N、Cu元素对0Cr13Ni4Mo钢组织及性能的影响

瞿兆银，杨家典，白家元，吴国兴
贵州航宇科技发展股份有限公司　贵州贵阳　550081

摘要：主要研究了添加一定量N、Cu元素对0Cr13Ni4Mo钢组织及性能的影响。通过采用相同的热处理制度对N、Cu含量不同的材料进行热处理，然后进行室温拉伸、室温冲击、硬度、显微组织的检测与分析。结果表明：在相同热处理制度下，添加N、Cu元素后，δ铁素体和碳化物含量明显减少，材料的抗拉强度提高70MPa以上，硬度提高20HBW以上，但冲击韧度降低了超过50%；单独添加N元素时，δ铁素体和碳化物含量也降低，材料抗拉强度提高50MPa以上，硬度提高15HBW以上，塑性及韧性与同时添加N、Cu元素时相当。结论分析认为：受N、Cu元素，尤其是N元素影响，材料奥氏体的稳定性明显增加，抑制了δ铁素体和碳化物的析出；同时，由于N、Cu元素分别具有固溶强化及时效强化效果，使材料强度、硬度有明显增加；但是，由于N含量提高，使回火过程中氮化物沿晶界沉淀析出，导致材料的塑性、韧性等有所降低。

关键词：抗拉强度；室温冲击；δ铁素体；碳化物；氮化物

Effects of N and Cu elements on microstructure and properties of 0Cr13Ni4Mo steel

QU Zhaoyin, YANG Jiadian, BAI Jiayuan, WU Guoxing
Guizhou Aviation Technical Development Co., Ltd., Guiyang 550081, Guizhou, China

Abstract: This article mainly studies the effects of adding a certain amount of N and Cu elements on the structure and properties of 0Cr13Ni4Mo steel. By using the same heat treatment system, materials with different N and Cu contents are heat treated, and then tested and analyzed for room temperature tensile, room temperature impact, hardness, and microstructure. The results show that, under the same heat treatment system, after adding N and Cu elements, the content of delta ferrite and carbide is significantly reduced, the tensile strength of the material is increased by more than 70MPa, the hardness is increased by more than 20HBW, but the impact toughness is reduced by more than 50%; When adding N element alone, the content of delta ferrite and carbide also decreases, the tensile strength of the material increases by more than 50MPa, the hardness increases by more than 15HBW, and the plasticity and toughness are equivalent to when N and Cu elements are added at the same time. Conclusion, Affected by the N and Cu elements, especially the N element, the stability of the austenite of the material is significantly increased, inhibiting the precipitation of delta ferrite and carbide; at the same time, because the N and Cu elements have solid solution strengthening and The age strengthening effect significantly increases the strength and hardness of the material; however, due to the increase in the N element content, nitrides precipitate along the grain boundaries during the tempering process, resulting in a decrease in the plasticity and toughness of the material.

Keywords: tensile strength; impact; δ-ferrite; carbide; nitride

1 序言

0Cr13Ni4Mo为超级马氏体不锈钢，广泛用于航空航天、电力、石油化工等领域，该材料具有较高强度、韧性及一定的耐蚀性[1]。近年来，为进一步提升该材料在各种复杂环境中的使用性能，国内外相关企业也在不断对其进行改进，随着冶金水平的提升以及对合金元素的研究不断深入，在不锈钢中加入一定量的N、Cu元素得到越来越广泛的应用，并且在提高材料的屈强比及耐蚀性上成效显著[2, 3]。根据各合金元素的特性，N、Cu元素不但能提高材料的耐蚀性，同时还具有较强的强化作用，且N元素还对碳化物及δ铁素体的形成有一定的抑制作用[4, 5]。因此，本文为进一步研究加入N、Cu元素对0Cr13Ni4Mo钢组织及性能的影响，设计了一组试验，通过对不添加N和Cu元素、单独加入一定量的N元素，同时加入N和Cu元素的3种材料进行对比试验，找出N、Cu元素对材料组织及性能的影响。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

作为试验参照，使用了3组材料进行对比试验：1号材料未添加N、Cu元素；2号材料单独添加N元素；3号材料同时添加N、Cu元素。试验材料均采用 AOD＋ESR工艺冶炼，然后锻制成ϕ250mm的棒材，并在棒材上切取横向试样进行试验，试样化学成分分析结果见表1。从表1可看出，3组材料除了N、Cu有明显差异外，其余化学成分非常接近。

