文章编号：1001-4888(2018)06-0877-08

预冷变形对 Cu-Ni-Si 铜合金疲劳性能和破坏行为影响研究*

王华强，吴明泽，张继旺，鲁连涛
（西南交通大学 牵引动力国家重点实验室，四川 610031）

摘要： 为了研究预冷变形处理对 Cu-Ni-Si 铜合金的疲劳性能和破坏行为的影响，对含有预冷变形处理和不含预冷变形处理的 Cu-Ni-Si 铜合金进行拉伸实验、疲劳实验、裂纹扩展实验等相关实验，并通过扫描电镜对试样疲劳断口进行观察。结果表明，预冷变形处理大幅提高了材料机械强度、降低了材料韧性，同时使疲劳强度降低，其中，10^7 寿命对应疲劳强度下降 4.7%。试样的疲劳破坏均萌生自表面的晶体滑移，预冷变形处理的试样在裂纹扩展阶段表现为穿晶破坏，而不含预冷变形处理的试样在裂纹扩展阶段表现为沿晶和穿晶的混合破坏模式。预冷变形处理试样在裂纹稳定扩展阶段，表现为剪切型破坏，而不含预冷变形处理的试样在裂纹萌生后，裂纹转向在最大拉应力面内扩展直到最终的破坏。由上述结果可知，预冷变形改变了 Cu-Ni-Si 铜合金的疲劳破坏行为，从而影响了其疲劳性能。

关键词： Cu-Ni-Si 铜合金；预冷变形；疲劳性能；破坏特性
中图分类号： TG166.2 **文献标识码：** A DOI：10.7520/1001-4888-17-163

0 引言

Cu-Ni-Si 材料是一类应用广泛、性能优异的低合金铜。主要应用于中等强度、高导电性和中低等循环应力应变场合，例如电器开关、断路器、继电器和铁路接触网定位线夹等[1]。

由于该材料广泛的应用前景，国内外学者对其展开了相关研究。文献[2]研究了时效处理温度和时间对 $CuNi_2Si$ 材料机械性能和组织的影响；文献[3]研究了固溶处理温度和热加工对 Cu-Ni-Si 铜合金机械性能的影响；文献[4]研究了不同轧制条件、时效处理温度和时间组合情况下 Cu-Ni-Si 铜合金的机械性能；文献[5]研究了 $CuNi_6Si_{1.5}$ 合金的微观结构对裂纹产生和扩展的作用；文献[6] 研究了不同温度和应力比情况下 Cu-Ni-Si 铜合金的动态脆化对疲劳性能的影响；文献[7]研究了时效强化的 $CuNi_2Si$ 的疲劳性能，重点讨论了不同热处理工艺对材料疲劳性能的影响；文献[8] 研究了 $CuNi_{2.55}Si_{0.55}$ 合金的疲劳行为。虽然学者们对 Cu-Ni-Si 材料进行了疲劳性能、时效工艺对疲劳性能的影响等方面的研究，但是对国产 Cu-Ni-Si 材料疲劳性能的研究鲜见报道。

此外，Cu-Ni-Si 材料的常用热处理工艺为固溶处理与时效处理，而在 Cu-Ni-Si 材料相关构件的制造过程中，由于制造工艺的需要，部分构件，如接触网用定位线夹会在时效处理前的制造工艺中引入预冷变形，而这些预冷变形将会对材料的疲劳性能产生影响，有关该方面的研究尚未见报道。

本研究的主要工作是通过对含有预冷变形处理和不含预冷变形处理的 Cu-Ni-Si 材料进行相关力

* **收稿日期：** 2017-08-10；**修回日期：** 2017-09-10
基金项目： 国家自然科学基金(U1534209)资助
通讯作者： 张继旺(1983－)，男，博士，副研究员。主要研究领域：材料和结构的疲劳与断裂。Email：zhangjiwang@swjtu.cn

学实验和疲劳实验来研究预冷变形加工对 Cu-Ni-Si 材料疲劳性能的影响。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料成分,热处理工艺

实验采用 $CuNi_2Si$ 材料,其具体化学成分如表 1 所示。本文实验采用两种热处理工艺,一种是含有预冷变形处理的热处理工艺,具体热处理工艺为:850℃固溶处理+预冷变形处理+时效处理 400℃保温 2h,室温空冷,该材料加工的试样称为预冷变形试样,简称 PCW(Pre-cold worked)试样;另一种是不含预冷变形的热处理工艺,具体热处理工艺为:850℃固溶处理+时效处理 400℃保温 2h,室温空冷,该材料加工的试样称为非预冷变形试样,简称 Un-PCW 试样。

