

Processing and Performance of Brazed Joints Between Ti(C,N)-Based Cermet and 40Cr Steel

Shuzhu Zhou Fuchang Wang Yanhong Ding*

School of Materials Science and Engineering Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan, 412000, China

Abstract

A systematic investigation was conducted on brazing Ti(C,N)-based cermet to 40Cr steel with an AgCuZn active filler metal in a high-frequency induction setup. The microstructure of the fabricated joints was thoroughly characterized using SEM and EDS, and their mechanical performance was assessed via shear testing. This study aimed to determine the optimal brazing parameters and their effect on joint integrity. It was found that sound joints, free of defects and with excellent interfacial bonding, were produced. An optimal brazing temperature of 850 °C yielded the highest shear strength of 220 MPa. Microstructural analysis revealed that the cermet interface was dominated by Ag-based and Zn-based solid solutions, and the failure mode was identified as predominantly brittle fracture.

Keywords

Ti(C,N)-based cermet; AgCuZn filler; induction brazing; interfacial structure

Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr 焊接的工艺及性能研究

周书助 王福昌 丁燕鸿*

湖南工业大学材料科学与工程学院, 中国·湖南 株洲 412000

摘要

本研究采用 AgCuZn 活性钎料, 在高频感应钎焊炉中成功实现了 Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr 钢的连接, 制备出 Ti(C,N) 基金属陶瓷 / AgCuZn / 40Cr 钎焊接头。利用扫描电子显微镜 (SEM) 和能谱分析 (EDS) 等手段, 系统表征了接头的微观组织结构, 并评估了其力学性能。通过实验确定了金属陶瓷与钢材钎焊的最佳工艺温度, 重点分析了钎焊工艺参数对接头剪切强度及微观形貌的影响规律。研究结果表明, 所获钎焊接头组织均匀、无明显缺陷, 钎料与两侧母材间润湿性良好, 并在界面处形成了明显的反应层。当钎焊温度为 850°C 时, 接头剪切强度达到最大值 220 MPa。微观分析显示, 金属陶瓷侧界面区域主要由 Ag 基和 Zn 基固溶体组成, 断口分析表明其断裂模式以脆性断裂为主。

关键词

Ti(C,N) 基金属陶瓷; AgCuZn 钎料; 感应钎焊; 剪切强度; 界面结构

1 引言

金属陶瓷是一种由陶瓷相和金属粘结相组成的复合材料。其中, Ti(C,N) 基金属陶瓷兼具陶瓷与金属的优良特性, 拥有高硬度、高耐温性、优异的耐腐蚀性与耐磨性, 在模具制造和石油化工等领域展现出巨大的应用潜力^[1,2]。然而, 该材料可加工性差, 难以直接制造复杂形状零件, 且通过粉末冶金方法获得的尺寸受限。因此, 将其与 40Cr 钢等金属进行可靠连接, 以制造结构复杂的零部件, 成为扩大其应用的关键。40Cr 钢作为一种应用广泛的合金结构钢, 具有优

良的综合机械性能和可加工性, 被行业广泛认可^[3]。它属于超高强度钢, 具备高强度和韧性, 烹透性良好, 经调质处理后疲劳极限高、抗冲击能力强, 低温韧性亦表现良好, 非常适合用于制造要求高强度和韧性的大中型塑料模具^[4]。高频感应钎焊利用工件在高频交流磁场中产生的感应电阻热进行焊接, 是一种高效、低成本的连接技术。该技术利用趋肤效应实现快速、局部的选择性加热, 热影响区小, 对母材性能影响轻微, 且过程易于控制、热效率高、污染小^[5], 因而在工业连接中应用日益广泛。基于此, 本文采用 AgCuZn 合金作为钎料, 开展 Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr 钢的高频感应钎焊研究, 旨在优化工艺参数, 并系统分析所得接头的界面组织与断裂形貌。

