

一种资源节约型耐热合金的 微观组织与性能

王建涛, 万晓宁, 王明华, 王友刚, 王兴雷

(青岛新力通工业有限责任公司 技术研发中心, 山东青岛 266000)

摘要: 通过以N代Ni和碳化物、氮化物第二相粒子强化, 开发了一种资源节约型耐热合金, 制备成离心铸管, 进行了微观组织和典型力学性能研究。结果表明, 该合金微观组织由奥氏体、碳化物和少量的氮化物组成, 添加的氮元素主要以固溶态存在。与ZG50Ni48Cr28W5合金相比, 资源节约型合金节约镍含量达40%以上, 综合力学性能显著提升: 室温、1 000 °C和1 100 °C的屈服强度分别提升了70%、36.5%和23%, 1 100 °C/16 MPa、加载时间100 h的蠕变伸长率降低约2/3。该合金性价比高, 具有广阔的工业应用前景。

关键词: 低成本; 离心铸造; 耐热合金; 微观组织; 持久性能; 蠕变性能

ZG50Ni48Cr28W5是一种通常含有0.4%~0.6% C (质量分数%, 下同)、27%~30% Cr、47%~50% Ni和4.0%~6.0% W^[1]的Ni-Cr-Fe-W系耐热合金, 在高温下具有优异的抗氧化性能、抗蠕变性能与持久强度, 最高使用温度可达1 200 °C, 广泛应用于航空航天、石油化工、冶金和玻璃建材等行业, 用于制造在高温下工作的重要零部件, 每年市场用量千吨以上。然而, ZG50Ni48Cr28W5合金的Ni含量已达到48%左右, 由于Ni属于稀缺资源, 价格昂贵, 因此该合金的制造成本很高。高性能合金的低成本化是市场的需求, 也一直是科技研究的焦点^[2-6]。

N是重要的奥氏体稳定元素, 与Ni作用相似, 也是固溶强化元素^[7]。合金中固溶的N导致晶体的面心立方结构的层错能最低, 使晶界发生晶格畸变, 增加位错运动的阻力, 降低奥氏体的最小蠕变速率, 从而提高合金的高温强度^[8], 其对抗蠕变性能的作用远远高于碳^[9]。以N代Ni是目前耐热合金低成本化的重要方向。郑开宏^[10]通过添加不多于0.3%的N和其他微合金元素, 开发了一种多元微合金化25-13型耐热耐磨铸钢, 制作的喷火嘴使用寿命是原用耐热钢喷嘴的3.5倍; 古可成^[11]通过加入Mn、N和Si替代Ni, 开发了Cr25Ni5SiMnRE耐热钢, 可替代4Cr25Ni20Si20合金, Ni含量降低了75%; 北京钢铁研究总院等四单位^[12]研制了3Cr24Ni7SiNRE合金, 该材料室温力学性能、高温瞬时力学性能、高温持久强度、抗氧化性能、工艺性能以及工业运行寿命值同HK40、1Cr25Ni20等材料相比, 其性能已达到或者超过高镍铬材料的水平, 节约Ni含量65%, 经济效益显著, 广泛应用于热处理电炉和炼镁还原罐上^[13-14]; Nishiyama Yoshitaka等^[15]通过添加0.2%的N开发的节镍型奥氏体耐热钢NH4, 在Ni含量降低64%的情况下, 蠕变强度和抗高温氧化性能仍优于Alloy800H合金; 作者通过以N代替部分Ni形成稳定的奥氏体, 优化Cr、Ni含量, 调整固溶强化元素W和Co含量, 添加C形成碳化物, 添加Ti、Zr、Nb、N形成碳化物和氮化物, 进行第二相粒子强化, 并添加适量的稀土元素净化晶界、提高合金的高温持久性能, 开发了一系列的低成本耐热合金, 较传统的ZG50Ni48Cr28W5类牌号的耐热合金节约Ni元素含量35%以上, 同时具有良好的室温强度、塑性和高温持久寿命, 综合性能优异^[16]。本课题针对其中一种典型的合金成分, 从微观组织和典型力学性能方面进行了详细研究, 为其工业推广应用积累充分的试验数据。

作者简介:

王建涛 (1984-), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为高温合金、耐热合金材料及制备工艺研究。电话: 0532-87316153, E-mail: wjtcxjd@163.com

中图分类号: TG142.1;
TG142.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2025)
09-1181-05

收稿日期:

