

累积形变量对 C17300 合金棒材组织及力学性能影响

曹 军 李 冲
(河南理工大学机械与动力工程学院)

摘 要 通过对水平连铸法制备的 C17300 合金,利用 SEM、拉伸试验机研究了累积形变量对 C17300 合金棒材组织性能和断口形貌的影响。结果表明,随着累积形变量增加,合金晶粒内部滑移带和形变孪晶数量减少,晶粒细化,抗拉强度和硬度先升高后降低,伸长率先降低后升高。在累积形变量为 57.3% 时综合性能最佳,抗拉强度为 682.8 MPa、屈服强度为 539.36 MPa、硬度(HV)为 251.11、伸长率为 10.78%;累积形变量由 20.0% 增加至 27.3% 时,合金由韧性断裂转变为沿晶、韧性混合断裂, γ 相转变为点坑状分布;累积形变量为 57.3% 时,韧窝直径减小,断口形貌呈韧性断裂, γ 相析出量增多呈瘤胞状分布;累积形变量为 72.7% 时,韧窝直径最小,由等轴状转变为抛物线状, γ 相析出量进一步增多。

关键词 C17300 合金;累积形变量;显微组织;力学性能;断口形貌

中图分类号 TG113.25;TG146.1⁺1 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.10.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Cumulative Deformation on Microstructure and Mechanical Properties of C17300 Alloy Bar

Cao Jun, Li Chong

(School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University)

Abstract: The effects of cumulative deformation on microstructure, properties and fracture morphology of C17300 alloy bar were investigated by SEM and tensile testing machine. The results show that with the increase of cumulative deformation, the number of slip bands and deformation twins is decreased with grain refinement, and the tensile strength and hardness are increased firstly and then decreased, and the elongation is decreased firstly and then increased. The comprehensive performance is desirable when the cumulative deformation is 57.3%, where the tensile strength, the yield strength, the hardness, and the elongation reach up to 682 MPa, 539.38 MPa, 251.11 HV and 10.78%, respectively. When the cumulative deformation is increased from 20% to 27.3%, the alloy is changed from ductile fracture to intergranular and ductile mixed fracture, and the γ phase is changed to pit-like distribution. When the cumulative deformation is 57.3%, the dimple diameter is decreased, with ductile fracture, and the precipitated amount of γ phase is increased with cellular distribution. When the cumulative deformation is 72.7%, the dimple diameter is the smallest, from equiaxed to parabolic, and the precipitated amount of γ phase is increased further.

Key Words: C17300 Alloy, Cumulative Deformation, Microstructure, Mechanical Properties, Fracture Morphology

C17300 铜合金是一种典型的时效析出型强化高铍铜合金,经过固溶和时效处理后具有高强度、高硬度、高弹性和高耐腐蚀性等特点^[1-4],在电子电器、通讯仪器、航空航天、石油化工、冶金矿山、汽车家电、机械制造等领域得到广泛应用^[5-7]。C17300 合金棒材制备流程为熔铸→热锻→热轧→冷拉拔→固溶处理→时效处理,冷加工和热处理工艺在高铍铜合金制备工艺流程中起着十分重要的作用^[8]。关于热处理工艺对铍铜合金影响

的研究报道很多。HYLINSKI S 等^[9]研究了不同时效处理工艺对 C17300 合金断裂韧度的影响,发现屈服强度的增加会降低断裂韧度,在 415 ℃×5 h 时效处理条件下,C17300 合金具有最佳断裂韧度和屈服强度,分别为 69.23 MPa·m^{1/2},717 MPa。ALISHA S 等^[10]研究了 C17200 合金在不同时效温度和时间条件下的力学性能,发现在 400 ℃×3 h 时效处理条件下合金力学性能最佳,抗拉强度和屈服强度分别为 943 MPa、761

收稿日期:2022-10-23;修改稿收到日期:2022-12-11

基金项目:区域创新发展联合基金重点资助项目(U21A2051)

第一作者简介:曹军,男,1979 年出生,副教授,河南焦作(454000),E-mail:cavan@hpu.edu.cn

引用格式:曹军,李冲.累积形变量对 C17300 合金棒材组织及力学性能影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(10):1 409-1 413.

CAO J, LI C. Effects of cumulative deformation on microstructure and mechanical properties of C17300 alloy bar[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2023, 43(10):1 409-1 413.

