

文章编号: 1006-3080(2025)01-0129-06

DOI: 10.14135/j.cnki.1006-3080.20240116002

掺杂元素对黄铜切削性能的影响

顾宇, 雷学林, 沈宏涛, 何云

(华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘要:为探讨不同掺杂元素对黄铜合金切削性能的影响, 制备了5种掺杂不同元素的黄铜(2%(质量分数, 下同)Sn黄铜、0.5%Sn黄铜、Sn-Fe黄铜、Pb黄铜、Si黄铜), 并与H59黄铜的组织金相、力学性能、切削性能等进行对比。结果表明, 2% Sn黄铜切削性能优于0.5% Sn黄铜; Sn-Fe黄铜和Pb黄铜因其晶界弥散着第二相颗粒质点, 使得其切削和断屑性能较好; 6种黄铜的切削力大小顺序为: 0.5% Sn黄铜>2% Sn黄铜>Sn-Fe黄铜>Si黄铜>H59黄铜>Pb黄铜; Pb黄铜的切削性能较好但机械强度较差, Si黄铜具有不错的机械强度和切削性能。

关键词:黄铜; 掺杂元素; 金相组织; 力学性能; 切削性能

中图分类号: TG146; TG51

文献标志码: A

黄铜作为铜合金中最为重要的合金之一, 具有良好的导电导热和冷热加工性能、且有耐腐蚀和优良的力学性能^[1]。普通黄铜是由Cu和Zn两种元素构成的合金, 而复杂黄铜是在普通黄铜的基础上继续加入微量的合金元素如Mn、Si、Pb、Sn、Al、Ni、Fe等^[2], 这些元素会以固溶反应或原位反应合成第二相的形式存在于基体中, 通过固溶强化或者第二相强化提高合金的力学性能, 同时弥散分布的第二相质点优化了黄铜的加工性能^[3]。由于黄铜制品在各个领域都有广泛应用, 故找到合适掺杂元素的高性能易加工黄铜成为黄铜加工领域的迫切需求^[4]。

Sn黄铜在国际上又被称为“海军黄铜”^[5], Sn元素溶入铜基固溶体中, 其原子和溶剂晶格中的铜原子互换, 形成置换固溶体, 起到固溶强化作用。随着Sn掺入量的增加, 固溶体中开始出现了 γ_1 相(即CuZnSn化合物^[6]), 该相不利于合金塑性变形。添加了Pb元素的黄铜在切削过程产生的热量较高, 这些热量可使低熔点的Pb熔化, 熔化的Pb可发挥类似石墨的润滑作用^[7-8], 故Pb元素的存在显著提高了黄铜的加工性能^[9]。此外, 黄铜合金中Pb元素含量的减少会导致加工表面边缘毛刺尺寸增大, 切削力增

大。文献[10]分别在黄铜中加入1%(质量分数, 下同)、2%、3%、4%的Si元素制备硅黄铜, 发现加入1% Si黄铜后切削力和表面粗糙度(R_a)最大, 加入4% Si黄铜后切削力和表面粗糙度最小。吴维冬等^[11]在黄铜中加入Mg、Sb等合金元素, 形成了硬且脆的金属间化合物颗粒。这些金属间化合物在基体中弥散均匀析出, 切削时表面会同时受到热应力和位错应力的耦合作用导致应力集中, 加强了断屑性能, 从而使Mg、Sb黄铜在具有更好力学性能的同时兼具与Pb黄铜相当的切削性能。

鉴于复杂黄铜的多样性, 先前的研究主要集中于同种元素不同含量掺杂黄铜切削性能的对比。然而鲜有不同元素掺杂的黄铜在切削性能上的比较。因此, 本文着重针对Sn掺入量为2%的黄铜(以下简称2Sn黄铜)、Sn掺入量为0.5%的黄铜(以下简称0.5Sn黄铜)、主要掺杂元素为Sn和Fe的黄铜(以下简称Sn-Fe黄铜)、主要掺杂元素为Pb的Pb黄铜以及主要掺杂元素为Si的Si黄铜, 对比探讨了掺杂元素对复杂黄铜合金金相组织、力学性能和切削性能的影响规律, 以获得在保证黄铜机械强度的同时具有最优切削性能的黄铜的元素掺杂方案。