表 1 $CuNi_2Si$ 化学成分(质量百分比)

Tab. 1 $CuNi_2Si$ chemical composition(percentage of mass)

Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Si	Sn	P	Al	Zn
余量	0.1395	<0.001	1.75	0.001	0.482	0.033	0.012	0.002	0.0261

1.2 微观组织观察和硬度测试

金相组织观察方法是将样品镶嵌后,经 240#～2000#砂纸打磨,并在抛光机上抛光,使用 $FeCl_3$+HCl+酒精配置的腐蚀液腐蚀 3s,用酒精清洗、热风烘干后,在奥林巴斯 BX51 金相显微镜上观察并拍摄金相组织照片。将样品经过 240#～2000#砂纸研磨后再抛光,采用 HVS-1000Z 型自动转塔数显显微硬度计进行硬度测试,加载载荷为 0.48N,加载时间为 10s,结果取 5 个数据点的平均值。

1.3 常规力学性能实验

对材料力学性能测试是根据 GB/T 228.1－2010 的要求进行单拉实验,实验在 EHF-UV200k2-070 电液伺服疲劳试验机上进行。实验结果取 3 根试样结果的平均值。

1.4 疲劳实验

疲劳试样图纸如图 1 所示。为减少机械加工对疲劳实验结果的影响,实验前用抛光布对试样最小断面处进行抛光处理。并用光学显微镜观察试样最小断面,确保不留下环状划痕。疲劳实验采用日本 RB4-3150-V1 旋转弯曲疲劳试验机,在室温空气中进行,加载频率为 52.5Hz。

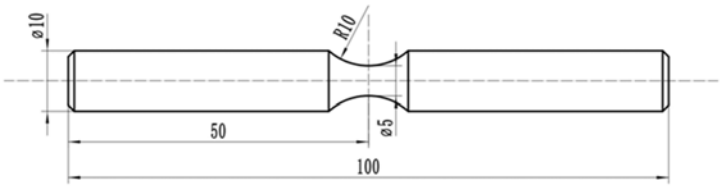


图 1 疲劳试样形状及尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Fatigue specimen shape and dimensions (unit:mm)

采用复型法在最小断面处进行裂纹扩展实验。实验前用抛光布对试样最小断面处进行电解抛光处理。预估试样寿命,每隔一定周次停下试验机并使用甲酸乙酯湿润复型膜,使复型膜环绕试样最小断面贴合复型,然后在光学显微镜下观察复型膜上的裂纹走向和测量裂纹尺寸。实验结束后用扫描电子显微镜对疲劳破坏断口进行观察,以分析其疲劳破坏特性。

2 实验结果与讨论

2.1 组织观察和硬度测试

PCW 材料与 Un-PCW 材料的组织如图 2 所示。由图可知,两种热处理后材料的组织均为单相 α 固溶体。PCW 材料晶粒平均尺寸 30.6μm,晶粒度为 7 级;Un-PCW 材料晶粒平均尺寸 24.1μm,晶粒度为 7.5 级。PCW 材料与 Un-PCW 材料 Vickers 硬度平均值分别为 201.6HV 和 170.2HV。

2.2 机械性能结果

单拉实验获得的材料机械性能如表 2 所示。与 Un-PCW 处理的 $CuNi_2Si$ 材料相比较,可以看出在 PCW 处理后,$CuNi_2Si$ 的屈服强度、抗拉强度和硬度上升了 307.8MPa、147.2MPa 和 31.4HV,分别上

