

退火温度对轧制铜铝锌合金力学性能的影响

蔡宝壮¹, 周庄迪², 孙乐乐², 朱心昆²

1. 天津市产品质量监督检测技术研究院检测技术研究中心 天津 300232

2. 昆明理工大学材料科学与工程学院 云南昆明 650032

摘要: 以铜铝锌合金为研究对象, 通过轧制和短时间退火工艺相结合的处理方法, 调控铜铝锌合金的微观组织, 解决了轧制变形后铜铝锌合金强度较高、延展性较差的问题, 达到协同提升综合力学性能的目的。通过金相检验、拉伸测试、包申格效应测试及数字图像相关性分析(DIC)试验, 综合分析了轧制铜铝锌合金退火后的微观组织与力学性能。研究结果表明: 对铜铝锌合金进行不同温度轧制处理, 发现室温轧制后进行 $325^{\circ}\text{C} \times 20\text{min}$ 退火处理获得的样品, 表现出优异的强度-延展性的匹配关系, 抗拉强度达到581MPa、伸长率达到20.5%。

关键词: 铜铝锌合金; 轧制; 退火; 力学性能

Effect of annealing temperature on mechanical properties of Cu-Al-Zn alloy by rolling

CAI Baozhuang¹, ZHOU Zhuangdi², SUN Lele², ZHU Xinkun²

1. Tianjin Product Quality Inspection Technology Research Institute Testing Technology Research Centre, Tianjin 300232, China

2. Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650032, Yunnan, China

Abstract: Taking Cu-Al-Zn alloy as the research object, the microstructure of copper alloy was adjusted by combining rolling and short-time annealing process, which solved the problem of high strength but poor ductility of copper alloy after rolling deformation, and achieved the purpose of synergistically improving the comprehensive mechanical properties. The microstructure and mechanical properties of rolled Cu-Al-Zn alloy after annealing were comprehensively analyzed by metallographic examination, mechanical tests, Bauschinger effect tests, Digital Image Correlation analysis(DIC). The results show that the Cu-Al-Zn alloy is rolled at different temperatures, and it is found that the samples obtained by annealing at 325°C for 20 minutes after rolling at room temperature show an optimal matching relationship between strength and ductility, with a tensile strength of 581MPa and a uniform elongation of 20.5%.

Keywords: Cu-Al-Zn alloy; rolling; annealing; mechanical properties

1 序言

由于铜合金具有良好的导电性、导热性和易加

工性, 因此广泛应用于电子信息、加工制造、仪器零部件等领域。然而, 铜铝锌合金材料由于传统加

基金项目: 地区科学基金项目(51664033)。

第一作者: 蔡宝壮, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为金属材料性能的检测, E-mail: bz_cai@126.com。

工变形方式通常存在强度-延展性之间的倒置关系,即若延展性较好,则强度较低,若强度高,则延展性较低,这一特性限制了其在工业生产中的进一步应用和发展,因此迫切需提高其综合力学性能。近年来,研究者发现,可以通过大塑性变形和热处理工艺来改善材料的强度和延展性之间的倒置关系^[1-4]。目前,轧制是一种简单有效且经济成本较低的大塑性变形工艺,其在工业生产中使用比较广泛^[5]。经过轧制处理后,晶粒会细化到超细晶粒或纳米晶级别,变形材料通常表现出超高的强度,但其延展性很差,后续再进行退火处理,可以改善其塑性性能。热处理工艺的制定密切影响着材料的力学性能,如果退火温度过高或保温时间过长,则会导致晶粒充分长大,强度也会大幅度降低。因此,合理地选择退火温度和保温时间,可使铜合金产生双峰晶粒组织结构,从而改善塑性变形能力,使材料获得更优异的综合力学性能。

