

振动对铜钢双金属熔铸复合材料凝固组织的影响

杨世豪, 尹延国, 方小亮, 李志明

(合肥工业大学摩擦学研究所, 安徽合肥 230009)

摘要: 通过在铜钢双金属熔铸工艺的冷却过程中对铸件施加机械振动, 研究在0.2 mm振幅条件下, 振动频率对铜合金凝固组织和铜钢双金属结合面的影响。结果表明: 在铸件冷却阶段对其施加振幅0.2 mm、频率40 Hz的机械振动能够有效细化铜合金侧凝固组织, 布氏硬度和组织均匀性显著提升, 铜合金晶粒尺寸减小并由枝晶转化为等轴晶, 铅元素偏析和聚集现象得到明显改善, 有效消除气孔和显微缩松。铜合金和钢基体之间形成冶金结合, 未振动和施加振动后剪切断裂模式均为混合断裂, 振动后由于 $\alpha + \delta$ 硬脆相的分布发生改变而使剪切强度有所降低。

关键词: 铜钢双金属; 熔铸; 机械振动; 显微组织; 界面结合

随着对工程材料综合性能的要求越来越高, 单种金属材料的性能无法满足实际生产的需要, 并且伴随着贵重金属资源的稀缺, 使得双金属复合材料在工业中逐步得到推广和应用^[1-2]。铜钢双金属复合材料兼具优良的摩擦学性能、高导热性和高强度, 常用于制造柱塞泵双金属缸体、铜钢复合轴承等, 具有广泛的应用前景^[3-4]。目前, 制备铜钢双金属复合材料的常用方法包括爆炸复合法、轧制复合法、扩散复合法、离心铸造法、熔铸法和粉末烧结法等^[4]。其中熔铸法是一种固液复合工艺, 通过将两种金属同时加热到较低熔点金属的液相线以上并保温, 使其在结合界面充分进行元素扩散, 形成稳固的冶金结合, 具有明显的技术和成本优势^[5-6]。

机械振动能够有效细化晶粒, 改善力学性能, 消除疏松缩孔, 减少气孔和裂纹, 改善铸件品质, 并且振动设备简单, 易于实现^[7-9]。1868年, Chernov首次在钢凝固过程中对其施加机械振动, 使初生奥氏体最终组织得到细化。此后迎来了广泛的应用^[10]。Vadim等^[11]对Al-Si合金施加振动处理与超细粉改性结合使其屈服强度和拉伸强度分别提升了10%和20%。Timeli等^[12]通过在A360-10%SiC合金凝固过程中施加振动, 使凝固组织细化并且SiC分布更加均匀。Guo等^[13]通过对AZ31熔融合金施加机械振动使凝固组织由粗大的枝晶组织转变为精细化、均匀合理的非枝晶组织, 力学性能显著提高。

目前采用常规熔铸复合工艺生产如柱塞泵缸体等高度差较大的铜钢双金属复合零件还存在一些问题, 包括凝固组织粗大、疏松缩孔、气孔、组织分布不均匀、元素偏析等。本研究将通过在铜钢双金属熔铸复合工艺的凝固阶段添加机械振动, 研究机械振动对铜钢双金属复合材料铜侧显微组织和铜钢界面结合性能的影响。

1 试验方案

1.1 试验材料和步骤

试验采用的材料包括高铅青铜CuPb10Sn10和45钢, 两种材料的化学成分如表1和表2所示。试验前, 将 $\Phi 40$ mm \times 45 mm的45钢圆柱一端加工出 $\Phi 35$ mm \times 39 mm的

作者简介:

杨世豪(1999-), 男, 硕士, 主要研究方向为振动对铜钢双金属熔铸成形及其摩擦学性能的影响。E-mail: 2218959874@qq.com

通讯作者:

尹延国, 男, 教授, 博士, 硕士生导师。电话: 18919661022, E-mail: abyin@sina.com

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

01-0017-08

收稿日期:

2023-05-17 收到初稿,

2023-06-28 收到修订稿。

表1 45钢的主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of 45 steel

C	Cr	Mn	Ni	P	S	Si	Fe	$w_B/\%$
0.42~0.50	≤0.25	0.50~0.80	≤0.25	≤0.035	≤0.035	0.17~0.37	余量	

表2 CuPb10Sn10的主要化学成分
Table 2 Main chemical composition of CuPb10Sn10

Zn	Sn	Ni	Pb	Sn	Sb	Cu	$w_B/\%$
0.16	10.01	0.82	10.46	10.24	0.13	余量	

盲孔，将铜合金加工成 $\Phi 28\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的圆柱。机加工后，使用砂纸进行打磨，在超声波清洗机中利用无水乙醇清洗钢基体和铜合金，结束后用吹风机冷风吹干待用。在钢基体盲孔底部铺上一层脱水硼砂并压实，再将铜合金插入钢基体盲孔中并在上面覆盖保温垫片，组装后如图1a所示。