收稿日期: 2024-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(51705155)

作者简介: 顾宇(1999—), 男, 上海人, 硕士生, 主要研究方向为精密加工。E-mail: Y81220003@mail.ecust.edu.cn

通信联系人: 雷学林, E-mail: xuelinlei@ecust.edu.cn

引用本文: 顾宇, 雷学林, 沈宏涛, 等. 掺杂元素对黄铜切削性能的影响[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2025, 51(1): 129-134.

Citation: GU Yu, LEI Xuelin, SHEN Hongtao, et al. Effect of Doping Elements on Machining Performance of Brass[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2025, 51(1): 129-134.

1 试验部分

1.1 合金材料的制备

本文利用中频感应炉制备了 6 种合金材料, 图 1 所示为简易示意图, 熔炼时将感应炉温度范围设置为 1050~1100 °C。首先将中频感应炉先升温预热, 达到设定温度后加入紫铜, 观察紫铜快融化时在其表面覆盖一层木炭, 待铜完全熔化后切断电源, 保温 2 min, 降低温度后加入锌块, 保温 4 min, 最后加入其他掺杂元素, 在 1060 °C 下保温 5 min, 全部熔化后, 保温一段时间, 经搅拌扒渣后浇铸。最后把铸锭加工至长度为 150 mm、外圆直径为 20 mm 的圆棒。通过 Zeiss Sigma 300 型能谱仪(蔡司公司)对制成的黄铜材料进行多点扫描, 并结合相关文献^[12-14], 得出掺杂不同元素黄铜的化学成分的质量分数(表 1)。

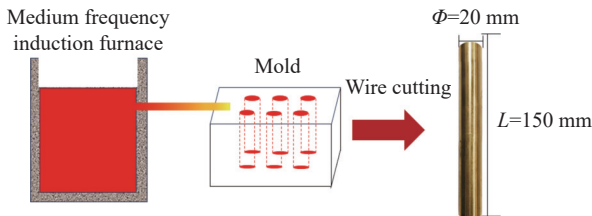


图 1 黄铜合金棒材铸造加工示意图

Fig. 1 Schematic diagram of brass alloy rod casting and processing

表 1 不同掺杂元素黄铜的成分

Table 1 Composition of copper alloys with different doping elements

Type	w/%					
	Cu	Zn	Sn	Fe	Pb	Si
2Sn	57	Remain	2.0	0.05	/	/
0.5Sn	59	Remain	0.5	0.01	/	/
Sn-Fe	62	Remain	0.5	0.20	/	/
Pb	59	Remain	/	0.10	1.0	/
Si	60	Remain	0.2	/	0.1	1.0
H59	59	Remain	/	0.10	0.3	/

1.2 黄铜合金组织的表征

首先用线切割设备从铸棒上切割一部分样品, 用环氧树脂进行镶嵌, 然后依次用 380#、500#、1000#、2000#的砂纸进行湿式打磨至表面无明显划痕, 再机械抛光至镜面, 最后采用高氯化铁盐酸水溶液(9 g FeCl_3 + 30 mL 浓盐酸+200 mL 水)腐蚀 30 s 后用酒精冲洗后并迅速吹干, 借助 Axio Imager M 型金相显微镜(蔡司公司)观察试样的微观组织, 并进行图像采集。

1.3 黄铜合金的力学性能测试

材料的拉伸试验在 MTS Teststar 810 型电子万能材料试验机(美国 MTS 公司)上进行, 拉伸速度为 1 mm/min, 拉伸试样尺寸如图 2 所示。

