

DOI: 10.11973/jxgcl202002001

卫浴行业用环保硅黄铜的研究进展

汪火良

(九牧厨卫股份有限公司, 厦门 361000)

摘要: 从产业化角度, 综述了卫浴行业用环保硅黄铜的研究进展, 重点介绍了低锌硅黄铜、硅铋黄铜、硅磷黄铜、硅锰黄铜的化学成分、综合性能以及生产应用情况, 简单介绍了硅黄铜的变质处理, 最后展望了环保硅黄铜的研究趋势, 提出未来的研究方向应集中于降低成本、提高铸造性能以及进行变质处理等方面。

关键词: 环保硅黄铜; 切削性能; 变质处理; 成分

中图分类号: TG146.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)02-0001-06

Research Progress of Eco-Friendly Silicon Brass for Bathroom Industry

WANG Huoliang

(JOMOO Kitchen & Bathroom Appliance Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: The research progress of eco-friendly silicon brass for bathroom industry is summarized from the point of industrialization. The chemical composition, comprehensive properties and producing application of low zinc silicon brass, silicon-bismuth brass, silicon-phosphorus brass and silicon-manganese brass are described in detail, and the modification of silicon brass is briefly introduced. The research trend of eco-friendly silicon brass is prospected, and the research direction in future, such as focusing on cost reduction, casting property improvement and modification, is put forward.

Key words: eco-friendly silicon brass; cutting performance; modification treatment; composition

0 引言

传统铅黄铜因具有良好的冷热成型性能、切削性能和耐腐蚀性能等优点而广泛应用于仪表零件, 电器连接件, 卫浴行业的水管、水龙头和阀门等零部件上。铅黄铜的主要成分是铜和锌, 另外的铅几乎不能固溶于铜锌二元合金, 也不会与铜或锌形成金属间化合物, 而是以游离状态分布于基体中。当铅黄铜用于卫浴管道系统时, 在水的冲刷和浸泡下, 表面的铅易溶出而进入水中, 从而对人体和环境造成严重危害。因此, 世界各国陆续出台了严格的法律法规以限制给水管道零部件用黄铜材料中的铅含量。美国加州政府在 2006 年通过了加州上水管道产品铅含量法令(AB1953), 规定在管道类产品及配件中, 与水接触部位的铅含量(质量分数, 下同)不得超过 0.25%; 美国国家卫生基金会制定的 NSF/

ANSI 61 标准规定饮用水系统中铅的检测统计值不能超过 $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 我国 GB 18145—2014 标准也规定铅在水中的溶出量不得超过 $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。开发低铅含量, 同时具备良好制造和加工性能的新型环保黄铜已成为行业发展的必然趋势。

自 20 世纪 90 年代以来, 国内外学者逐步开展无铅黄铜的研究工作, 相继开发出铋黄铜、硅黄铜和锑黄铜等新型无铅环保黄铜。美国和日本较早开发出铋黄铜, 并形成了较为完整的铋-硒和铋-锡黄铜合金体系^[1]。国内路达(厦门)工业有限公司开发的无铅易切削铋铝黄铜通过了中国有色金属工业协会的科技成果转化鉴定, 切削效率达到铅黄铜的 90%。然而铋的表面张力远小于铜的, 且铋易与锡、磷等元素形成低熔点化合物并呈网状或连续薄膜状分布在晶界上, 导致晶粒间结合力降低, 因此铋黄铜具有热脆和冷脆特性, 其耐脱锌腐蚀和耐应力腐蚀性能差, 在产品制造及使用过程中存在开裂风险^[2]。由此可见, 铋黄铜并非铅黄铜理想的替代材料。宁波博威

集团率先开发出一系列新型无铅易切削锑黄铜，其锑含量为 $0.3\% \sim 2.0\%$ ，切削性能与C36000铅黄铜相当；但由于锑对人体和环境具有毒性，析出量易超过NSF/ANSI 61和GB 18145—2014规定的上限 $0.6 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，因此难以在卫浴管道领域推广应用。此外，还有很多关于镁黄铜、钙黄铜、磷黄铜和石墨黄铜等方面的研究和专利，但这些铜合金大都还停留在试验研究阶段，离大规模产业化应用还有较大距离。硅黄铜具有良好的力学性能和耐腐蚀性能，其组织中硬脆的 γ 相可替代铅颗粒来实现易切削加工性能，并且硅是地壳中含量第二丰富的元素，在生产及使用过程中无有害物质产生，因此硅黄铜是目前铅黄铜最为理想的替代材料。