MPa,伸长率可达 16%。MIKI M 等^[11]研究了淬火温度对 Cu-Be 合金析出相的影响,发现随着淬火温度升高,Be 原子扩散需要的空位浓度增加,晶内析出相速率增大。MONTECINOS S 等^[12]研究了显微组织对 Cu-2Be 合金杨氏模量和硬度的影响,发现 α 基体中亚稳相的形成会导致硬度和杨氏模量显著增加,在温度为 676 K,时间为 0.75 h 时,合金硬度达到最大值,随着时效时间延长,硬度逐渐降低,弹性模量基本保持不变。方森鹏等^[13]研究了铍铜合金的凝固组织和力学性能,发现随着 Be 含量的增加,合金的宏观组织得到不同程度的细化,抗拉强度先升高后降低,电导率先降低后升高,Be 含量为 0.5% 时,抗拉强度达到最大值 490.4 MPa,电导率降低至 18.792 MS/m。周延军等^[14]对比了锻态和时效态 Cu-0.33Be 合金的硬度和抗拉强度,发现时效处理可显著提高 Cu-Be 合金的硬度和抗拉强度,460 ℃ 时效 60 min 时,抗拉强度和硬度(HB)最佳,分别为 661.6 MPa、207。陈乐平等^[15]研究了时效温度和时间对 Cu-Ni-Be 合金强度和电导率的影响,发现合金在 920 ℃×1 h+480 ℃×6 h 条件下,综合性能最佳,电导率为 34.28 MS/m,抗拉强度为 758 MPa,伸长率为 21%。上述研究主要关注热处理工艺对高铍铜合金性能的影响,而对拉拔过程中累积形变量对高铍铜合金微观组织和断口形貌的影响研究鲜有报道。本研究通过对水平连铸工艺制备的 C17300 合金进行不同累积形变量拉拔试验,并对拉拔后的棒材进行时效处理,研究不同累积形变量对 C17300 合金棒材显微组织、力学性能和断口形貌的影响,为进一步提高铍铜合金性能提供参考。

1 试验材料与方法

采用水平连铸制备直径为 $\phi 10$ mm 的 C17300 合金杆坯,其化学成分见表 1。采用 FR-200 型链式拉拔机将 $\phi 10$ mm 的杆坯分别拉拔至 $\phi 1.9$ 、 $\phi 1.52$ 、 $\phi 1.165$ 和 $\phi 1.11$ mm,拉拔过程中保持杆坯水平,再利用 DG-48 型拉丝机将合金杆坯进行多道次拉拔至 $\phi 0.993$ mm。表 2 为 C17300 合金棒材的拉拔道次和累积形变量。对累积形变量为 57.3% 和 72.7% 的试样进行 650 ℃×1 h 中间退火处理,然后将拉拔态试样进行 120 ℃×3 h 去应力退火和 315 ℃×1.5 h 时效处理,退火和时效处理均在真空感应炉中进行,然后随炉冷却。

采用环氧树脂镶嵌法制备金相试样,再进行打磨和抛光,采用氯化铜氨水溶液对不同累积形变量试样进行腐蚀,腐蚀溶液配比为:2 g 的 CuCl_2 + 25 mL 的 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$,腐蚀 4 s。使用 Merlin Compact 型扫描电镜观测微观组织和断口形貌;利用 HV-5L 型硬度计测

试试样硬度,载荷为 3 N,加载时间为 15 s,测试结果取 3 次测量的平均值;采用 WE-30 型万能拉伸试验机根据 GB/T 228.1—2021 测试合金的力学性能,测试结果取 3 次测量的平均值。

表 1 C17300 合金杆坯的化学成分

Tab.1 Chemical composition of C17300 alloy bar %					
ω_B					
Be	Ni+Co	Al	Si	Pb	Cu
1.8~2.0	≥ 0.15	≤ 0.15	≤ 0.2	0.2~0.6	余量