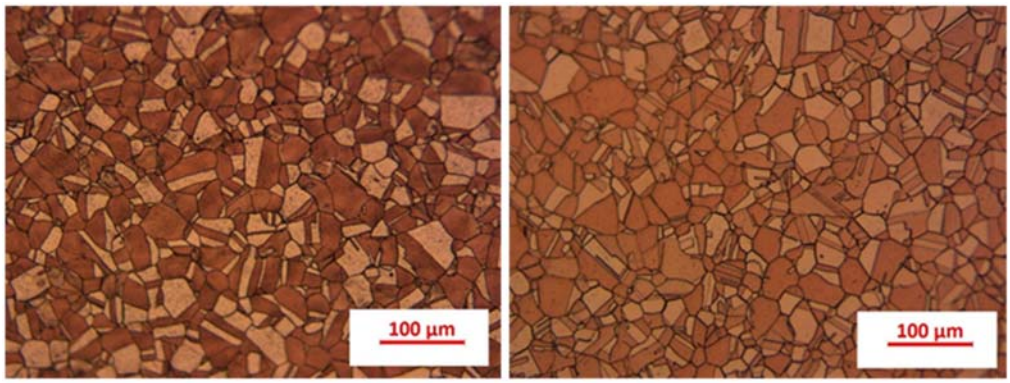


图 2　材料金相组织图

Fig. 2　Metallographic structure of materials

升 112.0%、29.5%和 18.4%；但是延伸率和断面收缩率分别下降 125.0%和 27.3%；弹性模量基本相同。这是因为 Cu-Ni-Si 系列合金是一种时效强化型合金，主要依靠 Ni_2Si 的析出实现强化[2]。预冷变形使材料的位错密度增加，促进了析出物形核和加快溶质原子的扩散速度，从而加快了 Ni_2Si 的析出过程，因此，预冷变形可以促进 Cu-Ni-Si 系列合金强化相的形成，对 $CuNi_2Si$ 具有较好的强化作用。从以上结果可知，预冷变形处理大幅提高了 $CuNi_2Si$ 的屈服强度，对材料强度有明显的提高，但同时也明显降低了材料的延伸率，降低了材料的韧性。

表 2　$CuNi_2Si$ 机械性能

Tab. 2　$CuNi_2Si$ mechanical properties

材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	断面收缩率/%	弹性模量/GPa	维氏硬度
PCW	582.6	645.9	14.0	54.50	127.5	201.6
Un-PCW	274.8	498.7	31.5	69.4	127.0	170.2

2.3　疲劳实验结果

实验获得的 S—N 曲线如图 3 所示，它们均表现为连续下降。从 S—N 曲线来看，预冷变形处理后的材料的疲劳强度出现下降，在高应力下对应的循环寿命下降更为明显。其中，PCW 处理和 Un-PCW 处理的材料 10^7 寿命对应疲劳强度分别为 193MPa 和 202MPa，对应的疲劳强度与抗拉强度的比率也从 40.5%下降为 29.8%。

