● 今日铸造 Today Foundry ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.04.021

高性能铍青铜研究进展

方森鹏[1],陈乐平[1],周 全[1],周水军[2]
(1.南昌航空大学 航空制造工程学院,江西 南昌 330063;2.新余长城铜产品开发有限公司,江西 新余 338025)

摘 要:铍青铜合金具有很好的时效硬化效果,经过合理的热处理后具有一系列优良的综合性能,因而广泛应用于工业生产等各个方面。介绍了铍铜合金的成分、合金元素对铍青铜性能的影响、热处理工艺、性能及应用,着重论述了铍铜合金热处理方法及工艺参数对性能的影响。

关键词:铍青铜;成分;热处理;分级时效;析出相;性能;应用

中图分类号:TG146.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)04-0384-07

Research Progress on Properties and Heat Treatment of Beryllium Bronze

FANG Senpeng[1], CHEN Leping[1], ZHOU Quan[1], ZHOU Shuijun[2]
(1.School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;2.Xinyu Great Wall Copper Product Development Co., Ltd., Xinyu 338025, China)

Abstract: The beryllium bronze alloy has a good aging hardening effect, and has a series of excellent comprehensive properties after reasonable heat treatment, so it is widely used in various aspects such as industrial production.The effects of beryllium copper alloy composition and alloying elements on the properties of beryllium bronze, heat treatment process, performance and application are introduced. The effects of heat treatment methods and process parameters of beryllium copper alloy on performance are emphasized.

Key words: beryllium bronze; composition; heat treatment; classification aging; performance; precipitates; properties; application

铍青铜是以铍为主加元素的铜基合金材料,属于时效析出强化的铜合金。它具有很好的时效硬化效果,因此经热处理后具有很高的强度、硬度和弹性极限,是强度、硬度最高的青铜。此外铍青铜还具有良好的耐蚀、耐磨、耐低温、耐疲劳性,良好的导电导热性,无磁性和冲击不产生火花等性能,其综合性能居铜合金之首[1],是理想的高导、高强弹性材料。正因其优异的综合性能,铍青铜被广泛用于电子电器、通讯仪器、航空航天、石油化工、冶金矿山、汽车家电、机械制造等多种领域,已经成为国民经济建设中不可缺少的重要工业材料[2]。同时随着科学技术和工业需求的发展,各领域对铍青铜的综合性能要求也在不断提高。

收稿日期:2020-03-12
基金项目:江西省科技重点研发项目(20192BBE50035)
作者简介:方森鹏(1997-),江西赣州人,硕士研究生.研究方向:高性能铜合金材料制备技术及应用研究.电话:15579158422,E-mail:2374847281@qq.com
通讯作者:陈乐平(1964-),江西南昌人,教授.研究方向:金属材料和铸造技术研究.电话:0791-83863027,E-mail:jnnclp@163.com

1 铍青铜的分类和主要成分

1.1 铍青铜分类

铍青铜合金按含铍量高低分为高铍高强度合金(1.6%~2.0%Be)和低铍高导电率合金(0.2%~0.7%Be)[3]。就目前的情况,高铍铜与低铍铜比较,低铍铜导电性优良但力学性能不及高铍铜,高铍铜力学性能较佳但导电性不及低铍铜[4],两者各有优劣。但是由于Be含量增加,压力加工产生困难[5],且高铍合金价格昂贵,因而推广应用受限。而低铍铜作为一种中等强度高导电的弹性合金,用途十分广泛。我国生产的铍青铜被列入国家标准的如QBe1.9、QBe2.0,均属于高铍铜合金。

铍青铜按制造成型工艺可分为加工合金和铸造合金。铍青铜加工用合金一般是通过压力加工将其制成板、带、管、棒、丝等,主要用于制造各类弹性元件,如开关、簧片、发条、接触片等;铍青铜铸造合金具有高的硬度、强度,主要应用于航空航天、电子和机械制造工业,如飞机的各种轴承和轴套、钻机钻头等。

1.2 合金元素对铍青铜性能的影响

国内常见的铍青铜材料主要有5种,从表1[6]可

表1 常见的铍铜材料 w(%)
Tab.1 Common beryllium copper materials

牌号	Be	Ni	Ti	Fe	Al	Si	Cu	杂质
QBe2.5	2.3~2.6	0.2~0.5	-	<0.15	<0.15	<0.15	余量	<0.5
QBe2.15	2.0~2.3	<0.5	-	<0.4	<0.10	<0.15	余量	<0.12
QBe2	1.9~2.2	0.2~0.5	-	<0.15	<0.15	<0.15	余量	<0.5
QBe1.9	1.85~2.10	0.2~0.4	0.10~0.25	<0.15	<0.15	<0.15	余量	<0.5
QBe1.7	1.60~1.85	0.2~0.4	0.10~0.25	<0.15	<0.15	<0.15	余量	<0.5