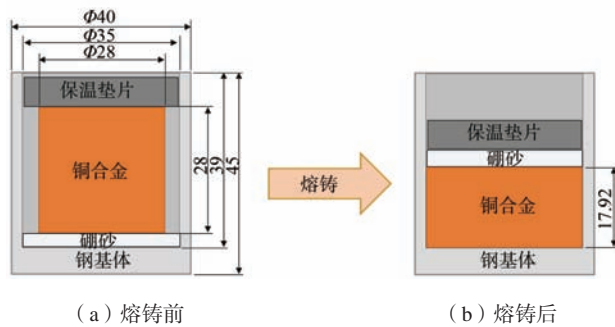


图1 熔铸样件
Fig. 1 Casting sample

熔铸试验在SGL-1400-II管式炉中进行，试验过程中通入高纯氮气作为保护气体。将组装好的试样放入炉中，随炉加热至 $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$ 并保温45 min，在熔铸过程中，钢基体保持固态，铜合金熔化为液态，随后取出铸件放置于电磁振动台夹具中施加机械振动直至铸件完全凝固，凝固后如图1b所示。

振动熔铸试验中主要通过改变振动频率，以研究其对CuPb10Sn10/45钢复合材料的铜合金层凝固组织和性能的影响规律，特别是铜合金的晶粒大小、铅的分布、铸造缺陷以及铜钢双金属结合界面剪切强度。其中，振动频率分别设置为0、20 Hz、30 Hz、40 Hz、50 Hz，振幅为0.2 mm，冷却方式采用炉外保温空冷。

1.2 测试方法

对试验后获得的铜钢双金属铸件进行机加工切取出金相试样，使用5% FeCl₃酒精溶液对铜合金进行腐蚀，采用MR5000立式金相显微镜观察复合材料各区域的组织形貌、铜合金晶粒大小、铅元素颗粒大小和分

布状态。使用HB3000布氏硬度计测试铜合金侧硬度。将铸件加工出 $2\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 大小的剪切试样，并使用CMT4304电子万能试验机进行剪切试验，剪切速率为5 mm/min。使用sigma300扫描电镜分析铜钢双金属试样在铜合金侧的组织缺陷、结合面处的元素扩散情况以及剪切断面形貌。

2 试验结果与分析

2.1 铜合金侧显微组织分析

2.1.1 金相组织

图2为不同振动频率下铜合金侧的金相组织。图2a为未施加振动时铜合金侧的金相组织，可观察到粗大的枝晶结构。图2b为振动频率为20 Hz时，铜合金侧的金相组织，对比图2a和图2b，可以看出20 Hz振动频率使晶粒尺寸有了一定程度的减小，但晶粒形貌并无明显变化，金相组织中仍然存在较大的枝晶结构。图2c为继续增大振动频率到30 Hz时的金相组织。由图2c可以看出，振动频率增大到30 Hz时，晶粒尺寸明显减小，枝晶逐渐被等轴晶所取代，但组织中的局部区域仍然存在一些小尺寸枝晶结构。从图2d中可以看出，当振动频率升高到40 Hz时，晶粒细化程度更高，等轴晶晶粒数量增加且分布均匀，晶粒明显得到细化。当继续升高频率到50 Hz时，如图2e所示，晶粒尺寸相对于40 Hz有一定程度的增大。

振动能量对微观结构的影响有两种方式，即在熔融合金中产生周期性的张力-压力和强制对流^[14]，两者都对合金凝固时的形核和生长行为产生影响。

振动引起的熔体流动对枝晶臂施加外力，导致枝晶臂的断裂，分离的枝晶臂向凝固前沿移动，成为新的晶核，为等轴晶的形成创造了条件。并且当枝晶臂断裂后，分离的枝晶臂会与相邻的枝晶碰撞，导致更多的枝晶臂断裂。伴随着振动频率的增加，围绕枝晶臂的对流强度增大，枝晶臂受到的粘滞力也随之增大，枝晶臂进一步震断，形核率增加，晶粒细化程度逐渐升高，如图2b、c、d所示。结果表明，机械振动对铜钢双金属熔铸过程晶粒细化有显著影响，采用这种振动方法可以在较低频率下获得较高的晶粒细化程度。

