

箱式可控气氛渗碳炉渗碳内氧化分析改进

胡勇¹, 赵泽宇¹, 刘耀², 胡锋³, 赵雅宁¹

1. 南高齿(包头)传动设备有限公司 内蒙古包头 014000
2. 内蒙古第一机械集团股份公司第三分公司 内蒙古包头 014000
3. 内蒙古科技大学材料科学与工程学院 内蒙古包头 014000

摘要: 对渗碳内氧化产生机理进行了阐述, 同时利用箱式可控气氛渗碳炉对18CrNiMo7-6合金渗碳钢内氧化问题进行分析研究, 并对其渗碳工艺进行优化。通过试验对渗碳过程中的工艺参数、工艺能力进行了分析。结果表明: 在工件材料和渗层深度一定的条件下, 将强渗碳势分成1.15%和1.1%两段进行, 并在两段之间增加碳势缓降段, 同时将扩散碳势提高到0.82%, 同样在1.1%和0.82%之间增加碳势缓降段, 避免降碳势过程中空气的过量通入, 可有效减少内氧化的产生。

关键词: 内氧化; 碳势; 渗碳

Improvement of IGO analysis for carburizing of controlled atmosphere box carburizing furnace

HU Yong¹, ZHAO Zeyu¹, LIU Yao², HU Feng³, ZHAO Yaning¹

1. NGC (Baotou) Drive Equipment Co., Ltd., Baotou 014000, Inner Mongolia, China
2. Inner Mongolia First Machinery Group Co., Ltd., The Third Branch, Baotou 014000, Inner Mongolia, China
3. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014000, Inner Mongolia, China

Abstract: The generation mechanism of carburizing IGO is described. At the same time, the IGO problem of 18CrNiMo7-6 alloy carburizing steel is analyzed and studied by using the box controlled atmosphere carburizing furnace, and the carburizing process is studied and optimized. The technological parameters and capability of carburizing process were analyzed by experiments. The results show that under the condition of the workpiece material and the depth of the cementing layer, the strong carburizing potential is divided into 1.15% and 1.1%, and the carbon potential slow drop section is added between the two sections, while the diffusion carbon potential is increased to 0.82%, and the carbon potential slow drop section is also added to avoid the air inlet during the carbon potential drop process, this can effectively reduce the generation of IGO.

Keywords: IGO; carbon potential; carburization

1 序言

从我国颁布可再生能源法以来, 风电行业得到了快速发展, 风电发电量在我国总发电量中所占的比重也将越来越大。因此对核心部件, 尤其是齿轮

箱的质量提出了更高的要求。

现针对风电齿轮箱的齿轮渗碳后内氧化超标问题进行分析研究。该齿轮选用的材料为18CrNiMo7-6低合金钢, 尤其对晶界内氧化

基金项目: 内蒙古自然科学基金(2024LHMS05005)。

(IGO) 控制比较严格, 需符合ISO 6336-5: 2016《正齿轮和斜齿轮承载能力的计算 第5部分: 材料的强度和重量》中ME等级要求, 见表1。

表1 晶界内氧化 (IGO) ME级要求

渗层深度 e/mm	<0.75	$0.75 \leq e < 1.50$	$1.50 \leq e < 2.25$	$2.25 \leq e < 3$	$3 \leq e < 5$	≥ 5
IGO/ μm	12	20	20	25	30	35

2 内氧化产生机理

在渗碳钢表层及向心部方向延伸形成的氧化物称为晶界内氧化(IGO), 是渗碳钢在传统渗碳过程中普遍存在的现象。在传统渗碳气氛中通常会含有 CO 、 O_2 、 H_2 、 N_2 和 CO_2 气体, 以及一些微量的游离 H_2O 。在渗碳过程中, 若 CO 含量太高^[1]或空气通入量太大时, 均会造成渗碳钢表层亲氧元素(Cr、Si、Mn等)发生沿奥氏体晶界或在奥氏体内部发生氧化反应, 形成氧化物, 使表层合金贫化, 最终造成这一区域淬透性降低, 淬火后形成微观黑色非马氏体组织, 且严重时极易造成后续磨削烧伤。

渗碳后IGO通常分两种形态: 一种是沿晶界分布形成的氧化物颗粒^[2]; 另一种是从表面向心部方向呈触须状延伸。当内氧化深度 $<13\mu\text{m}$ 时, 对疲劳强度没有影响; 当内氧化深度大于 $13\mu\text{m}$ 时, 疲劳强度随氧化层的增加而显著降低, 内氧化的存在也影响表面残余应力的分布, 内氧化层越深, 表面张力越大^[3]。因此, 内氧化层深度是渗碳过程中控制的一个关键点, 对提高风电齿轮箱齿轮齿根弯曲疲劳强度至关重要, 为此开发可行的渗碳工艺就显得具有实际意义。