根据相组成，硅黄铜可分为 $(\alpha+\beta)$ 型硅黄铜、 $(\beta+\gamma)$ 型硅黄铜以及 $(\beta+\alpha/\gamma/\kappa/\mu)$ 型硅黄铜。TAHA等^[3]研究了不同硅含量对CuZn40环保黄铜组织的影响，得出以下规律：当 $0 \leq w(\text{Si}) \leq 1\%$ 时，硅黄铜以 $(\alpha+\beta)$ 相为主，随着硅含量增加，硅黄铜中 α 相比例降低， β 相比例增加，有时会出现少量的 γ 相和 λ 相；当 $1\% \leq w(\text{Si}) \leq 2\%$ 时，硅黄铜以 β 相为主，组织中 γ 相和 λ 相的比例随着硅含量增加而增加， α 相含量较低，有时会出现少量的 η 相和 χ 相；当 $2\% \leq w(\text{Si}) \leq 3\%$ 时，硅黄铜中 β 相的含量随着硅含量的增加而逐渐减少， γ 相和 λ 相则逐渐增加，组织中基本不存在 α 相。根据主添加元素的不同，环保硅黄铜又分为低锌硅黄铜、硅铋黄铜、硅磷黄铜和硅锰黄铜等。目前国外主要进行低锌环保硅黄铜（如C87850硅黄铜）的开发，而国内则在多元复合硅黄铜的研究方面走在世界前沿。作者从成分设计、显微组织及性能等方面，综合介绍了这4种环保硅黄铜的研究进展及其在卫浴行业的应用现状，并简单介绍了硅黄铜的变质处理研究情况，以期为国内外学者对环保硅黄铜的研究提供一定参考。

1 环保硅黄铜的成分及性能

1.1 低锌环保硅黄铜

日本三菱伸铜株式会社开发出的低锌硅黄铜合金ECOBRASS在美国铜业发展协会成功注册合金牌号C87850，同时纳入一系列ASTM标准（如ASTM B584、ASTM B806、ASTM B30等）中，成为国际环保硅黄铜的典型牌号。ECOBRASS铜合金是一种硅含量约为3%的高性能新型无铅环保黄铜，具有良好的切削性能及优异的成型性能，同时解

决了应力腐蚀开裂及脱锌腐蚀问题。基于ECOBARSS铜合金，科研工作者相继开发出C87400、C87500、C87800等牌号铜合金，形成了较为完善的低锌环保硅黄铜体系；该体系铜合金中的铜含量大于75%，硅含量大于2.5%，铅含量小于1%，铝含量小于0.8%。与铅黄铜相比，低锌硅黄铜的强度高（抗拉强度不低于345 MPa），断后伸长率低（15%~18%），相对切削率均达到C36000铅黄铜的70%以上。

NOBEL等^[4]研究了低锌硅黄铜的组织和加工性能，发现其组织为 α 相加少量 κ 相和 γ 相，其中 κ 相和 γ 相具有硬脆性，能起到切削断屑作用，从而使低锌硅黄铜具有优异的切削加工性能。

HOFMANN等^[5]研究了硅系易切削黄铜，当化学成分为76.65% Cu, 3.27% Si, 0.01% Sn, 0.01% Fe, 0.01% Ni, 0.01% Mn, 20.04% Zn时，其耐腐蚀性能优异，抗拉强度（697 MPa）和屈服强度（412 MPa）均高于CuZn39Pb3铅黄铜的（475 MPa, 375 MPa），最大脱锌层深度（165 μm ）则远低于CuZn39Pb3铅黄铜的（1 200 μm ），适用于制造卫浴管道系统零部件。

国内主要铜材制造厂也进行了一系列环保低锌硅黄铜的开发，如浙江天申铜业开发出适合重力铸造的无铅环保硅黄铜^[6]，其化学成分为70%~80% Cu, 0.7%~3.0% Si, 0.2%~0.7% Al，余锌。该铜合金最突出的特点是流动性较好，保证了重力铸造的质量和良品率，在洁具行业具有良好的应用前景。