当振动频率超过最佳频率时，显微组织会粗化，如图2e所示。粗化的驱动力是表面能的降低，粗化机制主要有两种：聚结和奥斯特瓦尔德熟化^[15-17]。在聚结

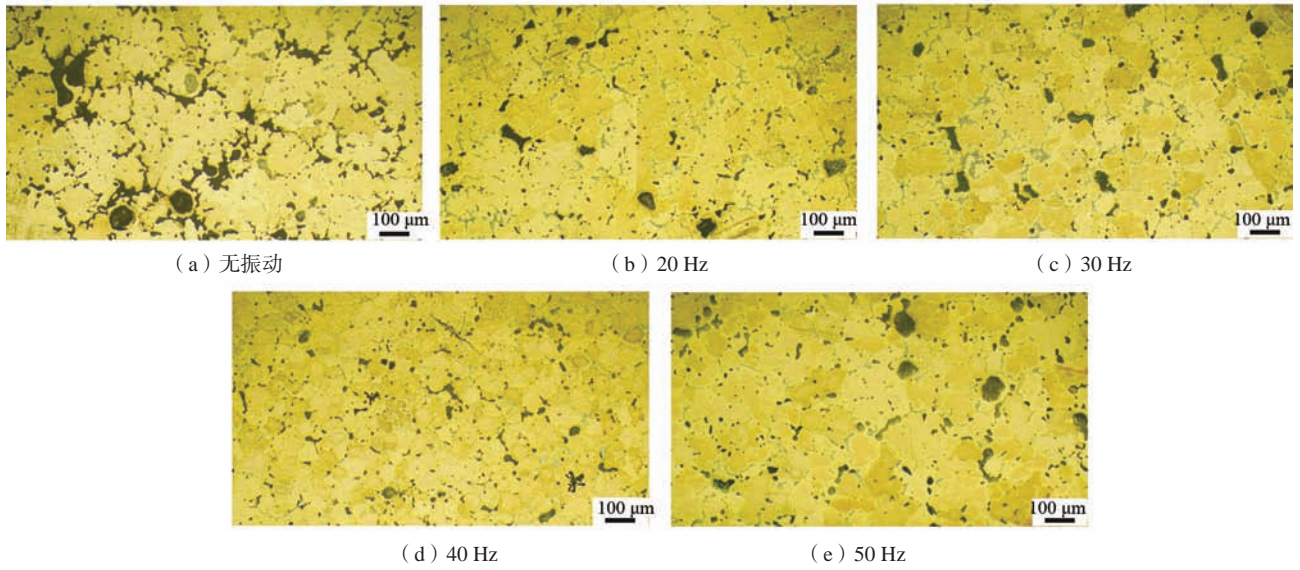


图2 不同振动频率下铜合金侧金相组织
Fig. 2 Metallographic structure of copper alloy side under different vibration frequencies

机制中，粗化发生在相邻枝晶臂的聚结过程中，凝固相间产生的熔体对流导致相邻枝晶臂相互结合，从而使固体晶粒变大。在Ostwald成熟机制中，由于高圆度界面向低圆度界面扩散通量增大，粒径较小的初生固相会溶解在熔体中，Ostwald发生的过程包括一个小于临界尺寸的粒子的溶解，然后转移到大于临界尺寸的粒子上，这将导致最终微观结构中固体颗粒密度的降低。

2.1.2 铅元素分布

图3和图4为铜合金中铅颗粒在不同的振动频率条

件下的分布情况。从图3a、图4a中可以看出，在未施加振动时，铜合金层顶部铅元素有明显聚集，过多的铅元素聚集在晶界处，呈现网状结构，底部铅元素则在铜合金凝固组织中呈现团聚倾向，形成体积较大，界面圆滑的铅颗粒。图3b、图4b为施加频率为20 Hz的机械振动时的铅元素分布图，相比于未振动时，顶部铅元素还是以网状形式分布于晶界周围，底部铅颗粒尺寸已经有了明显减小。图3c、图4c为施加频率为30 Hz的机械振动时的铅元素分布图，相比于未振动时，顶部网状铅元素结构消失，底部铅颗粒尺寸进一步减小，铅元素偏析现象得到明显改善。当继续提升

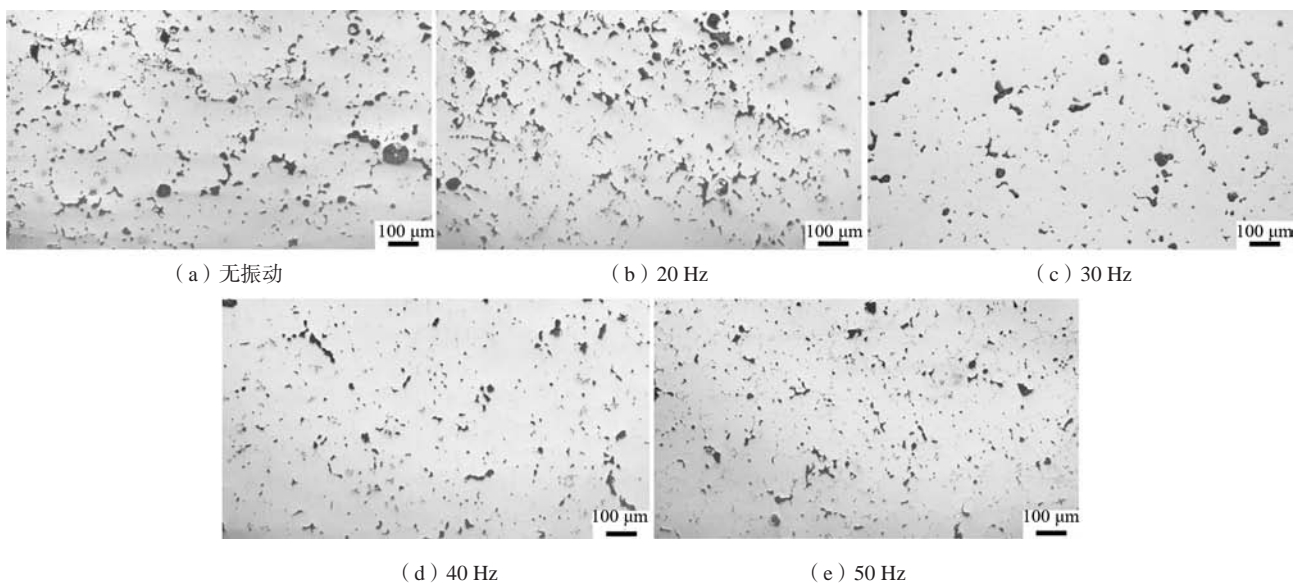


图3 不同振动频率下铅元素分布（顶部）
Fig. 3 Lead particle distribution under different vibration frequencies (top)