表1 试验材料的化学成分（质量分数）（%）

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
1号	0.04	0.39	0.63	0.028	0.003	12.68	3.69	0.57	0.16	0.016
2号	0.03	0.33	0.61	0.024	0.001	12.74	3.63	0.58	0.13	0.058
3号	0.04	0.41	0.57	0.027	0.001	13.33	3.61	0.53	0.54	0.055

2.2 试验方法

分别在以上3组材料上切取试样进行正火＋回火处理，正火为1020℃×90min，空冷，回火为不同温度下保温120min，空冷。热处理在实验室箱式电炉中进行，试样尺寸加工至30mm×30mm×100mm，具体热处理制度见表2。通过分析试样热处理后理化性能的差异，得出N、Cu元素对材料组织及性能的影响。

表2 热处理制度

试样编号	正火	回火
1	1020℃×90min，空冷	560℃×120min，空冷
2	1020℃×90min，空冷	580℃×120min，空冷
3	1020℃×90min，空冷	600℃×120min，空冷
4	1020℃×90min，空冷	620℃×120min，空冷
5	1020℃×90min，空冷	640℃×120min，空冷
6	1020℃×90min，空冷	660℃×120min，空冷
7	1020℃×90min，空冷	680℃×120min，空冷

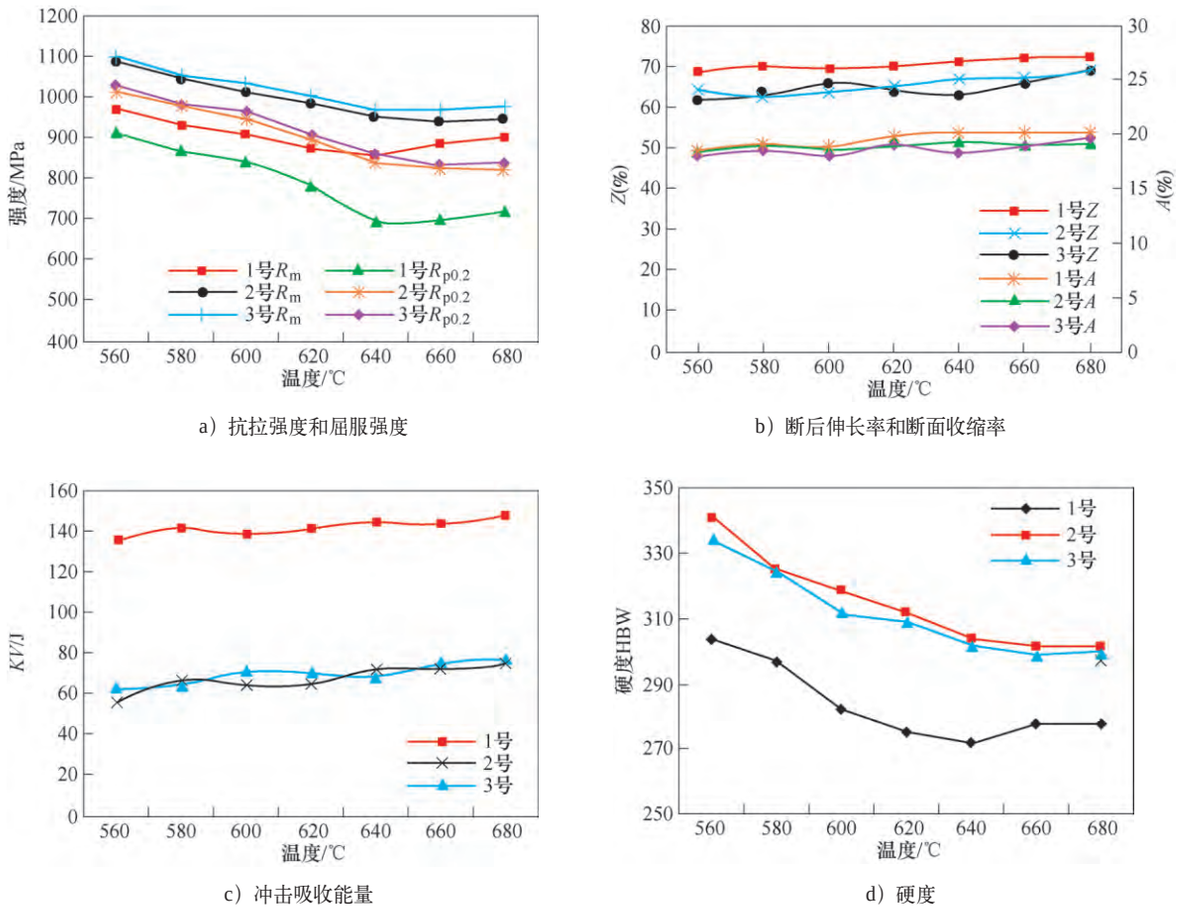
3 试验结果及讨论

3.1 力学性能

经相同的热处理制度正火＋回火后，3组材料力学性能随回火温度不同而变化的趋势基本相同，如图1所示。从图1a、d可看出，随着材料回火温度的升高，材料的强度、硬度先逐渐降低后缓慢升高[6]；在560～640℃回火时呈下降趋势；回火温度从620℃升到640℃时，1号材料抗拉强度（R_m）、屈服强度（$R_{p0.2}$）急剧下降，屈强比也明显降低，而2号、3号材料下降趋势并未明显增加；当回火温度高于640℃时，随着回火温度的升高，强度、硬度缓慢上升或基本不变。