应力缓冲层时, 无论厚度是 1 mm 还是 3 mm, 其应力分布状况完全相同, 表现在 Ti(C, N)金属陶瓷一侧为拉应力, 而 40Cr 钢和 Cu 箔一侧为压应力, 且最大轴向残余拉应力位于 Ti(C, N)金属陶瓷外侧, 靠近 Cu 箔应力缓冲层与 Ti(C, N)金属陶瓷钎缝界面。

与选择 Cu 箔作为应力缓冲层相比, 选用 Mo 箔时残余应力分布特征发生了明显的变化, 即残余拉应力分布于 Ti(C, N)金属陶瓷和 Mo 箔中, 残余压应力分布于 40Cr 钢中, 且残余应力峰值不是位于 Ti(C, N)金属陶瓷外侧, 而是转移到了 Mo 箔上, 靠近 40Cr 钢/Mo 箔钎缝界面处。

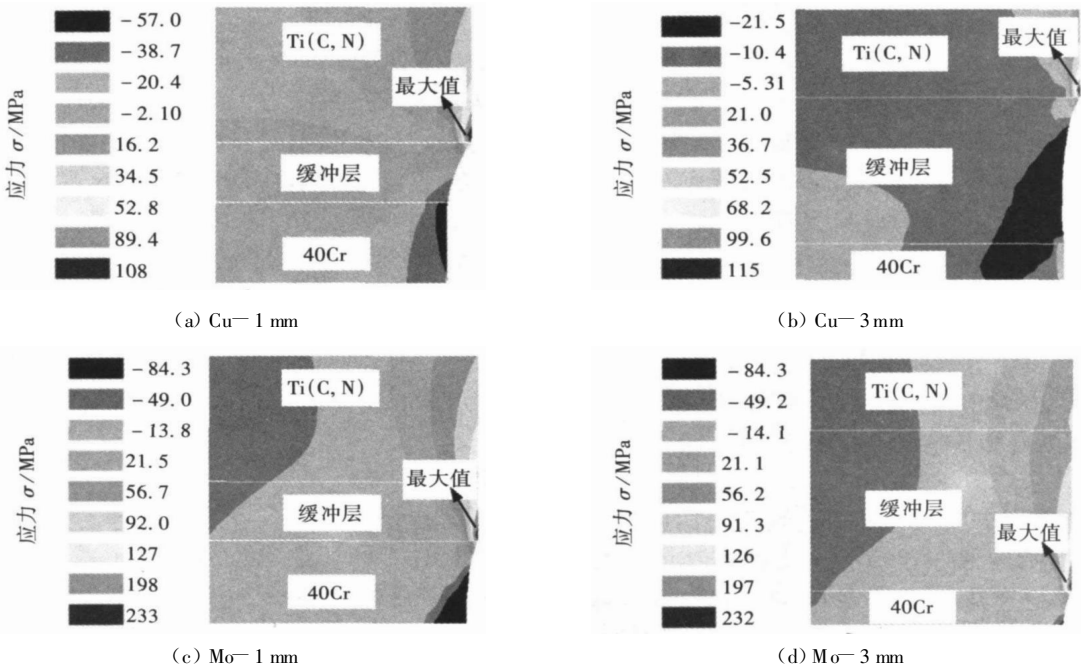


图 3 加应力缓冲层接头轴向应力等值分布图

Fig. 3 Longitudinal stress distribution of brazed joint with different stress reduction interlayers

图 4 反映了距侧面 0.2 mm 接头轴向残余应力的
的大小及分布特征。中间层厚度对轴向残余应力的
影响见图 5。由图 4 可以看出，使用 Cu 箔、Mo 箔作