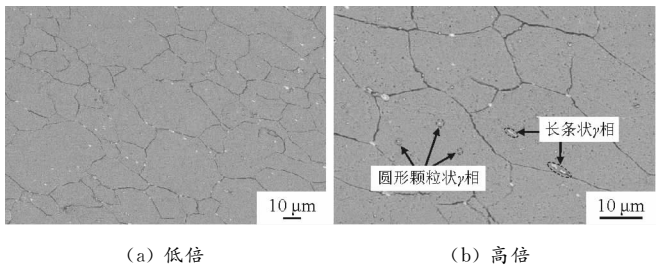
表 2 C17300 合金棒材的拉拔道次和累积形变量

Tab.2 Drawing passes and cumulative deformation of C17300 alloy bars		
试样	拉拔工序	累积形变量/%
1	$\phi 1.11 \text{ mm} \rightarrow \phi 0.993 \text{ mm}$	20.0
2	$\phi 1.165 \text{ mm} \rightarrow \phi 0.993 \text{ mm}$	27.3
3	$\phi 1.52 \text{ mm} \rightarrow \phi 1.15 \text{ mm}(650 \text{ }^\circ\text{C} \times 1 \text{ h}) \rightarrow \phi 0.993 \text{ mm}$	57.3
4	$\phi 1.9 \text{ mm} \rightarrow \phi 1.5 \text{ mm} \rightarrow \phi 1.15 \text{ mm}(650 \text{ }^\circ\text{C} \times 1 \text{ h}) \rightarrow \phi 0.993 \text{ mm}$	72.7

2 试验结果与分析

2.1 累积形变量对显微组织的影响

图 1 为 C17300 合金连铸杆坯的显微组织。由图 1a 可知,C17300 合金经固溶和时效处理后晶界明显,晶粒大小不均匀,显微组织中暗色区域为基体 α 相,亮白色点状区域为 γ 相, γ 相分布均匀,且在晶界和晶粒内部均有少量析出。晶粒内部 γ 相主要由颗粒状和长条状组成。晶界 γ 相尺寸大于晶内 γ 相,主要以长条状为主,见图 1b。



(a) 低倍 (b) 高倍

图 1 C17300 合金连铸杆坯的显微组织

Fig.1 Microstructure of C17300 alloy continuous casting rod blank

图 2 为时效态 C17300 合金棒材在不同累积形变量下的显微组织,时效条件为 315 ℃×1.5 h。可看出,C17300 合金连铸杆坯经拉拔塑性变形后, γ 相数量显著增加。由图 2a 和图 2b 可知,20% 累积形变量合金棒材经时效处理后,晶粒内部出现形变孪晶组织,见虚线框。 γ 相在晶界处析出严重,导致晶粒轮廓模糊,此时合金棒材处于过时效阶段。由于棒材经过大变形拉拔加工,产生大量位错、空位等缺陷,随着累积形变量增

加, 晶格畸变程度和缺陷数量增加, γ 相在这些畸变和缺陷处形核并长大, 因此拉拔态合金内部 γ 相析出量显著高于铸态合金; 累积形变量为 27.3% 时, 合金棒材晶粒组织被拉长变形, 晶粒尺寸不均匀, 晶界明显, γ 相析出量减少, 并在晶界上呈点状凹坑分布, 见图 2c。位错密度随着累积形变量增加而增加, 此时 γ 相被位错割据成纳米级颗粒, 导致合金最表层的 γ 相细化而逐渐消失, 析出量减少。由图 2d 可知, 27.3% 的累积形变量试样晶粒内部滑移带和形变孪晶数量增加, 形变孪晶组织有两种形态, 一种形变孪晶组织晶界平直, 贯穿整个晶粒, 呈现长条状, 另一种形变孪晶组织由晶界生长中止于晶粒内部, 端部呈阶梯状, 滑移带组织间距较小, 呈条纹状和交错状分布。这是因为位错塞积阻碍塑性变形, 累积形变量增加, 晶粒内部通过产生大量交叉滑

移带和形变孪晶, 促进塑性变形继续进行; 累积形变量增加至 57.3% 时, 晶粒内部滑移带和形变孪晶数量减少, 晶粒尺寸变小, γ 相析出量增加, 见图 2e 和图 2f。原因是合金内部产生的畸变能和缺陷数量增加, γ 相在缺陷处形核增加量大于位错割据处减少量, 导致 γ 相析出量继续增加; 累积形变量增加至 72.7% 时, 晶粒细化, 尺寸达到最小值, γ 相析出量进一步增加, 在晶界上呈现瘤胞状分布, 并向晶粒内部生长, 见图 2g 和图 2h。这是由于累积形变量增加促进了 γ 相形核析出, 合金在拉拔过程中经退火处理后, 畸变能释放, 发生畸变的晶粒获得能量后得以重新形核成长, 长大后的晶粒尺寸显著减小。形变孪晶之间相互吞并, 最终细长条状形变孪晶逐渐宽化, 而宽化的孪晶组织作为一种不完全位错, 在温度升高过程中会发生攀移和抵消, 导致位错密