本文采用室温轧制和液氮轧制变形工艺对铜铝锌合金进行了塑性变形处理,然后将轧制样品分别进行了300℃、325℃和350℃不同温度下保温20min退火处理。主要研究了不同退火温度对轧制变形铜铝锌合金组织和性能的影响,总结出铜铝锌合金最优的强度-延展性匹配关系,并结合拉伸试验、包申格效应测试(LUR)和数字图像相关性(Digital Image Correlation, DIC)技术等试验,探讨这种优异的强度-延展性匹配关系的形成原因。

2 试验材料与方法

本试验采用的是层错能为 7mJ/m^2 的铜铝锌合金($w_{\text{Al}}=5.5\%$ 、 $w_{\text{Zn}}=4.5\%$)。首先将熔炼的圆柱形铸锭在 700°C 下保温8h进行均匀化退火,表面处理后进行热锻和热轧处理,然后将样品置于 700°C 真空条件下保温2h退火处理。最后再将样品进行表面处理,得到厚度为8mm的板材。对于室温轧制工艺,首先将8mm板材采用二辊轧机轧制至2mm厚度。经过多道次轧制后,样品的厚度变为0.6mm,其变形量约为96%。低温轧制工艺与室温轧制过程基本一致,区别在于每次轧制前后均需将样品放入液氮(约为77K)中浸泡15min,然后在轧制过程中不停地将液氮洒在样品上,充分保证材料在低温中变形。对轧制后的样品分别进行真空退火处理,退火

温度分别为 300°C 、 325°C 和 350°C ,保温时间均为20min,到达保温时间后立即将样品取出空冷。

力学拉伸试验和包申格效应测试均是在室温下的SHIMADZU AG-X万能试验机上完成的,采用的应变速率为 $5\times 10^{-4}/\text{s}$,最大载荷为100kN。“哑铃形”拉伸试样的标距为15mm,宽度为5mm,样品尺寸如图1所示。

不同试验条件下的样品至少进行3次拉伸测试,以保证试验结果的复现性和可靠性。

本课题LUR研究中设置的加载-卸载-再加载循环应变点分别为1%、3%、5%、7%、9%、11%、13%、15%、17%和19%共10个。使用金相显微镜对样品进行金相观察分析,所用设备型号为Leica DM 5000。采用大恒图像公司生产的型号为MER-2000-19U3C的电感耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)相机(2000万像素),相机每隔12s进行一次拍摄,拍摄的图片运用GOM软件进行DIC数据分析。

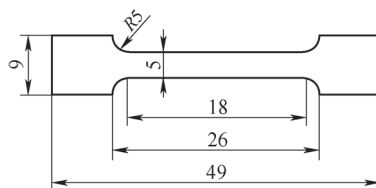


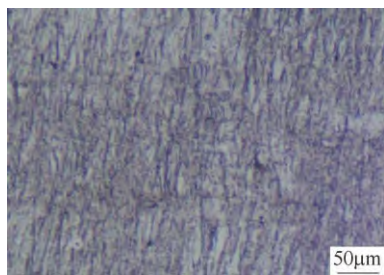
图1 拉伸试样尺寸示意

3 试验结果与讨论

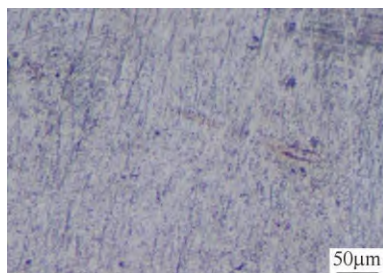
3.1 金相组织分析

经过轧制变形并在 325°C 下保温20min退火处理后铜铝锌合金的微观组织如图2所示。从图2a、b可看出,组织沿轧制方向呈现出细长带状组织,其中液氮轧制晶粒组织要比室温轧制更细小。这是由于样品在轧制过程中粗晶经历大塑性变形后形成不规则形状的纳米晶粒,低温轧制更容易细化晶粒,形成更多的位错和孪晶缺陷^[6]。图2c、d所示分别为室温轧制和液氮轧制 325°C 下保温20min退火的金相组织,主要由细晶和粗晶双峰结构组成。退火产生的一些再结晶晶粒和基体中留存的一些超细晶变形组织,其中室温轧制退火样品的晶粒更加细小,粗晶较少。轧制样品在 325°C 退火过程中发生再结晶,但在保温20min短时退火,再结晶不完全,有的晶粒来不及长大,还是细晶状态,有的晶粒长大成粗晶,组织中分布着粗晶和细晶尺寸不等的大小晶