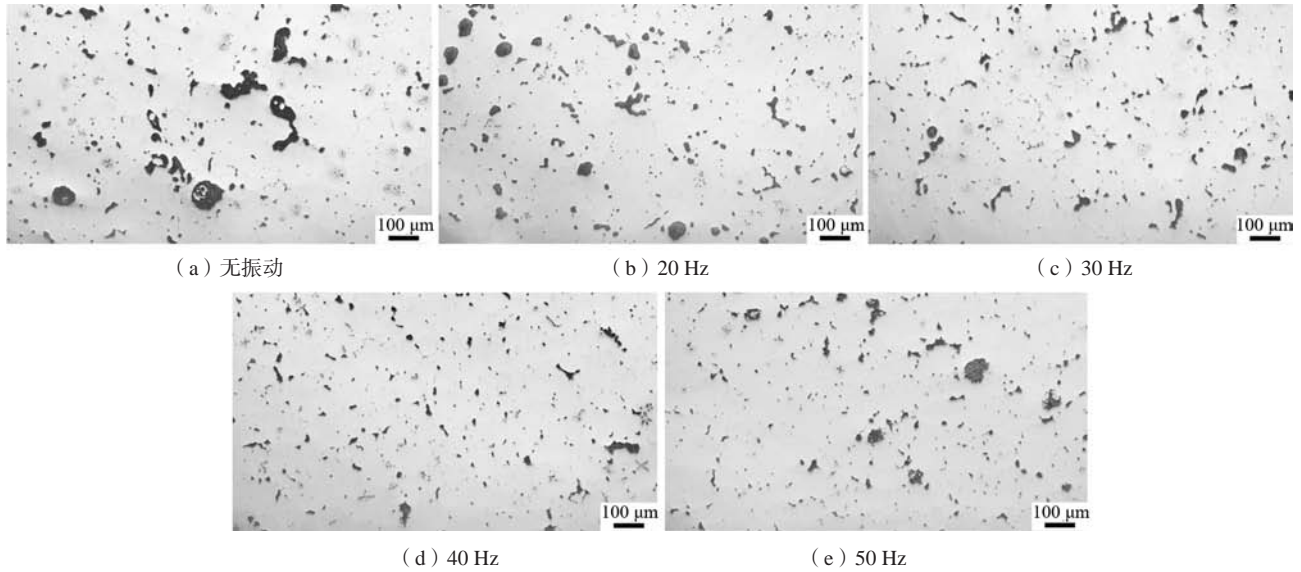


图4 不同振动频率下铅元素分布 (底部)

Fig. 4 Lead particle distribution under different vibration frequencies (bottom)

振动频率达到40 Hz时, 铅元素在整个铜合金层中均匀分布, 顶部和底部铅元素均以均匀分布的细小铅颗粒形式存在, 如图3d、图4d所示。当振动频率达到50 Hz时, 顶部铅元素无明显变化, 底部有些许的大尺寸铅颗粒出现, 如图3e、图4e所示。铅元素在施加振动后变得分散主要是由于晶粒细化, 枝晶被等轴晶取代, 不再存在较大的晶间区域。

2.1.3 缺陷分析

在未振动铸件的凝固组织中, 存在如图5a所示的微观气孔, 和图5b所示的显微缩松。铸件结构中存在的孔隙通常是由于液体中溶解的氢以及液体向枝晶臂之间空隙的补缩不足导致的^[18]。

熔体中气体元素的扩散速率与熔体在枝晶臂周围流动的强度成正比^[18-19]。施加机械振动后, 熔体绕枝晶臂流动的雷诺数增大, 导致熔体中溶解气体扩散速率增大。因此, 更容易使溶解气体析出并形成气泡, 并

且形成的气泡有足够长的时间生长并向模具顶部移动并排出。40 Hz振动条件下未发现如图5a所示气孔。

显微缩松是由于枝晶间液体凝固时体积的收缩得不到补缩, 再加上渗透率降低导致进入糊状区的熔料受到限制导致的。未振动时凝固组织粗大, 导致更大的枝晶间区域, 从而增加缩孔率。40 Hz振动条件下未发现如图5b所示的缩松现象, 这是因为机械振动会引起高频度的剪切运动, 降低糊状凝固合金的粘度, 因此增加了补缩时间。同时, 振动会导致糊状合金的凝固发生一定的弹塑性变形, 松散已经搭接的固相骨架, 会使已凝固的骨架坍塌, 进而重新打开补缩通道, 一定程度上也会提高补缩能力。而且铜合金进行晶粒细化后, 晶粒之间的晶间液体体积减小, 不利于缩孔的形成。