从图1b、c可看出，3组材料断后伸长率（A）、断面收缩率（Z）及冲击吸收能量（KV）等性能随着回火温度的升高而缓慢上升；与1号材料相比，2号和3号材料由于N、Cu元素的影响，断后伸长率、断面收缩率略有降低，室温冲击性能降低特别明显，KV值由140J左右降至70J左右，降幅达50%。

3.2 金相组织

图2所示为试验材料正火＋回火后典型的显微组织。从图2可看出，由于材料淬透性非常好，正火后空冷即可完全淬透[7]，经过不同温度回火后获得回火马氏体或保留马氏体位相的索氏体[8]。在560℃回火时，组织主要为板条马氏体及少量碳化物。在620℃回火时，马氏体逐渐分解，碳化物逐渐增多。在680℃回火时，马氏体几乎全部分解，可以看到大量碳化物析出，形成典型的回火索氏体组织。由显



a）抗拉强度和屈服强度

b）断后伸长率和断面收缩率

c）冲击吸收能量

d）硬度

图1　试样热处理后的力学性能

微组织对比可看出，1号材料试样有少量δ铁素体，而2号和3号材料试样未见明显δ铁素体；从碳化物析出的量看，1号材料碳化物颗粒最多，2号材料次之，3号材料碳化物含量最少。

3.3　分析与讨论

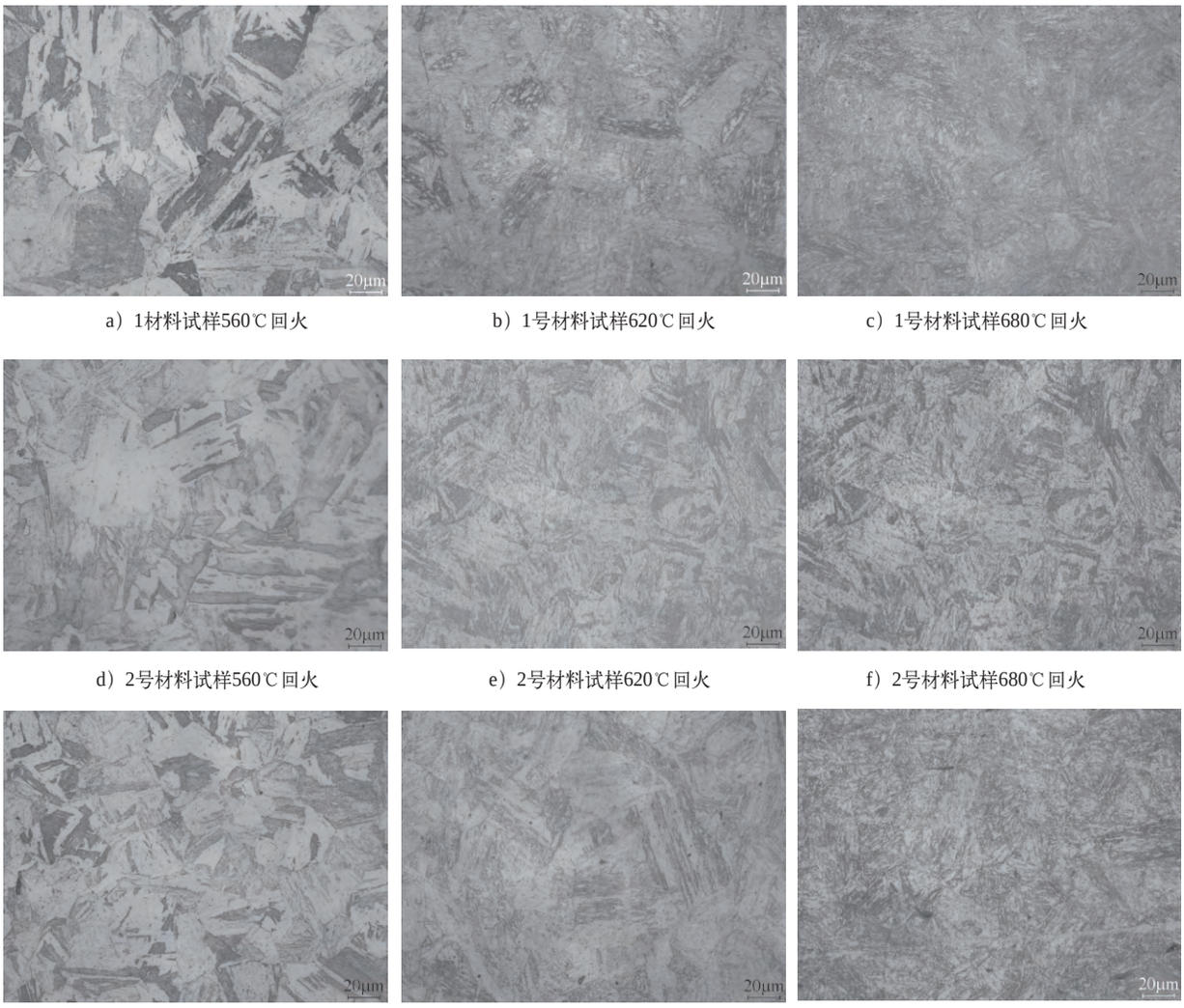
众所周知，N、Cu元素在钢中有很多相似特性，两者都对提高材料的耐蚀性、奥氏体的稳定性有显著作用[9]。本试验研究也显示，受合金元素的影响，加入N、Cu后材料的金相组织及力学性能表现出一定的差异性。从图2可看出，1号材料试样有少量δ铁素体，而2号和3号试样未见明显δ铁素体，这表明δ铁素体的形成主要受到其中添加的N元素的影响。不仅如此，由于N、Cu元素提高了材料回火稳定性，因此对碳化物析出有一定的抑制作用[10]。另外，从图2还可看出，2号材料试样碳化物含量比1号材料试样少，3号材料试样碳化物含量比2号试样少。