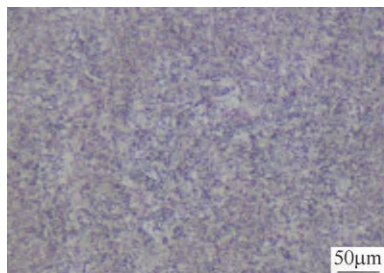
粒，构成双峰晶粒尺寸的异质结构。



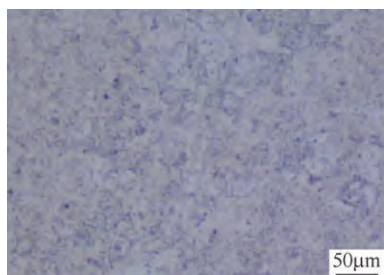
a) 室温轧制样



b) 液氮轧制样



c) 室温轧制325℃×20min退火样



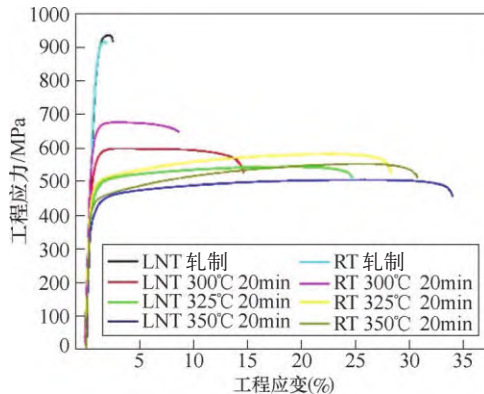
d) 液氮轧制325℃×20min退火样品

图2 SFE7铜铝锌合金相组织

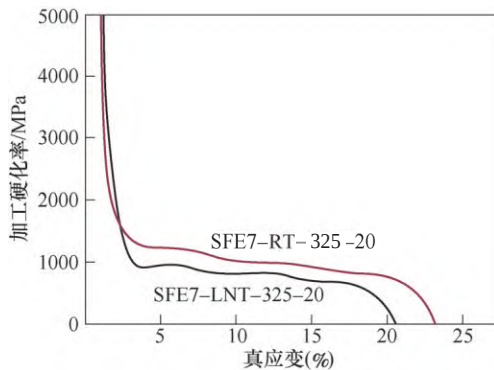
3.2 力学性能分析

在室温条件下，通过准静态拉伸试验测试了铜铝锌室温轧制（RT）和液氮轧制（LNT）不同退火温度样品的力学性能，其工程应力-工程应变曲线和加工硬化率曲线如图3所示。比较原始轧制样品力学性能可看出，LNT未退火试样的屈服强度和抗拉强度与RT系列相比分别高16MPa和20MPa。比较两种轧制退火样品的力学性能，发现RT退火系列的抗拉强度均明显高于LNT系列，而伸长率大致呈相反趋势。铜铝锌合金液氮轧制比室温轧制有更大的形