2.1.4 硬度分析

将每个样件距底部1 cm处的横截面进行抛光, 并

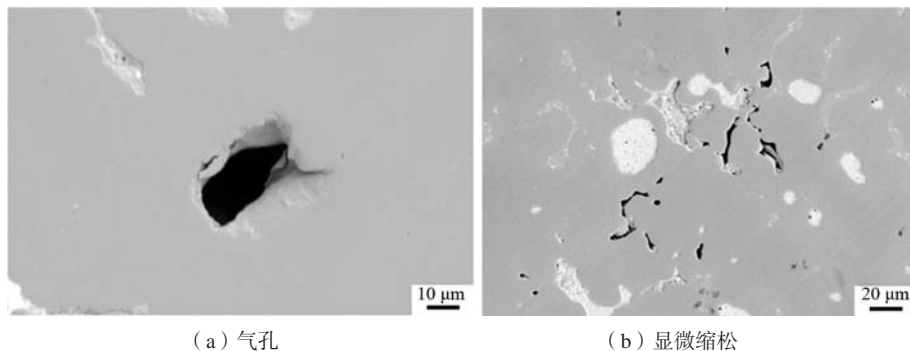


图5 未振动条件下的组织缺陷

Fig. 5 Structural defects without vibration

在相同位置各取5个点测量其布氏硬度，并求其标准差，结果如图6所示。未振动时，铜合金平均硬度最低，标准差最大，说明这一平面不同位置力学性能差异波动较大，强度低，材料性能不稳定，是因为组织中存在气孔、缩松缩孔以及组织粗大且分布不均匀所导致的。

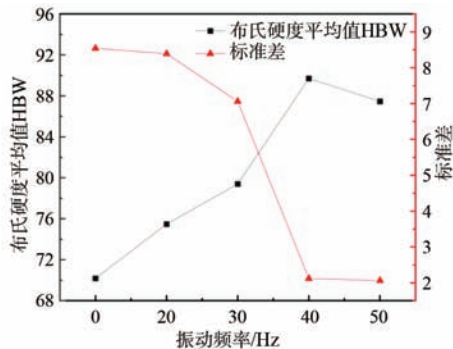


图6 不同振动频率下铜合金侧布氏硬度及其标准差

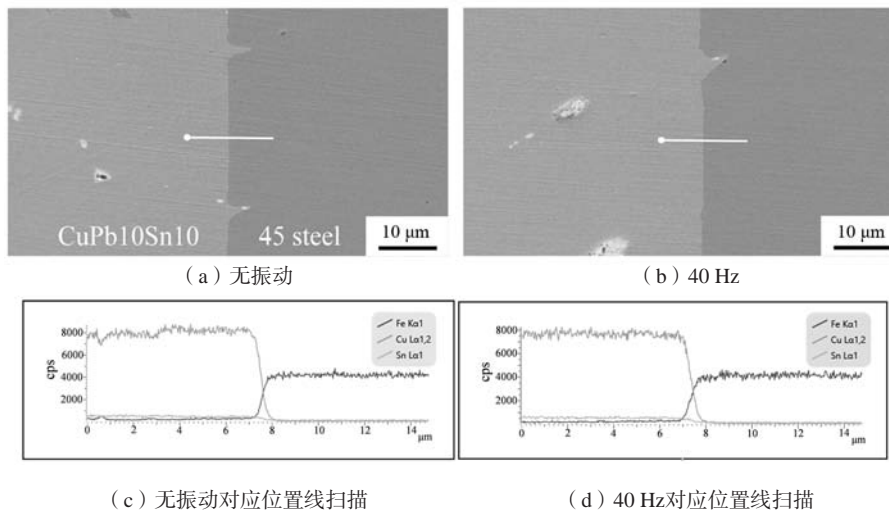
Fig. 6 Rockwell hardness and standard deviation of copper alloy side under different vibration frequencies

伴随着振动频率的增加，平均硬度随之增大，标准差也随之降低，在40 Hz时，平均硬度达到最大值HBW 89.7，且标准差降到了HBW 2.12，说明这一平面不同位置力学性能差异波动较小、强度高、材料性能稳定、组织均匀性显著提升。这是因为振动导致晶粒细化和缺陷减少，根据Hall-Petch关系^[20]，晶粒尺寸越小，合金的强度越高。继续升高频率到50 Hz，标准差无明显变化，但是由于组织粗化导致硬度有所降低。