2 实验方案

将 Ti(C,N) 基金属陶瓷加工成尺寸为 100mm × 50mm × 30mm 的立方体, 并将 40Cr 钢加工成

【作者简介】周书助 (1966-), 男, 中国湖南浏阳人, 博士, 教授, 从事粉末冶金材料研究。

【通讯作者】丁燕鸿 (1968-), 女, 中国湖南攸县人, 博士, 副教授, 从事新能源材料研究。

150mm×200mm×40mm 的立方体，在其顶端预留出与金属陶瓷尺寸相匹配的缺口（如图 1 所示）。感应钎焊前进行如下预处理：对真空烧结后的 Ti(C,N) 基金属陶瓷试样进行表面磨平，并去除待焊表面的氧化层。随后使用喷砂机对其待焊面进行喷砂处理，以增加表面粗糙度，从而有效提高钎料与母材的接触面积。最后，将 Ti(C,N) 基金属陶瓷试样置于丙酮溶液中，利用超声波清洗器清洗后晾干。对 40Cr 钢母材同样进行喷砂处理，适当提高其表面粗糙度，随后进行超声波清洗。试验中使用的钎料为片状，厚度为 0.1~0.3mm。感应钎焊前，先用金相砂纸打磨钎料表面以去除氧化皮，再将其剪成与钎焊面形状和大小相近的小片，最后置于丙酮中经超声波清洗。

中频感应钎焊试验采用对接接头形式。操作时，先将钎剂均匀涂覆在钢母材表面，然后依次放置钎料片和 Ti(C,N) 基金属陶瓷母材，并在钎料与金属陶瓷之间再涂一层钎剂。将装配好的母材、钎料与钎剂置于感应加热线圈中，启动中频感应焊机进行加热。钎焊温度设定为 750~900℃，当温度升至 700℃时，在工件表面涂撒焊粉以去除高温形成的氧化膜。随后用铝棒对钎焊结构施加一定压力，并在边缘处使用铝夹固定，采用 20Ag 钎料沿焊缝进行填充。填充完成后保压 5~10 秒，以排除焊缝中多余的钎料和熔渣。钎焊完成后，将试件迅速移入保温箱中进行缓冷（保温冷却 12 小时），直至冷却至室温。随后采用机械方式清理表面残留的钎剂及接头附近加热区的氧化膜。利用剪切强度测试仪对连接件进行剪切强度测试，以评估接头强度；并采用扫描电镜（SEM）观察界面形貌，结合能谱分析（EDS）对局部区域进行成分分析。

3 结果与讨论

3.1 感应钎焊接头的强度分析

采用 Ag20CuZn 钎料感应钎焊 Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr 时，Ag20CuZn 钎料的熔化温度为 690~810℃，感应钎焊温度选择为 810~900℃，为了确定 Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr 的最佳感应钎焊温度，研究了 Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr 的高频感应钎焊过程中钎焊温度对接头界面强度的影响。其中，采用万用剪切强度测试仪检测接头剪切强度，其检测结果如图 1 所示。图 1 可以看出钎焊温度与钎焊接头界面强度之间的关系，钎焊温度较低时，接头强度不高，这是由于钎料的熔化温度（680~750℃）区间较大，温度较低时钎料熔化不充分，流动性差，接触面积小，导致钎焊接头的强度较低。随着钎焊温度的升高，钎焊接头的剪切强度和抗弯强度均增大。这是因为随着钎焊温度的升高，液态钎料的表面张力逐渐降低，钎料对母材的润湿角逐渐减小，润湿性能提高；同时温度的升高增强了钎料金属的流动性，熔融钎料能充分填满母材表面的凹坑，从而增大钎焊接头界面的有效接触面积；钎焊温度继续升高，在 850℃时，接头强度达到最大值，其剪切强度达到 220MPa。然而，钎焊温度

超过 850℃后，母材和钎料的氧化加剧，易造成夹渣等缺陷，而且钎料合金中 Zn 等元素急剧蒸发易产生裂纹和气孔，同时，钎焊温度的提高也使接头残余应力迅速增加，因此钎焊接头结合强度的开始降低。