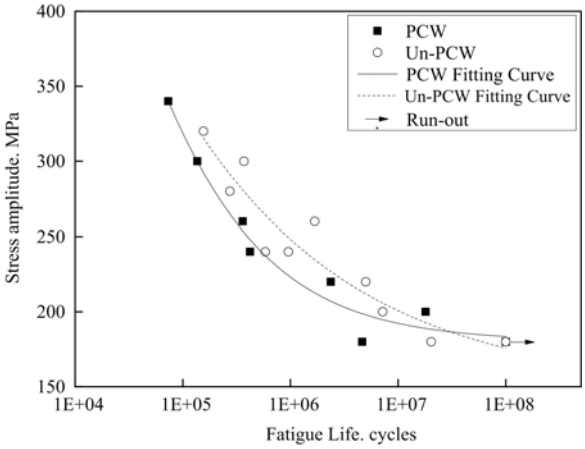


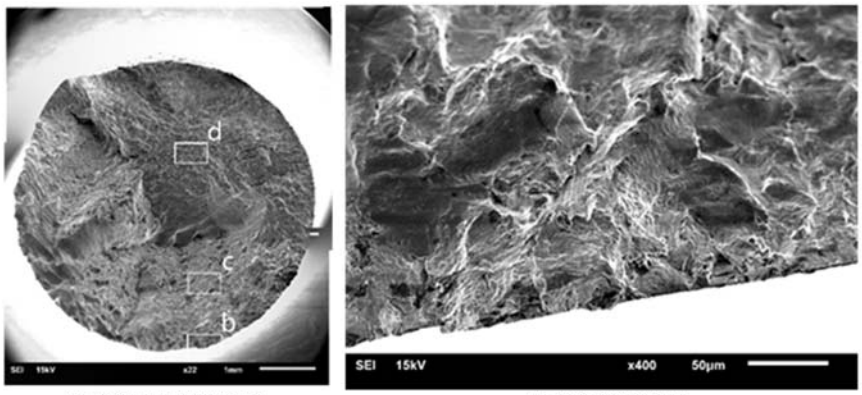
图 3　S—N 曲线

Fig. 3　S—N curve

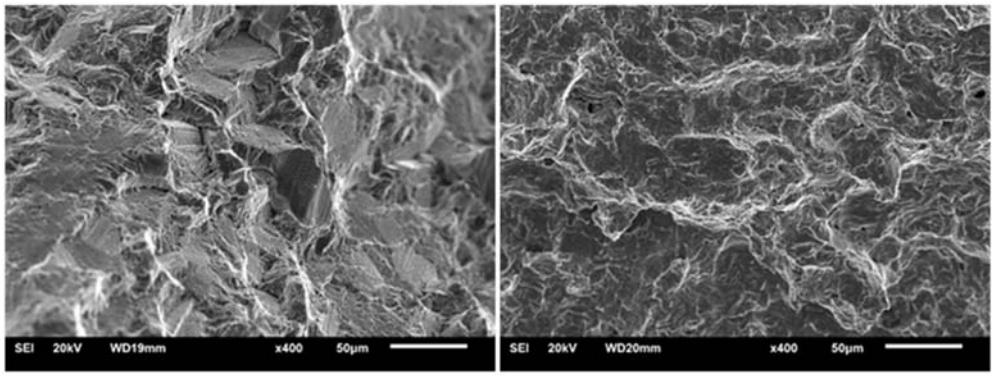
从常规力学性能实验结果可知，预冷变形使材料的抗拉强度提高了 147MPa。但是，10^7 寿命对应疲劳强度却下降 4.7%。从而可知，预冷变形在一定条件下对材料的疲劳性能有负面影响，会降低材料的疲劳强度。

2.4　疲劳断口观察

图 4 为高应力加载下的 PCW 疲劳断口观察图，图 4(b)、(c)、(d)分别是图 4(a)中(b)、(c)、(d)标记矩形框处的放大图。疲劳断口可分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三个阶段，即萌生、扩展和瞬断。对于图 4(a)，第Ⅰ阶段裂纹萌生对应于图的正下方，第Ⅱ阶段对应于图 4(a)中部，第Ⅲ阶段对应于图 4(a)上部。图 4(b)为裂纹萌生的放大图，可以观察到裂纹萌生自表面的晶体滑移。图 4(c)中存在着大量的裂纹穿晶扩展产生的小平面，这对应着疲劳的第Ⅱ阶段。图 4(d)则表现为瞬断