宁波博威合金公司开发出一种低钙易切削硅黄铜^[7]，其化学成分为73.5%~78.4% Cu, 3.0%~3.45% Si, 0.001%~0.15% Ca, 0.03%~0.3% 稀土（RE），其他元素0.015%~0.95%，余锌。采用钙、稀土元素替代元素铅，可以在基体中形成均匀分布的含钙化合物和稀土化合物，使得该硅黄铜的切削性能和耐应力腐蚀性能明显提升，且抗氧化性能优良。

海亮集团开发出一种含硅无铅易切削黄铜^[8]，其化学成分为80%~84% Cu, 2.5%~5.0% Si, 0.02%~0.1% As，余锌。该黄铜的热加工性能与日本C3771铅黄铜相当，切削加工性能与日本C3604铅黄铜相当，耐腐蚀性能优于HPb59-1铅黄铜，可用于生产加工对强度要求较高、形状复杂的产品。

低锌硅黄铜基本不含有毒元素，性能优良，但其铜含量普遍在70%以上。高昂的成本及铜资源紧

缺等诸多限制条件导致低锌环保硅黄铜缺乏市场竞争力。同时,日本三菱伸铜株式会社在全球范围内申请了专利保护,亦给低锌硅黄铜的推广和应用造成诸多限制。目前低锌硅黄铜仅少部分应用于日本、澳洲和东南亚等海洋环境区域,主要替代成本更加高昂的青铜材料用于制造阀体和龙头等产品。

1.2 硅铋环保黄铜

与HPb59-1铅黄铜相比,铋硒系、铋锡系、铋铝系等铋黄铜具有良好的切削加工性能,但抗脱锌腐蚀和耐应力腐蚀性能较差;低锌硅黄铜具有良好的热加工性能、铸造性能和耐腐蚀性能,但切削加工性能较差。因此,国内外学者充分结合硅黄铜和铋黄铜的性能优点,开发出了Cu-Zn-Si-Bi系列黄铜。

宁波敖达金属新材料有限公司开发出4个牌号的无铅易切削耐腐蚀硅铋黄铜,并已实现批量化生产^[9]。这4个牌号分别为HSi60-1.0-0.8、HSi62-1.0-0.3、HSi62-0.4-0.3、HSi59-0.4-0.3,各牌号黄铜中的硅含量分别为0.6%~1.0%,0.8%~1.3%,0.25%~0.4%,0.4%~0.7%;铋含量分别为0.6%~1.0%,0.2%~0.45%,0.3%~0.5%,0.3%~0.5%。此外,还添加了微量锰、镍、锡、铝等元素进行合金化。因组织中出现硬脆的γ相,该系列硅铋黄铜的强度和硬度较高,适量硅和铋又使得其铸造流动性和热锻性较好。该系列硅铋黄铜切削加工性能明显优于低锌硅黄铜的,在电子、卫浴水暖和汽配领域具有较好的应用前景。

上述硅铋黄铜的硅含量普遍高于0.3%,且材料硬度较高,不利于生产过程中的切削和研磨抛光加工。鸿航金属科技有限公司在这4种硅铋黄铜的基础上开发出低硅铋黄铜^[10],该黄铜的硅含量低于0.3%,铋含量为0.1%~0.6%,在降低基体硬度的同时又改善了切削性能,还可避免较高含量铋在基体中的不连续网状分布。

佛山市国鸥铜业^[11]开发出一种易切削锻造用无铅硅铋铜合金,其化学成分为57.5%~59.0%Cu,0.3%~0.4%Si,0.7%~1.2%Bi,0.05%~0.2%Fe,余锌。添加少量铁元素可以细化晶粒,但需避免造成抛光硬质点。该铜合金的切削、磨抛、电镀性能优异,适用于制造水暖零部件,目前已实现批量化生产。