变储能，前者样品处于热力学的不稳定状态，再结晶所需的温度相对较低。在稍低温度退火时，LNT退火样品发生再结晶程度要明显高于RT退火样品，轧制变形组织保留的更少。随着退火温度的升高，RT退火样品逐渐开始再结晶，LNT退火试样的再结晶晶粒开始长大，强度逐渐降低，塑性增加显著。当退火温度从300℃增加到325℃时，发现样品的伸长率急剧增加，分别从2.7%增加到20.5%、从3.1%增加到17.6%。随着退火温度升高，材料内部再结晶驱动力变大，部分晶粒发生明显长大，较短的退火保温时间使得再结晶不完全，仍存在一些变形组织，最后基体组织以大小晶粒的双峰异质结构形式存在。之前的研究发现，LNT样品经过低温塑性变形产生了更多的位错和孪晶组织，晶粒尺寸更细小，而RT样品位错密度更低，组织晶粒尺寸相对更大^[6]。在退火过程中，LNT样品中的位错会从高密度缠结状态解开并逐渐湮灭，导致位错密度下降，而在拉伸变形过程中，RT样品更容易开动变形组织周围的位错滑移系，且会在粗晶与细晶的界面处塞积大量



a) 工程应力-应变曲线



b) 加工硬化率曲线

图3 室温和液氮轧制退火试样的工程应力-应变曲线和加工硬化率曲线

的几何必须位错,晶界从小角度晶界开始转变为大角度晶界,小角度晶界减少,从而促进了再结晶晶粒的生成,会产生更高的加工硬化能力,因此RT退火样品表现出更高的抗拉强度^[7, 8]。结合图3b可看出,RT退火样品比LNT退火样品具有较高的应变硬化率,下降趋势更慢,使得前者具有更高的伸长率,表现出更优异的塑性指标。

3.3 包申格试验分析

为了探究轧制变形后经 $325^{\circ}\text{C} \times 20\text{min}$ 短时退火处理对铜铝锌合金综合力学性能提升的影响,对轧制退火的铜铝锌合金样品进行了加载-卸载-再加载测试(LUR),每次循环点的应变设置分别为1%、3%、5%、7%、9%、11%、13%、15%、17%和19%,共计10个应变点。图4a、b所示分别为LUR循环曲线和异构形变诱导效应(HDI)应力随应变变化曲线。

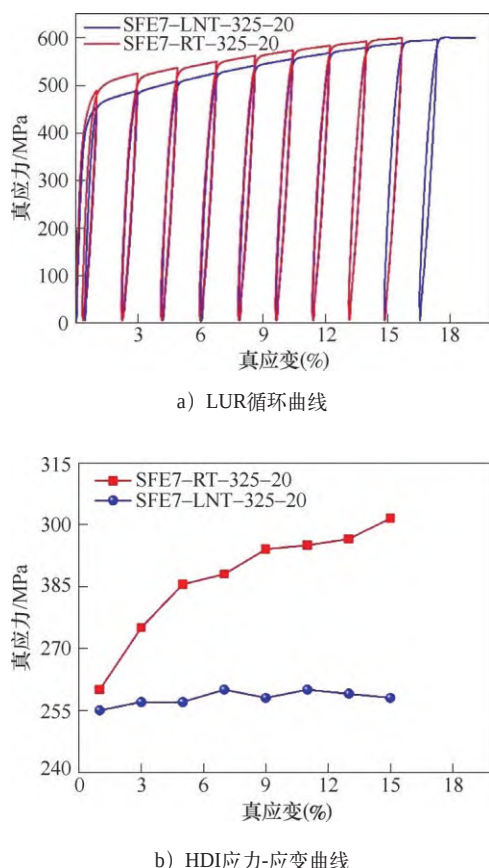


图4 铜铝锌合金室温/液氮轧制 $325^{\circ}\text{C} \times 20\text{min}$ 退火样品的LUR循环曲线和HDI应力-应变曲线