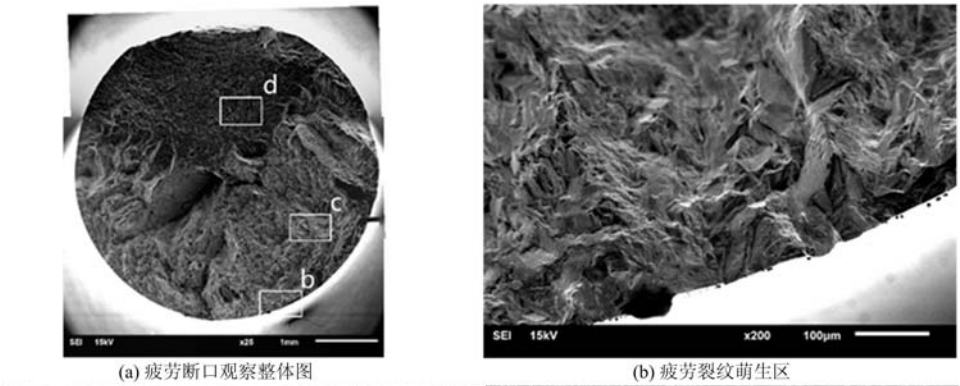
(a) 疲劳断口观察整体图 (b) 疲劳裂纹萌生区



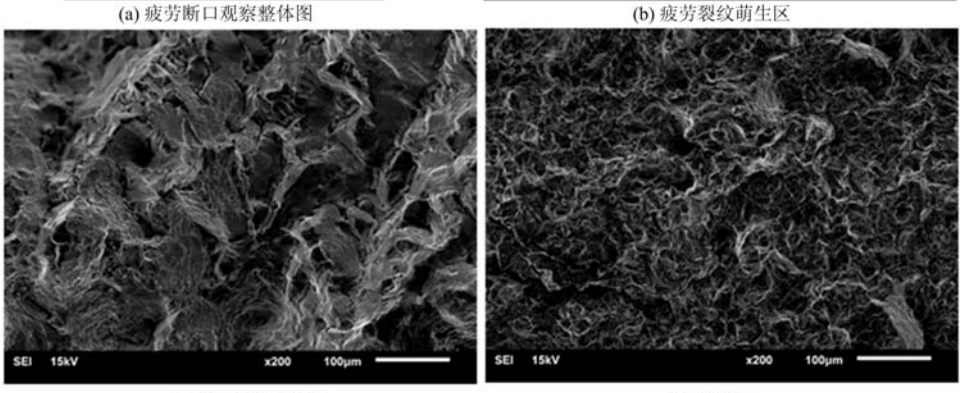
(c) 疲劳裂纹扩展区 (d) 瞬断区

图 4 300MPa 加载下 PCW 疲劳断口观察

Fig. 4 Fracture surface observation of PCW specimen failed at 300MPa



(a) 疲劳断口观察整体图 (b) 疲劳裂纹萌生区

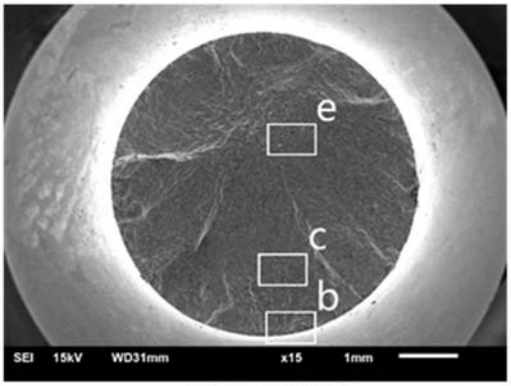


(c) 疲劳裂纹扩展区 (d) 瞬断区

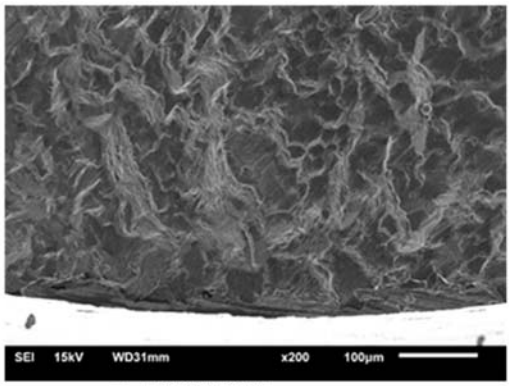
图 5 180MPa 加载下 PCW 疲劳断口观察

Fig. 5 Fracture surface observation of PCW specimen failed at 180MPa

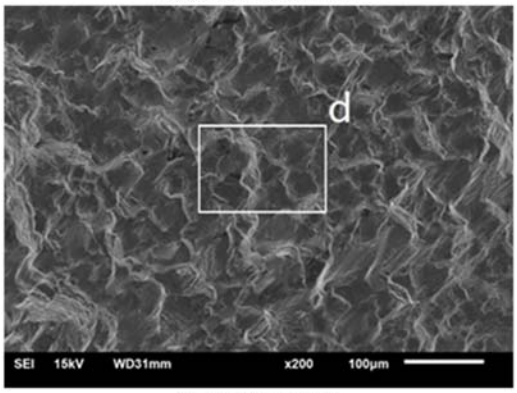
区的特征，观察到韧窝形貌。图 5 为低应力加载下的疲劳断口观察图，图 5(b)、(c)、(d)分别是图 5(a)中(b)、(c)、(d)标记矩形框处的放大图。通过图 5 可知其具有和图 4 断口相同的三个阶段的破坏形貌，与高应力试样具有多个裂纹起始位置不同，在低应力下试样只有一个裂纹起始位置。