知，铍铜主要合金元素有 Cu、Be、Ni、Co、Fe、Al、Si、Ti 等，其中铜为基体、铍为主要添加合金元素，其次是镍，并含有微量杂质元素。

1.2.1 铍含量的影响

铍为铍铜合金主要添加元素，对 Cu-Be 合金的性能有显著影响，合金强度随铍含量的增加而增加，而电导率和热导率降低[7]。其含量对 Cu-Be 合金性能的影响如图 1(均经 320 ℃，2 h 时效后)[5]。由图 1 可见，随着 Be 含量的增加，时效硬度也增加，到达硬度峰值所需的时效时间较短。

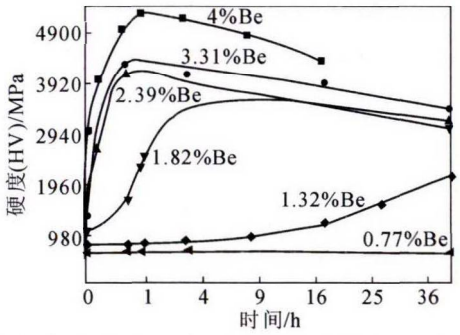

图 1 Be 含量对 Cu-Be 合金硬度的影响 (320 ℃)
Fig.1 Effect of Be content on the hardness of Cu be alloy (320 ℃)

铍的价格昂贵且有毒，含铍量高不仅会造成生产成本高，而且对产品的加工、热处理等工艺过程产生困难。因此在提高合金性能的基础上，尽量降低铍含量是铍铜合金的发展趋向。例如 QBe2.5 铍青铜是常用的弹簧材料，其组织是 α 基体上分布着细小的 $\gamma 2$ 基体及少量的 NiBe 相，适用于制作强力弹簧及耐磨零件。而含铍量较低的 QBe1.7，强度、硬度稍有下降，但改善工艺性能，降低成本，有代替部分 QBe2.5 的趋势[8]。目前压力加工铍铜中 Be 的含量都控制在 2%以下，而铸造铍铜一般含 Be 量控制在 2.8%以下。

1.2.2 镍、钴的影响

镍或钴是铍铜中除铍外的主要添加合金元素，这两者对彼青铜的影响相近，美、日等国常用 Co，而我国和俄国则用 Ni。

镍加入铍铜合金中能够起到阻碍合金局部分解、细化晶粒等作用。镍与铍能形成化合物 NiBe，而 NiBe 能溶于 α 固溶体，它在 1 030 ℃ 的最大溶解度是 3.25%(0.42% Be,2.38% Ni)；当温度降低时，NiBe 的溶解度明显减小，故此类合金能因化合物 NiBe 的沉淀而硬化[6,9]。

Ni 含量对铸态铍铜合金硬度的影响如图 2[10]。由图 2 可见，铸态铍铜合金硬度随着 Ni 含量的增加而出现先增加后减小的趋势。Ni 含量为 0 时，合金显微硬度最小为 73 HV；Ni 含量为 0.98%时，合金显微硬度达到最大值 159 HV；之后，随着 Ni 含量的增加，合金显微硬度值逐渐下降，在 Ni 含量为 2.04%时下降到 111 HV。Ni 的加入降低 Be 在 α-Cu 固溶体中的溶解度，有利于在 Cu 基体中形成弥散析出相，但过量的 Ni 则倾向于形成不均匀分布的析出相[11]，这对合金的力学性能有害。因此，合理控制 Ni 含量是提高 Cu-Be 合金时效硬化效果的有效方法[12]。

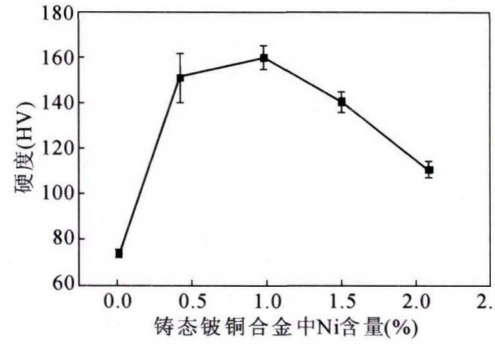

图 2 Ni 含量对铸态铍铜合金硬度的影响
Fig.2 Effect of Ni content on the hardness of as cast beryllium copper alloy

钴加入铍铜合金中能够提高合金力学性能和耐高温性能，防止加热时晶粒粗大，并抑制晶界反应等。钴与铍能形成化合物 CoBe 并溶于固溶体中，它在 1 011 ℃时的最大溶解度是 2.7%，并随着温度的降低溶解减度减小，从而起到强化作用。图 3[5]为镍、钴对 Cu-Be 合金性能的影响，由图 3 可见镍、钴元素都可以提高合金强度并推迟过时效产生，但 Co 的时效强化效果更为显著。