刘伯雄^[12]研究了不同硅含量(0.3%~1.0%)对某环保铋黄铜组织的影响,发现随着硅含量增加,黄铜中的β相比例升高,α相比例降低,其强度和切削

加工性能得到提升。

ZHAO等^[13]研究发现,添加铋元素并对熔体进行电脉冲处理会对无铅易切削硅黄铜的晶粒尺寸和组织均匀性产生较大影响:对铋含量0.5%的硅铋黄铜熔体进行30 s电脉冲处理,所得黄铜中的铋颗粒尺寸由30 μm减小到5 μm,形状由长条状变为颗粒状,在α相及相界上的分布更加均匀;随着脉冲电压增加,β相由细针状或长棒状转变成短棒状,当电脉冲参数为电压1 000 V,频率8 Hz,时间30 s时,β相最为细小、均匀。

硅铋黄铜虽然在一定程度上克服了铋黄铜和硅黄铜的缺点,但仍存在较大的开裂风险,在使用前大都需要进行热处理,这就导致现阶段硅铋黄铜的产量依然不高,其工艺性能还需进一步优化。

1.3 硅磷环保黄铜

硅磷环保黄铜以地壳中含量丰富的硅、磷替代铅、铋等金属,有利于实现可持续发展。磷在铜中的固溶度随着温度下降而迅速降低,室温时几乎为0,析出的磷与铜结合形成金属间化合物Cu₃P。在切削加工过程中,该化合物易切削破碎,从而使该铜合金表现出良好的切削性能。

日本三越金属株式会社开发出BZ5硅磷环保黄铜^[14],其化学成分为75.5%Cu,3.0%Si,0.1%P,0.1%Pb,余Zn;棒材和铸件的抗拉强度分别为600,430 MPa,断后伸长率分别为28%,25%。BZ5黄铜含有Cu₃P和富硅脆相,切削性能与铅黄铜相当,流动性好,锻造、铸造等工艺性能良好,可用于饮用水系统五金件的批量化生产。

许跃等^[15]开发出65Cu-3Si-0.1P和65Cu-1Si-0.1P两种新型无铅硅磷黄铜,其基体中含有由多种元素组成的复杂化合物。这些化合物与铅类似,具有脆性,可起到切削断屑作用,从而提高切削加工性能。65Cu-1Si-0.1P黄铜的塑性远好于65Cu-3Si-0.1P黄铜的。

何孔高等^[16]采用正交试验设计方法,率先将稀土与硼-锆复合变质技术应用于硅磷黄铜,配合时效热处理工艺,开发出了高性能、低成本的无铅易切削高强耐蚀硅磷黄铜,其化学成分为59%Cu,3.0%Si,2.7%P,0.2%Ni和35%Zn。该黄铜已实现小批量试产,可应用于电子、水暖卫浴、仪器仪表、家用电器等相关领域,是铅黄铜的理想替代材料之一。

九牧厨卫开发出一种含磷易切削硅黄铜并进行了批量化试产^[17],该硅黄铜的化学成分为61%~

64%Cu,0.5%~1.0%Si,0.4%~1.0%Al,0.15%~0.6%P,0.1%~0.15%Pb,0.01%~0.3%Ni,0.1%~0.5%(Mg+Sn),余Zn。在其开发研究过程中,发现当磷含量为0.15%时,Cu₃P主要分布于 α 和 β 相界上,起到改善切削性能的作用;当磷含量大于0.6%时,Cu₃P以网状或连续薄膜状分布于晶界上,导致铜合金产生热脆和冷脆特性,同时还会出现铸造疏松缺陷而影响组织致密性。因此,需将该硅磷黄铜中的磷含量控制在低于0.6%。

硅磷环保黄铜具有良好的铸造性能和切削加工性能,但耐脱锌腐蚀性能较差,脱锌层深度随着磷含量增加而明显增加,如ZCu62Si0.6Al0.4硅黄铜的平均脱锌层深度为252.3 μm,当添加质量分数0.15%,0.60%的磷后,平均脱锌层深度分别增至316.2,465.5 μm。这是由于Cu₃P大多分布于相界或晶界上,产生了数量众多的微型原电池反应,从而加快了铜合金的腐蚀。硅磷环保黄铜目前主要应用于对耐腐蚀性能要求不高的中低端卫浴产品上。为了扩大其应用范围,需要在提高耐腐蚀性能及铸造收缩性能等方面开展更加深入的研究。