2024-12-19 收到初稿,
2025-03-04 收到修订稿。

1 试验材料与方法

采用离心铸造工艺分别生产出长度3 500 mm、外径 Φ 118 mm的ZG50Ni48Cr28W5和资源节约型合金的铸管，炉号分别为S4591和S4592，主要化学成分如表1所示。通过计算，ZG50Ni48Cr28W5合金的材料成本为98元/kg，资源节约型合金的材料成本为72元/kg，成本降低约25%。从两根铸管的同一端、沿着铸管的长度方向采用线切割切取试样，加工成平行段直径为 Φ 5 mm的标准试棒，按照GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》进行室温拉伸试验，按照GB/T 228.2—2015《金属材料 拉伸试验 第2部分：高温试验方法》进行高温拉伸试验，按照GB/T 2039—2024《金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法》进行高温持久试验和高温蠕变试验，每种试验取两根试样

(编号分别为炉号-1、炉号-2)，两种合金进行对比试验；采用JEOL的JXA-8530F型电子探针观察了微观组织，并用其附带的波谱仪分析了微区的化学成分；采用德国布鲁克D8 ADVANCE X射线衍射仪，按照JY/T 0587—2020标准进行了主要物相的定性分析。

2 试验结果与讨论

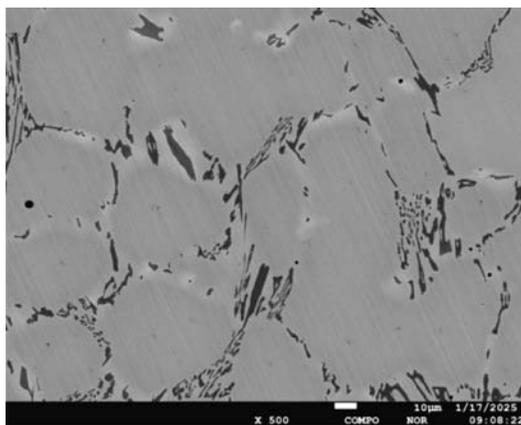
2.1 微观组织

两种合金微观组织的背散射照片如图1所示，均由奥氏体基体和析出相组成。其中，ZG50Ni48Cr28W5合金中的析出相为鱼骨状，而资源节约型合金中的析出相包含两种，一种为网状的灰色相，另一种为点状的白色相。

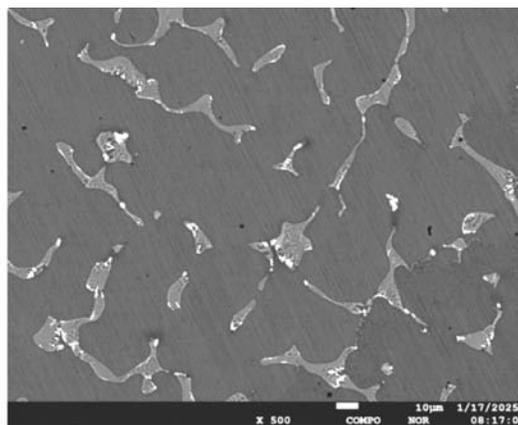
表1 试验合金的化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of experimental alloys

合金牌号	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	N	Nb	Ti	Zr	Fe
ZG50Ni48Cr28W5	0.48	1.02	1.3	27.5	47.5	4.5	0.06	-	-	-	余
资源节约型合金	0.48	1.05	1.5	27.5	27.0	4.5	0.29	0.2	0.015	0.021	余



(a) ZG50Ni48Cr28W5



(b) 资源节约型合金

图1 两种试验合金的微观组织

Fig. 1 Microstructures of the two experimental alloys

通过波谱仪分析析出相成分(表2)得知，ZG50Ni48Cr28W5合金中的主要析出相为Cr的碳化物，碳化物中含有少量的W和Ni，经X射线物相分析，该碳化物为 M_7C_3 型；资源节约型合金中的灰色析出相也是Cr的碳化物，但碳化物中的W含量较高，达到15.2%，经X射线物相分析，该碳化物为 $M_{23}C_6$ 型；资源节约型合金中的白色析出相为碳氮化物，N含量达到了2.4%，并且W含量达到了26%，还含有8.3%的Nb；由于W的原子序数为74，Nb的原子序数为41，均较Cr的原子序数24大，因此，当碳氮化物中的W和Nb含量较高时，