1.2.3 铁的影响

铁能使二元铜铍合金组织中出现新的含铁相，增加组织的不均匀性，降低耐蚀性，并减少合金的沉淀硬化效果。但是铁能够细化晶粒，而且固溶于 α 固

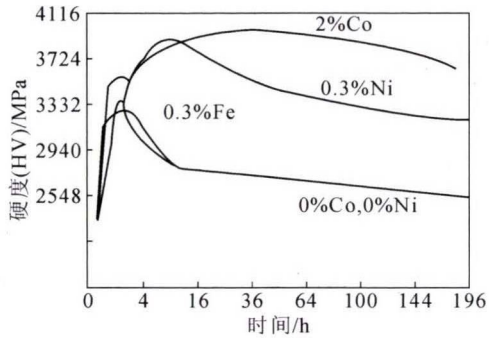

图 3 Ni、Co 含量对 Cu-Be 合金硬度的影响 (320 ℃)
Fig.3 Effect of Ni and Co content on the hardness of Cu-Be bronze (320 ℃)

溶体中的铁还能延迟过饱和固溶体的分解，抑制晶界反应。一般铍铜合金中含铁量不超过 0.4%[9]。

2 铍青铜合金的热处理

铍青铜合金作为一种典型的时效析出强化合金，合理的热处理可以使合金具有高强度、高硬度、高导电性、高弹性等优异的综合性能，因此热处理对它的性能的提高有着非常重要的意义，在很大程度上热处理工艺可以直接影响铍青铜性能的优劣。铜合金为避免固溶强化时导电性与强度的矛盾，常常是固溶强化与时效强化同时使用[13]，铍铜合金也是，其热处理主要可以分为固溶处理和时效处理，其中温度和时间是重要参数。

2.1 固溶处理

Cu-Be 二元相图铜侧见图 4。其中 α 相是铍溶入铜中的固溶体，呈面心立方晶格。γ1 相是以电子化合物 CuBe 为基的无序固溶体，γ2 相是以 CuBe 为基的有序固溶体，这两者都是高硬度低塑性的相。从图中可见随着温度的升高，铍在铜中的溶解度逐渐增加，在室温时铍的溶解度为 0.2%，当温度为 866 ℃ 时其溶解度达到最大为 2.7%，因此有很高的热处理强化效果。

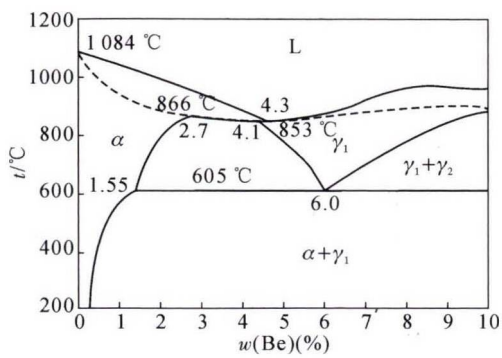

图 4 Cu-Be 二元相图铜侧
Fig.4 Cu-Be binary phase diagram on copper-rich side

铍青铜的固溶处理是指将铍铜合金加热到高温单相区的状态然后恒温保持一段时间，在过剩相充分溶解到固溶体中形成均匀的组织后快速冷却到室温，使 α 固溶体中的铍来不及析出，合金组织因骤冷仍保持高温状从而得到过饱和 α 固溶体。过饱和 α 固溶体的存在使铍青铜塑性增强，易于加工，但是强度、硬度很低，所以后续仍需时效处理。固溶处理的目的包括[14,15]：①使铍青铜中的富铍相(β 相)充分固溶于基体中，获得均匀的过饱和固溶体，为随后的时效强化做组织准备；②机械成型加工前的中间软化(α 固溶体具有良好的塑性，其强度和硬度不高，延伸率可达 30%，易于进行各种冷热加工)；③消除铸锭或铸件的枝晶偏析。

从相图可知，尽量提高温度可以获得足够过饱和度的 α 固溶体，但是温度过高时铍铜组织又会发生晶粒粗大或大小不均匀。为了保证合金在时效后具有良好的综合性能，应该控制铍铜合金的固溶处理参数，使合金在获得足够过饱和度的 α 固溶体的同时，又能得到大小均匀的细晶粒组织。

