

电梯安全钳用 Cu-1.9Be-0.25Co 合金高温拉伸行为研究

周延军^{1,2} 高 芳³ 张文敏³ 王 磊³ 康军伟^{1,2} 张宏宇³ 马晓萍³ 姚 望³
(1.河南科技大学材料科学与工程学院; 2.有色金属新材料与先进加工技术省部共建协同创新中心;
3.河南省特种设备安全检测研究院)

摘 要 对 780 ℃×4 h 固溶+320 ℃×8 h 时效处理后的电梯安全钳用 Cu-1.9Be-0.25Co 合金进行高温拉伸试验,获得了不同试验条件下合金的应力-应变曲线和力学性能,并通过光学显微镜、扫描电镜观察其微观组织和拉伸断口形貌。结果表明,温度对时效态 Cu-1.9Be-0.25Co 合金高温条件下的抗拉强度和伸长率影响显著。随着拉伸温度升高,合金的抗拉强度从 262 MPa 逐渐下降到 24.5 MPa,伸长率和断面收缩率先升高后降低,在 730 ℃时均达到最大值,分别为 129.5% 和 99%,断面收缩率最大值持续到 780 ℃发生下降;合金的断裂机制为:500 ℃的沿晶脆性断裂+局部韧性断裂的混合断裂机制向 600、730、780、830 ℃条件下韧性断裂转变。

关键词 Cu-1.9Be-0.25Co 合金;高温拉伸行为;组织与性能

中图分类号 TG146.1 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.11.019 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High Temperature Tensile Behavior of Cu-1.9Be-0.25Co Alloy for Elevator Safety Gear

Zhou Yanjun^{1,2}, Gao Fang³, Zhang Wenmin³, Wang Lei³, Kang Junwei^{1,2},
Zhang Hongyu³, Ma Xiaoping³, Yao Wang³
(1.Institute of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology;
2.Provincial and Ministerial Co-construction Collaborative Innovation Center of New
Materials and Advanced Processing Technology of Nonferrous Metals;
3.Special Equipment Safety Inspection and Research Institute of Henan Province)

Abstract: The high-temperature tensile tests were conducted on elevator safety Gear with Cu-1.9Be-0.25Co alloy after 780 ℃×4 h solid solution+320 ℃×8 h aging treatment. The stress-strain curve and the change rule of mechanical properties of alloy under different testing conditions were obtained, and the microstructure and tensile fracture morphology of the alloy were observed through optical microscope and scanning electron microscope. The results reveal that temperature has a significant effect on the tensile strength and elongation of the aged Cu-1.9Be-0.25Co alloy under high temperature conditions. As the tensile temperature increases, tensile strength of the alloy is gradually decreased from 262 MPa to 24.5 MPa, and the elongation and reduction of area are firstly increased and then decreased, which reach the maximum of 129.5% and 99% at 730 ℃, respectively, and the maximum reduction of area continues to decline until 780 ℃. The fracture mechanism of the alloy is transformed from the composite fracture mechanism of intergranular brittle fracture+local ductile fracture at 500 ℃ to ductile fracture at 600 ℃, 730 ℃, 780 ℃ and 830 ℃.

Key Words: Cu-1.9Be-0.25Co Alloy, High Temperature Tensile Behavior, Mechanical Properties and Microstructure

收稿日期:2021-04-29;修改稿收到日期:2021-06-15
基金项目:河南省市场监督管理局科技计划资助项目(2020sj76);河南省重点研发与推广专项基金资助项目(科技攻关)(212102210441);河南省自然科学基金青年基金资助项目(202300410139);河南省高等学校重点科研资助项目(19A430012)
第一作者简介:周延军,男,1985 年出生,讲师,河南洛阳(471023),E-mail:dazhou456@163.com
引用格式:周延军,高芳,张文敏,等. 电梯安全钳用 Cu-1.9Be-0.25Co 合金高温拉伸行为研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(11):1 419-1 423.
ZHOU Y J, GAO F, ZHANG W M, et al. High temperature tensile behavior of Cu-1.9Be-0.25Co alloy for elevator safety gear[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11):1 419-1 423.

[5] MILLER W S, ZHUANG L, BOTTEMA J, et al. Recent development in aluminium alloys for the autom otive in dustry[J]. Materials Science and Engineering, 2000, A280(1): 37-49.