以往研究也表明，N元素在钢中主要以固溶体形式存在，且有较强的固溶强化作用[11, 12]；而Cu元素虽然固溶度较低，但具有一定强化效果[13]。在N、Cu元素的综合作用下，材料的强度明显提高，3组材料的试验结果也证实了这一结论（见图1a）；在经过相同的热处理制度正火＋回火后，力学性能检测结果如下。

1）同时添加了N、Cu元素的3号材料抗拉强度及屈服强度，比未添加N、Cu元素的1号材料强度提高70MPa以上，硬度提高20HBW以上，在560℃回火时，抗拉强度提高甚至超过130MPa。

2）只添加N元素的2号材料抗拉强度及屈服强度，比未添加N、Cu元素的1号材料强度提高50MPa以上，硬度提高15HBW以上。

3）当回火温度从620℃升到640℃时，由于逆变奥氏体增加，1号材料抗拉强度及屈服强度急剧下降，因此屈强比也明显降低，而2号和3号材料由于N元素抑制了逆变奥氏体形成，抗拉强度及屈服强度下降趋势并不明显。当回火温度高于640℃时，由



a）1材料试样560℃回火　b）1号材料试样620℃回火　c）1号材料试样680℃回火

d）2号材料试样560℃回火　e）2号材料试样620℃回火　f）2号材料试样680℃回火

g）3号材料试样560℃回火　h）3号材料试样620℃回火　i）3号材料试样680℃回火

图2　不同温度回火后的显微组织

于回火过程中形成的逆变奥氏体冷却时又转变为马氏体，所以强度不再下降。

4）2号和3号材料由于添加N元素，回火过程中氮化物沿晶界析出，因此导致材料的塑性、韧性有所降低，尤其是室温冲击性能降低明显，*KV*值由140J左右降至70J左右，降幅达50%。

4　结束语

1）通过试验研究可以得出，添加N、Cu元素后，均使材料强度、硬度提高，塑性、韧性下降，*KV*值降幅达50%。同时添加N、Cu元素的材料，其强度、硬度均比单独添加N元素材料的略高，塑性、韧性无明显差异。

2）N、Cu元素对提高奥氏体的稳定性有显著作用，在相同热处理制度下，加入N、Cu元素后，可明显降低δ铁素体和碳化物的含量；N、Cu元素同时添加与单独添加N元素相比，δ铁素体含量无明显差异，碳化物含量有一定减少。

