

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.08.09

40Cr钢与YG8C硬质合金钎焊工艺研究

陈睿博¹, 郝庆乐¹, 杨 雷¹, 吕红英¹, 王 琿¹, 钟素娟¹, 王德柱²

1. 中国机械总院集团宁波智能机床研究院有限公司, 浙江 宁波 315700

2. 山东索力得焊材股份有限公司, 山东 泰安 271600

摘 要: 为解决40Cr钢与YG8C硬质合金因物理性能差异导致的钎焊接头强度不足问题, 采用感应钎焊技术, 以Cu58ZnMn合金为钎料, 系统研究了钎焊温度对钎料润湿性、接头微观组织、元素扩散行为及剪切强度的影响规律。结果表明: Cu58ZnMn钎料对两种母材均具有优异润湿性(最大润湿角 $\leq 10^\circ$), 且润湿性随温度升高显著改善; 钎焊温度升高可促进元素扩散与固溶体形成, 940℃以上时双侧界面形成连续扩散带, 其中Co元素跨钎层扩散及Fe-Co固溶体的生成是强化接头的关键; 接头剪切强度随温度升高先增后减, 960℃时达到最大值342 MPa, 过高温度(980℃)会导致40Cr侧出现魏氏组织, 引发强度骤降。本研究通过揭示温度调控下的“润湿性-扩散行为-组织强度”关联机制, 确定了最佳钎焊工艺参数, 为异种材料高强度钎焊连接提供了理论依据与技术参考。

关键词: 感应钎焊; 40Cr钢; YG8C硬质合金; Cu58ZnMn钎料; 温度调控; 接头强度

中图分类号: TG425 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)08-0083-07

Research on Brazing Process of 40Cr Steel and YG8C Hard Alloy

CHEN Ruibo^{1*}, HAO Qingle¹, YANG Lei¹, LU Hongying¹, WANG Hui¹, ZHONG Sujuan¹, WANG Dezhu²

1. Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd, of China National Machinery Institute Group, Ningbo 315700, China

2. Shandong Solide Welding Materials Co., Ltd., Taian 271200, China

Abstract: To solve the problem of insufficient brazing joint strength caused by the physical property differences between 40Cr steel and YG8C cemented carbide, induction brazing technology was adopted, using Cu58ZnMn alloy as the brazing filler metal, and the effects of brazing temperature on the wettability of the filler metal, the microstructure of the joint, the element diffusion behavior, and the shear strength were systematically studied. The results show that Cu58ZnMn filler metal has excellent wettability for both base materials (maximum wetting angle $\leq 10^\circ$), and the wettability improves significantly with the increase of temperature; the increase of brazing temperature can promote element diffusion and solid solution formation, and a continuous diffusion band is formed at both sides of the interface above 940℃, in which the diffusion of Co element across the brazing layer and the formation of Fe-Co solid solution are the key to strengthening the joint; the shear strength of the joint increases first and then decreases with the increase of temperature, reaching the maximum value of 342 MPa at 960℃, and too high temperature (980℃) will cause the appearance of Widmanstätten structure on the 40Cr side, leading to a sharp drop in strength. This study reveals the correlation mechanism of "wettability-diffusion behavior-microstructure strength" under temperature control, determines the optimal brazing process parameters, and provides theoretical basis and technical reference for high-strength brazing connection of dissimilar materials.

Keywords: induction brazing; 40Cr steel; YG8C cemented carbide; Cu58ZnMn filler metal; temperature control; joint strength

引用格式: 陈睿博, 郝庆乐, 杨雷, 等. 40Cr钢与YG8C硬质合金钎焊工艺研究[J]. 电焊机, 2025, 55(8): 83-89.

Citation: CHEN Ruibo, HAO Qingle, YANG Lei, et al. Research on Brazing Process of 40Cr Steel and YG8C Hard Alloy[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(8): 83-89.