[6] 张亮, 司乃潮, 王宏建, 等. 熔体处理对 A356 合金组织和性能的影响[J]. 铸造, 2017, 66(3): 294-297.

[7] 刘文娇, 张新朋, 李惠杰, 等. 固溶处理对 7A55 铝合金断裂韧性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(1): 41-45.

[8] NIKLAS A, FERNANDEZ-CALVO A L, LACAZE J, et al. Thermal analysis as a microstructure prediction tool for A356 aluminium parts solidified under various cooling conditions[J]. China Foundry, 2011, 8(1): 89-95.

铍青铜合金因具有很高的强度、硬度、耐磨损性能以及优异的弹性极限和松弛稳定性能,而被广泛应用在非晶甩带辊环、电梯安全钳楔块、连续铸轧辊套等领域。上述领域对铍青铜合金的综合性能和服役效能提出更高要求,同时要求其具备良好的加工成形性能和高温力学性能^[1~3]。目前针对铍青铜合金的加工成形研究和热变形研究主要通过热压缩试验进行。何霞等^[4,5]对变形温度为 450~850 ℃,应变速率为 0.1~10 s⁻¹ 条件下 Cu-0.23Be-0.84Co 低铍青铜的热变形行为进行研究,发现其热变形的流变应力随应变速率的降低和变形温度的升高而减小,并且在高温变形条件下发生动态再结晶。同时,构建热加工图得出合金的加工安全区对应的温度为 450~725 ℃,应变速率为 0.7~10 s⁻¹。唐延川^[6]对 Cu-Be-Co-Ni 合金的高温压缩变形行为进行了研究,发现其热压缩变形过程即为热激活的过程,其过程可分为加工硬化、动态回复与动态再结晶 3 个阶段。合金的应力峰值随应变速率的增加而上升,随着变形温度的增加而降低。ZHAO Z G 等^[7]研究了高弹软化态 Cu-Be 合金的热变形行为,获得了其本构方程,拉伸过程是典型的流变过程;在 600~680 ℃ 范围内的热活化能为 162.2 kJ/mol,主要的软化机制为动态再结晶。目前,有关铍青铜的研究主要集中在铍青铜热压缩变形行为的研究,但关于高铍青铜的高温拉伸变形行为研究则报道很少。因此,本课题借助 MTS-E45/100 kN 电子万能试验机对 Cu-1.9Be-0.25Co 合金进行不同高温下的拉伸试验,同时探究了其加工成形性能和高温力学性能,获得不同参数下的应力-应变关系、力学性能,以及合金的微观组织和断口形貌,为其实际塑性成形工艺参数的调控提供参考。

1 试验材料及方法

对 Cu-1.9Be-0.25Co 合金分别在 500、600、730、780、830 ℃ 下进行高温拉伸试验,其中 500、600 ℃ 的设置是根据该合金在电梯安全钳、非晶甩带等服役工况温度环境确定,730、780、830 ℃ 的设置是根据 Cu-1.9Be 系合金固溶温度(780 ℃)、出现过烧时的温度(830 ℃)确定的。试样初始状态为固溶时效态(780 ℃×4 h, 320 ℃×8 h)。试验将拉伸试样与工装相连放入高温炉中进行加热,达到设定的温度后,保温 15 min 后进行拉伸试验。在达到屈服点之前,变形处在弹性变形阶段,变形量很小而拉伸载荷迅速增大,因此拉伸速度不宜过大,设为 0.5 mm/min,过了屈服阶段后,由于铍青铜在高温条件下变形较快,拉伸速率设为 2 mm/min。试样所用引伸计标距为 25 mm,精度为 0.5 级。高温拉

伸试样按照 GB/T 4338-2006 进行加工,见图 1。通过 Zeiss AxioVert A1 金相显微镜、JSM-5610LV 扫描电镜对合金组织和断口形貌进行分析。

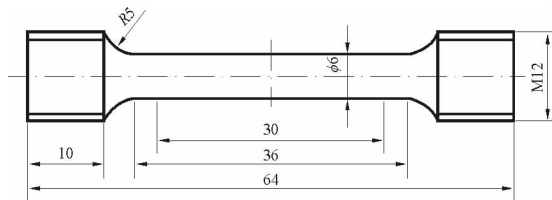


图 1 Cu-1.9Be-0.25Co 合金高温拉伸试样示意图

Fig.1 The schematic diagram of high temperature tensile specimens of Cu-1.9Be-0.25Co alloy