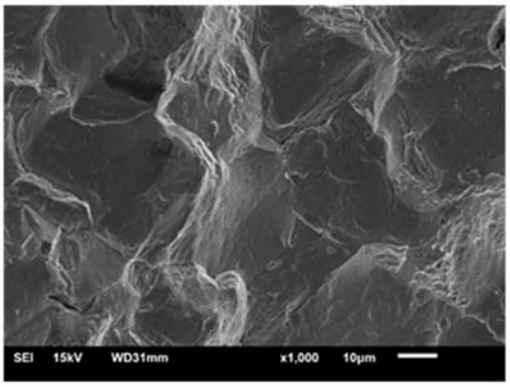
(a) 疲劳断口观察整体图



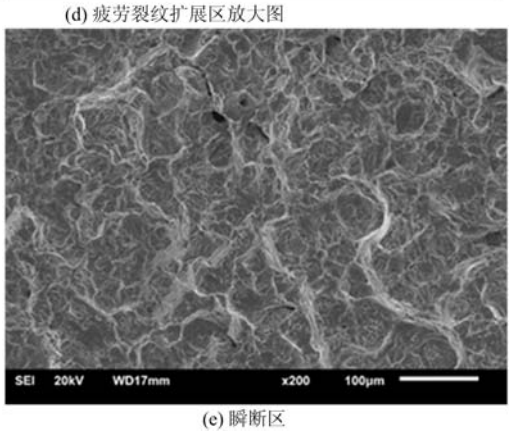
(b) 疲劳裂纹萌生区



(c) 疲劳裂纹扩展区



(d) 疲劳裂纹扩展区放大图



(e) 瞬断区

图 6　300MPa 加载下 Un-PCW 疲劳断口观察

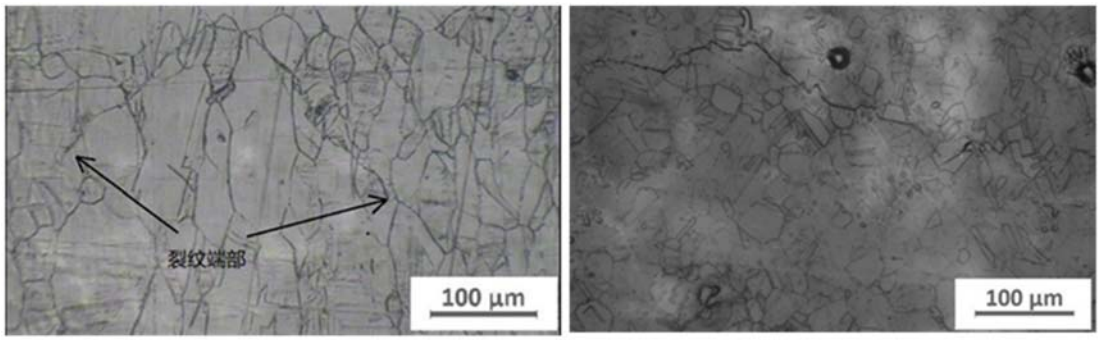
Fig. 6　Fracture surface observation of Un-PCW specimen failed at 300MPa

图 6 为 Un-PCW 试样的疲劳断口观察图，图 6(b)、(c)、(e)分别是图 6(a)中(b)、(c)、(e)矩形框的放大图，图 6(d)是图 6(c)中 d 标记方框处的放大图。其疲劳断口同样可以分为萌生、扩展和瞬断三个阶段。图 6(b)为裂纹萌生位置的放大图，疲劳裂纹起源于晶体滑移，且在高应力加载下试样的表面有多个裂纹起始位置。图 6(c)和(d)对裂纹扩展位置的观察发现沿晶平面和穿晶平面混合存在，此外还有包围这些平面的晶界破坏形成的条纹。而图 6(e)对瞬断区域的观察同样发现由大量的韧窝组成。低应力下的疲劳试样断口观察具有类似的特征，和高应力下疲劳试样相比，裂纹源位置减少。

2.5　疲劳裂纹扩展和破坏特性分析

图 7(a)和(b)分别是 PCW 和 Un-PCW 试样的表面裂纹复形观察。从图 7(a)可以看出，PCW 试样表面裂纹主要是穿晶裂纹，裂纹沿与水平方向呈现约 45°方向扩展；而 Un-PCW 试样表面裂纹以沿晶扩展为主，裂纹沿水平方向曲折扩展。这些与前面的疲劳断口观察相一致，出现这种变化的原因是预冷变形处理导致 PCW 材料晶粒出现沿预冷变形方向的择优取向，从而使裂纹沿择优取向晶粒的易滑移方向扩展，这种裂纹扩展导致裂纹主要为穿晶裂纹；而 Un-PCW 处理的材料由于没有织构的存在，裂纹按照常见的水平方向扩展，裂纹也以沿晶为主。

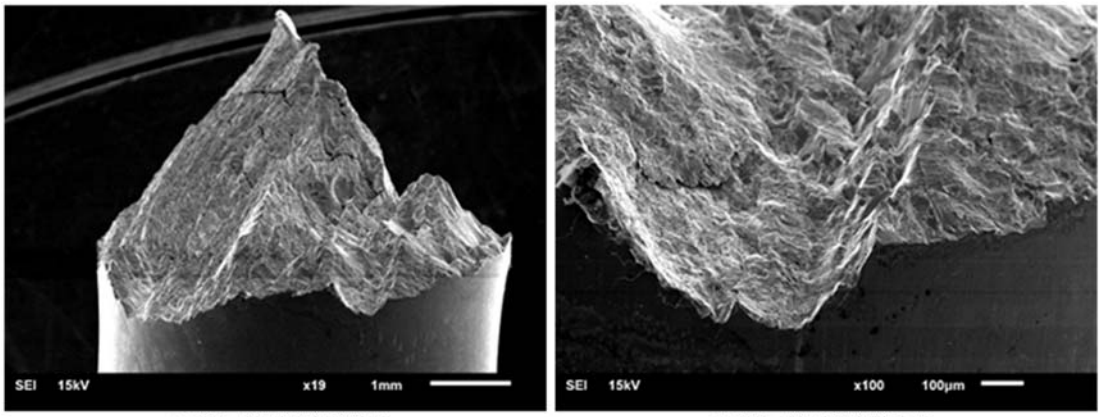
图 8、图 9 为疲劳断口的侧视图，图 8(a)为 PCW 试样疲劳断口整体侧视图，图 8(b)为 PCW 试样疲