3 内氧化深度的试验

3.1 试验样块材料及规格

试验材料采用与工件相同模数的标准齿形样块, 模数为16, 样块如图1所示, 其材料为18CrNiMo7-6低合金钢, 共进行10次试验, 所有试样为同熔炼炉号、同锻造批次, 每次携带一组样块, 选用同一台设备进行试验, 化学成分见表2。

3.2 试验设备

试验设备为爱协林箱式可控气氛渗碳炉, 采用热辐射管加热, TUS精度 $\pm 8^\circ\text{C}$, 碳势控制方式为氧探头+2604仪表自动PID控制, 碳控精度 $\pm 0.05\%$, 渗碳介质为氮-甲醇-丙酮。

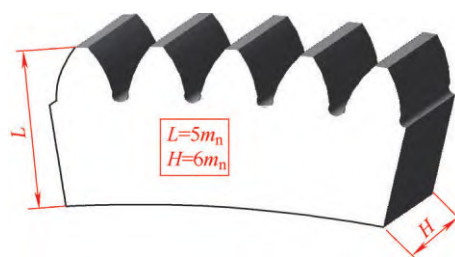


图1 齿形样块示意

表2 化学成分 (质量分数) (%)

样块编号	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S
1	0.189	0.261	0.747	1.56	0.247	1.24	0.0069	0.0011
2	0.192	0.258	0.761	1.69	0.250	1.22	0.0057	0.0019
3	0.188	0.256	0.755	1.55	0.251	1.21	0.0056	0.0013
4	0.191	0.259	0.749	1.54	0.245	1.25	0.0056	0.0013
5	0.192	0.259	0.756	1.57	0.246	1.23	0.0055	0.0014
6	0.185	0.249	0.760	1.57	0.248	1.23	0.0059	0.0012
7	0.190	0.258	0.751	1.59	0.248	1.27	0.0064	0.0016
8	0.189	0.256	0.749	1.60	0.251	1.22	0.0062	0.0017
9	0.186	0.250	0.756	1.64	0.244	1.23	0.0066	0.0014
10	0.194	0.252	0.759	1.61	0.249	1.23	0.0061	0.0014

3.3 试验要求及工艺

每组样块采用相同渗碳淬火工艺, 样块按要求尺寸加工成形, 并需保证齿面、齿根处表面粗糙度 $Ra \leq 1.6\mu\text{m}$, 入炉前清洗去除表面油污、铁屑。优化前后热处理工艺如图2所示。由图2a、b对比可看出, 将碳势分布及时间都进行了优化。试验的整个热处理工序与零件保持一致, 全部工序结束后采用线切割取样, 金相制样后使用奥林巴斯金相显微镜测量内氧化层深度。

3.4 试样结果分析

1) 由于此次试验主要目的是为了通过工艺优化来解决内氧化超标问题, 所以只针对内氧化数据分析, 并抽取部分样块内氧化形貌进行展示。热处理工艺优化前后内氧化检测结果分别见表3、表4。