在铍青铜固溶处理时，随着固溶温度的提高，合金的塑性提高而强度下降，且在时效后能达到较高的性能[6]。如果固溶处理温度过低或者处理时间较短，铍青铜中的富铍相(β 相)就不能充分溶入固溶体基体中形成均匀的过饱和固溶体，这会使合金塑性降低，从而导致冷切削加工等冷加工性能恶化。此外还会使合金晶粒尺寸过小，使得后续时效处理时晶界反应量增加，降低了铍青铜的力学性能。若固溶温度过高或者处理时间较长，会造成晶粒粗大，甚至局部过烧，粗大晶粒会损坏合金的机械性能，过烧则会使合金变脆而不能使用[16]。

表 2 为郁龙贵[17]采用 QBe2 铍青铜经不同温度固溶处理后的力学性能(均经 320 ℃时效 1 h)。由表 2 可见，QBe2 合金随固溶温度的升高而得到强化，但是超过 800 ℃时，力学性能便下降。

表2 QBe2不同温度固溶处理后的力学性能
Tab.2 Mechanical properties of QBe2 after solid solution treatment at different temperatures

固溶温度 /℃	σ_b/ MPa	σ_s/ MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_{10}/%
740	1 109	853	974	10.0
780	1 189	931	974	5.8
800	1 210	913	1063	7.4
810	1 187	929	1074	4.2
880	759	-	-	-

图 5 为李宁宁等[18]采用 Cu-0.23Be-0.84Co 合金经不同温度固溶处理后的合金硬度和导电率变化曲线。由图 5 可见：在相同的保温时间下，随着固溶温度的升高，合金硬度逐渐降低，导电率则逐渐升高。随着固溶温度的升高，铍在铜中的溶解度逐渐增加，

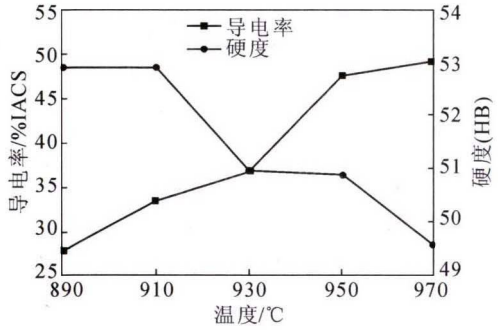

图 5 固溶温度对合金硬度和导电率的影响

Fig.5 Effect of solution solid solution temperature on hardness and electrical conductivity of alloy

铜基体中第二相逐渐增多，此时溶质原子的固溶强化大于第二相的强化作用，所以合金硬度逐渐下降。

因而，适宜的固溶温度和保温时间应使合金中的富铍相既能充分固溶于基体且分布均匀，又不致引起晶粒强烈长大为宜[19]。实验和生产实际表明，铍铜的固溶处理温度一般应当控制在 780～800 ℃，晶粒大小一般控制在 15～55 μm，固溶保温时间则需要根据实际材料具体情况来确定。

2.2 时效处理

铍铜合金经固溶处理后呈软态，此时合金塑性良好，可便于加工，但是强度、硬度很低，无法直接使用，仍需要时效处理产生沉淀强化，以提高其强度、硬度、弹性等。铍青铜的时效处理是指将固溶处理后的合金加热到合适温度后保温一段时间并空冷，其本质是晶内发生连续脱溶过程，即过饱和 α 固溶体中析出细小弥散的 γ 相，形成弥散强化效应，从而强化合金性能。

根据零件的技术要求和材料成分的不同，选择的时效处理方法也有所不同，铍青铜常用的时效处理可分为低温长时时效和高温短时时效。低温长时时效，能使合金获得较高的强度和硬度，其适用于仅要求高强度和硬度而其它性能没有特殊要求的零件。高温短时时效处理能较大程度的去除合金固溶、冷变形时留下的内应力，还能使材料获得更好的弹性、塑性、导电率、抗疲劳性、应力松弛等性能，缩短热处理周期，提高生产效率[20]。

2.2.1 时效处理重要参数

时效过程中，析出相的类型、数量、尺寸和分布对铍铜合金的力学和电学性能有很大影响[21]，对时效温度和时效时间的合理控制是时效处理的关键，可以决定铍铜合金时效后的性能。

时效温度过高会导致不连续脱溶物过剩，即 γ 相在晶界聚集和长大，产生过时效现象，降低合金的力学性能。时效温度过低，Be 原子则无法获得足够的能量以 γ 相形式从过饱和的 α 固溶体中析出，γ 相析出不充分则不能很好的强化合金性能。影响最佳时效温度的有材料成分、性能要求等因素，与铍含量也有一定的关系，高铍铜合金时效温度相对较低，而低铍铜合金时效温度相对较低。总之，时效温度的选择应该在不使 γ 相聚集和长大的前提下，选择较高的温度，使 γ 相在较短的时间内充分析出，以达到强化的目的。