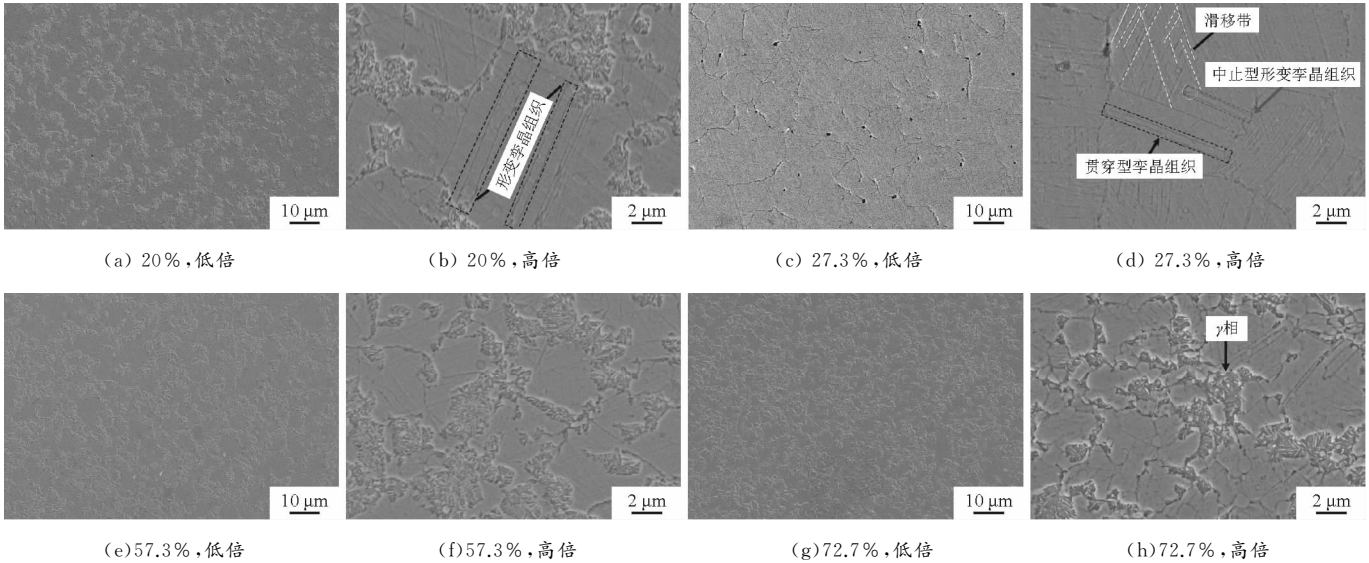


图 2 时效态 C17300 合金棒材在不同累积形变量下的显微组织

Fig.2 Microstructure of aged C17300 alloy bar under different cumulative deformation

度降低, 形变孪晶数量显著减少。

2.2 累积形变量对硬度和伸长率的影响

图 3 为 C17300 合金棒材硬度和伸长率随累积形变量的变化曲线。可以看出, 累积形变量由 20% 升高至 27.3% 时, 合金棒材硬度 (HV) 由 220.99 升高至 246.23, 伸长率由 11.18% 降低至 9.11%, 硬度和伸长率变化幅度较大。合金棒材在拉拔过程中累积形变量增加引起位错密度增大, 位错在运动中交织缠结形成位错高密度区, 对后续运动的位错产生钉扎作用, 阻碍了塑性变形发生, 导致合金硬度升高, 伸长率下降; 累积形变量增加至 57.3% 时, 合金棒材由于在拉拔过程中进行了退火处理, 内部发生 Be 原子析出和再结晶软化作用, 析出的 Be 原子弥散分布在铜基体内部, 这些析出相颗粒在拉拔加工过程中发生破碎, 位错经过析出相颗粒时, 交织缠结更加剧烈, 导致硬度进一步增加。在热处

理过程中, 温度升高导致堆积的位错发生攀移和抵消而使密度减小, 造成合金棒材加工硬化作用减弱, 又会使硬度降低, 但此时 Be 原子强化大于再结晶软化作用, 使硬度 (HV) 升高至 251.11, 伸长率升高至 10.78%; 累