为应力缓冲层，最大应力峰值出现的位置与其厚度
无关，即 Cu 箔作为应力缓冲层时，最大应力始终位
于 Ti(C,N)金属陶瓷一侧靠近钎缝的区域，而 Mo 箔
作为应力缓冲层时，最大应力始终位于 Mo 箔一侧
靠近钎缝的区域。另外 Cu 箔缓解应力效果较好，
1 mm和 3 mm Cu 箔的接头最大应力分别下降到 98
MPa 和 115 MPa。由于 Mo 的屈服极限较高，缓解应
力效果较差，Mo 箔厚度为 1 mm 时接头最大拉应力
达到了 201 MPa，3 mm Mo 箔达到了 228 MPa。由图 5
可知，Cu 箔和 Mo 箔缓解应力效果的趋势基本相似，
即当厚度小于 0.8 mm 时，随着厚度增加，轴向残余
应力峰值显著降低；对于 1 mm Cu 箔而言应力从 268
MPa 下降到 98 MPa，对于 1 mm Mo 箔而言从 268 MPa
下降到 201 MPa；厚度大于 0.8 mm，随着应力缓冲层
厚度的增加轴向残余应力峰值增大；厚度超过

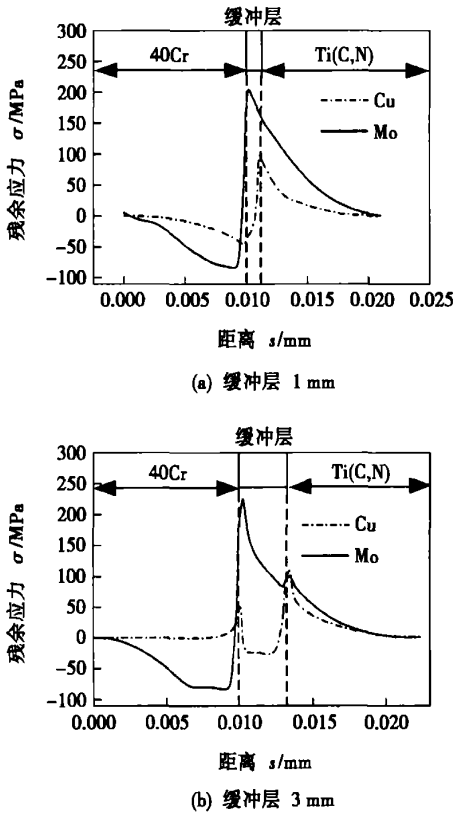


图 4 距侧面 0.2 mm 接头轴向残余应力分布

Fig. 4 Longitudinal residual stress distribution at face of 0.2 mm distance from side

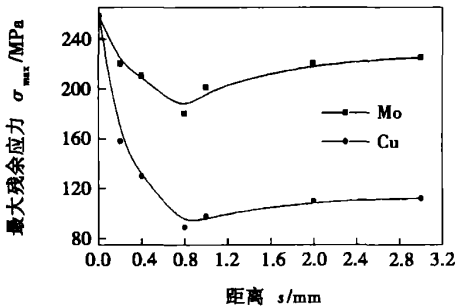


图 5 应力缓冲层厚度对最大轴向残余应力的影响

Fig. 5 Effect of stress reduction interlayer thickness on maximum longitudinal residual stress in brazed joints

2.5 mm, 轴向残余应力峰值增大趋势减缓。

综合以上有限元模拟结果不难发现, 由于 Ti (C,N)金属陶瓷与 40Cr 钢在力学性能、物理性能方面存在较大的差异, 极易在靠近钎缝的 Ti (C,N)金属陶瓷一侧形成高应力梯度, 即接头残余应力水平存在较大的不均匀性, 造成接头在低的工作应力下发生破坏。使用钎焊方法直接连接 Ti (C,N)金属陶瓷/40Cr 钢, 接头残余应力峰值达到了 268 MPa, 使用应力缓冲层可以有效降低接头残余应力峰值, 其中使用屈服极限低的 Cu 箔对缓解残余应力特别有效, 而使用线膨胀系数小的 Mo 箔作为应力缓冲层可以调整残余应力场的分布状态。