图 6[22]为 QBe2 铍青铜时效温度和时间与硬度的关系。由图 6 可见，总体来说要达到同一硬度，时效温度越高则时效时间越短。而当时效温度一定时，过长的时效时间会降低强化效果。这是由于析出相连续转变，合金会随着时效时间的延长而软化，但硬度和强度仍高于过饱和固溶体[23]。经相同条件固溶处理后，QBe2 铍青铜在 310～340 ℃温度时效处理 1~2 h 后，其最高硬度可达 400 HV 以上。

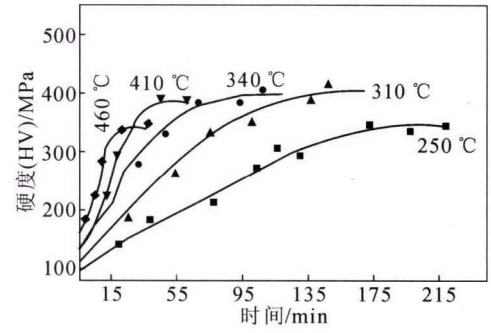

图 6 时效温度及时间与硬度关系曲线

Fig.6 Relationship between aging temperature and time and hardness

图 7[24]为时效温度对 QBe2 铍青铜合金硬度的影响关系图。由图 7 可见经相同时效时间，QBe2 铍青铜合金硬度随着时效温度先提高后降低，其实是经历了 3 个过程即欠时效、正常时效(峰值时效)、过时效。欠时效状态是指合金强度和硬度未达到最大

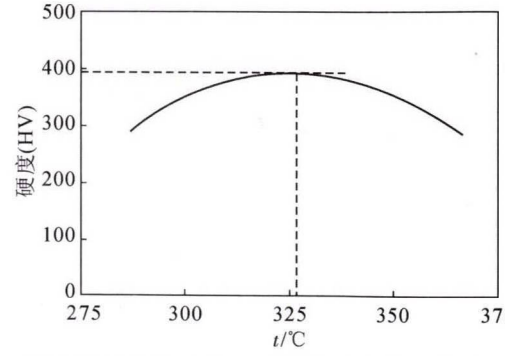

图 7 时效温度对 QBe2 铍青铜合金硬度的影响(时效时间 1.5 h)

Fig.7 Effect of Aging Temperature on the Hardness of QBe2 Beryllium Bronze Alloy (Aging Time 1.5 h)

值，这是因为 γ 相析出不充分，合金尚未得到充分强化。但此时的合金具有良好的塑形和抗疲劳性，适用于对塑性、抗疲劳性有要求但对强度要求不高的零件。正常时效也称峰值时效，此时合金的状态良好，具备优良的综合力学性能。过时效状态时合金的强度和硬度较之于正常时效反而下降，这是因为析出的 γ 相在晶界处聚集长大降低合金性能，但此时的合金具有良好的热稳定性。

图 8 [25] 是时效时间对铍铜合金（Cu-0.23Be-0.84Co，460 ℃时效温度下）的硬度和电导率的影响关系图。由图 8 可见，Cu-0.23Be-0.84Co 合金的硬度和电导率随时效时间的延长有明显变化。固溶态合金的硬度为 50.9 HB，时效 0.5 h 和 1 h 后，合金的硬度由 76.5 HB显著提高到 120 HB，时效时长 1~3 h 内硬度几乎不变，时效 3 h 后硬度达到最大值为 121 HB。随着时效时长的进一步增加，4~6 h 硬度略有下降，时效 6 h 后硬度降至 115.7 HB。固溶态合金的电导率为 47.0%IACS，经时效 0.5～3.0 h 后，电导率随着时效时间的延长而逐渐增大，在时效 3 h 后电导率达到最大值为 64.6%IACS，时效 6 h 后，电导率显著下降到 59.4%。

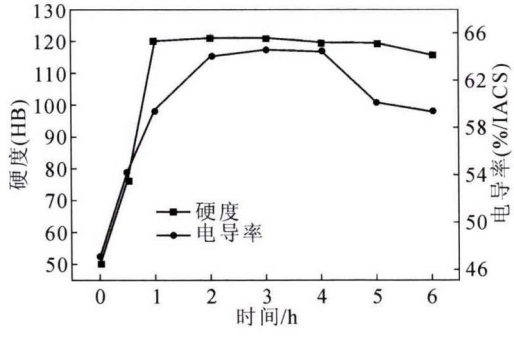

图 8 460 ℃下时效时间对 Cu-0.23Be-0.84Co 合金硬度和电导率的影响

Fig.8 Effect of aging time at 460 ℃ on hardness and electrical conductivity of Cu-0.23Be-0.84Co alloy