2 试验结果与分析

2.1 不同拉伸温度条件下合金的强度和韧性

图 2 为 Cu-1.9Be-0.25Co 合金在不同温度下的单向拉伸应力-应变曲线。可以看出,不同温度下拉伸时流变应力随着变形温度的升高而降低。这说明其为热(负温度)敏感型合金^[8],其高温变形过程大致分为两个阶段。在变形初始阶段,随着应变量的增加,合金达到屈服点后,流变应力迅速增大到峰值。这是由于此阶段,变形量逐渐增加,导致大量的位错塞积,位错密度迅速提升,合金内部畸变能增加,位错运动受到阻碍,只有在较大应力作用下,位错才能脱离溶质原子的钉扎,表现为应力-应变曲线的上屈服点;当位错继续滑移时,所需的应力相应得到减小,表现为应力-应变曲线的下屈服点^[9]。其中该拉伸曲线屈服阶段均呈现单次的波动应力值至最低点,且随着温度升高,上下屈服点之间的“误差带”逐渐减小。随着变形继续,因为加工硬化起主导作用,当位错增殖带来的加工硬化与位错间由于相互作用引起位错的湮灭、重组导致的动态软化达到动态平衡时,流变应力快速升高达到峰值^[4]。随着应变量继续增大,在 500、600 ℃ 达到峰值后的流变应力出现缓慢下降,并最终趋于平稳,表明此阶段发生了典型的动态再结晶软化,且动态再结晶软化起主导作用,这可能是由

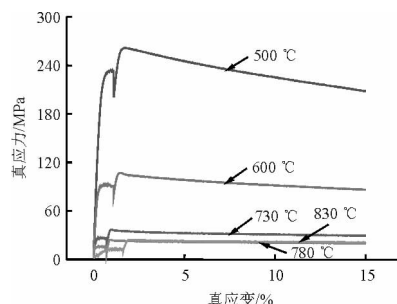


图 2 不同温度下 Cu-1.9Be-0.25Co 合金的应力-应变曲线

Fig.2 The stress-strain curves of Cu-1.9Be-0.25Co alloy at different temperatures

于随着拉伸温度升高,合金抵抗外界变形所需的变形抗力越低。同时,变形初期的形变储存能为再结晶过程提供了驱动力,并且温度越高,位错和合金原子的动能就越大^[10]。至 730、780、830 ℃时,拉伸曲线比较平缓,呈现平直状,为动态回复的特征曲线,同时由于拉伸的温度过高,此时合金抗拉强度最高只有 730 ℃时的 26 MPa。

图 3 为 Cu-1.9Be-0.25Co 合金试样在不同温度下的拉伸试验结果。可以看出,随着变形温度升高,原子间的结合力由于热激活能的增强而降低,原子间的扩散更容易进行,从而运动产生的位错消失,减轻或削弱了加工硬化,提高了塑性,使得强度降低^[11,12]。因此在 730 ℃时屈服强度和抗拉强度分别降低到 15.6、24.4

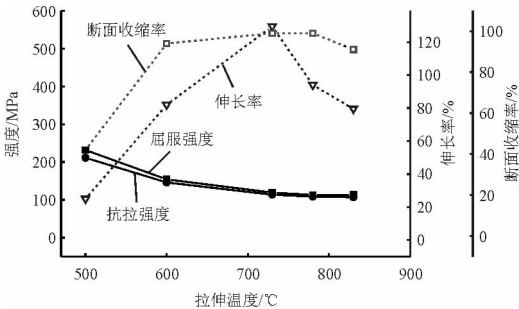


图 3 不同温度下 Cu-1.9Be-0.25Co 合金的拉伸性能
Fig.3 Tensile properties of Cu-1.9Be-0.25Co alloy at different temperatures

MPa。同时在热变形过程中,发生了部分动态再结晶,加强了合金的软化程度,降低了合金的变形抗力^[13]。当温度高于 780 ℃时,随着温度增加,伸长率快速降低,这可能是由于温度过高导致晶界处有部分脱溶物产生,使得合金脆化,伸长率降低,在 830 ℃时,伸长率降低至 79.5%。