收稿日期: 2025-02-13 修回日期: 2025-05-30

基金项目: 泰山产业领军人才工程战略性新兴产业创新类

作者简介: 陈睿博(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事材料成形、焊接等研究。E-mail: 465238660@qq.com。

0 引言

40Cr 钢是最常用的合金调质结构钢,用于制造承受中等负荷和中等速度工作条件下的机械零件,也常用于制备工程刀具的基体。YG8C 常用于建工钻、冲击回转凿岩钎头、油井钻头 etc 切削工具的刃口部位。硬质合金的脆硬且韧性差等缺点使其难以制作大尺寸、形状复杂的构件。将 40Cr 钢作为基体,YG8C 硬质合金作为关键切削部位用材,两者结合可发挥两种材料优势。

钎焊是 40Cr 合金钢与 YG8C 硬质合金连接的重要技术之一,其常见工艺方法包括火焰钎焊、真空炉钎焊和感应钎焊等。然而,钎焊工艺参数的优化不当(如温度控制、保温时间等)往往导致接头强度不足等关键问题,制约了该组合材料在工程应用中的可靠性^[1-8]。本研究聚焦于感应钎焊工艺,选用 Cu58ZnMn 钎料体系,旨在实现 40Cr/YG8C 异质材料的高质量连接。核心目标是通过关键性的钎焊工艺参数试验研究,深入探究钎焊温度对接头元素扩散、显微组织及力学性能的影响规律,以期识别并获得能显著提升接头剪切强度的最优感应钎焊温度值^[9-10]。

1 材料及试验方案

1.1 试验材料

试验选用 40Cr 合金结构钢与 YG8C 硬质合金作为钎焊母材,其化学成分如表 1 和表 2 所示。40Cr 钢线切割加工成 10 mm×10 mm×40 mm 的方条,YG8C 硬质合金线切割加工成 10 mm×10 mm×10 mm 的方块。40Cr 钢及 YG8C 硬质合金母材试样钎焊前均需对表面进行处理:首先采用 8% 稀盐酸清洗去除表面氧化膜,然后用水漂洗并进行超声波酒精或丙酮清洗去除表面污物,取出样品风机吹干待用。

表 1 40Cr 化学成分(质量分数,%)						
Table 1 Chemical Composition of 40Cr (wt. %)						
C	Si	Mn	Cr	P	S	Fe
0.39	0.28	0.58	1.02	0.021	0.026	余量

表 2 YG8C 化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical Composition of YG8C (wt. %)	
WC	Co
92	8

钎料选用 200 目 Cu58ZnMn 合金粉末,其固相线温度为 880 ℃,液相线温度为 909 ℃,化学成分如表 3 所示。为便于布设,将 Cu58ZnMn 合金粉、QJ308 钎剂及粘结剂按质量比 6:3:1 混合制备成膏状,均匀涂覆于 40Cr 钢与 YG8C 硬质合金的待焊界面间,涂覆厚度 0.5 mm 如图 1 所示。焊接时施加 5 N 垂直压力,保持 40Cr 与 YG8C 样块在焊接时相对位置固定。

表 3 Cu58ZnMn 化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical Composition of Cu58ZnMn (wt. %)		
Cu	Mn	Zn
57	3.8	余量

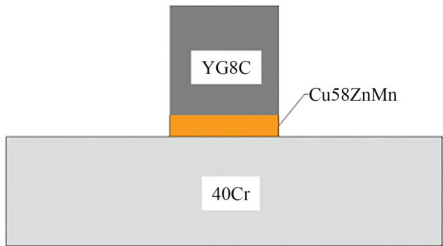


图 1 钎焊试样组合示意

Fig. 1 Schematic diagram of brazed specimen combination

1.2 试验方案

试验采用 SP-15 高频感应加热设备,钎焊温度分别设置为 920 ℃、940 ℃、960 ℃、980 ℃,保温时间约 15 s,钎焊加热曲线如图 2 所示,每组焊接 2 个样品。感应电源及线圈如图 3 所示,采用红外线测