从图4a可看出,铜铝锌合金RT退火样品的LUR循环回路比LNT退火样品的更大,初步表明前者样品的包申格效应更强。通过分析不同应变下的循环

LUR测试,可以获得样品应变过程中异构形变诱导效应(HDI)应力随应变的变化规律。HDI应力是因粗晶和细晶之间取向不同导致塑性应变不协调而引起的。由4b可知,两种样品的HDI应力随应变的增加而增加,RT退火样品的HDI应力增加趋势更为明显,在应变前期增长速率快,到应变后期增长速率逐渐减弱。这是因为样品内部存在不同尺寸的晶粒,为了保持应变的连续性,会在粗晶与细晶的界面处产生大量的几何必须位错积累,这些位错在变形过程中提升了材料的应变硬化能力,有益于改善拉伸塑性。在应变初期大晶粒首先发生塑性变形,而小晶粒仍然处于弹性变形阶段,“塑性-弹性”阶段导致的机械不相容性形成了较大的应变梯度^[9]。当经历“塑性-弹性”后,随着材料变形增加,小晶粒也进入塑性变形阶段,“塑性-塑性”阶段粗晶要比细晶承受更大的塑性应变,在粗晶和细晶的交界处也会产生应变梯度,使铜铝锌合金材料发生背应力加工硬化,因此界面处的几何必须位错硬化对提高材料塑性有很大的促进作用。室温轧制退火样品比液氮轧制退火样品组织异质化程度更高,包申格效应最强,HDI强化效应更明显,在力学性能上表现出优异的强度-塑性匹配关系。

3.4 数字图像相关性分析

对室温轧制和液氮轧制的 325°C 退火样品进行数字图像相关性(DIC)技术测试分析,探究不同样品在拉伸变形过程中表面应变带的发展情况。本次DIC试验选择了1%、4%、7%、10%、13%和16%共6个应变点对应变过程的应变演化进行分析。对Y轴方向获得的峰进行高斯拟合,分析峰强(I)和半高宽(W)两个参数。将6个应变量下对应的峰强和半高宽绘制成散点图,并对散点图进行一次线性拟合,以方便进行比较分析,如图5所示。

对于铜铝锌合金轧制退火样品,DIC表现出两种不同的应变分布。如图6所示,SFE7-RT-325-20样品从1%~13%应变没有观察到明显的应变集中现象,16%应变时观察到表面的中心位置存在轻微的应力集中现象。而对于SFE7-LNT-325-20样品从4%应变开始之后的应变均观察到明显的应变集中现象,从沿Y轴方向应变的分布来看,1%应变时没有出现应变集中现象,应变带分布较为均匀,继续增大拉伸应变达到4%应变时,在样品表面下方出现应