2.2 不同拉伸温度条件下合金断口形貌

图 4 和图 5 分别为 Cu-1.9Be-0.25Co 合金不同温度下单向拉伸试验后的宏观和微观断口形貌。由图 4 可知,500 ℃时合金断面呈平直面,断裂平面几乎与拉伸方向垂直,裂纹的扩展方向与主正应力方向平行^[14]。结合合金断口微观形貌(见图 5a 和图 5b),拉伸温度为 500 ℃时,可以看到每个晶粒的多面体形貌,断面呈较

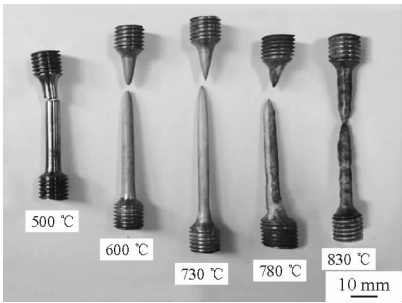


图 4 不同拉伸温度下试样的宏观断口形貌
Fig.4 Macro-fracture morphology of specimens at different tensile temperatures

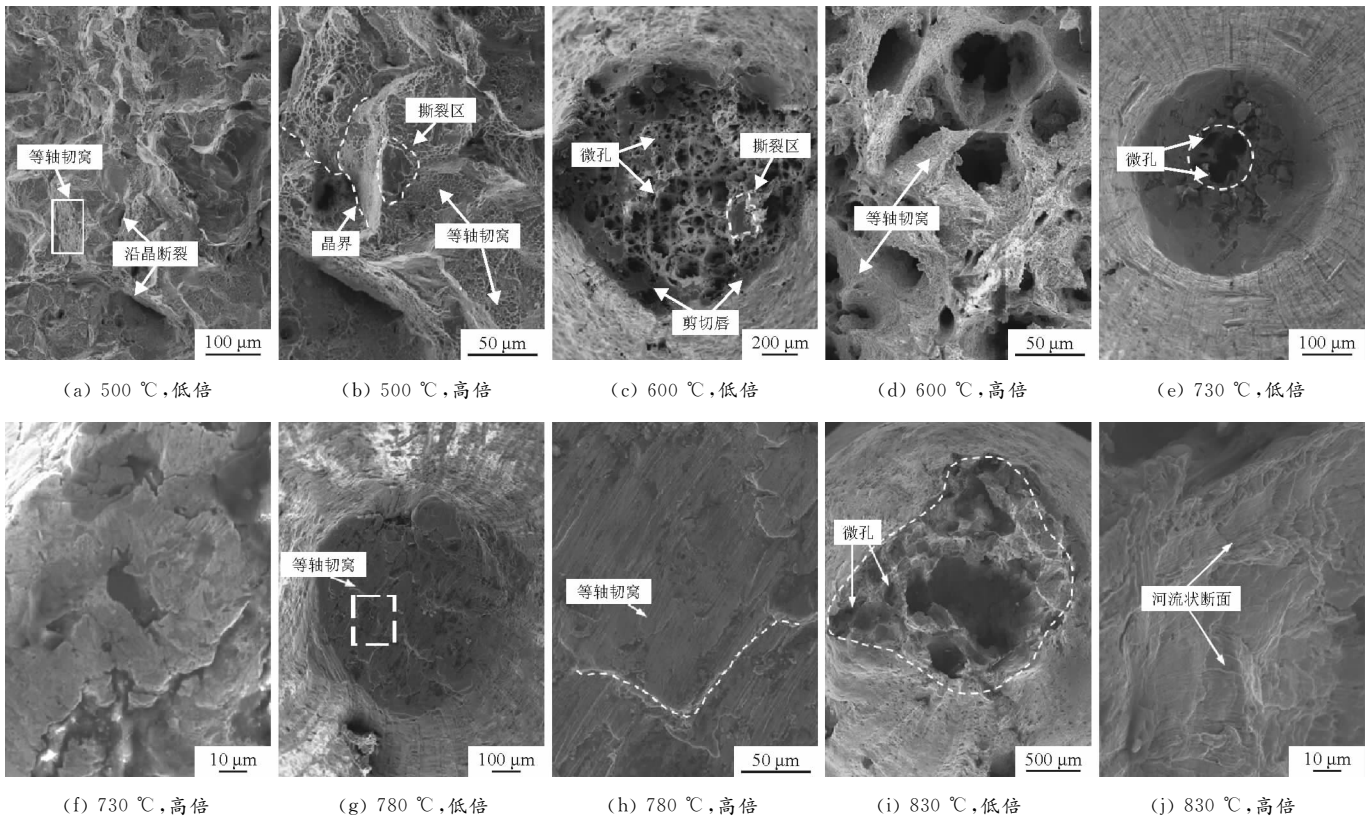


图 5 时效态 Cu-1.9Be-0.25Co 合金在不同拉伸温度下的微观断口形貌

Fig.5 Macro-fracture morphology of aged Cu-1.9Be-0.25Co alloy at different tensile temperatures