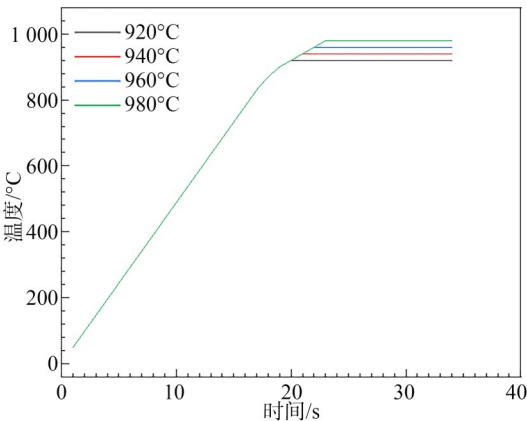


图 2 钎焊加热曲线

Fig. 2 Brazing heating curve



图3 感应电源及线圈

Fig. 3 Induction power supply and coil

温仪对试样进行测温。感应电源输入电压 380 V, 最大功率 35 kW, 频率 75 kHz, 钎焊感应电流 600 A。

钎焊样件见图 4。采用 LeicaMM-6 金相显微镜观察钎焊接头过渡区的显微组织, 采用 INSTRON 4505 型万能力学试验机测定焊缝的剪切强度, 剪切强度按图 5 所示方式进行测试。采用 HIROX SH-3000 扫描电镜 (SEM) 观察焊接接头的形貌, 用扫描电镜自带的射线能谱仪 (EDS-X) 线扫描分析不同温度下钎焊接头的元素扩散情况。



图4 钎焊样件

Fig. 4 Brazing Sample

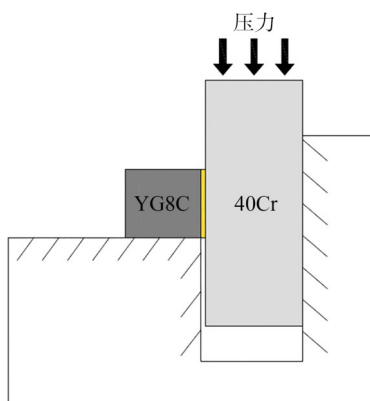


图5 剪切强度测试

Fig. 5 Shear strength measurement

3 结果与讨论

3.1 钎料对基体的润湿性

钎料与基体的润湿性是决定钎焊接头质量的关键因素, 其好坏直接影响钎料在母材表面的铺展均匀性与界面结合强度, 通常以润湿角 (θ) 作为评价指标: 润湿角越小, 润湿性越优异, 钎料铺展越充分。

本研究采用直接测量法评估 Cu58ZnMn 钎料对 YG8C 硬质合金与 40Cr 钢的润湿性。将 Cu58ZnMn 钎料分别置于两种母材表面, 在真空炉中加热至试验温度使钎料熔融, 冷却后沿铺展中心线截取剖面, 通过金相照片结合 CAD 绘图直接测量润湿角, 如图 6 所示。不同温度下的测量结果如表 4 所示。Cu58ZnMn 钎料在 YG8C 表面的润湿角大于 40Cr 表面 (如 920 °C 时分别为 10° 和 4°), 表明钎料对 40Cr 钢的润湿性更优。两种母材表面的润湿角均随温度升高而减小 (920 °C → 980 °C 时, YG8C 表面从 10° 降至 5°, 40Cr 表面从 4° 降至 2°), 说明高温可显著改善钎料的润湿性。所有温度下的润湿角均小于 15°, 表明 Cu58ZnMn 钎料对两种母材均具有良好的润湿性^[9], 可满足钎焊过程中均匀铺展与充分填充的需求。

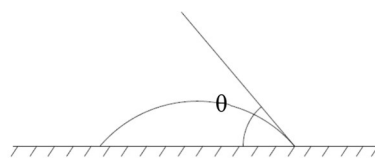


图6 润湿角测量

Fig. 6 Wetting angle measurement

表4 不同温度下钎料对 YG8C 与 40Cr 的润湿角

Table 4 Wetting angles of YG8C and 40Cr with brazing materials at different temperatures