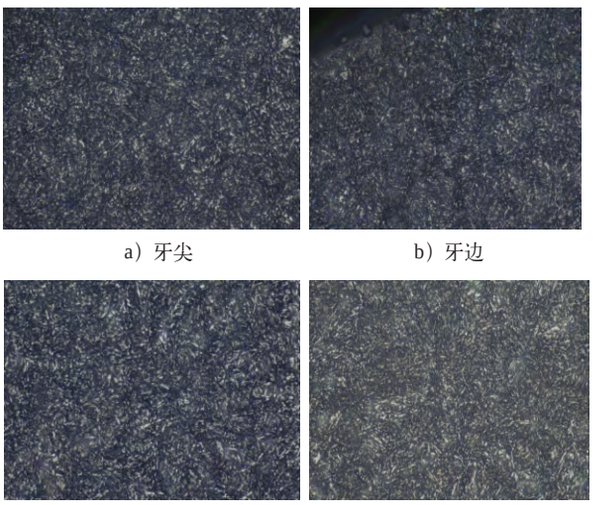
3）虽然添加N、Cu元素后会使0Cr13Ni4Mo钢的耐蚀性、强度等明显提高，但材料室温冲击性能下降明显。因此，添加N、Cu元素的0Cr13Ni4Mo钢比较适合在高腐蚀、高应力环境下使用，对于高冲击环境下使用则应谨慎考虑。

参考文献：

[1] 张文华. 不锈钢及其热处理[M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社，2010：157-162.

[2] 李旭. 耐蚀钢中铜元素对耐蚀性的影响规律探讨[J]. 南钢科技与管理，2018（1）：26-30.

（下转第98页）



a）牙尖　b）牙边

c）牙中　d）牙轴中间

图7　试样各部位金相组织

6　结束语

在实际生产中，感应加热线圈与零件的匹配很重要。试验数据表明，感应加热温度过高或过低均会导致产品硬度高于技术指标要求的情况，因此需选择加热效率较低的方式生产。产品距离感应器较远可降低感应加热时在产品表面的趋肤效应，感应温度较容易控制，故设计采用感应线圈离产品直径距离远的感应器。数次试验调整确定：感应线圈内径35mm，产品直径16mm，产品居中间，距感应器9.5mm距离为最佳。

在制定感应回火工艺时，需重视感应设备功率及频率选择对工件回火硬度的影响。采用较低频率，降低预设功率，使用双圈感应器回火，可有效解决感应加热升温太快、处理时间过短的问题。采用此方式回火硬度若在上限，则可采用重复回火的技术措施，使产品回火位置硬度全部在36～37HRC之间，由于有水冷保护，所以热影响过渡区可控制在8mm范围内。

参考文献：

[1] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册航空制造工程手册（热处理）[M]. 2版. 北京：航空工业出版社，2010.

[2] 李炯辉，林德成. 金属材料金相图谱（上册）[M]. 北京：机械工业出版社，2006.

MW 20240407

（上接第93页）

[3] 安浩然，王睿，康燕，等. 含氮马氏体不锈钢的腐蚀行为研究进展[J]. 钢铁研究学报，2023，35（6）：635-650.

[4] 刘正东，程世长，包汉生，等. 高铬马氏体不锈钢中δ铁素体形成及影响[J]. 材料热处理学报，2010（11）：61-67.

[5] WANG P，LU S P，XIAO N M，et al. Effect of delta ferrite on impact properties of low carbon 13Cr-4Ni martensitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering A，527（13）：3210-3216.

[6] 李照国，王珂，纪显彬，等. 回火温度对00Cr13Ni5Mo超级马氏体不锈钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理，2021（5）：95-97.

[7] 张迎春. 回火温度对00Cr13Ni4马氏体不锈钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理，2013（11）：95-97.

[8] ZOU D N，HAN Y，ZHANG W，et al. Influence of tempering process on mechanical properties of 00Cr13Ni4Mo super martensitic stainless steel[J]. Journal of Iron and Steel Research，2010（8）：50-54.

[9] 马小平，王立军，王园园，等. 氮对马氏体不锈钢00Cr13Ni4Mo组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报，2012，33(（4）：78-84.

[10] 郑善举，杨卯生，张启富，等. 氮元素对马氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报，2017（1）：100-105.

[11] MA Y ZH，QIN B，CHEN X，et al. Influence of nitrogen-alloying on the tempering properties of the martensitic stainless steel 00Cr13Ni4Mo[J]. Research Institute，2010，4（1）：56-59.

[12] 孙永庆，刘振宝，王长军，等. N含量对00Cr16Ni5Mo马氏体不锈钢力学性能和组织的影响[J]. 金属热处理，2019（3）：69-74.

[13] 钟远标，何小芳，李金象. Cu、Ni对钢水质量和钢材性能的影响[J]. 南方钢铁，1999（10）：9-13.

MW 20240105