为明显的“冰糖块状”形貌(见图 5b),晶粒间的分界线清晰,大部分晶面上存在着较多的等轴状韧窝形貌。在晶界线上存在着沿晶裂纹,裂纹间隙小,即呈现沿晶断裂和韧性断裂共存的断口特征^[15~17]。高温条件下合金的塑性有所提高,在脆性断裂前发生了部分塑性变形。因此,时效态 Cu-1.9Be-0.25Co 合金高温拉伸条件下的断裂机制为:沿晶脆性断裂+局部韧性断裂的混合断裂机制。

另外,在 600、730、780、830 °C 高温拉伸的宏观断口形貌均发生明显的拉长现象,最后在拉断处呈针状形貌,可以看作是颈缩到一点的纯剪切断裂,即呈现韧性断裂的断口特征。由图 5c 和图 5d 可知,拉伸温度为 600 °C 时,断面由一系列显微孔洞及大尺寸的孔洞组成,这些显微孔洞及大尺寸的孔洞的轴线平行于拉伸方向,且在孔洞边缘及侧面存在较多等轴韧窝。韧窝形成的应力状态为均匀应变型^[18]。因此,600 °C 下高温拉伸时断裂机制为等轴韧性断裂,其断裂过程是显微孔洞的形成以及长大过程,属于高能吸收过程的塑性断裂。首先在塑性变形严重部位形成显微孔洞,并在高温及外力作用下长大、聚集形成大尺寸的孔洞,随着孔洞的进一步增大,部分孔洞演变成裂纹,裂纹经快速扩展,最后在剪切唇区断裂。730、780、830 °C 时均出现明显的颈缩现象,材料的断面收缩率均达到 90% 以上。宏观断面取向与最大切应力方向一致,即最大正应力约呈 45°。从微观形貌上看,断面较为光洁,没有明显的韧窝区域,呈现出纯剪切韧性断裂的特征。此外在 730 °C 时,合金整体塑性最好,试样的伸长率达到最大值 129.5%,此时材料的塑性最好。随着温度进一步升高,由于合金内部发生晶粒的急剧长大(过热)甚至局部熔化(过烧)^[19],780 °C 时,伸长率降低到 94.0%。温度升高到 830 °C 时,晶界处有脱溶物产生,会降低塑性,导致合金的断口形貌参差不齐,不再平滑,部分区域呈现“河流状”解理断裂特征,同时存大而深的不规则孔洞,合金

的伸长率也随之降低到 79.5%。

2.3 不同拉伸温度条件下合金的高温组织

图 6 为 Cu-1.9Be-0.25Co 合金在不同温度下的拉伸试样纵截面显微组织。可以看出,经 500 °C 变形后,Cu-1.9Be-0.25Co 合金的晶粒组织较为粗大,大晶粒之间夹杂着一些小晶粒,晶粒没有被拉长变形的迹象,为原始的粗晶组织。这是由于此温度条件下拉伸时,合金断裂方式为沿晶脆性断裂为主导,没有发生明显的拉伸变形,见图 6a。经 600 °C 变形后,合金内部晶粒组织沿拉伸方向被拉长,部分晶粒仍保持变形前的形貌,在此温度下进行塑性变形时,位错易出现集中,产生较大应力,容易产生裂纹,见图 6b。当温度达到 730 °C 时,合金发生明显的动态再结晶,在原始晶界周围形成了具有“项链组织”形貌的细小再结晶晶粒。同时在原始晶界处已有黑色的节瘤状析出物出现。这是由于在结晶发生的同时,由于温度过高,固溶体内 α 相发生了共格脱溶过程。脱溶首先从晶界开始,并以比晶内更大的脱溶速度而发展,因此在晶界处首先有少量不连续脱溶物产生^[20],但此时脱溶物较少,仍使得合金保持较高的断面收缩率,此时伸长率达到最大值 129.5%,见图 6c。780 °C 下变形时,原子的扩散更易进行,为位错的滑移和攀移提供了更多能量,有利于动态再结晶的进行,细小的再结晶晶粒通过吞噬周围的基体向四周进行伸展长大,并且合金晶界宽度明显增加,“瘤状组织”较多,即不连续脱溶物数量较多。合金的强度和塑性进一步下降,表现为合金的强度由 26 MPa 降低至 15.6 MPa,伸长率由 129.5% 降低至 94%,见图 6d。当变形温度进一步增大到 830 °C 时,合金内部晶粒发生异常长大,且大小晶粒区界线较为明显,同时加上晶界处“瘤状组织”脆化效果,造成组织与性能的不均匀性加剧,具体体现在宏观断口试样表面呈现波浪起伏的形貌,且试样表面氧化较为严重,严重影响合金的塑性和强度,见图 6e。