温度/°C	润湿角/(°) (40Cr)	润湿角/(°) (YG8C)
920	4	10
940	3	8
960	3	6
980	2	5

3.2 钎焊温度对组织的影响

不同钎焊温度下接头的显微组织如图 7 所示。钎焊温度 920 °C 时, 焊缝区域存在疏松孔洞 (见图 7a), 钎料与 YG8C、40Cr 的两侧界面紧密贴合, 但无

明显过渡区域。孔洞的形成主要归因于低温下钎料流动性不足,难以通过毛细作用充分填充缝隙,导致钎缝存在未填满的缺陷。钎焊温度 940 °C 时,焊缝中无明显孔洞,表明钎料流动性已满足填充需求。此时,钎料与 40Cr 界面出现不连续的块状灰色区域(见图 7b),推测为元素扩散形成的初期固溶体,但尚未形成完整的过渡层。钎焊温度 960 °C 时,钎料与 40Cr、钎料与 YG8C 的两侧界面均形成灰色区域,且两侧灰色区域相互连接,沿界面形成连续窄带(见图 7c)。该现象表明,随温度升高,元素扩散加剧,固溶体从单侧不连续分布扩展为双侧连续带状分布,形成贯穿钎缝的过渡区。当温度升高至 980 °C 时,两侧界面的灰色带状组织宽度显著增加

(见图 7d),说明高温进一步促进了元素扩散,使固溶体区域持续扩展。综合分析可知,温度高于 940 °C 时,焊缝区域均无孔洞,证实此温度区间内钎料具备良好流动性,可通过毛细作用充分填充缝隙。

由图 7 可以看出,焊缝宽度为 50~80 μm ,灰色带状组织宽度约几微米,其形成机制与元素扩散密切相关:Co 元素扩散显著,不仅进入钎料层,还在两侧界面富集;Mn 元素因高温挥发,在焊缝及基体中含量极低。40Cr 侧界面的灰色区域:因 Cu、Zn 与 Fe 溶解度有限,而 Co 与 Fe 可无限固溶,推测为含少量 Cu、Zn 的 Fe-Co 固溶体。YG8C 侧界面的灰色带状组织:由钎料中 Cu 元素扩散进入 YG8C,与 Co 形成有限固溶体,并与 WC 构成混合组织。