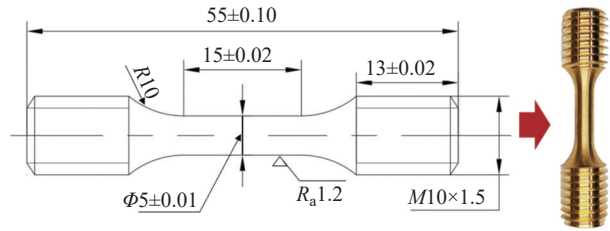


图 2 黄铜合金拉伸试样示意图(单位: mm)

Fig. 2 Schematic diagram of brass alloy tensile specimens (Unit: mm)

利用上述金相研磨后的镶嵌试样, 在 HVS-1000 型小负荷 Vickers 硬度计(上海高致精密有限公司)上进行材料硬度测试。加载载荷为 300 g, 加载时间 15 s, 对每个试样进行 10 次测量并取平均值。

1.4 黄铜合金的切削性能评价

切削试验在金陵 C3136 数控车床上开展, 刀片采用山高 TNMG160404-MF2 TP100 硬质合金刀具。切削力测量设备为 Kistler 9257B(奇乐石公司)测力仪; 切削过程实物图和切削力(F_x 、 F_y 、 F_z 为不同方向的切削力)方向如图 3 所示。切削参数为: 线速度 60 m/min, 背吃刀量为 0.5 mm, 进给量 0.125 mm/r, 具体详细切削参数见表 2。每次切削完后收集并观察黄铜合金的切屑形貌。在每根黄铜棒切削长度达到 360 mm 后采用二维划线式表面粗糙度测量仪沿轴向测量已切削黄铜棒圆柱面的表面粗糙度。

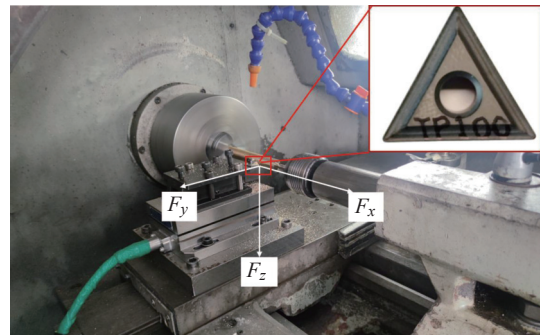


图 3 黄铜切削测力过程及切削力方向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of brass cutting force measurement process and cutting force direction

2 结果与讨论

2.1 不同掺杂元素黄铜组织形貌分析

图 4 所示为不同掺杂元素黄铜的金相组织, 其中 α 相是以 Cu 为基体的固溶体, 具有面心立方结

表2 黄铜合金棒切削参数
Table 2 Cutting parameter of brass alloy rod

Cutting length/mm	Workpiece diameter/mm	Velocity/($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	Speed/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	Depth of cut/mm	Feed rate/($\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$)
45	19.5	60	979	0.5	0.125
90	18.5	60	1032	0.5	0.125
135	17.5	60	1091	0.5	0.125
180	16.5	60	1157	0.5	0.125
225	15.5	60	1232	0.5	0.125
270	14.5	60	1317	0.5	0.125
315	13.5	60	1414	0.5	0.125
360	12.5	60	1527	0.5	0.125

构,不易腐蚀,在明场下呈现亮白色,多为条状或不规则块状,且无明显方向性。 β 相是以电子化合物Cu、Zn为基体的固溶体,具有体心立方结构,含锌量较高且易受侵蚀,在明场下颜色较深,呈现出黑色或深灰色,没有明显晶界。第二相不易被腐蚀,呈现出深蓝色、黑色颗粒状或棒状。