(a) 240MPa加载下PCW试样表面裂纹 (b) 240MPa加载下Un-PCW试样表面裂纹

图 7 试样表面裂纹

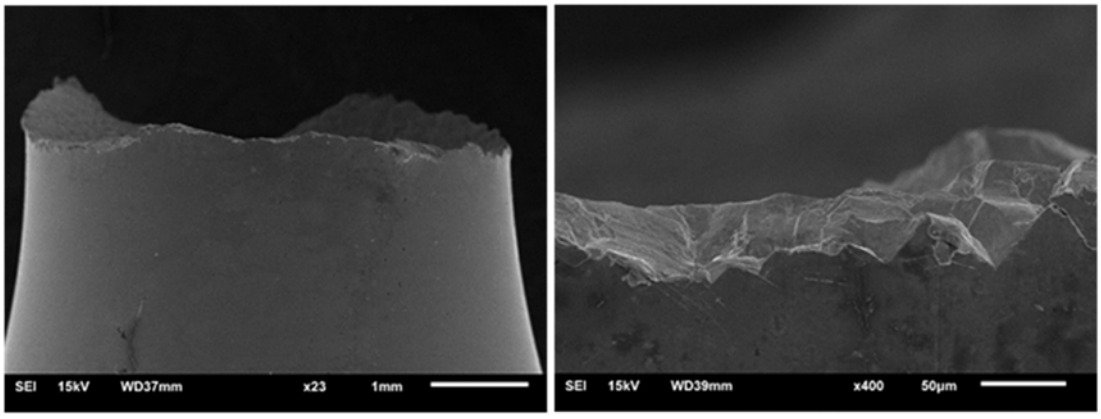
Fig. 7 Crack observation on specimen surface



(a) 断口侧面观察整体图 (b) 断口侧面观察放大图

图 8 300MPa 加载下 PCW 试样断口侧面观察

Fig. 8 PCW specimen fracture surface observation from lateral side at 300MPa



(a) 断口侧面观察整体图 (b) 断口侧面观察放大图

图 9 220MPa 加载下 Un-PCW 试样断口侧面观察

Fig. 9 Un-PCW specimen fracture surface observation from lateral side at 220MPa

劳断口局部侧视图,图 9(a)为 Un-PCW 试样疲劳断口整体侧视图,图 9(b)为 Un-PCW 试样疲劳断口局部侧视图。从图 8 疲劳断口侧面来看, PCW 试样断口边沿由较长的约 45°倾斜段和平直段共同组成,断面高低起伏极为明显。由此可知,预冷变形后的 PCW 试样在裂纹萌生之后,在稳定扩展阶段,均表现为沿 45°最大剪应力面的剪切型破坏,直到最后裂纹扩展到临界尺寸后在拉伸应力下瞬断。而 Un-PCW 试样断口表面有小的波浪起伏,整体相对平直,断面也相对平整,从而可知其裂纹萌生后,裂纹转向在最大拉应力面内扩展直到最终的破坏。

结合裂纹扩展方向和断口观察可知，预冷变形处理使 $CuNi_2Si$ 晶粒出现了织构。而织构越多，则晶粒间取向差角越小，疲劳裂纹偏折越小，裂纹扩展路径越短，疲劳裂纹扩展速率越快；织构越少，晶粒间取向差角越大，疲劳裂纹偏折越厉害，裂纹扩展路径越长，疲劳裂纹扩展速率降低[9]。因此，尽管 PCW 材料比 Un-PCW 材料屈服强度更高，但由于 PCW 材料含有大量织构，裂纹扩展速率更快，最终导致 PCW 试样疲劳强度出现下降。故此可知，由于预冷变形改变了 $CuNi_2Si$ 材料的疲劳破坏特性，进而影响了其疲劳性能，使其在预冷变形后拉伸和屈服强度提高的同时，疲劳强度出现下降。

3　结论

对含有预冷变形处理和不含预冷变形处理的 Cu-Ni-Si 材料开展了机械性能和疲劳性能的相关研究，得到如下结论：

（1）预冷变形处理使 $CuNi_2Si$ 的屈服强度、抗拉强度和硬度明显上升，但是延伸率和断面收缩率出现下降，它也使材料的疲劳强度有所降低，其中 10^7 寿命对应疲劳强度下降 4.7%。