1.4 硅锰环保黄铜

锰黄铜因具有优异的铸造性能、力学性能和耐海水腐蚀性能而广泛应用于螺旋桨、轴承套、阀门等产品上。九牧厨卫率先将硅黄铜和锰黄铜相结合,开发出JM1和JM2两种易切削硅锰黄铜^[18],并批量将其应用于五金龙头和阀门的生产制造中。JM1硅锰黄铜的化学成分为60%~64%Cu,0.6%~1.0%Si,0.2%~1.0%Al,≤0.15%Pb,0.2%~0.3%Mn,0.01%~0.25%P,0.01%~0.25%Mg,0.01%~0.1%Sn,余Zn;JM2硅锰黄铜则在此基础上将锰含量提高到了0.4%~0.5%。

以JM1硅锰黄铜为例对显微组织进行说明。JM1硅锰黄铜的基本组织为 β 相+少量呈针状、小块状的 α 相+黑色颗粒状化合物+块状Mn-Si化合物。锰在黄铜中有两种存在形式:一是少量固溶于 β 相以改善 β 相的铸造收缩性能,并提高黄铜的强度和硬度;二是与硅形成弥散分布的Mn-Si化合物以改善黄铜的切削性能。硅锰环保黄铜的耐脱锌腐蚀性能优于HPb59-1铅黄铜的,其脱锌层深度小于150 μm,相对切削效率最高可达到HPb59-1铅黄铜的90%,是铅黄铜理想的替代材料。

1.5 其他环保硅黄铜

PUATHAWEE等^[19]研究了一种无铅易切削

硅锡环保黄铜,其化学成分为58.7%~60.3%Cu,0.6%Sn,0.5%~3.0%Si,余锌。当硅含量为0.5%时,该铜合金的硬度为123.4 HV,硅含量越高,其硬度越高。与单独添加硅相比,同时添加锡和硅时组织中的 β 相含量更高, γ 相分布更为均匀,铜合金硬度更高,更有利进行切削加工。

汪盼等^[20]通过在硅黄铜中添加一定量的镍,制备了环境友好型硅镍黄铜,添加镍元素可以明显改善硅黄铜的耐脱锌腐蚀性能,镍含量为0.3%的耐脱锌腐蚀性能好于镍含量0.1%和0.5%的,平均脱锌层深度小于400 μm。

董晟全等^[21]设计了一种低成本耐蚀易切削硅镁黄铜,其化学成分为60.0%~62.0%Cu,0.5%~1.0%Si,1.5%~2.0%Mg,2.0%~2.4%Al,0.05%~0.1%Ti,余Zn。该铜合金的室温抗拉强度达522 MPa,脱锌层深度约为131 μm,螺旋流动长度约为93 cm,切削性能与HPb59-1铅黄铜相当。

彭峰等^[22]开发出一种无铅易切削硅钙黄铜,其组成为57.0%~65.0%Cu,0.1%~2.0%Si,0.3%~2.5%Ca,0.2%~2.0%Mg,0.01%~0.5%Al,0.01%~0.3%La-Ce合金(40%Ce),0.01%~2.0%X,余Zn;X为铁、磷、锡中的一种或多种。该黄铜合金添加了环保且储量丰富的硅和钙,未添加铋、锑和镍等贵金属,生产成本较低,同时具有较高的切削性能、耐蚀性能、热加工性能和力学性能,可广泛应用于水龙头配件等。

黄劲松等^[23]设计了一种无铅易切削硅石墨黄铜,其化学成分为58.0%~62.0%Cu,0.1%~3.5%Si,0.1%~3.5%石墨,余Zn。硅和石墨价格便宜,可显著降低生产成本,同时该黄铜的热塑性非常好,热挤压比达80以上,无冷脆现象。

总体来说,目前环保硅黄铜合金化研究主要集中在降低成本,提高切削性能和耐腐蚀性能等方面。虽然已相继开发出硅镍黄铜、硅镁黄铜、硅钙黄铜以及硅石墨黄铜等新型环保硅黄铜,但这几种材料均存在一定应用瓶颈,如硅镍黄铜原料成本高,硅镁黄铜和硅钙黄铜存在铸造疏松缺陷及成分管控难题,硅石墨黄铜熔炼制备困难等,需要进行进一步优化提升才能真正投入到实际生产中。