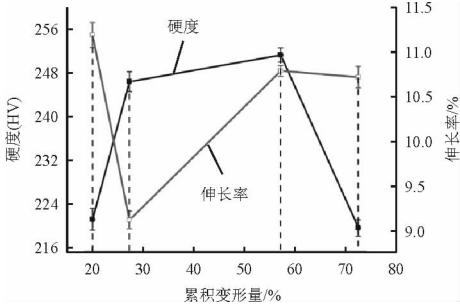


图 3 C17300 合金棒材硬度和伸长率随累积形变量的变化曲线

Fig.3 Hardness and elongation variation of C17300 alloy bar with cumulative deformation

积形变量继续增加至 72.7% 时,由于塑性变形程度较大,位错高密度区作为钉扎点产生的位错阻力小于位错运动驱动力,钉扎作用逐渐消失,导致硬度(HV)下降至 219.44,而热处理引起的再结晶软化现象仍然存在,因此伸长率变化幅度较小。

2.3 累积形变量对强度的影响

图 4 为 C17300 合金棒材强度随累积形变量的变化曲线。可以看出,累积形变量为 20% 时,抗拉强度和屈服强度分别为 622.76 MPa、504.7 MPa;累积形变量升高至 27.3% 时,合金塑性变形变得困难,加工硬化作用显著增强^[16],位错密度不断升高,抗拉强度增加。此外,C17300 合金具有低层错能,在拉拔时易产生形变孪晶,见图 2,形变孪晶界对塑性变形产生阻碍作用,也会使抗拉强度升高。合金在两者共同作用下,抗拉强度、屈服强度分别升高至 681.75 MPa、523.07 MPa;累积形变量为 57.3% 时,拉拔过程中进行了退火处理,温度升高导致位错密度减小,合金内部发生再结晶现象,因拉拔产生的畸变晶重新形核长大,晶粒尺寸减小,晶界面积极增大,韧性增加,再结晶作用引起的软化并不足以完全抵消由拉拔加工引起的硬化作用,导致合金棒材的抗拉强度和屈服强度升高,分别达到 682.8 MPa、539.36 MPa;累积形变量增加至 72.7% 时,合金棒材在退火处理后,温度升高,合金内部再结晶软化作用显著,而加工硬化作用逐渐趋于饱和,此时再结晶软化大于加工硬化作用,所以抗拉强度和屈服强度显著下降,分别为 643.04 MPa、512.05 MPa。

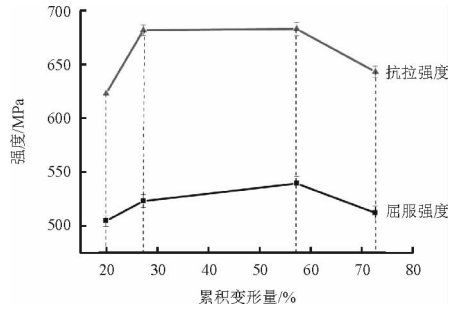


图 4 C17300 合金棒材强度随累积形变量的变化曲线
Fig.4 Strength variation of C17300 alloy bar with cumulative deformation

2.4 累积形变量对拉伸断口形貌影响研究

图 5 为时效态 C17300 合金棒材在不同累积形变量下的拉伸断口形貌。由图 5a 和图 5b 可以看出, C17300 合金棒材断口表面出现韧窝和空洞,韧窝密集呈等轴状分布,在韧窝和空洞内部存在小颗粒析出物,空洞深度较大,且随着深度增加直径变小,整体呈现“喇叭状”形貌,说明此时时效态 C17300 合金棒材拉伸断裂模式为韧性断裂。这是因为合金棒材经时效处理后,过饱和固溶体发生沉淀析出,析出相颗粒在拉应力作用下使基体周围产生应力集中,随着拉伸不断进行,析出相颗粒与基体分离形成空洞,进而产生裂纹,最后在剪切唇区发生断裂^[17]。由图 5c 可知,27.3% 累积形变量试样断口形貌表面呈山峰状,平整度较差,可观察到较为明显的晶粒形态,整体呈现“冰糖块状”分布,晶粒不同晶面上分布着等轴状韧窝,韧窝直径较小,数量较多,无较深空洞出现,晶粒之间晶界明显,且裂纹沿晶界延