从表4可看出, 热处理工艺优化后样块有效硬化层深分布在2.54~2.94mm, 齿根内氧化层深为13~

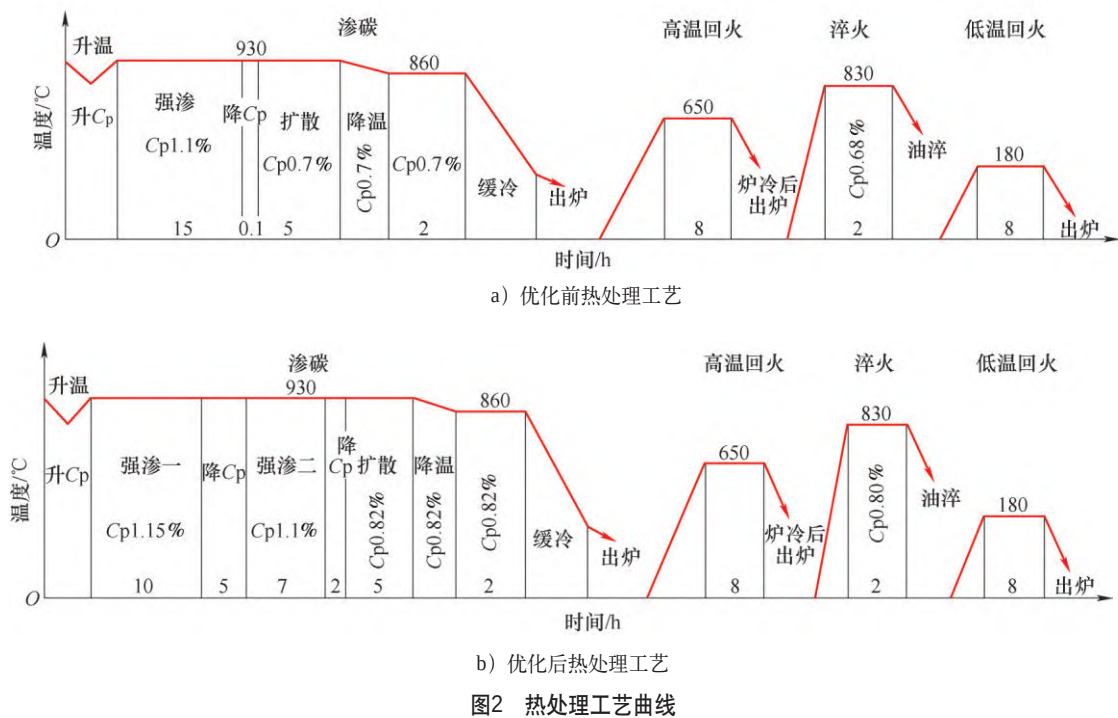


表3 优化前10炉次内氧化检测结果

编号	有效硬化层深/mm	齿根IGO/ μm	齿面IGO/ μm
XSSC001	2.66	30	34
XSSC002	2.71	40	37
XSSC003	2.77	38	33
XSSC004	2.75	33	30
XSSC005	2.59	35	34
XSSC006	2.60	37	35
XSSC007	2.73	34	31
XSSC008	2.74	34	34
XSSC009	2.58	37	34
XSSC010	2.72	39	35

表4 优化后样块内氧化检测结果

样块编号	有效硬化层深/mm	齿根IGO/ μm	齿面IGO/ μm
1	2.72	19	16
2	2.54	14	14
3	2.92	13	14
4	2.94	13	12
5	2.65	14	13
6	2.66	16	14
7	2.61	19	17
8	2.55	18	14
9	2.58	14	13
10	2.75	13	13

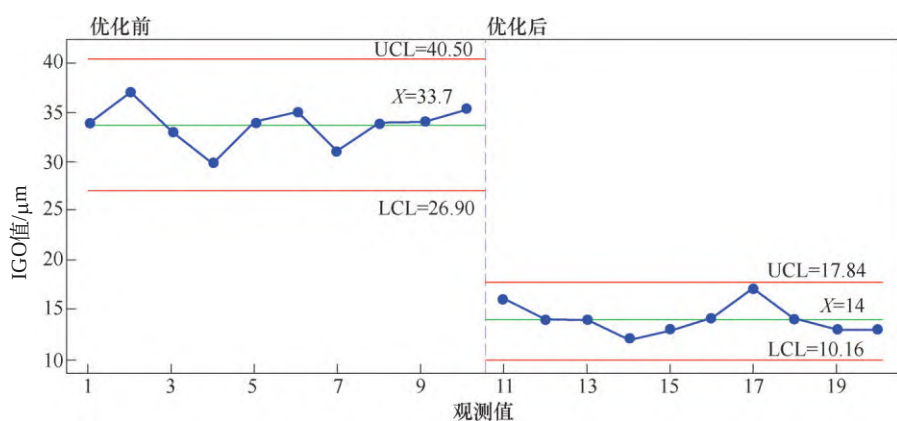
19 μm ，齿面内氧化层深为12~17 μm ，齿根及齿面内氧化层深均符合内氧化ME级 $<25\mu\text{m}$ 的要求（见表1）。

利用Minitab对表3、表4工艺优化前后IGO数据进行分析对比，如图3所示。从图3可看出，优化前齿根内氧化层深均值35.7 μm 、齿面内氧化层深均值33.7 μm ，优化后齿根均值15.3 μm 、齿面IGO均值14 μm ，优化后内氧化层深全部合格；同时对优化后的热处理工艺 C_{pk} 也进行了分析，齿根 C_{pk} 达到2.76，齿面 C_{pk} 达到4.16，工艺优化效果显著，达到较优水平。