大量研究表明, 近缝区陶瓷侧高的拉伸残余应力是造成接头在低工作应力下失效破坏的主要原因。结合本研究结果可以认为, 对于连接线膨胀系数小、屈服极限高的材料与线膨胀系数大、屈服极限低的材料时, 采用所谓硬质中间层可以调整接头残余应力场的分布状态, 有效抑止初始裂纹在线膨胀系数小、屈服极限高的材料一侧萌生, 但其缓解应力效果较差, 从降低残余应力峰值角度考虑应选取屈服极限低的中间层材料。

3 结 论

(1) 无应力缓冲层直接钎焊 Ti (C,N)金属陶瓷/40Cr 钢, 在 Ti (C,N)金属陶瓷外侧靠近钎缝的狭小区域内产生高的拉伸残余应力, 其峰值达到

268 MPa。

(2) 使用屈服极限低的 Cu 箔作为应力缓冲层, 接头最大残余拉应力下降到 98 MPa, 所处区域与无应力缓冲层接头无明显变化; 使用线膨胀系数小的 Mo 箔, 应力峰值不在位于 Ti (C,N)金属陶瓷一侧, 而是转移到应力缓冲层 Mo 箔中, 缓解应力效果与 Cu 箔相比明显下降。

(3) 无论使用 Cu 箔还是 Mo 箔作为应力缓冲层, 最佳厚度约 0.8 mm 左右, 大于或小于该厚度值, 残余应力得不到有效释放。

参考文献:

[1] 徐 强, 张幸红, 曲 伟, 等. 金属陶瓷的研究进展[J]. 硬质合金, 2002, 19(4): 221—225.

[2] 刘 宁, 黄新民, 周 杰, 等. Ti (C,N)基金属陶瓷显微组织的研究[J]. 硅酸盐学报, 1999, 27(12): 750—754.

[3] 黄小丽, 林 实, 肖纪美. 缓冲层化学成分对钎焊接头强度的影响[J]. 焊接学报, 1998, 19(4): 215—220.

[4] Zhang J X, Chandel R S, Chen Y Z, *et al.* Effect of residual stress on the strength of an alumina-steel joint by partial transient liquid phase(PTLP) brazing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122(2): 220—225.

[5] 何 鹏, 冯吉材, 钱乙余. 异种材料扩散连接接头残余应力的分布特征及中间层的作用[J]. 焊接学报, 2002, 23(2): 76—80.

作者简介: 吴铭方, 男 1962 年 7 月出生, 副教授。主要从事异种材料连接研究, 发表论文 15 余篇。

Email: Wu _MingFang@163. com

spot surface.

Key words: resistance spot welding; image of welding spot surface; image processing; Radical Basic Function neural network; quality monitoring

Interface microstructure and mechanical property of CMT welding brazed joint between aluminum and galvanized steel sheet

SHI Chang-liang, HE Peng, FENG Ji-cai, ZHANG Hong-tao (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p61—64

Abstract: Welding-brazing experiment of aluminum and galvanized steel was conducted with cold metal transfer method. The interface microstructure and mechanical property of the joint were analyzed by SEM, EDAX and transverse tensile test. The results indicate that good lap joint between aluminum and galvanized steel sheet can be made in appropriate parameters. The interface turns to be thin from middle to the edge with the components changing from FeAl_3 intermetallics to a compound of α solid solution and FeAl_3 intermetallics. Meanwhile, a rich-zinc zone composed of α solid solution and aluminum at the edge of weld metal exists. In the tensile test, fracture appears in the heat affected zone of aluminum base metal, and its tensile strength is 72.09 MPa.