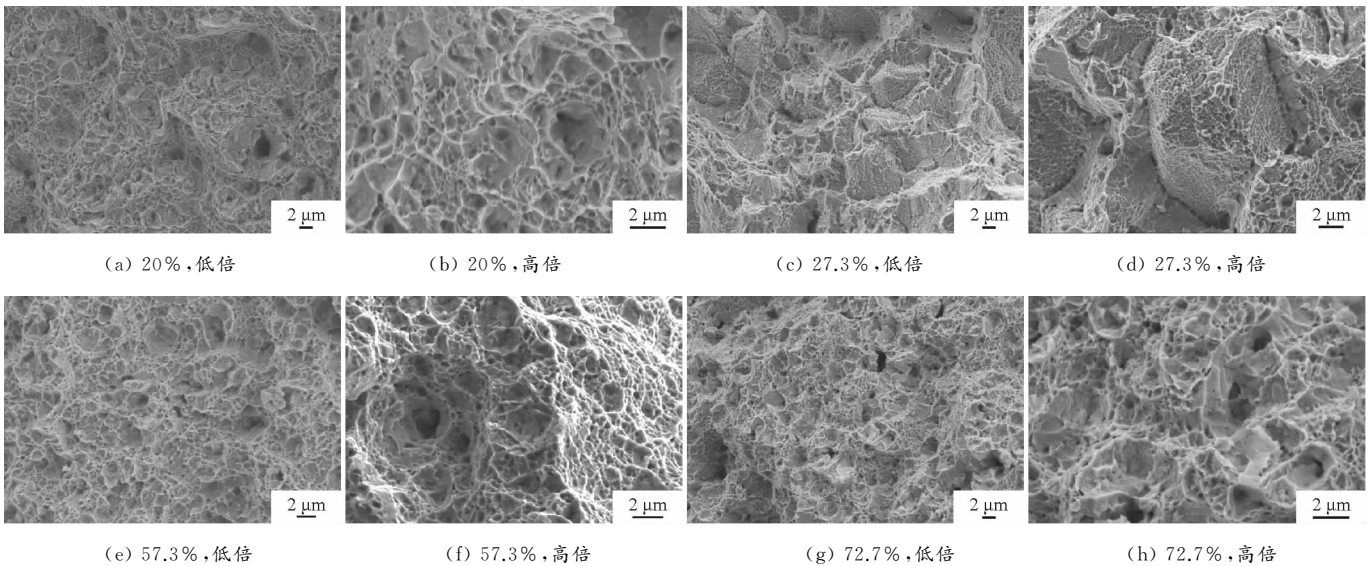


图 5 时效态 C17300 合金棒材在不同累积形变量下的拉伸断口形貌

Fig.5 Tensile fracture morphologies of aged C17300 alloy bar under different cumulative deformation

伸,在晶界附近分布着少量第二相颗粒,见图 5d,此时拉伸断裂模式为沿晶、韧性混合断裂,合金伸长率降低;

累积形变量为 57.3% 时,断口形貌较图 5c 平直,韧窝和空洞数量增加,直径减小,在韧窝周围还存在大量弯曲

状撕裂棱,见图 5e 和图 5f。拉拔变形促进了 γ 相的析出,更多的 γ 相与基体分离,导致在拉伸过程中韧窝和空洞数量增多,此时合金断裂形式为韧性断裂,伸长率有所升高;累积形变量增加至 72.7% 时,合金断口表面平整度较图 5e 有所降低,空洞和韧窝数量增加,韧窝直径进一步减小,且由等轴状逐步转变为抛物线状,见图 5g 和图 5h,此时合金棒材断裂形式仍为韧性断裂,伸长率进一步升高。由图 5 可知,随着累积形变量增加,合金断口形貌与伸长率变化趋势相一致。

3 结 论

(1)累积形变量在 20.0%~72.7% 范围内,C17300 合金棒材抗拉强度和硬度先升高后急剧下降,伸长率先降低后升高,晶粒内部滑移带和形变孪晶数量减少,晶粒细化。在累积形变量为 57.3% 时综合性能最佳,抗拉强度为 682.8 MPa、屈服强度为 539.36 MPa、硬度(HV)为 251.11、伸长率为 10.78%。

(2)累积形变量为 20.0% 时,断口形貌出现韧窝和空洞;累积形变量为 27.3% 时,韧窝数量增加,直径减小,合金棒材由韧性断裂向沿晶、韧性混合断裂机制转变;累积形变量为 57.3%,断口形貌表面出现撕裂棱,韧窝直径进一步减小;累积形变量为 72.7% 时,韧窝直径最小,且由等轴状转变为抛物线状。