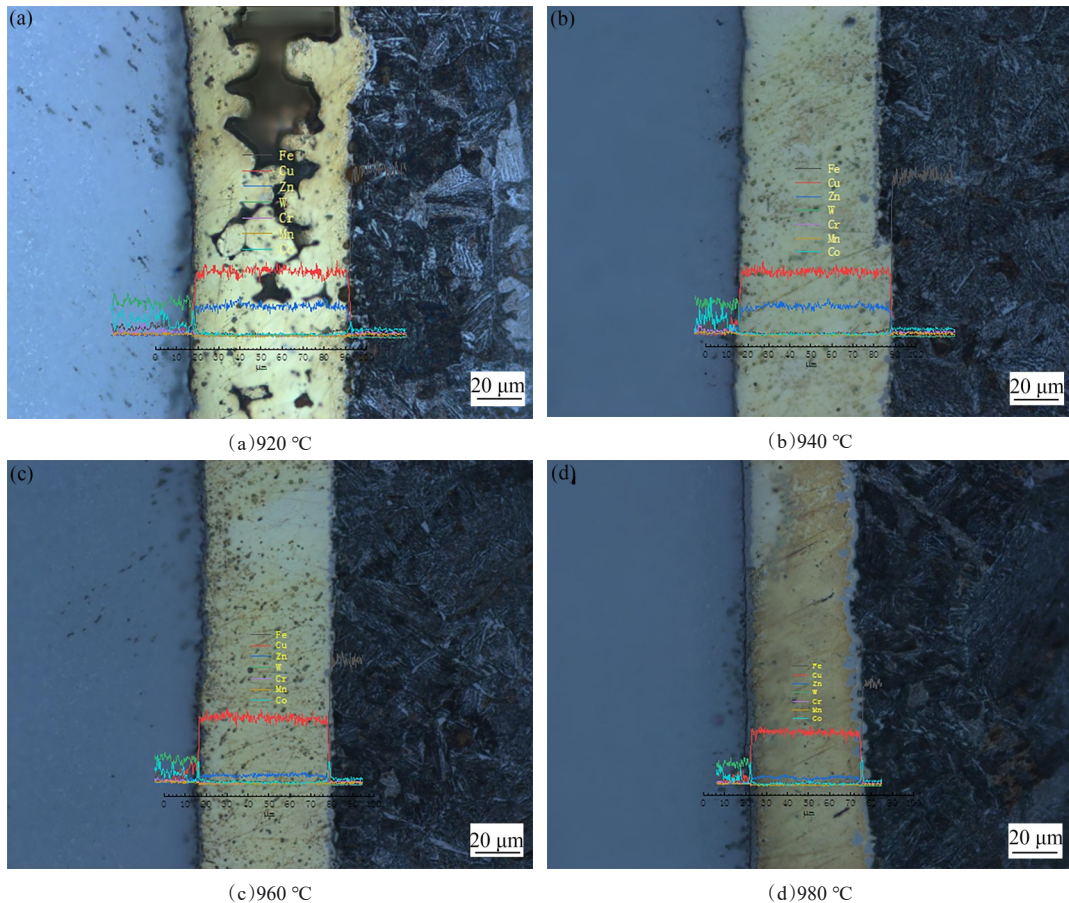


图 7 不同钎焊温度对应组织

Fig. 7 Different brazing temperatures correspond to different microstructures

3.3 钎焊温度对元素扩散的影响

采用 EDS 线扫描分析不同温度下钎缝区域的元素扩散行为,扫描路径垂直于焊缝并贯穿 YG8C-Cu58ZnMn 界面及 Cu58ZnMn-40Cr 两个界面,扫描