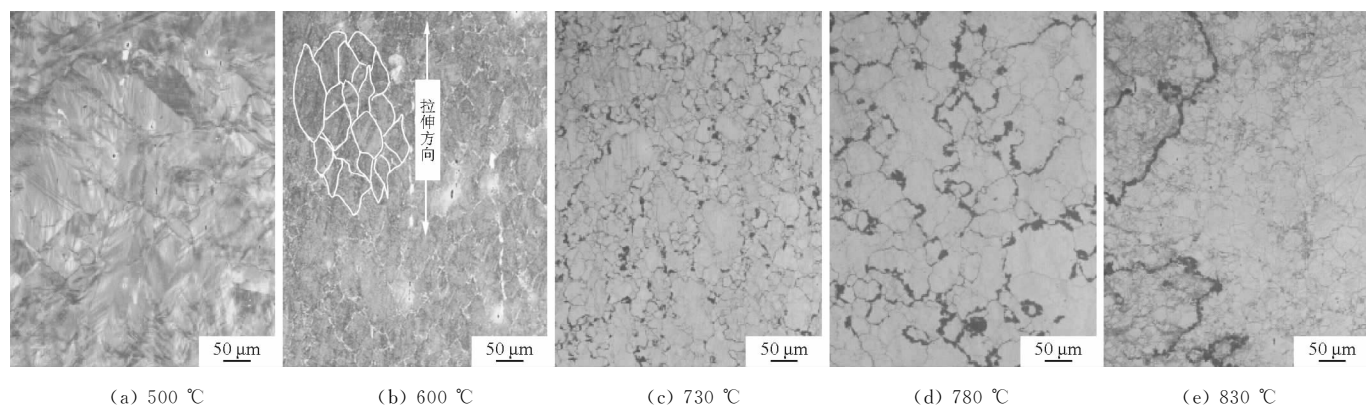


图 6 不同温度下的拉伸试样纵剖面金相组织

Fig.6 Metallographic structure of longitudinal section of tensile specimen at different temperatures

3 结 论

(1)Cu-1.9Be-0.25Co 合金变形分为两个阶段:在变形初始阶段,加工硬化起主导作用,在第二阶段,动态再结晶软化起主导作用。随着温度升高,合金的抗拉强度从 262 MPa 逐渐下降到 24.5 MPa,伸长率和断面收缩率先升高后降低,在 730 ℃时伸长率和断面收缩率达到最大值,分别为 129.5% 和 99%,断面收缩率最大值持续到 780 ℃发生下降。

(2)不同温度下 Cu-1.9Be-0.5Co 合金的断裂机制为:500 ℃的沿晶脆性断裂+局部韧性断裂的混合断裂机制向 600、730、780、830 ℃条件下韧性断裂转变。

(3)Cu-1.9Be-0.5Co 合金在 830 ℃变形时,晶界处有大量不连续脱溶物产生,使得合金晶界处材料变得硬而脆,导致合金的塑性明显降低,随着变形温度升高,脱溶物逐渐由“项链组织”向“瘤状组织”形貌转变,同时合金晶粒组织异常长大,导致合金力学性能进一步下降。