(3)拉拔加工可显著促进 C17300 合金 γ 相的析出。当累积形变量为 20.0% 时, γ 相析出量较多,呈瘤胞状分布;累积形变量为 27.3% 时, γ 相析出量减少,转变为点坑状分布;累积形变量在 57.3%~72.7% 范围内, γ 相析出量再次增加。

参 考 文 献

- [1] ESAKLUL K A, AHMED T M. Prevention of failures of high strength fasteners in use in offshore and subsea applications[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(4): 1 195-1 202.
- [2] BEHJATI P, VAHID DASTJERDI H, MAHDAVI R, et al. Influence of ageing process on sound velocity in C17200 copper-beryllium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 505(2): 739-742.
- [3] SANKAR V, ARRAVIND R, MANIKANDAN D, et al. Material synthesis, characterization, and machining performance of stir cast beryllium copper alloy composites[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2018, 43(2): 143-152.
- [4] 周延军,王启峰,余京鹏,等.冷变形对铸轧辊用 Cu-Be-Co 合金组织性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2022,42(5): 551-554.
- [5] JIANG Y, ZHANG T, YU L, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of Cu-0.36Be-0.46 Co alloy fabricated by heating-cooling combined mold horizontal continuous casting during cold rolling[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of Chi-

na, 2020, 30(4): 958-971.

- [6] PANG J C, DUAN Q Q, WU S D, et al. Fatigue strengths of Cu-Be alloy with high tensile strengths[J]. Scripta Materialia, 2010, 63(11): 1 085-1 088.
- [7] XIE G L, WANG Q S, MI X J, et al. The precipitation behavior and strengthening of a Cu-2.0Be alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2012, A558(6): 326-330.
- [8] 范俊玲,曹军,郑磊.热处理对大变形冷加工 Cu-0.4Co-0.2Ni-0.2Sn 铜合金性能的影响[J].金属热处理,2019,44(11): 153-156.
- [9] HYLINSKI S, NATE G, JEN K P, 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.
- [10] ALISHA S, VENKATESWARAN T, AMRUTH M, et al. Effect of heat treatment on the mechanical properties of copper-beryllium alloy (C17200)[J]. Materials Science Forum Trans. Tech. Publications, 2015, 830(13): 168-171.
- [11] MIKI M, OGINO Y. Effect of quenching temperature on the intragranular and cellular precipitations in Cu-1.5Be binary alloy[J]. Womens Studies Quarterly, 2007, 36(9): 1 118-1 123.
- [12] MONTECINOS S, TOGNANA S, SALGUEIRO W. Influence of microstructure on the Young's modulus in a Cu-2Be(%) alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 729(6): 43-48.
- [13] 方森鹏,陈乐平,周全,等.低铍 Cu-1.7Ni-0.2Co-xBe 合金的凝固组织及性能[J].特种铸造及有色合金,2022,42(5): 610-613.
- [14] 周延军,陈伟,李立鸿,等.时效工艺对铸轧辊铍铜合金力学性能和显微组织影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(12): 1 514-1 517.
- [15] 陈乐平,周全.时效处理对 Cu-Ni-Be 合金组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(7): 867-871.
- [16] 曹军,姚亚昔. Ag-0.8Au-0.3Pd-0.03Ru 键合金线冷变形及热处理[J].金属热处理,2019,44(11): 153-157.
- [17] 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): 1 420-1 423.

(编辑:刘晨辉)

万丰奥威积极推动国内镁合金产业化

日前(9月28日),浙江万丰奥威汽轮股份有限公司(简称:万丰奥威)在互动平台表示,目前公司镁合金业务重点推进亚太中心建设,导入北美成熟管理体系,在镁合金大型一体化铸造技术方面开展了一系列研究,与国内汽车生产企业联合研制镁合金一体化后掀背门、同高校和新能源汽车等单位联合研究镁合金一体化汽车后底盘的设计和生

产技术等,积极推动国内镁合金产业化发展。万丰奥威还表示,理想汽车是公司铝镁合金轻量化业务合作伙伴,公司抓住传统车向新能源汽车转型的机遇,已与众多新能源车企开展战略合作。

(摘自压铸周刊)