2.3 改进后的热处理工艺

随着铍青铜合金在人们的生活和生产中应用的越来越广泛，人们对铍青铜合金的性能也提出了更高的要求，诸如更高的弹性极限、更高的强度硬度等。经过多年的研究和开发，一些新的热处理工艺也已经在生产中逐渐推广和应用。

2.3.1 分级时效

分级时效也称双重时效，即在合金固溶化处理之后，先在某一温度保温一定时间后再升温（或降温）°至另一温度再进行人工时效。与正常峰值时效相比，分级时效后材料的韧性提高最为明显，另一方面，分级时效得到的析出相比常规峰值时效得到的析出相更细、更分散，从而提高了材料的韧性[26]。分级时效被应用到铍青铜的热处理中成为一种新的可以有效提高铍青铜力学性能的时效方法。铍青铜固溶处理后必须经过时效处理才能获得优良性能，但常规时效处理后铍青铜存在表面氧化、畸变和性能不稳定等缺陷。铍青铜的分级时效通常是一级低温时效+二级中温时效，与常规时效相比，分级时效可以提高合金强化效果又可减少畸变、稳定尺寸。因一级时效（预时效）温度低，在基体中形成一定量稳定晶核，能避免出现二级时效时脱溶物沿晶界不均匀析出，促使二级时效在稳定晶核基础上析出 γ 相，并弥散均匀分布于基体[22]。

表 3 为宋帆等[27]采用单级时效和分级时效两种热处理工艺对 QBe2 进行热处理后的金相组织分析和硬度测定结果。单级时效分两组，即在 790 ℃×25 min 固溶处理后分别加热 180℃保温 1 h 和加热 300 ℃保温 2 h。分级时效是在 790 ℃×25 min 固溶处理后加热 180 ℃保温 1h+ 加热 3 0 0℃ 保温 2 h。经对比分析组织和性能，分级时效后的 QBe2 其硬度值稳定且偏差小；组织均匀，晶粒细化，排列密集，平均晶粒度为 15~20 μm；另外，疲劳寿命循环试验可连续开 / 关≥2 000 000 次，大幅度提高弹性极限和疲劳强度。

Yanchuan Tang 等[26]研究了正常时效和分级时效两种时效工艺对 Cu-Be-Co-Ni 合金组织和力学性

表 3 金相组织分析和硬度测定结果

Tab.3 Metallographic analysis and hardness measurement results

试验方案	热处理工艺	硬度 $HV_{0.2}$	金相组织分析
(a)单级时效	加热 180 ℃，保温 1 h	171 177 172	金相组织为固溶态
(b)单级时效	加热 300 ℃，保温 2 h	348 351 346	晶界上有少量 γ 相析出，晶内有较深的析出线，属正常的固溶时效态组织。晶粒基本为等轴状，平均晶粒度约为 0.015~0.025 mm
(c)分级时效	加热 180 ℃，保温 1 h+ 加热 3 0 0 ℃，保温 2 h	323 321 321	晶界明显，表面和心部晶粒大小均匀，晶粒细化，排列密集，金相组织为固溶时效态，晶粒基本为等轴状，平均晶粒度约为 0.015~0.020 mm

能的影响。通过拉伸试验和 Kahn 撕裂试验结果表明，与常规时效相比，分级时效能显著提高材料的均匀伸长率和平面应力断裂韧性，但极限拉伸强度略有下降。

Daibo Zhu 等[28]研究了双级时效对 Cu-2.7Be 合金组织和力学性能的影响，并与单级时效进行了比较。结果表明，双级时效与单级时效相比，在 380 ℃时效温度下，双级时效可明显提高 Cu-Be 板材的强度。在 320 ℃和 340 ℃温度下，双级时效和单级时效的强度和伸长率没有明显差异。断口扫描电镜表明，随着时效温度的升高，韧窝数量增加。

2.3.2 分步时效

分步时效是将时效分两步或多步叠加进行，可以确保零件的尺寸精度并进一步提高机械性能。其机制在于时效强化效应是可叠加的，而低温加热有利于减小应力。分步时效适用于薄材和尺寸精度要求较高的零件[6,15]。

2.3.3 回归热处理

回归热处理是指将时效强化后的合金在低于固溶处理的较高温度下进行短时加热，使合金重新软化，甚至塑性和维氏硬度恢复到与淬火状态差不多的工艺[29]。回归热处理工艺在铝合金热处理工艺中非常常见，而铍铜合金的回归热处理工艺是指将时效后的铍铜合金，在低于固溶温度条件下进行短时加热，使溶质原子重新回溶到铜基体当中，并且使铜基体软化的过程。