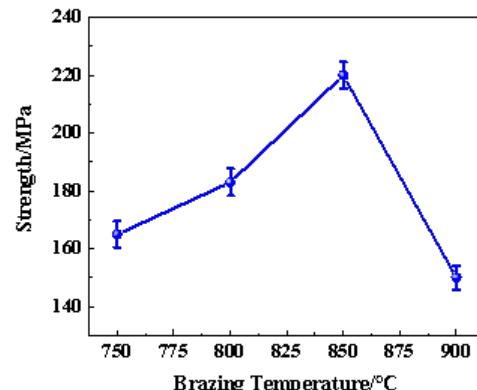


图 1 钎焊温度与钎焊接头界面强度之间的关系

3.2 感应钎焊接头的界面结构分析

在钎焊温度为 850℃时，采用 Ag20CuZn 钎料感应钎焊 Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr 材料，对其接头界面组织进行微观形貌分析。图 2 为 Ti (C, N) 基金属陶瓷 /AgCuZn/40Cr 钎焊接头的微观形貌背散射电子图像，可以看出，钎焊接头中 Ag20CuZn 钎料与两侧母材润湿良好，并形成致密的界面结合，钎料中间层形成密集的银铜共晶花纹，并分布均匀，且在金属陶瓷一侧形成了一条银铜共晶纹路。

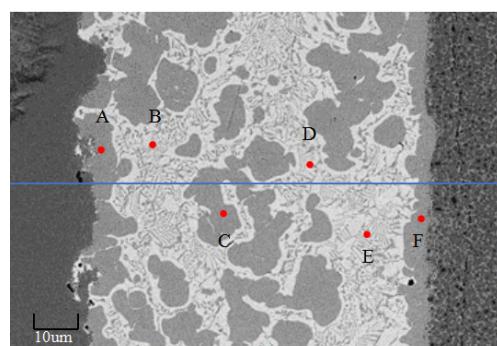


图 2 Ti (C, N) 基金属陶瓷 /AgCuZn/40Cr 钎焊接头的微观形貌背散射电子图像

图 3 为钎焊温度 850℃下的接头线扫描能谱分析图。结果表明，界面上各元素分布均匀，Cu、Ag、Zn 元素分布在整个焊缝中，Ni、Co 元素向焊缝扩散，其中 Cu 元素向金属陶瓷侧有一定的偏析。图 4 为感应钎焊界面主要元素的面扫描能谱图，可以看出，Ti、Fe 的分布情况与线分布测试结果基本吻合。

为了确定 Ti (C, N) 基金属陶瓷 /AgCuZn/40Cr 钎焊接头的反应产物和界面结构。对钎焊温度为 850℃的接头反应区进行能谱点分析，结果如表 1 所示。结合图 4 和表 1 中点 A 可知，40Cr 反应区侧主要由 Ni、Cu 和 Zn 3 种元素组成。

由于 Ti(C, N) 基金属陶瓷中的 Ni 元素扩散能力强，所以在钎焊时 Ni 元素从陶瓷基体中扩散到钎料反应区，并参与反应。中间区主要为钎料成分区，根据图 3 和表 1 中 B、C 点能谱分析结果可知，其主要成分为银基固溶体 / 铜基固溶体。从点 F 中，结合能谱和面分析结果可以发现：感应钎焊由于连接时间短，钎料和母材之间原子扩散和界面反应不是很充分，即界面上钎料和母材均没有明显的相互作用。研究表明^[6]，反映界面反应程度和界面接合性能的反应层厚度，是影响接头强度的重要参量。由于它受钎焊工艺参数如温度和时间等的影响，易于测量和控制，因而从理论上探讨它与界面微观结构和界面强度的关系具有十分重要的工程应用价值。