同时,由图4(a)、(b)可以看出,其中 β 相呈长条状分布,在 β 相界中分布着大量块状的 γ_1 相组织。随着Sn质量分数的增加,晶粒细化,形成独特的细长条型 β 相结构,生成 γ_1 相组织^[15],并能够与 β 相共存形成这种独特的($\beta+\gamma_1$)相的结构。图4(c)所示Sn-Fe黄铜中长条及小块状组织为 α 相,基体组织为 β 相组织,其间可以看到较多的第二相Fe颗粒质点弥散分布于晶界内。由于铁在黄铜中溶解度极少,超过其溶解度即以富铁相的微粒析出并作为“人工晶核”细化黄铜组织,并阻止再结晶晶粒长大,从而提高黄铜的力学性能和加工性能^[16]。图4(d)所示Pb黄铜组织中长条状及小块状错落排布的组织为 α 相, β 相组织分布于 α 相之间。Pb极少固溶于铜锌合金中,大多以独立相的形式存在,呈游离质点在晶粒内部和晶界析出,有着细化晶粒的作用。图4(e)所示为Si黄铜中的 α 相呈不规则长条状和块状分布于基体之中,两相的组织形态也发生较大的变化,由于Si元素含量变大, α 相区缩小和 β 相区增大。图4(f)所示为H59标准黄铜的金相组织结构,其中 α 相呈不规则形状,错落散布在暗色的 β 相组织基体中,并有一些第二相颗粒质点弥散分布于晶界中^[17]。

2.2 不同掺杂元素黄铜材料力学性能分析

图5所示为不同掺杂元素黄铜材料的应力应变曲线和力学性能。从图中可以看出,不同黄铜的屈服强度($R_{p0.2}$)范围为132~205 MPa,维氏硬度范围为106~165 HV。其中Sn元素掺杂量从0.5%增加到2.0%后,黄铜合金的抗拉强度提高但延伸率下降^[18],

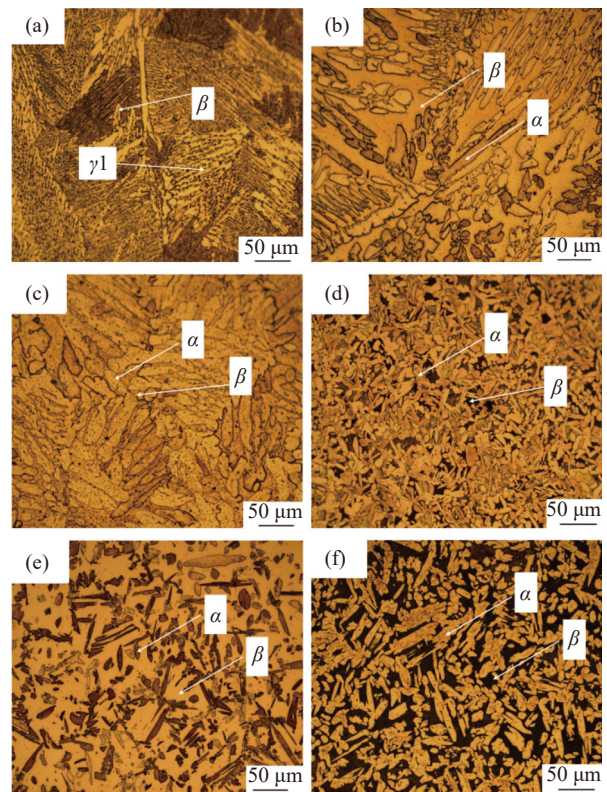


图4 不同掺杂元素的黄铜金相组织图: 2Sn(a); 0.5Sn(b); Sn-Fe(c); Pb(d); Si(e); H59(f)

Fig. 4 Metallographic organization picture of brass with different doping elements: 2Sn (a); 0.5Sn (b); Sn-Fe (c); Pb (d); Si (e); H59 (f)

这是由于Sn元素的掺入细化了晶粒,使晶界变多,导致位错移动困难,使得抗拉强度增大。Sn元素的掺入同样增大了 β 相在组织中的占比,同时少量Sn元素与基体组织形成固溶强化,提高了Sn黄铜的硬度。Sn-Fe黄铜的抗拉强度较0.5Sn黄铜下降了9%(图5(a)),但是延伸率较好,是由于Fe第二相颗粒质点在晶间起到润滑作用;Pb黄铜的强度、硬度均较低,分别为H59黄铜的95%和86%,因为Pb的游离质点细化了晶粒并在晶界析出生成大量微观滑移面,使其具有较低的力学性能;Si黄铜的抗拉强度和硬度最高^[19],分别为H59黄铜的107.9%(图5(a))和134%(图5(c)),因为掺杂了Si元素的黄铜组织中 β 相在($\alpha+\beta$)相结构中占比较大,而 β 相组织的强度、硬度都较高,故Si黄铜具有较高的硬度和抗拉强度^[20]。