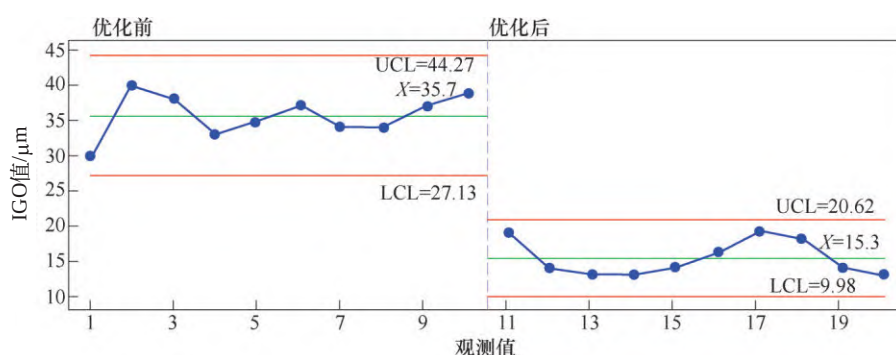
部分样块内氧化形貌如图4所示。从图4可看出，样块均未出现触须状内氧化。

2) 工艺优化后渗碳过程中调整碳势分布，将强渗碳势调整为1.15%+1.1%两段，两段间增加缓降碳势段，同时将扩散段碳势提高到0.82%，强渗转扩散同样采用缓降碳势的方法，使整个渗碳过程中的碳势呈现由高向低缓慢降低的态势，这样可有效避免因降碳势而通入大量空气，空气通入量由原来的1.5 m^3/h 降低到了0.3 m^3/h ，有效降低了工件表层晶界内氧化的产生。

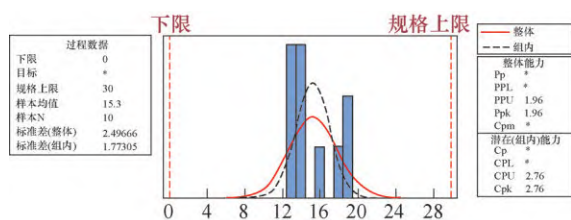
3) 优化工艺后渗碳气氛中CO含量严格控制在17%~19%，避免因CO含量太高造成氧的分压升高而导致内氧化指标上升。同时，由于大型箱式炉的



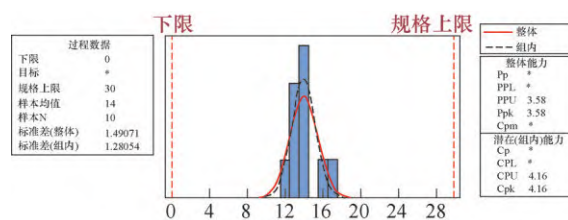
a) 齿面IGO的单值控制图



b) 齿根IGO的单值控制图

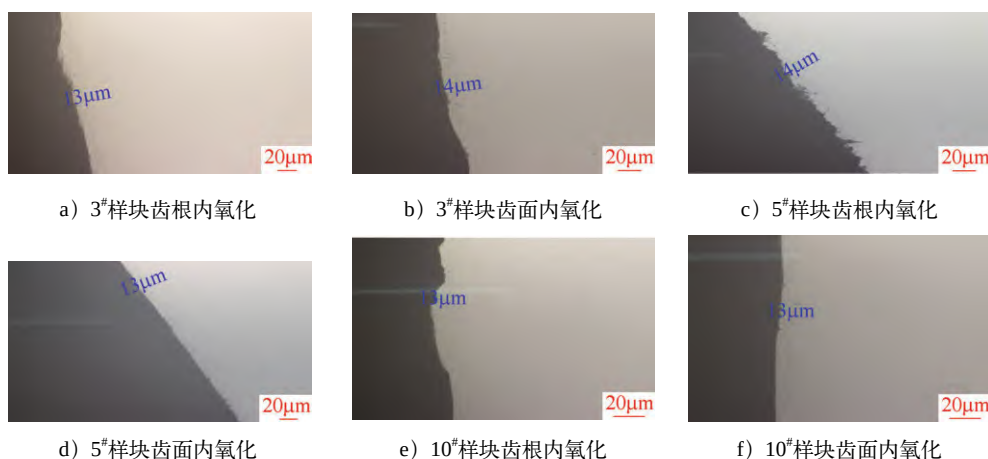


c) 优化后齿面IGO的过程能力



d) 优化后齿根IGO的过程能力

图3 内氧化数据分析对比



a) 3#样块齿根内氧化

b) 3#样块齿面内氧化

c) 5#样块齿根内氧化

d) 5#样块齿面内氧化

e) 10#样块齿根内氧化

f) 10#样块齿面内氧化

图4 部分样块内氧化形貌

(下转第119页)

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