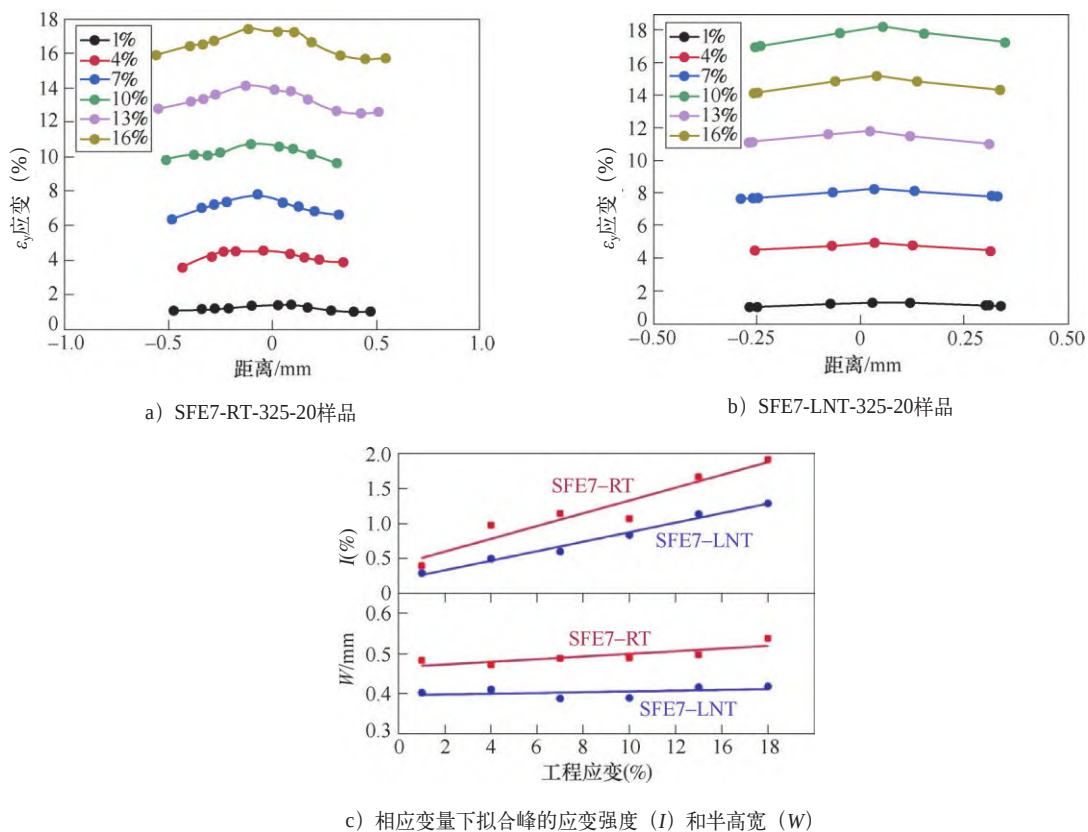


图5 ε_y 应变峰随不同拉伸应变的发展情况

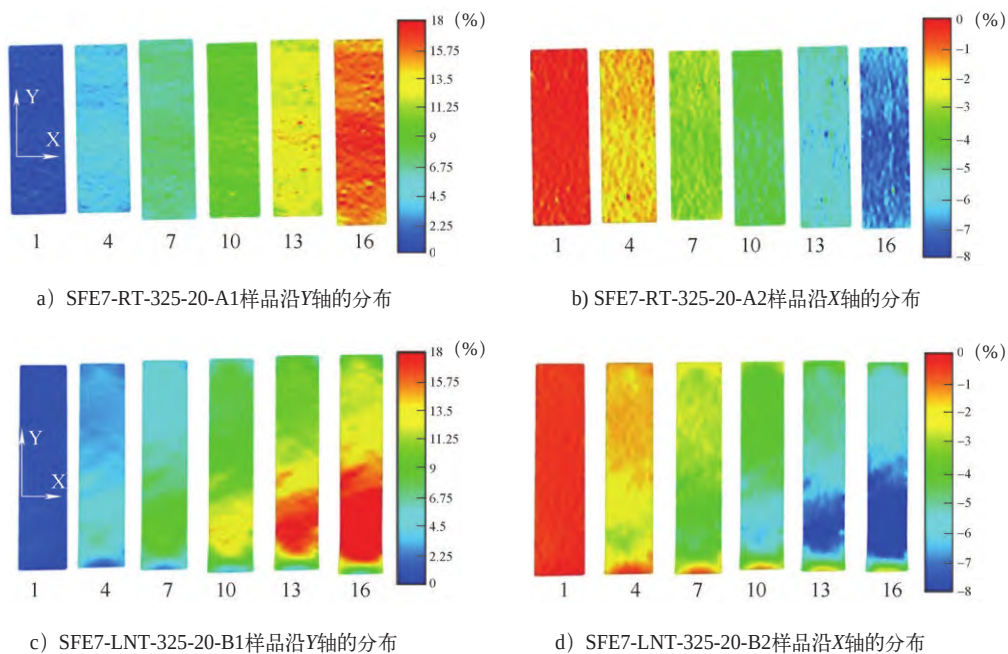


图6 DIC分析样品在XOY平面上的应变分布

变带，随着拉伸的进行，这个部分的应变集中现象越来越明显，当达到16%应变时观察到严重应变集中区域，X轴方向观察到同样的应变发展过程。对Y

轴方向应变带上的峰值轮廓进行高斯拟合后，发现应变带的半高宽没有明显变化，SFE7-RT-325-20样品 W 值在0.5mm位置平衡，SFE7-LNT-325-20样品