2 环保硅黄铜的变质处理

SADAYAPPAN等^[24]对化学成分为14%Zn,4.5%Si,余Cu的低锌硅黄铜进行了不同的变质处

理,发现添加 Cu-50%Zr 合金后,低锌硅黄铜的晶粒度为 6.8 级;添加 Cu-9%Zr-9%Mg 合金后,低锌硅黄铜的晶粒度为 4.5 级;添加美国 Desofin 晶粒细化剂后,黄铜晶粒度达到 4.5 级;而 Cu-2%B 合金或德国 FKM2000 晶粒细化剂对低锌硅黄铜几乎没有晶粒细化作用。

OISHI 等^[25]在 Cu-10Zn-2Si 黄铜中添加了钴元素,发现微量钴的添加有助于产生析出相,从而阻止晶粒长大;而添加质量分数 0.1% 的钴后,该黄铜的晶粒尺寸接近 1.6 μm,抗拉强度为 558 MPa,屈服强度为 438 MPa,断后伸长率为 36.8%,强度和塑性更为平衡。

庞晋山等^[26]以硅代替铅,经过稀土和硼变质处理制得一种环境友好型硅黄铜,其切削性能达到 HPb59-1 铅黄铜的 80%,且变质处理后 γ 相由沿着 β 相呈网状分布形貌转变为均匀细小的颗粒状,显微硬度明显降低。

汪小霞^[27]设计了成分为 59.0%Cu,3.0%Si,0.3%P,0.2%Ni,余 Zn 的环保型无铅硅黄铜,并研究了稀土、硼和锆对其组织的细化作用,结果发现添加 0.01%B 变质处理的细化效果最好,γ 相为均匀细小球状颗粒,硅黄铜的力学性能得到提高。

陈洲等^[28]设计了成分为 63%Cu,3%Si,0.05%~0.1%P,0.02%~0.04%Mg,余 Zn 的硅黄铜,研究了锆对其耐腐蚀性能的影响,结果发现添加 0.007% 的锆可提高该黄铜的极化电阻,减小腐蚀电流,从而显著提高在 CuCl₂ 溶液中的耐脱锌腐蚀性能。

环保硅黄铜变质处理的主要目的是改变 γ 相的形貌和分布。通过添加变质剂,β 相基体上的 γ 相由不均匀分布的粗大星花状转变成弥散分布的颗粒状,进而改善黄铜的切削加工性能。目前国内外对硅黄铜变质处理的研究主要集中在中间合金细化剂变质处理,而对粉状盐类细化剂的变质处理研究不够充分,这与国内主流铜材厂及卫浴制造企业在一次熔炼及铜锭二次重熔过程中大都采用粉状盐类细化剂的生产现况发生明显脱节。鉴于粉状盐类细化剂具有低成本及低温易添加等优点,粉状盐类细化剂的作用机理、中间合金与粉状盐类复合变质处理技术可作为硅黄铜变质处理的重要研究方向。

3 结束语

环保硅黄铜是铅黄铜最为理想的替代材料,目前针对硅黄铜的研究已取得一定成果,已开发出低

锌硅黄铜、硅铋黄铜、硅磷黄铜和硅锰黄铜等系列环保黄铜,并在中国、日本等海洋环境区域得到推广应用。研究人员应从原料成本、产品定位、加工条件以及性能等方面综合考虑,选择匹配的环保硅黄铜进行技术开发及应用,如低锌硅黄铜适用于成本接受度高,对耐海水腐蚀性能有苛刻要求的沿海区域;硅铋黄铜适用于加工量大,对应力腐蚀性能要求不高的环境;硅磷黄铜和硅锰黄铜的成本及加工性能相当,但硅磷黄铜的抛光性能更好,硅锰黄铜的强度和耐腐蚀性能更突出。为了持续推进并实现环保硅黄铜在卫浴给水管道系统零部件领域对铅黄铜的有效替代,未来研究方向应集中于以下几个方面:

(1) 通过低成本、多组元合金化设计降低硅黄铜的生产成本。硅黄铜的铜含量普遍高于铅黄铜,且为了保证其切削性能和耐腐蚀性能,大都添加了铋、镍和锡等价格较为昂贵的金属,因此如何使用廉价的磷、镁、锰等达到相同的切削和耐蚀效果是重要的研究方向。

(2) 拓宽硅黄铜性能研究领域。现有环保硅黄铜的性能研究多集中在显微组织、力学性能、切削加工性能和耐脱锌腐蚀性能等方面,对宏观组织、铸造收缩和流动性的研究略显不足。开发出低凝固收缩、低浇注温度以及流动性能优异的环保硅黄铜,并将其应用于龙头本体、阀体的铸造生产,提高其综合良品率,也是目前环保硅黄铜应用的迫切需求。

(3) 加强硅黄铜变质处理的研究。硅黄铜组织通常以 β 相为主,由于合金设计的差异,还会伴随有少量的 α 相、γ 相、κ 相,有时也会产生少量的 Cu₃P、Mn-Si、Cu₂Mg 等金属化合物。因此,进一步研究硅黄铜的变质处理方法,如中间合金与粉状盐类复合变质处理技术,使得析出相及金属化合物呈细小颗粒状弥散分布,对于提高硅黄铜的塑性和耐腐蚀性能有重要意义。

参考文献:

- [1] SADAYAPPAN M, NEWCOMBE P D, SAHOO M. Mechanical properties of SeBiLOY III (C89550) [J]. AFS Transactions, 2000, 108: 571-578.
- [2] 周年润. 卫浴行业用无铅易切削铋黄铜的研究进展[J]. 机械工程材料, 2017, 41(8): 6-11.
- [3] TAHIA M A, EL-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.

- [4] NOBEL C, KLOCKE F, LUNG D, et al. Machinability enhancement of lead-free brass alloys [J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 95-100.
- [5] HOFMANN U, DANNENMANN W, BOEGEL A, et al. Lead-free copper alloy and a method of manufacture: US2004078803[P]. 2004-11-25.
- [6] 蒋明川. 一种适合重力铸造的无铅环保硅黄铜合金材料及其制备方法: 101343702A[P]. 2009-01-14.
- [7] 谢识才, 裴勇军, 张明, 等. 一种低钙易切削硅黄铜合金及其制备方法: 101921926A[P]. 2010-12-22.
- [8] 唐吉苗, 曹建国, 郭均华, 等. 含硅无铅易切削黄铜合金: 1616695A[P]. 2005-05-18.
- [9] 彭锋, 夏宝平, 刘剑平, 等. 无铅易切削黄铜的现状及改进方向[J]. 上海有色金属, 2011, 32(4): 162-167.
- [10] 王秋燕, 陈永禄, 张海高, 等. 无铅易切削硅铋黄铜及其制备方法: 105886835A[P]. 2016-08-24.
- [11] 麋洪国, 毛岳山, 张伟建. 一种易切削锻造用无铅铜合金: 101250641A[P]. 2008-08-27.
- [12] 刘柏雄. 硅对易切削 Bi 黄铜组织及性能影响的研究[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(1): 35-38.
- [13] ZHAO Z F, QI J G, DAI S, et al. Effects of different melt modification techniques on the structure and properties of silicon brass [J]. Advanced Materials Research, 2011, 299/300: 390-394.
- [14] YASUHIRO T, HIROYUKI M. Effect of additive element on grain refinement of cast Cu-Zn-Si alloys [J]. Journal of Japan Institute of Copper, 2012, 51(1): 86-90.
- [15] 许跃, 刘平, 刘新宽, 等. 无铅硅磷黄铜组织性能的研究[J]. 上海有色金属, 2015, 36(1): 14-17.
- [16] 何孔高, 唐兰花, 张军. 无铅易切削高强耐蚀硅磷黄铜的生产[J]. 化学工程与装备, 2013(11): 76-78.
- [17] 林孝发, 林孝山, 汪火良, 等. 一种含磷易切削硅黄铜合金及其制备方法: 104480344A[P]. 2015-04-01.
- [18] 林孝发, 林孝山, 汪火良, 等. 一种含锰易切削硅黄铜合金及其制备方法和应用: 107974573A[P]. 2018-05-01.
- [19] PUATHAWEE S, ROJANANAN S, ROJANANAN S. Lead-free Cu-Si-Zn brass with tin addition [J]. Advanced Materials Research, 2013, 802: 169-173.
- [20] 汪盼, 周永欣, 吕振林. Ni 含量对无铅硅黄铜耐脱锌腐蚀性能的影响[J]. 铸造技术, 2018, 39(10): 2164-2166.
- [21] 董晟全, 梁艳峰, 李高宏. 一种低成本耐蚀环保易切削黄铜及其制备方法: 102703753A[P]. 2012-10-03.
- [22] 彭锋, 胡世铁, 夏宝平, 等. 无铅易切削钙黄铜合金: 101565784A[P]. 2009-10-28.
- [23] 黄劲松, 周忠诚. 一种无铅易切削硅石墨黄铜: 101235448A[P]. 2008-08-06.
- [24] SADAYAPPAN M, THOMSON J P, ELBOUJDAINI M, et al. Grain refinement of permanent mold cast copper base alloys[R].[S.I.]: Copper Development Association, 2015.
- [25] OISHI K, SASAKI I, OTANI J. Effect of silicon addition on grain refinement of copper alloys[J]. Materials Letters, 2003, 57(15): 2280-2286.
- [26] 庞晋山, 曹标, 陈明, 等. 变质处理对环境友好型硅黄铜 γ 相及切削性能的影响[J]. 机械工程材料, 2012, 36(5): 73-75.
- [27] 汪小霞, 苏勇, 吕雪, 等. 稀土硼锆对硅黄铜组织细化以及脱锌腐蚀性能的影响[J]. 金属功能材料, 2012, 19(1): 35-39.
- [28] 陈洲, 刘新宽, 刘平, 等. 含 Zr 硅黄铜耐腐蚀性能的研究[J]. 铸造, 2015, 64(5): 450-454.