结果如图 8 所示。随钎焊温度的升高,各元素原子的扩散加剧,扩散距离不断增大,不同温度下两界面的元素扩散区间宽度如表 5 所示。

YG8C 主要组成元素为 W、Co,对其扩散行为

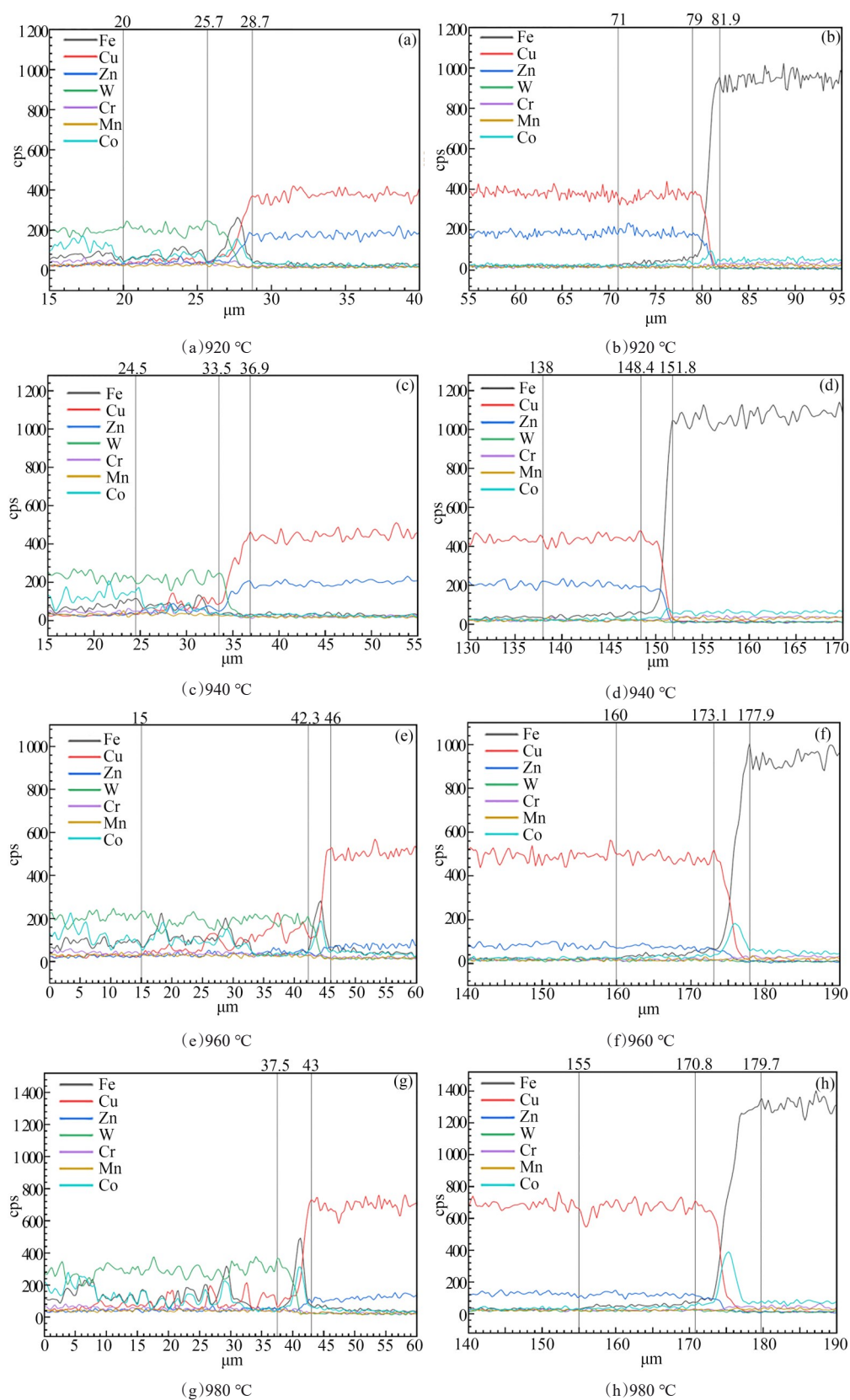


图 8 不同钎焊温度钎缝线扫描

Fig. 8 Scanning of brazing lines at different brazing temperatures

表5 钎焊界面扩散区间

Tab. 5 Diffusion interval of brazing interface

钎焊温度 /°C	YG8C-Cu58ZnMn界面/ μm		Cu58ZnMn-40Cr界面/ μm	
	W	Cu、Zn	Cu、Zn	Fe
920	3.0	8.7	2.9	10.9
940	3.4	12.4	3.4	13.8
960	3.7	31	4.8	17.9
980	5.5	43	8.9	24.7

进行分析。从线扫描可以看出,W元素向钎料中扩散一定距离,且随温度升高扩散距离增大,但整体扩散能力较弱。这是由于W原子半径较大,扩散过程中易引起晶格畸变,导致扩散受阻,980 °C时其扩散距离仅为5.5 μm 。Co元素可以穿过钎焊层进入40Cr中,且在界面上形成富集。这归因于Co原子直径小于W原子,扩散引起的晶格畸变较小,扩散阻力更低;同时,界面处大量的晶界和相界为Co原子提供了快速扩散通道,进一步促进其扩散与富集。

40Cr的主元素为Fe和Cr,因Cr含量较低,线扫描中其扩散行为不明显,主要分析Fe元素的扩散:Fe元素向钎料侧扩散是形成固溶体的主要原因,其扩散范围随温度升高持续扩大,980 °C时扩散距离达24.7 μm 。

对钎料主元素扩散行为进行分析。Cu、Zn元素在两个界面均发生了扩散,低温(920 °C、940 °C)时,Cu、Zn在YG8C侧的扩散区间小于40Cr侧;温度高于960 °C后,YG8C侧的Cu、Zn扩散区间显著增大并超过40Cr侧(见表5)。这一现象与Cu、Zn在Fe中的溶解度特性相关:低温时Cu、Zn在Fe中未达饱和,主要向40Cr侧扩散;当温度升高至960 °C以上,Cu、Zn在Fe中的溶解达到饱和,扩散速度降低,此时更多向YG8C侧扩散以寻求新的溶解空间。