2.3.4 形变热处理

形变热处理是指通过综合利用形变强化和相变强化，将压力加工与热处理相结合的金属热处理工艺。王志强等[4]发现 9 mm 厚的 C17460 铍青铜板综合性能最佳的形变热处理工艺是：固溶 950 ℃/1 h+36.3%冷变形量 +455 ℃/3.0 h 时效，此工艺条件下合金的抗拉强度可达 826 MPa，电导率可达 41.71%IACS。

由上述可知，热处理很大程度上决定了铍青铜的性能，不同的热处理工艺对合金的性能影响很大，在实际生产中，不应一味追求高强度高硬度，而应根据产品设计要求来确定合理的热处理方法和参数，以更好的发挥铍青铜的性能优势。

3 铍青铜的性能及应用

铍青铜具有一系列优良的综合性能，主要体现在以下几个方面：

(1)高的硬度、强度。铍青铜经合理热处理后，其强度极限可达 1 250~1 500 MPa，接近中等强度钢的水平，因而铍青铜合金在油气钻井设备中应用十分广泛。

(2)良好的导电传热性能。铍青铜合金在具有良好的力学性能的同时还兼具良好的导电热传性能。其电导率达到 20%IACS~60 IACS（国际退火铜标准）不等，导热率≥105 W/m·k·20 ℃。

(3)良好的耐疲劳性能。铍青铜因具有较高弯曲应力及疲劳而被作为一种非常长效可靠的弹性弯曲材料使用，广泛应用在电气、电子元件方面，如弹簧、接触器。

(4)良好的成形性能。铍青铜合金经固溶处理后呈软态，此时合金塑性提高，便于加工。经后续时效处理后强度、硬度显著提高，不易变形，故可用于生产复杂、微小、精密的零件，如精密磁测量仪器、精密的模具、微型电子元件。

(5)极好的耐腐蚀性能。铍青铜的抗腐蚀性在众多的各类铜合金中是最好的，其耐腐蚀性相当于无氧铜，还能抗氧化耐高温，在一些恶劣环境中仍具有可观的力学性能，因而常用于海底通讯电缆且具有不可替代性[30,31]。

4 结束语

铍青铜因其优异的综合性能，在人们的工业生产和社会生活中具有不可或缺的地位。但因铍价格昂贵且有毒，这对生产条件提出了很高的要求，同时也限制了铍铜的应用和发展。随着科学技术的发展进步，人们对铍青铜的性能也提出了更高的要求。热处理作为决定着铍青铜性能好坏的关键环节，亦需要在处理方法、工艺流程、参数控制等方面进一步优化，以生产出安全性更高、性能更优、更符合人们要求的产品，届时铍青铜材料也将会更加广泛的应用于人们工业生产和社会生活的方方面面。

参考文献：

[1] 何霞，张彦敏，宋克兴，等. Cu-0.23Be-0.84Co 合金熔铸工艺及组织性能研究[J]. 铸造技术，2014，35(8):1765-1768.

[2] Wambach P F,Laul J C.Beryllium health effects,exposure limits and regulatory requirements [J]. Journal of Chemical Health & Safety, 2008, 15(4):5-12.

[3] 董超群，易均平. 铍铜合金市场与应用前景展望 [J]. 稀有金属，2005(03):350-356.

[4] 王志强. 热处理对低铍铜力学性能及电导率影响的实验研究[D]. 中南大学，2007.

[5] 潘奇汉.高级弹性材料——铍铜合金[J]. 汽车工艺与材料，2003(12):8-12.

[6] 谢伟滨. 铍青铜的热处理[J]. 热处理，2012，27(4):7-11.

[7] Abdulkadir Klzllaslan, ibrahim Altlnsoy. The mechanism of

two-step increase in hardness of precipitation hardened CuCoNiBe alloys and characterization of precipitates[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 701(Complete):116-121.

[8] 李隆盛. 铸造合金及熔炼[M]. 机械工业出版社, 1989.

[9] 汲翠兰. 微量元素对铍青铜材料的影响 // 中国电子学会生产技术学会、中国有色金属学会材料科学与工程学术委员会、中国仪器仪表学会仪表材料学会.第三届弹性合金与工艺学术交流会论文集[C]. 中国电子学会生产技术学会、中国有色金属学会材料科学与工程学术委员会、中国仪器仪表学会仪表材料学会:中国电子学会电子制造与封装技术分会,1991:208-211.

[10] 李永华,潘建立,任海强,等. Ni 对低铍铜合金铸锭组织和硬度的影响[J]. 有色金属加工, 2018, 47(6):22-24,41.

[11] S. Spaić and B. Markoli. Microstructural characterization of alloys of the quasibinary Cu-NiBe system, Z. Metallkd., 94(2003), No.8, p.876.

[12] Shuang-jiang He, Yan-bin Jiang, Jian-xin Xie, et al. Effects of Ni content on the cast and solid-solution microstructures of Cu-0.4wt% Be alloys [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2018, 25(6):641-651.