2.3 不同掺杂元素黄铜切削力分析

6种不同掺杂元素的黄铜合金棒材,在每刀切削长度为45 mm、切削至360 mm后,每刀 F_x 方向的主切削力如图6(a)所示。图6(b)所示为每一段切削长度测力仪所采集到的切削力波形数据,进刀前所有力几乎为0,在切削时产生 F_x 、 F_y 、 F_z 3个方向上的

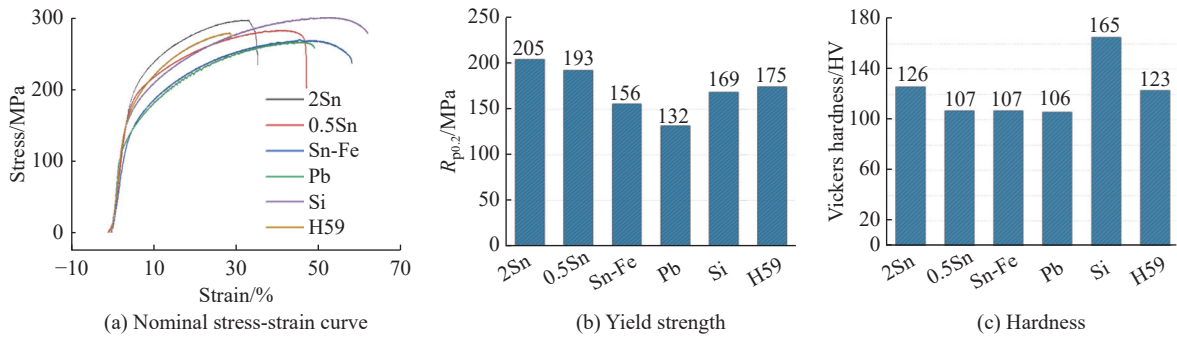


图 5 不同掺杂元素的黄铜的力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of brass with different doping elements

力,其中 F_x 最大,为主切削力,主切削力从大到小依次为: 0.5Sn 黄铜 > 2Sn 黄铜 > Sn-Fe 黄铜 > Si 黄铜 > H59 黄铜 > Pb 黄铜。可以看出, 2Sn 黄铜的切削力小于 0.5Sn 黄铜,但较 H59 黄铜提高了 37%。因 Sn 掺杂量增加, β 相从块状转变为致密的长条网状结构,同时独特的 $(\beta+\gamma_1)$ 结构降低了切削力。Sn-Fe 黄铜由于 Fe 质点弥散在晶体和晶界内,细化晶粒,并阻碍了晶粒的进一步生长,有助于降低切削力,相较 0.5Sn 黄铜,其切削力减小了约 9%。Pb 黄铜中由于 Pb 极少固溶于铜锌合金中,大多以独立相形式游离于晶粒内部和晶界,细化了晶粒。在切削过程中, Pb 质点受热易融化,在切削表面起到“润滑”的作用,使切削力降低,其切削力较 H59 黄铜减少了 19%。Si 黄铜的抗拉强度和硬度分别为 H59 黄铜的 107.9% 和 134.1%,由于 Si 元素的含量较大,增大了 β 相的占比,故其切削力相应增大,比 H59 黄铜提高了 21.5%。而且 Si 元素主要固溶于 β 相中,加大了 β 相和 α 相之间的硬度差,反而更利于切削。

图 7 所示为 6 种黄铜合金切削力的平均值,由式(1)综合 F_x 、 F_y 、 F_z 3 个方向上的力得到切削力 F 。

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

由图 7 可见,6 种材料的平均切削力在 50~100 N 的范围内,不同掺杂元素材料的平均切削力的大小排序为: 0.5Sn 黄铜 > 2Sn 黄铜 > Sn-Fe 黄铜 > Si 黄铜 > H59 黄铜 > Pb 黄铜。其中 Pb 掺杂黄铜合金平均切削力明显小于其他黄铜合金。