在背散射模式下呈现出亮白色。

2.2 室温拉伸性能

两种试验合金的室温拉伸性能见表3。可以看出，以N代Ni的资源节约型合金，N作为间隙原子固溶强化的效果非常显著，屈服强度提升明显，平均值达到了480.5 MPa，较ZG50Ni48Cr28W5合金的282 MPa提升幅度达70%，抗室温塑性变形能力显著增强，同时抗拉强度也提高了8%左右，但强度的提高也导致伸长率有所降低。

表2 试验合金析出相的主要成分
Tab. 2 Main compositions of the precipitated phases in the experimental alloys

合金牌号	分析位置	C	Si	Cr	Ni	W	N	Nb	Fe
ZG50Ni48Cr28W5	黑色析出相	15.8	-	72.7	2.2	5.1	-	-	3.8
资源节约型合金	灰色析出相	10.5	-	54.6	3.5	15.2	-	-	14.3
	白色析出相	3.7	5.7	23.0	18.5	26.0	2.4	8.3	10.0

表3 两种试验合金的室温拉伸性能
Tab. 3 Room temperature tensile properties of the two experimental alloys

合金牌号	编号	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%
ZG50Ni48Cr28W5	S4591-1	589	284	11.5
	S4591-2	567	280	11
	平均值	578	282	11.25
资源节约型合金	S4592-1	613	475	7
	S4592-2	646	483	6
	平均值	629.5	480.5	6.5

2.3 高温拉伸性能

两种试验合金在1 000 °C和1 100 °C的高温拉伸性能见图2和图3。可以看出，以N代Ni的资源节约型合金，在1 000 °C时，资源节约型合金的平均抗拉强度为161.5 MPa，平均屈服强度为84 MPa，平均断后伸长率为43.5%，与ZG50Ni48Cr28W5合金相比，抗拉强度提高52%、屈服强度提高36.5%，断后伸长率略有降低；随着温度升高至1 100 °C，资源节约型合金的平均抗拉强度为92 MPa，平均屈服强度为45.5 MPa，平均断后伸长率为52.0%，与ZG50Ni48Cr28W5合金相比，高温强度优势仍旧突出，抗拉强度提高了41.5%、屈服强度提高了23%，断后伸长率二者相当。

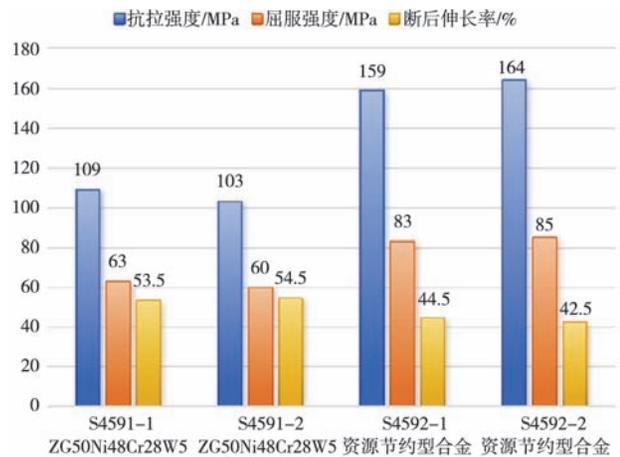


图2 两种试验合金1 000 °C的高温拉伸性能
Fig. 2 Tensile properties of the two experimental alloys at 1 000 °C

2.4 高温持久性能

表4为两种试验合金的高温持久性能，在1 100 °C/

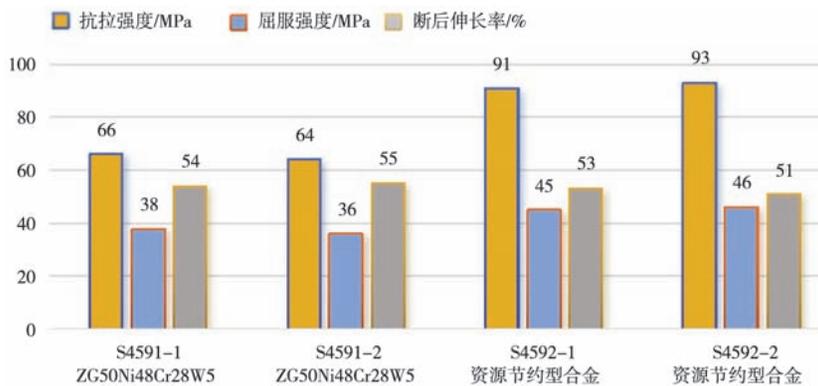


图3 两种试验合金1 100 °C的高温拉伸性能
Fig. 3 Tensile properties of the two experimental alloys at 1 100 °C