（2）试样的疲劳破坏均萌生自表面的晶体滑移，预冷变形处理试样在裂纹扩展阶段表现为穿晶破坏，不含预冷变形处理的试样在裂纹扩展阶段表现为沿晶和穿晶混合破坏模式，疲劳试样的瞬断区域均由大量的韧窝组成。

（3）含有预冷变形处理试样在裂纹稳定扩展阶段，均表现为剪切型破坏，直到最后裂纹扩展到临界尺寸后在拉伸应力下瞬断。而不含预冷变形处理的试样在裂纹萌生后，裂纹转向在最大拉应力面内扩展直到最终的破坏。

参考文献：

[1] 殷荣幸，王旭，李东升. 铁路电气化用铜合金定位线夹失效分析[J]. 热加工工艺，2015(3)：245－249（YIN Rongxing，WANG Xu，LI Dongsheng. Failure analysis on copper alloy positioning clamp for railway electrification [J]. Hot Working Technology，2015(3)：245－249 (in Chinese)）

[2] 张文芹. 热处理对 $CuNi_2Si$ 合金组织和性能的影响[J]. 上海有色金属，2015，36(2)：47－51（ZHANG Wenqin. Effects of heat treatment microstructure and properties of $CuNi_2Si$ alloy[J]. Shanghai Nonferrous Metals，2015，36(2)：47－51 (in Chinese)）

[3] Chalon J，Guérin J D，Dubar L. Characterization of the hot-working behavior of a Cu-Ni-Si alloy[J]. Materials Science and Engineering A，2016，667：77－86.

[4] Qian Lei，Zhou Li，Yang Gao. Microstructure and mechanical properties of a high strength Cu-Ni-Si alloy treated by combined aging processes[J]. Journal of Alloys and Compounds，2017，695：2413－2423.

[5] Goto M，Han S Z，Lim S H，et al. Role of microstructure on initiation and propagation of fatigue cracks in precipitate strengthened Cu-Ni-Si alloy[J]. International Journal of Fatigue，2016，87：15－21.

[6] Sun Z，Laitem C，Vincent Z. Dynamic embrittlement during fatigue of a Cu-Ni-Si alloy[J]. Materials Science and Engineering A，2011，528：6334－6337.

[7] Lockyer S Z，Noble F W. Fatigue of precipitate strengthened Cu-Ni-Si alloy[J]. Materials Science and Technology，1999，15：1147－1153.

[8] Atapek S H，Pantelakis S G，Polat S. Fractographical analysis of fatigue failed Cu-2.55Ni-0.55Si alloy[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics，2016，83：60－66.

[9] 雷欣，聂祚仁，黄晖，等. 织构对含铒铝合金疲劳裂纹扩展行为的影响[J]. 机械工程材料，2015，39(6)：11－15（LEI Xin，NIE Zuoren，HUANG Hui，et al. Influence of texture on fatigue crack propagation of Er-containing aluminum alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering，2015，39(6)：11－15 (in Chinese)）

On the effect of precooling deformation on fatigue performance and failure behavior of Cu-Ni-Si alloy

WANG Hua-qiang, WU Ming-ze, ZHANG Ji-wang, LU Liantao
(State-Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to investigative the effect of precooling deformation treatment on fatigue performance and failure behavior of Cu-Ni-Si alloy, a series of related experiments, such as tensile, fatigue and crack propagation experiment were carried out were carried out for Cu-Ni-Si alloy after precooling deformation treatment and without precooling deformation treatment, respectively. The fatigue fracture of specimen was observed by scanning electron microscope (SEM). Results show that the mechanical strength of material greatly increases and the toughness and fatigue strength decrease due to precooling deformation treatment. Thereinto, the fatigue strength decreases by 4.7% corresponding to the fatigue life of 10^7. The fatigue failure of all specimens initiate from the crystal slip on the surface. In the crack propagation stage stage, the pre-cold worked specimens show transgranular fracture, while the no pre-cold worked specimens show mixed fracture mode consisted of both transgranular and intergranular. The pre-cold worked specimens in the crack propagation stage show as shear failure mode, but the cracks in pre-cold worked specimens propagate under the maximum tensile stress until the final failure. It can be found that the pre-cold worked treatment changes the fatigue fracture behavours of the material, so it changes the fatigue property.

Keywords: Cu-Ni-Si alloy; pre-cold working; fatigue properties; fracture behaviours