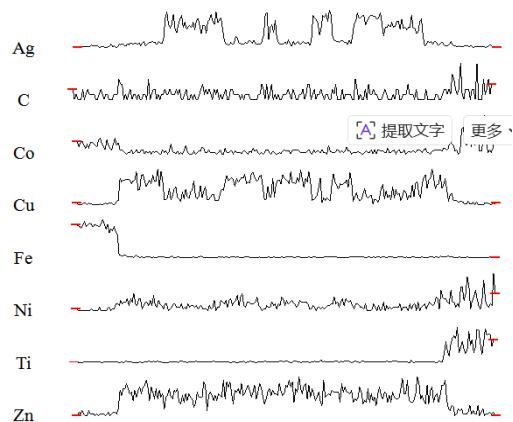


图 3 各元素线扫结果

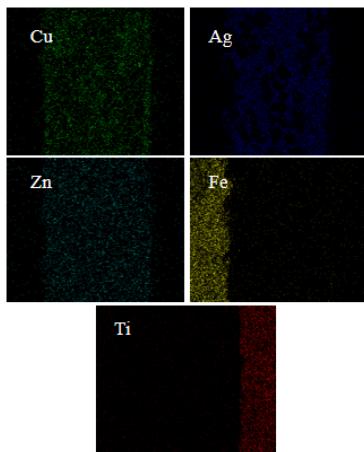


图 4 感应钎焊界面主要元素的面分

3.3 感应钎焊接头的断口分析

图 5 为钎焊温度 850℃ 时 Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr 感应钎焊连接接头剪开后金属陶瓷侧断口形貌，在陶瓷侧断口上呈现了晶间断裂的特征，还有“韧窝”存在，出现了混合花样，整个断口主要特征为脆性断裂。

4 结语

采用 AgCuZn 钎料实现了 Ti(C,N) 基金属陶瓷与 40Cr

钢的高频感应钎焊连接。研究了钎焊温度对感应钎焊接头强度的影响，在本试验中，当钎焊温度为 850℃ 时得到的接头界面强度达到最大值，其剪切强度达到 220Mpa。利用 SEM、EDS 等微观分析手段，探讨了钎焊界面的微观结构和断口形貌，在金属陶瓷侧，主要为 Ag 基和 Zn 基固溶体，金属陶瓷侧整个断口主要特征为脆性断裂。

致谢：本工作感谢湖南省自然科学基金（项目编号：2023JJ50195）的支持。

表 1 特性点能谱测试结果

测试点	Fe	Ni	Cu	Zn	Ag
A	1.70	5.99	49.69	31.69	7.18
B			9.32	21.69	68.99
C	0.93	5.62	52.88	31.59	8.97
D			8.63	20.80	70.56
E	1.55	8.73	51.18	31.61	6.94
F		4.19	51.38	32.04	12.39

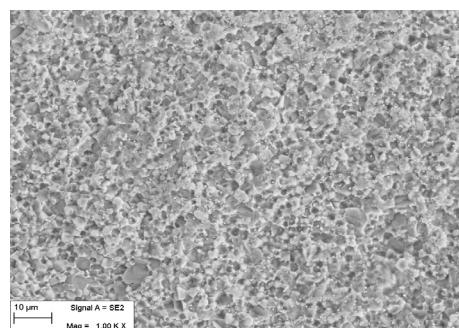


图 5 Ti(C,N) 基金属陶瓷 /Ag20CuZn/ 40Cr 感应钎焊接头断口形貌（金属陶瓷侧面形貌）

参考文献

- [1] Rajabi A, Ghazali MJ, Daud AR. Chemical composition, microstructure and sintering temperature modifications on mechanical properties of TiC-based cermet-A review[J]. Materials and Design, 2015, 67: 95-106.
- [2] 王全兆, 刘越, 张玉政, 等. TiC/NiCr金属陶瓷与Cr13不锈钢的真空钎焊[J]. 焊接学报, 2006, 27(8): 43-46.
- [3] 张帅坤, 张超勇, 吴剑钊, 等. 40Cr钢滚刀组织表面激光淬火的数值模拟[J]. 金属热处理, 2024, (05): 21-25.
- [4] 高鹤芯. 40Cr齿轮钢激光淬火过程多场耦合数值模拟及实验研究[D]. 辽宁科技大学, 2022.
- [5] 李先芬, 徐道荣, 刘宁. Ti(C,N)基金属陶瓷与45号钢火焰钎焊试验研究[J]. 硬质合金, 2003, 20(02): 91-94.
- [6] 陈铮. 陶瓷和陶瓷(金属)部分瞬间液相连接的界面反应模型和连接强度研究[D]. 杭州: 浙江大学, 199