20 MPa的条件下,两种合金的寿命均为50~60 h;在1 100 °C/17 MPa的条件下,ZG50Ni48Cr28W5合金和资源节约型合金的平均持久寿命分别为171 h和177.3 h,处于相当的水平。由此可见,资源节约型合金虽然降低镍含量达40%以上,但高温持久性能完全达到了ZG50Ni48Cr28W5合金的水平。

表4 两种试验合金的高温持久性能
Tab. 4 High temperature stress rupture properties of the two experimental alloys

试验条件	合金牌号	编号	持久寿命/h
1 100 °C/20 MPa	ZG50Ni48Cr28W5	S4591-1	59
		S4591-2	50
	资源节约型合金	S4592-1	59.9
		S4592-2	52
1 100 °C/17 MPa	ZG50Ni48Cr28W5	S4591-1	176.6
		S4591-2	165.5
	资源节约型合金	S4592-1	183
		S4592-2	171.6

2.5 高温蠕变性能

表5为两种试验合金在1 100 °C/16 MPa、加载时间为100 h的高温蠕变性能。可以看出,以N代Ni的资源节约型合金在N元素的固溶强化和碳化物、碳氮化物第二相粒子强化的共同作用下,抗蠕变性能显著提升,同等条件下的蠕变伸长率仅是ZG50Ni48Cr28W5合金的1/3左右,表明资源节约型合金在1 100 °C的高温下抗

表5 两种试验合金的高温蠕变性能
Tab. 5 Creep properties of the two experimental alloys

合金牌号	编号	蠕变伸长率/%
ZG50Ni48Cr28W5	S4591-1	2.76
	S4591-2	2.65
	平均值	2.7
资源节约型合金	S4592-1	1.01
	S4592-2	0.98
	平均值	0.995

参考文献:

- [1] 全国化工机械与设备标准化技术委员会. 高温承压用离心铸造合金炉管: HG/T 2601—2011 [S]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [2] 冯佃臣, 杨亮, 李涛, 等. 含Nb、Y高温合金的组织与性能的研究 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (6): 44-47.
- [3] 余存焯. 节镍不锈钢的开发与展望 [J]. 化工设备与管道, 2008, 45 (2): 4-8.
- [4] 汤瑞瑞, 龚利华. 节镍型双相不锈钢的研究进展 [J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27 (1): 8-12.
- [5] SCHNIO A D, KENNY J M, BARTER M. Fatigue behavior of a high nitrogen austenitic stainless steel as a function of its grain size [J]. Journal of Materials Science Letters, 2003, 22: 1511-1513.

蠕变变形的能力更强,在服役过程中抗弯曲性能更优异。

2.6 资源节约型合金的强韧化机理

资源节约型合金的技术核心是添加适量的N并降低Ni含量,由于N是间隙原子,原子半径很小,其晶格格点可以进入原子间隙,原子间结合力较强,因此,起到的固溶强化作用更好;其次,在奥氏体合金中,N作为间隙原子倾向于与置换原子Cr反应形成间隙-置换原子团簇,阻碍位错运动^[17],能够加强Cr的固溶强化作用;另外,在Cr-Ni合金中,N含量和层错能密切相关,添加适量的N可使材料的层错能降低数个数量级^[18]。由于层错能越低,扩展位错越宽,越不易发生交滑移,从而表现出较高的变形抗力,因此导致资源节约型合金的抗拉强度和屈服强度有显著提高;而且N的添加也有利于合金持久和蠕变性能的提升,例如在316LN合金中,当N含量由0.07%增大至0.22%时,持久寿命增加了近10倍,并且随着N含量的增加,稳态蠕变速率也呈下降趋势^[19]。因此,对于资源节约型合金,虽然Ni含量较ZG50Ni48Cr28W5合金降低了40%以上,Ni的固溶强化作用有所降低,但由于N的固溶强化和降低层错能的作用,使资源节约型合金的高温力学性能能达到甚至优于ZG50Ni48Cr28W5合金的水平。

3 结论

(1) 以N代Ni的资源节约型合金微观组织由奥氏体、碳化物和少量的碳氮化物组成。

(2) 资源节约型合金较ZG50Ni48Cr28W5合金的强度提高显著,室温屈服强度提升70%;1 000 °C抗拉强度提高52%、屈服强度提高36.5%;1 100 °C抗拉强度提高41.5%、屈服强度提高23%。