2.4 不同元素掺杂黄铜切削面表面粗糙度分析

图 8 展示了 6 种材料在切削长度达到 360 mm 后的表面粗糙度情况。由图可得, 2Sn 黄铜和 0.5Sn 黄铜的表面粗糙度非常接近; Si 黄铜和 H59 黄铜的表面粗糙度要优于其他 4 种材料; 而 Pb 黄铜和 Sn-Fe 黄铜的表面粗糙度略高。这是由于添加了 Fe 和 Pb 元素的黄铜在切削时所产生的热量较高,切削温度的上升增强了被刀具挤压的黄铜材料的热软化效

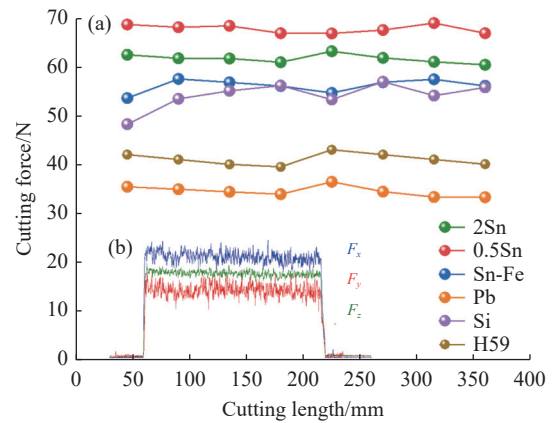
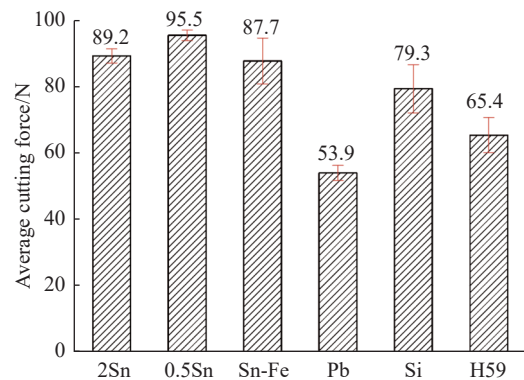
图 6 6 种不同掺杂元素黄铜合金的 F_x 主切削力对比情况Fig. 6 Comparison of F_x main cutting forces of six different doped brass alloys

图 7 6 种不同掺杂元素黄铜合金的平均切削力对比情况

Fig. 7 Comparison of average cutting force for six different doped brass alloys

应^[21],因此导致其表面粗糙度的增大。

2.5 不同元素掺杂黄铜的切屑分析

6 种不同黄铜合金在切削速度为 60 m/min 下的宏观切屑形貌如图 9 所示。由图可见, 2Sn 黄铜在切削时所产生的切屑整体都为 C 型碎屑,随着 Sn 含量的减少其断屑性能变差,这是由于相界中分布有利于断屑的 Cu、Zn、Sn 脆性化合物也相应减少,进而导致其出现螺旋状长条切屑^[22]; Sn-Fe 黄铜合金的切