2.2 机械振动对铜钢结合界面的影响

2.2.1 元素扩散

图7a、b分别为未振动和40 Hz振动条件下的双金



(c) 无振动对应位置线扫描

(d) 40 Hz对应位置线扫描

图7 铜钢双金属结合界面SEM图像及线扫描

Fig. 7 SEM images and line scanning of copper-steel bimetallic bonding interface

属结合界面处的SEM图像，界面处钢侧均存在缺口，无明显的过渡区。

液态金属向固相的扩散主要包括表面扩散和晶界扩散。由于晶界上存在大量间隙，Cu、Sn元素从铜合金液向45钢的晶界扩散速度远快于表面扩散。首先，晶界缺陷较多，元素扩散所需的活化能较低，扩散速率较高，原子容易迁移。Zhou等^[21]也指出，在双金属复合材料的固液结合过程中，当温度加热到固体基体熔点的0.5~0.75倍时，晶界扩散系数约为表面扩散系数的 10^5 倍。铜合金中的Cu、Sn元素容易沿45钢的晶界扩散，使得晶界处形成如图所示的缺口。

图7c、d分别为对应位置处的线扫描，未振动时Fe、Cu、Sn元素的扩散层厚度分别为：0.74 μm 、1.22 μm 、1.22 μm ，40 Hz振动条件下Fe、Cu、Sn元素的扩散层厚度分别为：0.76 μm 、1.21 μm 、1.21 μm ，结果表明Fe、Cu、Sn扩散层厚度在未振动和40 Hz振动条件并无明显差异。这是因为扩散速率由扩散系数决定，而扩散系数又取决于温度和扩散活化能，不同振动频率下样件的加热温度和保温时间相同，所以扩散层厚度无明显差异。Fe、Cu、Sn元素的相互扩散也表明了铜/钢界面已实现了冶金结合。

2.2.2 剪切强度和断口形貌

图8为剪切强度随振动频率的变化曲线。由图可知，剪切强度呈现先下降后上升的趋势，和晶粒细化程度相反，在未振动时达到了253 MPa，40 Hz振动条件下下降到了217 MPa。由于在保护气氛熔铸过程中，在结合界面处会发生元素扩散。形成Cu-Fe-Sn固溶体，形成固溶强化，大大提高了铜合金在结合界面处的稳定性和强度，使该区域的结合强度大于铜合金基体的强度，从而导致断裂主要发生在铜合金侧。

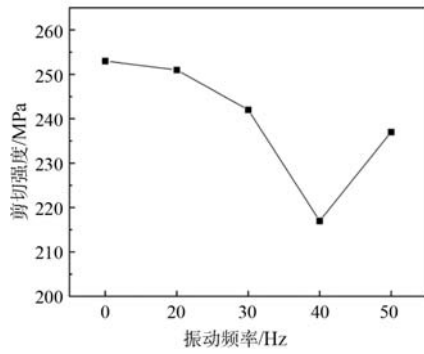


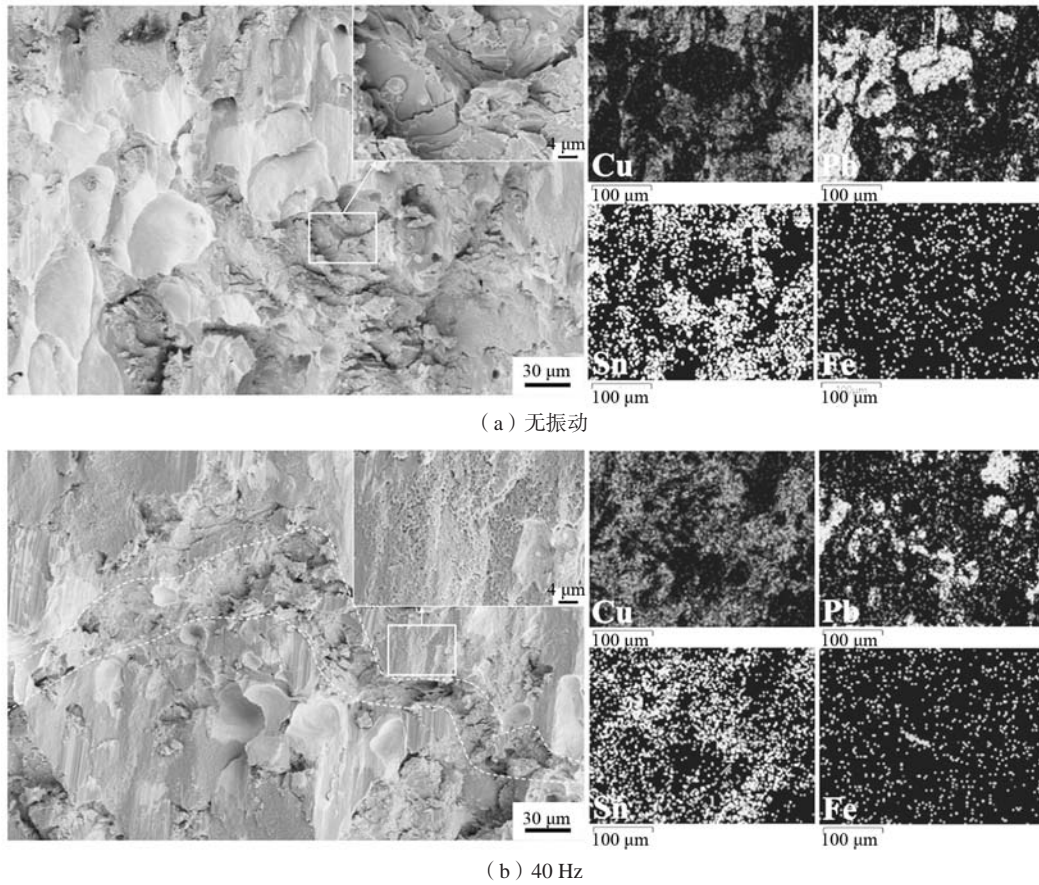
图8 不同振动频率下铜钢结合界面剪切强度

Fig. 8 Shear strength of copper-steel bimetallic bonding interface under different vibration frequencies