(3) 资源节约型合金与ZG50Ni48Cr28W5合金的1 100 °C的持久寿命相当,但1 100 °C/16 MPa、加载时间100 h的蠕变伸长率仅是ZG50Ni48Cr28W5合金的1/3左右。

(4) 与ZG50Ni48Cr28W5合金相比,资源节约型合金节约镍含量达40%以上,高温综合力学性能更优,性价比更高,具有广阔的工业应用前景。

- [6] BREGLIOZZI G, SCHNIO A D, KENNY J M. Influence of atmospheric humidity and grain size on the friction and wear of high nitrogen austenitic stainless steel [J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39: 1481-1484.
- [7] TERANISHI HIROSH, SAWARAGI YOSHIATSU, KUBOTA MINORU. Fine-grained TP347H steel tubing with high elevated temperature strength and corrosion resistance for boiler applications [J]. *Sumitomo Search*, 1989, 38 (5): 63-64.
- [8] 张景春, 王守仁, 仇恒永. Fe-Cr-Ni-N系耐热合金的研究概况 [J]. *济南大学学报 (自然科学版)*, 2002, 16 (2): 186-188.
- [9] MATHEW M D, SASIKALA G, BHANU SANKARA RAO K, et al. Influence of carbon and nitrogen on the creep properties of type 316 stainless steel at 873 K [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1991, 148 (2): 253-260.
- [10] 郑开宏, 苏志辉, 毕亮. 多元微合金化25-13型耐热耐磨铸钢显微组织与高温性能 [J]. *热加工工艺*, 2005 (7): 17-19.
- [11] 古可成, 蔡春波, 孙东杰, 等. 以Mn、N代Ni奥氏体耐热钢的高温氧化 [J]. *沈阳工业大学学报*, 2006, 28 (1): 21-24.
- [12] 李邦熙. 炉用高温耐热材料3Cr24Ni7SiNRE [J]. *工业加热*, 1983 (3): 4-9.
- [13] 宋志标, 郭佩华. 3Cr24Ni7SiNRE稀土耐热钢在热处理电炉中的应用 [J]. *电炉*, 1986 (5): 60-63.
- [14] 吴先敬. 炼镁还原罐的离心铸造技术 [J]. *有色金属加工*, 1996 (4): 51-55.
- [15] NISHIYAMA Y, SAWARAGI Y, MATSUDA T, et al. Development of a new heat resistant austenitic stainless steel "NAR-AH-4" [J]. *Sumitomo Search*, 1998 (60): 27-33.
- [16] 王建涛, 国新月, 李尚平, 等. 一种耐热合金及其制备方法: ZL 2023 1 1060407.9 [P]. 2024-11-05.
- [17] PARK I, MASUYAMA F, ENDO T. Effect of soluble nitrogen on the creep strength of an austenitic 25Cr-20Ni steel [J]. *Key Engineering Materials*, 2000, 171-174: 445-452.
- [18] SCHRAMM R E, REED R P. Stacking fault energies of seven commercial austenitic stainless steels [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1975, 6: 1345-1351.
- [19] MATHEW M D, LAHA K, GANESAN V. Improving creep strength of 316L stainless steel by alloying with nitrogen [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 535: 76-83.

Microstructure and Properties of a Resource-Saving Heat-Resistant Alloy

WANG Jian-tao, WAN Xiao-ning, WANG Ming-hua, WANG You-gang, WANG Xing-lei
(Technology Research Center, Qingdao NPA Industrial Co., Ltd., Qingdao 266000, Shandong, China)

Abstract:

A resource-saving heat-resistant alloy was developed by N replacing of Ni and combined with second phase particles strengthening of carbides and nitrides. The centrifugal casting pipes were prepared, and the microstructure and typical mechanical properties were studied. The results show that the microstructure of the alloy is composed of austenite, carbides and a small amount of nitrides, and the nitrogen element added mainly exists in a solid solution state. Compared with ZG50Ni48Cr28W5 alloy, the nickel content of the resource-saving alloy is saved by more than 40%, and the comprehensive mechanical properties are significantly improved. The yield strength at room temperature is increased by 70%, while increased by 36.5% at 1 000 °C and increased by 23% at 1 100 °C, and the creep elongation at 1 100 °C /16 MPa and loading time of 100 h is reduced by about 2/3. It is cost-effective and has a broad prospect for industrial applications.

Key words:

low-cost; centrifugal casting; heat-resistant alloy; microstructure; stress rupture property; creep property