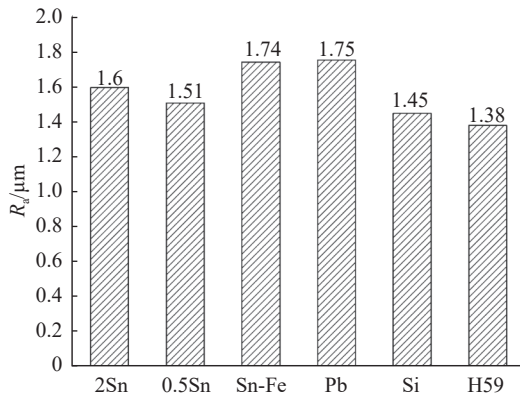


图8 6种材料在360 mm长度下的表面粗糙度

Fig. 8 Surface roughness of six materials under 360 mm cutting length

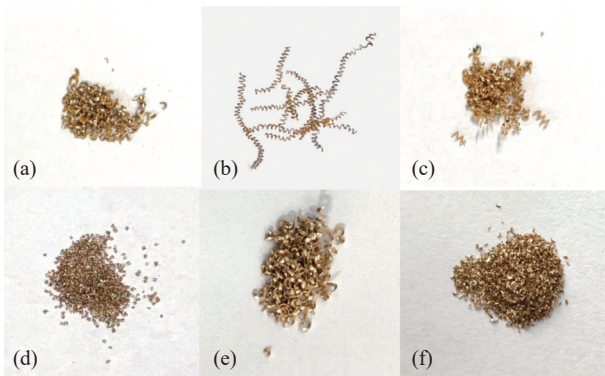


图9 6种掺杂不同元素的黄铜合金在相同切削速度下的切屑宏观形貌: 2Sn(a); 0.5Sn(b); Sn-Fe(c); Pb(d); Si(e); H59(f)

Fig. 9 Macroscopic morphology of chips in brass alloys with six different doping elements at the same cutting speed: 2Sn (a); 0.5Sn (b); Sn-Fe (c); Pb (d); Si (e); H59 (f)

屑整体都为C型碎屑,其中游离弥散分布的Fe质点起到较好的断屑作用;Pb黄铜因其晶界中存在的游离Pb质点,切口效应明显,导致整体切屑呈细粉状C型碎屑,无其他形貌的切屑出现,切屑性能好;Si黄铜中因Si元素固溶于 β 相使其变脆,包括相界的脆性化合物 Cu_9Si ,在切削过程中不同软硬相在切削力的作用下相互作用断裂,一定程度上提高了其断屑能力;H59黄铜中由于含有Pb元素,故整体断屑性能较好,其切屑呈C型碎屑,形貌均匀。

3 结论

(1)不同掺杂黄铜的抗拉强度依次为:Si黄铜>2Sn黄铜>H59黄铜>0.5Sn黄铜>Sn-Fe黄铜>Pb黄铜,Sn元素过量导致黄铜晶粒结构细化并使其力学性能提高。Fe和Pb不溶于铜锌合金,游离质点阻碍晶粒生长并降低力学性能。由于Si元素的高含量增大了 β 相在 $(\alpha+\beta)$ 中占比,导致合金的抗拉强度和硬

度较H59黄铜分别提高了7.9%和34.1%。

(2)不同掺杂黄铜的平均切削力依次为:0.5Sn黄铜>2Sn黄铜>Sn-Fe黄铜>Si黄铜>H59黄铜>Pb黄铜;2Sn黄铜独特的 $(\beta+\gamma_1)$ 相晶体结构降低了切削力,其切削力小于0.5Sn并较H59黄铜提高了37%。Sn-Fe黄铜切削力较0.5Sn减少了9%,但是Fe质点优化了断屑性能。Pb游离质点降低了合金的切削力,使切削力较H59黄铜减少了19%。Si黄铜切削力仅比H59黄铜提高了21.5%,且断屑表现良好。

(3)Pb黄铜的切削加工性能较好,但是Si黄铜在力学性能较好的同时还表现出较好的切削加工性能。

参考文献:

- [1] 余富忠. 6061铝合金与TC4钛合金异种金属CMT焊接研究[J]. 热加工工艺, 2015, 425(19): 209-211.
- [2] 王涛. 新型高强耐磨复杂黄铜及其生产技术[J]. 有色金属加工, 2005(6): 1-9.
- [3] 李四年, 陈园, 叶甲旺, 等. 汽车同步器齿环的生产现状与发展前景[J]. 湖北工业大学学报, 2012, 27(1): 114-116.
- [4] 张娟, 李周, 陈畅, 等. 含铈铝黄铜的显微组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(11): 1989-1994.
- [5] 袁学敏. 海军黄铜的制备工艺及应用探讨[J]. 世界有色金属, 2017(13): 220-222.
- [6] TAHA M A, MAHALLAWY N A, HAMMOUDA R M, *et al.* Machinability characteristics of lead free-silicon brass alloys as correlated with microstructure and mechanical properties[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2012, 3(4): 383-392.
- [7] JOHANSSON J, ALM P, M'SAOUBI R, *et al.* On the function of lead (Pb) in machining brass alloys[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(11): 7263-7275.
- [8] HSIEH C C, WANG J S, WU P T Y, *et al.* Microstructural development of brass alloys with various Bi and Pb additions[J]. *Metals and Materials International*, 2013, 19: 1173-1179.
- [9] ZOGHIPOUR N, TASCIOGLU E, CELIK F, *et al.* The influence of edge radius and lead content on machining performance of brass alloys[J]. *Procedia CIRP*, 2022, 112: 274-279.
- [10] DOOSTMOHAMMADI H, MORIDSHAHI H. Effects of Si on the microstructure, ordering transformation and properties of the Cu60Zn40 alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 640(12): 401-407.
- [11] 吴维冬, 朱权利, 刘楷周, 等. 热挤压铋镁黄铜的显微组织

- 及性能 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2008, 28(11): 898-900.
- [12] 陈一胜, 刘位江, 朱志云, 等. 不同相组成的硅黄铜组织性能的研究 [J]. *有色金属科学与工程*, 2014, 5(3): 32-37.
- [13] 钱泽涛, 王敏, 苏华. Sn 对 H65 黄铜组织和性能的影响 [J]. *铜业工程*, 2016(4): 41-44.
- [14] 张英. Sn 对 H65 黄铜组织性能的影响 [D]. 江西赣州: 江西理工大学, 2016.
- [15] VILARINHO C, DAVIM J P, SOARES D, *et al.* Influence of the chemical composition on the machinability of brasses[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 170(1/2): 441-447.
- [16] 聂小龙, 张旭东, 刘新宽, 等. Al 和 Sn 对再生 Bi 黄铜组织和性能的影响 [J]. *有色金属材料与工程*, 2021, 42(1): 23-30.
- [17] 杨超, 陶靖驰, 卢海洲, 等. 无铅环保硅黄铜的耐腐蚀性能 [J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(12): 2717-2728.
- [18] RAJABI Z, DOOSTMOHAMMADI H. Effect of addition of tin on the microstructure and machinability of α -brass[J]. *Materials Science and Technology*, 2018, 34(10): 1218-1227.
- [19] 朱权利, 田小平, 杨超. 无铅易切削硅黄铜的组织 and 性能研究 [J]. *铸造*, 2017, 66(7): 691-694.
- [20] 陆文华. 铸造合金及其熔炼 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [21] 陈曙光, 刘平, 田保红. C3602 铅黄铜切削表面粗糙度的研究 [J]. *机械制造与机床*, 2005(5): 86-88.
- [22] 刘柏雄, 张丽娜. Sn 对易切削 Bi 黄铜组织及性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2011, 31(3): 288-290.

Effect of Doping Elements on Machining Performance of Brass

GU Yu, LEI Xuelin, SHEN Hongtao, HE Yun

(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: In order to investigate the influence of different doping elements on the machinability of brass alloys, five types of doped brass alloys were prepared: 2%Sn brass, 0.5% Sn brass, Sn-Fe brass, Pb brass, and Si brass. Their microstructure, mechanical properties, and machinability were compared with H59 brass. The results indicate that the cutting performance of tin-brass with 2% (mass fraction) Sn is superior to that of Sn brass with 0.5% (mass fraction) Sn. Sn-Fe and Pb-brasses exhibit excellent cutting abilities and chip-breaking properties due to the presence of second phase particles dispersed along their grain boundaries. The ranking order for cutting forces among these six types of brasses is as follows: 0.5% Sn brass > 2% Sn brass > Sn-Fe brass > Si brass > H59 brass > Pb brass; while Pb-brass demonstrates good machinability but poor mechanical strength, Si-brass exhibits both good machinability and improved mechanical strength.

Key words: brass; doped element; metallographic structure; mechanical property; machining performance

(责任编辑: 王晓丽)