3.4 钎焊温度对接头剪切强度的影响

钎焊温度对接头的剪切强度影响如图9所示,不同钎焊温度剪切强度及断口位置如表6所示。剪切强度随钎焊温度的升高而升高,超过960 °C后,剪切强度降低。920 °C时,接头剪切强度为216 MPa,断口位于YG8C-Cu58ZnMn界面,该温度下,钎料流动性不足且界面扩散区较窄(W扩散3.0 μm ,Cu、Zn在YG8C侧扩散仅2.9 μm),导致界面结合力薄弱,断裂沿界面发生,表现为较低的强度。940 °C与960 °C时,样品剪切强度随温度升高显著提升,其中

960 °C时达到最大值342 MPa,断口均位于钎缝区域。这是由于温度升高促进了元素扩散,扩散层宽度增加(如960 °C时Fe向钎料侧扩散达17.9 μm ,Cu、Zn在YG8C侧扩散增至31 μm),扩散元素对钎料层形成有效的固溶强化,同时钎料填充更致密,使钎缝成为接头中的强韧性区域,断裂发生在钎缝内部而非界面。980 °C时,剪切强度降至328 MPa,断口偏移至Cu58ZnMn-40Cr界面靠近40Cr侧。金相观察显示,40Cr侧因高温加热导致组织粗大并形成魏氏组织,该组织脆性较高,削弱了母材与钎缝的过渡区强度,成为剪切失效的薄弱环节,导致强度下降。综上,适度提高钎焊温度可通过增强元素扩散与固溶强化提升接头强度,960 °C为最佳温度;温度过高则因40Cr侧组织恶化(魏氏组织形成)导致强度降低。

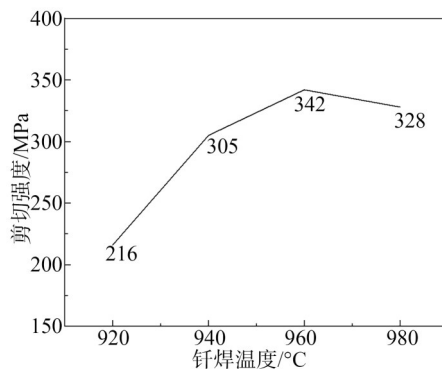


图9 钎焊温度对接头剪切强度的影响

Fig. 9 Influence of brazing temperature on the shear strength of joints

表6 钎焊温度对接头性能的影响

Table 6 The influence of brazing temperature on joint performance

序号	焊接温度/°C	剪切强度/MPa	断口位置
1	920	216	YG8C-Cu58ZnMn 界面
2	940	305	断在钎缝
3	960	342	断在钎缝
4	980	328	Cu58ZnMn-40Cr 界面

4 结论

以Cu58ZnMn合金为钎料,采用感应钎焊技术实现40Cr钢与YG8C硬质合金的连接,系统研究了钎焊温度对钎料润湿性、接头微观组织、元素扩散行为及剪切强度的影响,主要结论如下:

(1)Cu58ZnMn钎料对40Cr钢与YG8C硬质合

金均具有良好润湿性,润湿角均小于 15° 。其中,钎料在40Cr钢表面的润湿角($2^{\circ}\sim 4^{\circ}$)小于YG8C表面($5^{\circ}\sim 10^{\circ}$),且两种母材表面的润湿角均随温度升高而减小,高温下润湿性更优。

(2)钎焊温度显著影响接头微观组织演化:920 $^{\circ}\text{C}$ 时焊缝存在疏松孔洞,界面无明显过渡区;940 $^{\circ}\text{C}$ 以上时,钎料流动性足以消除孔洞,且随温度升高,界面逐步形成固溶体组织:先在40Cr侧出现不连续块状灰色区域,后扩展为双侧连续带状结构,980 $^{\circ}\text{C}$ 时带状组织宽度显著增加。40Cr侧灰色区域为含少量Cu、Zn的Fe-Co固溶体,YG8C侧为Cu与Co形成的有限固溶体与WC的混合组织。