[13] 杨贵荣,郝远,宋文明,等. 高性能铜材的研究近况[J]. 铸造技术, 2003(1):13-15.

[14] 陈乐平, 周全. 铍铜合金的研究进展及应用 [J]. 热加工工艺, 2009, 38(22):14-18.

[15] 杨复建,梅敬军. 铍青铜热处理工艺的改进[J]. 机电元件, 2004 (3):18-20.

[16] 叶丽梅. 铍青铜热处理工艺研究 [J]. 世界有色金属, 2017(1): 29-30.

[17] 郁龙贵. 热处理对铍青铜组织和性能的影响[J]. 物理测试, 2000 (4):5-8.

[18] 李宁宁,宋克兴,周延军,等. 热处理对 Cu-0.23Be-0.84Co 合金性能和组织的影响 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2015,36(2):10-13,2-3.

[19] 韩明达,朱宝辉,韩俊刚. QBe2 铍青铜棒热处理断裂原因分析[J]. 理化检验(物理分册),2014,50(4):299-302.

[20] 李宁宁. Cu-0.23Be-0.84Co 合金热处理强化工艺及组织性能研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2015.

[21] Zhang H, Jiang Y, Xie J, et al. Precipitation behavior, microstructure and properties of aged Cu-1.7 wt% Be alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 773:1121-1130.

[22] 王荣滨. 铍青铜的热处理缺陷分析和双重时效强化 [J]. 热处理, 2001(3):20-24.

[23] Huang X, Xie G, Liu X, et al. The influence of precipitation transformation on Young's modulus and strengthening mechanism of a Cu-Be binary alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 772:138592.

[24] 曹迪,王宇鑫,高伟东,等. 铍青铜材料的加工工艺研究进展[J]. 金属功能材料,2018,25(4):35-40.

[25] Zhou Y J, Song K X, Xing J D, et al. Precipitation behavior and properties of aged Cu-0.23 Be-0.84 Co alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 658:920-930.

[26] Tang Y, Kang Y, Yue L, et al. The effect of aging process on the microstructure and mechanical properties of a Cu-Be-Co-Ni alloy [J]. Materials & Design, 2015,85:332-341.

[27] 宋帆,耿浩,李强. 分级时效处理对铍青铜弹性簧片的组织和性能影响[J]. 中国设备工程, 2016 (9):44-44.

[28] Zhu D B, Liu C M, Han T, et al. Effect of Two-step Aging on the Microstructure and Mechanical Properties of Cu-2.7 Be Alloys[C] //Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2016, 850:532-535.

[29] 张龙. Cu-Ni-Si 合金回归工艺研究[D]. 长沙:中南大学,2014.

[30] 施永奎. 高强度 QBe2 铍青铜线材的制备及性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007.

[31] 王迎鲜. 低铍 Cu-0.2Be-XCo 合金热处理工艺及组织性能研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.

(上接第 380 页)

比较其它 3 个拉坯速度，拉坯速度 0.10 m/s 的温度场分布均匀,温度梯度变化比较小。

从不同拉坯速度比较可知,冶金长度在浇注初期对于浇注速度影响不大，随着冶金长度的增加，拉坯速度越大,铸坯中心温度越高。相比较在二冷区出口段位置，浇注速度 0.05 m/s 和 0.10 m/s 的出口处的温度相近。铸坯表面温度在不同拉坯速度的情况下变化，相比较其它的拉坯速度，浇注速度 0.10 m/s 的温度梯度变化量比较小，有利于降低凝固过程偏析和疏松现象的发生。

3 总结

相比较 1 510、1 528 和 1 545 ℃的出口处和入口段温度场的变化,温度梯度过大,后期在凝固过程会产生成分偏析和影响下一步浇注工艺;温度梯度过小,在后期轧制过程会造成式样的变形。因此根据温度梯度分布，易于选择浇注温度 1 528 ℃最佳;相比较其它的拉坯速度,浇注速度 0.10 m/s 的温度梯度变化量比较小,有利于降低凝固过程偏析和疏松现象的发生。

参考文献:

[1] 王社教. Q345E 钢 ϕ600 mm 大圆坯生产工艺及质量控制研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2014.

[2] 章裕琳. 板坯连铸凝固传热及鼓肚变形分析[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2011.

[3] 方庆. Q345E 钢 ϕ600 mm 大圆坯连铸凝固数值模拟 [J]. 炼钢, 2014, 30(5): 57-61.

[4] 冯科. 方坯连铸二冷仿真数学模型的改进性研究[J]. 炼钢, 2006 (3): 49-53.

[5] 李慧春. 连铸坯凝固传热过程的数值模拟[D]. 兰州:兰州理工大学, 2008.