图9a为未振动时的剪切断面，左侧可见大尺寸铅颗粒受到剪切应力形成的大韧窝，中下部为 $\alpha + \delta$ 硬脆相受力形成的解理断裂，可以清晰见到解理台阶，除此之外就是 α 相韧性断裂形成的细小韧窝。图9b为40 Hz振动条件下的剪切断面，相比于图9a铅颗粒较为分散，形成的韧窝也较小，但其中部有一条 $\alpha + \delta$ 硬脆相受力形成的左右贯穿的解理带，分布于晶界处，其它区域是 α 相韧性断裂形成的细小韧窝。

未振动和40 Hz振动条件下断裂模式均为混合断裂，但是脆性相的分布不同引起剪切强度的变化。

图10是未振动和40 Hz振动条件下 $\alpha + \delta$ 硬脆相分布状态，未振动时 $\alpha + \delta$ 硬脆相主要分布在枝晶间隙

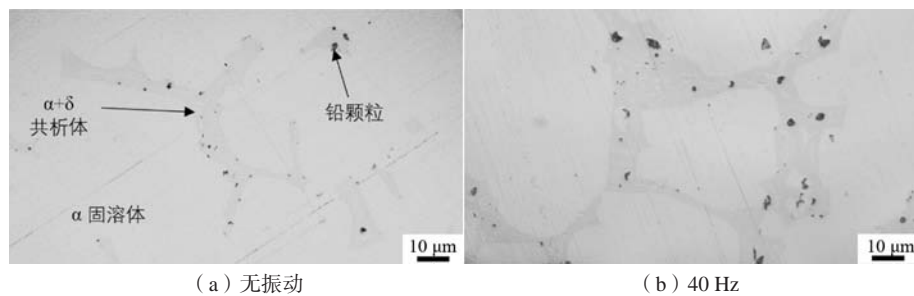


(a) 无振动

(b) 40 Hz

图9 剪切断面形貌

Fig. 9 Shear fracture morphology



(a) 无振动

(b) 40 Hz

图10 $\alpha + \delta$ 脆性相分布Fig. 10 $\alpha + \delta$ Brittle phase distribution

中, 由于枝晶较大, 通常将 $\alpha + \delta$ 相包裹, 如图10a。施加机械振动后, 伴随着振动频率的升高, 晶粒得到细化并由枝晶转换为等轴晶, 由于晶粒细化, 局部区域会出现如图10b所示连续或不连续的 $\alpha + \delta$ 网状脆性相包裹细小等轴晶粒的情况, 在剪切力的作用下, 这些网状硬脆性相将直接承受载荷, 很易破碎形成裂纹并使裂纹沿晶界扩展, 使剪切强度降低。

高压柱塞泵铜钢双金属缸体通常要求铜层剪切强度 ≥ 180 MPa, 硬度在HBW 80~95范围内。40 Hz振动条件下相比未振动时剪切强度虽然有所下降, 但是仍维持在一个较高的数值, 并且其硬度和组织均匀性均显著提升, 晶粒得到细化, 铅元素也较为分散, 气孔和显微疏松得到消除。后续试验将重点研究通过优化工艺条件来改善脆性相包裹细小等轴晶粒现象。

3 结论

(1) 伴随施加机械振动频率的提高, 铜合金侧晶粒逐渐细化, 在40 Hz达到最佳细化效果, 铸件上部的网状铅颗粒分布结构消失, 下部铅颗粒变得均匀弥散, 消除宏观偏析, 硬度和组织均匀性均显著提高, 显微气孔和裂纹得到消除。过高的振动频率会使组织粗化。

(2) 铜钢双金属在结合面形成牢固的冶金结合, 界面元素扩散层厚度在未振动和施加振动后无明显变化, 在结合面处均存在晶间渗透产生的小缺口, 剪切强度在施加振动后有一定程度的下降, 由未振动时的253 MPa下降到40 Hz时的217 MPa。未振动和40 Hz振动条件下断裂模式均为混合断裂。

参考文献:

- [1] SUN Y F, FUJII H, TAKAKI N, et al. Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al alloy/steel joints prepared by a flat spot friction stir welding technique [J]. *Materials & Design*, 2013, 47 (5): 350–357.
- [2] ZOU J T, LIU Y F, LU P, et al. Study on the interface diffusion bonding of the copper alloy/30CrMnSi steel [J]. *Materials Science Forum*, 2013, 749: 168–172.
- [3] WANG X, TANG B, WANG L, et al. Microstructure, microhardness and tribological properties of bronze–steel bimetallic composite produced by vacuum diffusion welding [J]. *Materials*, 2022, 15 (4): 1588.
- [4] WANG Q, ZHENG Q F, LI D F. Development of copper alloy–steel bimetallic bearing materials and manufacturing technology [J]. *Materials Science Forum*, 2020, 993: 374–383.
- [5] 任冰冰, 王元龙, 张吉贤, 等. 熔铸工艺对铜钢双金属复合材料组织性能作用规律 [J]. *铸造*, 2021, 70 (5): 515–520.
- [6] LIU B, SUID S, GUO Z M, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of bronze/steel bimetallic laminated composite prepared by protective atmosphere casting process [J]. *China Foundry*, 2021, 18 (5): 497–504.
- [7] TAGHAVI F, SAGHAFIAN H, KHARRAZI Y. Study on the effect of prolonged mechanical vibration on the grain refinement and density of A356 aluminum alloy [J]. *Materials and Design*, 2009, 30 (5): 1604–1611.
- [8] XIAO B T, FAN Z T, JIANG W M, et al. Effect of vibration frequency on primary phase and properties of grey cast iron fabricated by lost foam casting [J]. *China Foundry*, 2020, 17 (1): 7–13.
- [9] CHIRITA G, STEFANESCU, SOARES D, et al. Influence of vibration on the solidification behaviour and tensile properties of an Al–18wt%Si alloy [J]. *Materials & Design*, 2009, 30 (5): 1575–1580.
- [10] 杨宝, 张慧, 王明林, 等. 振动条件下金属凝固过程的研究现状与展望 [J]. *钢铁钒钛*, 2022, 43 (1): 135–144.
- [11] SELIVORSTOV V, DOTSENKO Y, BORODIANSKIY K. Influence of low-frequency vibration and modification on solidification and mechanical properties of Al–Si casting alloy [J]. *Materials*, 2017, 10 (6): 560.
- [12] TIMELLI G, CORTE E D, BONOLLO F. Effect of mechanical mould vibration on solidification behaviour and microstructure of A360–SiC_p metal–matrix composites [J]. *Materials Science Forum*, 2011, 678: 105–114.
- [13] GUO H M, ZHANG A S, YANG X J, et al. Microstructure formation and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy solidified with a novel mechanical vibration technique [J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2014, 45 (1): 438–446.
- [14] CAMPBELL J. Effects of vibration during solidification [J]. *International Metals Reviews*, 1981, 26 (1): 71–108.
- [15] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1991, 22: 957–981.
- [16] FAN Z. Semisolid metal processing [J]. *International Materials Reviews*, 2002, 47 (2): 49–85.
- [17] WAN G, SAHM P R. Ostwald ripening in the isothermal rheocasting process [J]. *Acta Metallurgica Et Materialia*, 1990, 38 (6): 967–972.
- [18] KOCATEPE K. Effect of low frequency vibration on porosity of LM25 and LM6 alloys [J]. *Materials & Design*, 2007, 28 (6): 1767–

1775.

- [19] YADOLLAHTABAR H, SAGHAFIAN S H, SHABESTARI G. Effect of mechanical vibration during solidification on the microstructure and mechanical properties of A380 aluminum alloy [J]. *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, 2008, 19 (5): 65–74.
- [20] JIANG W M, FAN Z T, LIU D J, et al. Correlation of microstructure with mechanical properties and fracture behavior of A356-T6 aluminum alloy fabricated by expendable pattern shell casting with vacuum and low-pressure, gravity casting and lost foam casting [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2013, 560: 396–403.
- [21] ZHOU Y, NORTH T H. Numerical model for the effect of grain boundaries on the total amount diffused [J]. *Acta Metallurgica Et Materialia*, 1994, 42 (3): 1025–1029.

Influence of Vibration on Solidification Structure of Copper-Steel Bimetal Melt-Cast Composite

YANG Shi-hao, YIN Yan-guo, FANG Xiao-liang, LI zhi-ming
(Institute of Tribology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract:

By applying mechanical vibration to the casting during the cooling process of the copper-steel bimetal melt-cast process, the influence of the vibration frequency on the solidification structure of the copper alloy and the joint surface of the copper-steel bimetal under the condition of 0.2 mm amplitude was studied. The results show that applying mechanical vibration with an amplitude of 0.2 mm and a frequency of 40 Hz during the cooling stage of the casting can effectively refine the solidified structure of the copper alloy side, the Brinell hardness and structure uniformity are significantly improved, and the grain size of the copper alloy is reduced and transformed from dendrite to equiaxed crystals, segregation and aggregation of lead elements are significantly improved, and pores and micro-shrinkage are effectively eliminated. A metallurgical bond is formed between the copper alloy and the steel matrix, and the shear fracture modes both without vibration and after vibration are mixed. After vibration, the shear strength decreases due to the change in the distribution of $\alpha+\delta$ hard and brittle phases.

Key words:

copper-steel bimetal; melt-cast; mechanical vibration; microstructure; interfacial bonding