Key words: welding-brazing; cold metal transfer; intermetallics; interface; rich-zinc zone

Numerical calculations of residual stress in Ti(C, N)/40Cr brazed joint

WU Ming-fang, ZHOU Xiao-li, MA Cheng, YANG Pei (Provincial Key Lab of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China). p65—68

Abstract: To obtain the effect of copper and molybdenum interlayer on the residual stress of Ti(C, N)/40Cr brazed joint, the finite element method was conducted. The simulation results showed that the high tensile stress concentration with a maximum stress magnitude of 268 MPa happens at the narrow zone near ceramic/steel seam in the ceramic side without interlayer, but when the metal with copper foil of low yield stress was used as interlayer, the residual stress can be significantly decreased, and the maximum residual tensile stress reduce to 98 MPa, and there are to change of maximum genetic zone in brazed joint with interlayer and without interlayer. When the low linear expansion coefficient metal molybdenum was used, the maximum stress occurred at the molybdenum interlayer zone, which gave a less residual stress reduction effect than copper foil. It also can be seen that the optimum interlayer thickness is about 0.8 mm for either interlayer kinds, and the thickness with thicker or thinner than 0.8 mm will be harmful to stress reduction effect.

Key words: Ti(C, N) based metal ceramic; 40Cr steel; brazing; residual stress; numerical calculation

Effects of shielding gas on microstructure and number of gas pore in high strength aluminum alloys weld

XU Liang-hong, TIAN Zhi-ling, ZHANG Xiao-mu, PENG Yun (State Key Laboratory

of Advanced Steel Processes and Products, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China). p69—73

Abstract: The effect of Ar and He dual mixed shielding gas and Ar, He and CO_2 ternary mixed shielding gas on the number of the gas pore and microstructure in the weld was studied in arc welding of 2519 aluminum alloy. Results indicate that, compared with using Ar alone, the number and the size of gas pore is reduced by using Ar and He dual mixed shielding gas and the dual mixed shielding gas is also helpful for the transition of columnar crystal to equiaxed crystal. When the percentage of He reaches 70%, the number and the size of the gas pore are reduced significantly, and in weld centre it can get the smallest equiaxed crystal entirely. When filling 1% CO_2 into the dual mixed gas which the ratio of Ar: He is 30:69, the number of the gas pore is further reduced, but there is no evidence to prove that it can affect the microstructure of the weld. The width and the softening extent of the HAZ can also be reduced by filling He into Ar shielding gas.

Key words: high strength aluminum alloy; mixed shielding gas; gas pore; microstructure

Influence of hydrogen on weld metal toughness by self-shielded flux-cored wire welding

SUI Yong-li^{1,2}, DU Ze-yu¹, HUANG Fu-xiang^{1,2}, TIAN Liang³ (1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Pipeline Research Institute of CNPC, Langfang 065001, Hebei, China; 3. Beijing University of Science & Technology, Beijing 100083, China). p74—76

Abstract: The effect of hydrogen content on the low temperature toughness of weld metal was studied by Nick-Break test, low temperature impact test and scanning electron microscopy test, which filled by self-shielded flux-cored welding wire and held different periods in room temperature. The results show that all these conditions such as the high content of hydrogen in self-shielded flux-cored wire, uneasy outflow of hydrogen from the weld metal and the short-lived molten pool, make the content of hydrogen high in weld metal (immediately test after welding). The average value of impact absorbing energy at low temperature is low and the data are disperse under the action of hydrogen and non-metallic inclusion. When the work piece stored 40 days in room temperature, the content of hydrogen decreases and the fish eye decrease or disappear, and the average value of impact absorbing energy at low temperature increase and dispersion of the data decrease.

Key words: self-shielded flux-cored wire; pipeline; fish eye; impact absorbing energy

Performance prediction in spot welding of body galvanized steel sheets based on artificial neural network and its optimization

ZHAO Xin, ZHANG Yan-song, CHEN Guan-long, ZHANG Xiaoyun (School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China). p77—80, 84

Abstract: The performance prediction in spot welding of the galvanized steel sheets are very important in the automobile body manufacturing. So it was studied with galvanized steel sheet GMW2