参 考 文 献

- [1] XIE G L, WANG Q S, MI X J, et al. The precipitation behavior and strengthening of a Cu-2.0% Be alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2012, A558: 326-330.
- [2] MONZEN R, TAKAGAWA Y, WATANABE C, et al. Mechanical properties of precipitation strengthening Cu-base alloys highly deformed by ARB process[J]. Procedia Engineering, 2011(10): 2 417-2 422.
- [3] 范瑛,谭云,陶萍,等. 铍青铜的性能研究综述[J]. 材料导报, 2014, 28: 100-103.
- [4] 何霞,张彦敏,宋克兴,等. Cu-0.23Be-0.84Co 合金热变形行为[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(2): 105-110.
- [5] 何霞. 铸轧铝板坯用 Cu-0.23Be-0.84Co 合金热变形行为及数值模拟研究[D].河南洛阳:河南科技大学, 2015.
- [6] 唐延川. Cu-Be-Co-Ni 合金组织性能及时效硬化行为研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [7] ZHAO Z G, LIU J W, LU S Q, et al. Deformation mechanisms in highly elastic softened-state Cu-Be alloy at elevated temperatures [J]. Physics of Metals and Metallography, 2018, 119(1): 69-75.
- [8] 张毅,许倩倩,柴哲,等. Cu-Cr-Zr-Ag 合金高温热变形行为与变形机制[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(4): 931-937.
- [9] 陶杰,姚正军,薛峰. 材料科学基础[M]. 北京: 北京工业出版社, 2006.
- [10] 班宜杰,张毅,田保红,等. Cu-0.8Cr-0.3Zr-0.2Mg 合金热变形行为及热加工图[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(9): 44-49.
- [11] 刘健,张双楠,蒋炜. 铜导线高温拉伸组织与力学性能分析[J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48(4): 87-90.
- [12] 吕官丽,周延军,苏娟华,等. C19400 合金高温拉伸性能和断口形貌[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(6): 77-83.
- [13] 李瑞卿,张毅,田保红,等. Cu-Cr-Zr-Ce 合金高温热变形行为及动态再结晶[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(S2): 10-13.
- [14] OGAWA Y, YAMABE J, MATSUNAGA H, et al. Material

performance of age-hardened beryllium-copper alloy, CDA-C17200, in a high-pressure, gaseous hydrogen environment[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (26): 16 887-16 900.

- [15] SUDHAKAR KV, CISNEROS JC, CERVANTES H, et al. Machining characteristics and fracture morphologies in a copper-beryllium (Cu-2Be) alloy[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2006, 15(1): 117-121.
- [16] JEN KP, XU L, HYLINSKI S, et al. Over-aging effect on fracture toughness of beryllium copper alloy C17200[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 17(5): 714-724.
- [17] ZHOU Y J, SONG K X, XING J D, et al. Mechanical properties and fracture behavior of Cu-Co-Be alloy after plastic deformation and heat treatment[J]. Journal of Iron and Steel Research(International), 2016, 23(9): 933-939.
- [18] 周延军. 低铍高导 Cu-0.2Be-0.8Co 合金组织性能演变规律[D].西安: 西安交通大学, 2016.
- [19] 丁雨田,施永奎,胡勇,等. 热处理对 QBe2 合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2007, 36(24): 62-65.
- [20] 王晶莉,岳丽娟,闫永,等. 低温时效对 QBe2.0 铍青铜组织与性能的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9(3): 17-21.

(编辑:刘晨辉)

Novelis 推出第二代铝精密 EV 电池外壳解决方案

Novelis 宣布,推出第二代轻型电动汽车电池外壳解决方案。据悉,第二代方案在第一代概念的基础上引入创新材料,与钢或铝型材制成的传统 EV 电池外壳相比,铝板强化设计能够最大限度地减轻质量、降低成本并提供更高的电池能量密度。

自 2019 年推出第一代电池外壳解决方案以来,Novelis 一直与行业合作伙伴和汽车工程师合作,在优化设计的同时引入生产可行的创新,包括高强度铝滚压成型的电池到封装(CTP)模块化结构和结构集成的热管理底板。凭借材料技术与创新,Novelis 将框架质量防护系数成功降至 1.0 kg/kWh 以下,与欧洲其他电动 SUV 制造商的基准铝制生产外壳相比,质量减少 20% 以上。此外,改进后的 CTP 封装效率和结构性能也使能量密度比基准提高了 30%。

据了解,第二代 EV 电池外壳采用 Novelis Advanz™ s650 合金设计,比传统钢外壳的质量减少 50%,并且比挤压件更具成本效益,可轻松适应特定的 OEM 车辆设计。除了详细的设计解决方案,Novelis 还开发出一种新工艺方法和设计指南,为外壳应用领域指定轻质铝型材,同时参考许多严格的全球热失控要求。

(摘自中国有色网)