《机械工程材料》2020 年专题报道

2020 年,《机械工程材料》杂志将在第 5 期、第 6 期、第 11 期分别推出“金属材料表面处理”、“电子陶瓷”、“增材制造技术”等专题报道,热忱欢迎相关领域科研技术人员踊跃投稿。

(1) 金属材料表面处理。表面处理指采用某种工艺方法,在不改变基体组织和性能的前提下改善材料表面的组织和性能,使之具有良好的耐磨、耐腐蚀、耐高温等性能,从而适用于各种复杂的工作环境。本专题报道内容主要为表面处理对金属材料组织和性能的影响,包括但不限于表面形变强化(包括喷丸、滚压、内挤压等)、激光表面处理、表面淬火处理、等离子表面处理、电镀堆焊、热喷涂等表面处理技术。

(2) 电子陶瓷。电子陶瓷是指具有电、磁、光、热、超导、力学等性能的一类功能陶瓷,在电子、通信、自动控制、信息计算机、激光、医疗、机械、汽车、航空航天、核技术和生物技术等领域中作为关键材料得到了广泛应用。本专题报道范围为先进电子陶瓷材料(单晶)的制备方法、性能表征及其前沿科学进展,包括但不限于介电陶瓷、电绝缘陶瓷、半导

体陶瓷、压电陶瓷、快离子导体陶瓷、高温超导陶瓷、超级电容器。

(3) 增材制造技术。增材制造,又可称为快速成形、3D 打印等,是指基于离散—堆积原理,采用材料逐点逐层累积叠加的方法制造实体零件的技术;这种生产方式彻底打破了以往的零件加工方式,已经在航空航天等高精尖行业得到应用。本专题报道范围主要包括金属材料增材制造粉体制备、粉体表征、成形工艺、成形件组织和性能、成形后处理等。

综述性文章要求能总结上述领域的研究现状并提出前瞻性的发展方向;研究性文章要求能反映上述领域的最新研究成果,数据详实、方法新颖、结果可靠;模拟类文章要求有相应的试验验证;应用性文章要求具有实际推广价值,研究要有系统性,有理论分析。

请按照本刊论文模板(在投稿主页上下载)撰写,择优录用,优先发表。

投稿网址: <http://www.mat-test.com/Submission>

联系电话: 021-65541496; 021-65556775-368

E-mail: mem@mat-test.com; matmem@mat-test.com