(3)W元素因原子半径大扩散能力弱,980 $^{\circ}\text{C}$ 时扩散距离仅5.5 μm ;Co元素可穿透钎料层进入40Cr并在界面富集;Fe元素向钎料侧扩散范围随温度扩大至24.7 μm ;Cu、Zn在低温时向40Cr侧扩散更显著,960 $^{\circ}\text{C}$ 以上时在YG8C侧扩散区间超过40Cr侧,与元素溶解度差异相关。

(4)接头剪切强度随钎焊温度升高呈先增后减趋势:920 $^{\circ}\text{C}$ 时强度为216 MPa,断口位于YG8C-钎料界面;960 $^{\circ}\text{C}$ 时强度达到最大值342 MPa,断口位于钎缝区域,归因于扩散层加宽与固溶强化;980 $^{\circ}\text{C}$ 时强度降至328 MPa,断口偏移至40Cr侧界面,因40Cr基体出现魏氏组织导致局部弱化。

参考文献:

- [1] 龙伟民,孙华为,秦建,等.钎焊技术在高速列车制造中的应用[J].电焊机,2018,48(1):1-12.
LONG W M, SUN H W, QIN J, et al. Application of brazing technology in high-speed train manufacturing [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(1): 1-12.
- [2] Gao Y, Yan M Y, Luo B H, et al. Effects of NbC additions on the microstructure and properties of non-uniform structure.WC-Co cemented carbides[J]. Materials Science and Engineering, 2017(687): 259-268.
- [3] Gao Y, Yan M Y, Luo B H, et al. Effects of NbC additions on the microstructure and properties of non-uniform structure.WC-Co cemented carbides[J]. Materials Science and Engineering, 2017(687): 259-268.
- [4] 酆剑,罗娟,罗来马,等.硬质合金与钢基体钎焊技术的研究进展[J].材料科学与工程学报,2009(06): 955-958.
LI J, LUO J, LUO L M, et al. Research Progress on Brazing of Cemented Carbides to Steels [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2009(06): 955-958.
- [5] 阙仲萍,王海龙.YG8硬质合金与42CrMo钢的真空钎焊连接[J].机械工程材料,2009(02):35-38.
QUE Z P, WANG H L. Vacuum Brazing of 42CrMo Steel and YG8 Hard Alloy [J]. Materials For Mechanical Engineering, 2009(02): 35-38.
- [6] Y H H, Li X, Michelon M, et al. Effects of aging on the shelf life and viscoelasticity of gellan gum microcapsules[J]. Food Hydrocoll, 2021, 121: 982-987.
- [7] 王新洪,邹增大.YT535硬质合金钎焊工艺的研究[J].焊接技术,2001,30(1):8-9.
WANG X H, ZOU Z D. Research on brazing process of YT535 cemented carbide [J]. Welding Technology, 2001, 30(1): 8-9.
- [8] 龙伟民,张青科,朱坤,等.绿色钎焊材料及无害化钎焊技术的发展[J].焊接,2014(1):3-7.
LONG W M, ZHANG Q K, ZHU K, et al. Development of green brazing filler metals and harmless brazing technologies [J]. Welding & Joining, 2014(1): 3-7.
- [9] Shen Z, Arioka K, Lozano-Perez S. A study on the diffusion-induced grain boundary migration ahead of stress corrosion cracking crack tips through advanced characterization [J]. Corros. Sci. J. Environ. Degrad. Mater. Its Control, 2021, 183, 109328-109328.
- [10] 周许升,乔培新,龙伟民,等.Ag含量对Sn-Ag-Cu无铅钎料显微组织和性能的影响[J].焊接,2013(6): 38-41.
ZHOU X S, QIAO P X, LONG W M, et al. Effect of Ag content on microstructure and properties of Sn-Ag-Cu lead-free solder [J]. Welding & Joining, 2013(6): 38-41.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>