W 值在0.4mm位置平衡, RT系列的 I 值在应变过程中始终大于LNT系列样品的 I 值, I 值的发展规律和力学性能强度指标变化趋势相一致。

4 结束语

本文研究了不同温度轧制和不同温度退火处理工艺对铜铝锌合金板材组织和力学性能的影响, 得出以下结论。

1) 室温轧制和液氮轧制变形的材料经过(300~350)℃×20min退火处理后强度均有所下降, 伸长率均有所增加, 其中当退火温度达到325℃时, 伸长率均增加明显, 分别增加到20.5%和17.6%。在325℃热处理条件下两种轧制变形工艺均可得到最佳的强度-延展性的匹配关系, 其中室温轧制工艺的强塑性关系要优于低温轧制系列, 表现出抗拉强度为581MPa、伸长率为20.5%。

2) 室温轧制的325℃退火样品相比液氮轧制系列样品表现出更优异的综合力学性能, 主要是因为室温轧制样品经过325℃×20min退火短时保温发生了再结晶, 组织呈现粗晶细晶双峰异质结构, 导致大量几何必须位错堆积, 存在更高的HDI应力, 具有更高的应变硬化率, 综合因素导致材料展现出优异的强度-延展性的匹配关系, 具有更高的应用价值。

参考资料:

- [1] 蒙品品. 轧制变形和退火处理协同提升纯铜力学性能及其强化机理研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- [2] AN X, LIN Q, WU S, et al. Significance of stacking fault energy on microstructural evolution

in Cu and Cu-Al alloys processed by high-pressure torsion[J]. Philosophical Magazine, 2011, 91 (25): 3307-3326.

- [3] TIAN Y Z, ZHAO L J, PARK N, et al. Revealing the deformation mechanisms of Cu-Al alloys with high strength and good ductility[J]. Acta Materialia, 2016, 110: 61.
- [4] ZHAO Y, ZHU Y, LIAO X, et al. Tailoring stacking fault energy for high ductility and high strength in ultrafine grained Cu and its alloy [J]. Applied physics letters, 2006, 89 (12): 121906.
- [5] SARMA V S, WANG J, JIAN W, et al. Role of stacking fault energy in strengthening due to cryo-deformation of FCC metals[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527 (29): 7624-7630.
- [6] CAI B, TAO J, WANG W, et al. The effect of stacking fault energy on equilibrium grain size and tensile properties of ultrafine-grained Cu-Al-Zn alloys processed by rolling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 610: 224-230.
- [7] ZHU Y T, WU X L. Heterostructured materials[J]. Progress in Materials Science, 2023.
- [8] 武晓雷, 朱运田. 异构金属材料及其塑性变形与应变硬化[J]. 金属学报, 2022, 58 (11): 1349-1359.
- [9] WU X, YANG M, YUAN F, et al. Heterogeneous lamella structure unites ultrafine-grain strength with coarse-grain ductility[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112 (47): 14501.

MW 20240826

(上接第113页)

炉型结构所致, 其存在炉膛内四角周围气氛循环不畅的问题, 所以对换气率也进行了调整, 由原来的2倍炉膛体积提高到4倍炉膛体积, 有效解决了因循环不均而造成的局部气氛沉积致CO含量升高的问题。

4 结束语

1) 通过优化渗碳过程碳势值及碳势分布, 有效降低了空气通入量, 进而降低晶界氧化的产生。

2) 严格控制CO浓度, 并增加换气率, 可以很好地控制炉内氧的分压, 从而达到降低内氧化的目的。

参考文献:

- [1] 美国金属学会手册编委会. 美国金属学会热处理手册(A卷): 钢的热处理基础和工艺流程[M]. 汪庆华, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [2] 美国金属学会手册编委会. 美国金属学会热处理手册(D卷): 钢铁材料的热处理[M]. 叶卫平, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [3] 陈衍行. 有氧环境下渗碳缺陷组织及其对使用性能的影响[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.

MW 20240715