显微组织对铸造高温合金 K4208 力学性能的影响

付珊珊¹,凌晨²,李尚平²

(1. 贵阳航发精密铸造有限公司,贵州贵阳 550014;2. 北京钢研高纳科技股份有限公司,北京 100081)

摘要:研究了K4208合金的晶粒和枝晶尺寸以及析出相形态对力学性能和变形机制的影响。 K4208合金硬度较高,室温和900 ℃断裂机制均为由α-W/Mo相脱粘和裂纹沿晶扩展造成的 脆性断裂。铸造冷却速率的增加能够使晶粒尺寸和二次枝晶间距减小,能够获得尺寸更加细 小、分布更加均匀弥散的α-W/Mo相,有利于改善析出相与基体之间的协同变形能力,减缓 应力集中,从而提高合金的抗拉强度。此外,晶粒组织的细化和α-W/Mo相的细小、均匀和 弥散析出也有利于改善合金的高温抗压缩性能。

关键词:Ni基合金;高温合金;显微组织;拉伸性能;压缩性能

航空发动机涡轮叶冠工作面之间存在振动、挤压和磨损,通常需要使用高温耐磨材料进行耐磨强化^[1]。由于其使用部位的特殊性,耐磨块的组织特征、物理性能和力学性能等直接影响到叶片的使用寿命,是发动机叶片系统中的重要部件之一,因此,叶冠耐磨材料必须具有良好的高温强度和硬度,优异的高温耐磨性,较高的使用温度和较适宜的高温膨胀系数等物理性能^[2-3]。

K4208合金是一种镍基耐磨合金,具有熔点高、硬度高、耐磨性好、热膨胀系数 小、具有一定的抗冲击韧性和可焊性好等特点,在800 ℃下的抗微动磨损性能十分优 异,可应用于航空发动机涡轮叶冠表面耐磨强化^[4-8]。由于独特的工况环境,航空发 动机工作过程中,相邻叶冠工作面处于紧配合状态,除了会产生磨损之外,还存在 挤压,即实际服役工况对叶冠耐磨材料的强韧性均有一定的要求。因此,作为一种 叶冠耐磨材料,K4208合金的力学性能对叶冠耐磨材料的实际应用至关重要。此前与 K4208合金相关的研究主要关注其耐磨性和抗氧化性,与力学性能和强化机制相关的 研究较少。

K4208合金中含有W、Mo、Al和Ti等元素(表1),其中W和Mo元素主要形成 α-W/Mo相,α-W/Mo相的析出使得合金具有硬度高和耐磨性好的特点^[9-11],Al和 Ti元素可形成γ'相。K4208合金主要通过铸造工艺制备,铸造工艺对合金的晶粒尺 寸、二次枝晶间距和析出相的形状、尺寸和分布等影响很大,从而会影响合金的力 学性能^[12-15]。本文通过工艺参数调整获得了两种具有不同晶粒组织特征和析出相组 织特征的K4208合金,研究了合金的晶粒组织和耐磨硬质相的尺寸和形态对力学性能 (主要包括拉伸和压缩性能)的影响,并进一步分析了K4208合金在外加应力下的变 形和强化机制,为K4208合金在航空发动机涡轮叶冠表面强化领域的应用提供理论和 试验依据。

表1 K4208合金的化学成分 Tab. 1 Chemical composition of K4208 alloy						<i>w</i> _B /%			
С	Cr	W	Mo	Al	Ti	Si	Fe	Ni	
0.11~0.17	12.0~15.0	8.0~10.0	12.0~15.0	1.5~3.0	2.0~3.2	1.0~2.0	2.0~3.5	余量	

作者简介: 付 珊 珊(1974-), 女, 高级工程师,主要研究方 向铸造叶片用高温合金。 E-mail: 2726217343@ qq.com

中图分类号:TG132.3⁺2 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2025) 04-0442-06

收稿日期: 2024-11-07 收到初稿, 2024-12-27 收到修订稿。

1 试验材料和方法

采用真空感应熔炼炉(Vacuum induction melting, VIM)制备K4208合金锭。为了研究K4208合金的显 微组织对力学性能的影响,本试验通过调整铸锭冷却 速率来获得不同组织特征的K4208合金,选取的铸造 冷却速率分别为8 ℃/min和27 ℃/min。铸锭的尺寸规 格相同,在铸锭的同一位置取样,进行后续的热 处理,组织观察和性能测试。对不同铸造冷却速率 获得的合金锭采用同样的热处理工艺,热处理制 度为1 200 ℃×1 h/AC。晶粒度组织观察试样在盐酸-双氧水溶液($HCl: H_2O_2=1:3$)中进行腐蚀,扫描电 镜显微组织观察试样在三酸溶液(12 mL HPO₄+40 mL HNO_3+48 mL H_2SO_4) 中进行电解腐蚀, 电解腐蚀条 件为直流电5 V,腐蚀时间为5 s。晶粒和枝晶组织采 用OLYMPUS-SZX7体视显微镜进行观察,显微组织 采用 JSM-7200F型场发射电子显微镜进行观察。采用 Image-ProPlus软件对晶粒尺寸、二次枝晶间距以及析



出相体积分数和平均尺寸进行统计。合金试样的室温 洛氏硬度通过HR-150A型洛氏硬度计测试,最终结果 取5次测量的平均值。拉伸和压缩性能测试在GNT系列 微机控制电子万能试验机上进行,拉伸试验按照标准 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第1部分:室温 试验方法》和GB/T 228.2—2015《金属材料拉伸试验 第2部分:高温试验方法》,压缩试验标准参照GB/T 7314—2017《金属材料室温压缩试验方法》。

2 结果与讨论

2.1 合金的显微组织和洛氏硬度

K4208合金的晶粒组织图1所示,铸造冷却速率增加后,K4208合金的晶粒组织明显细化,随着晶粒的 细化,二次枝晶间距也有所减小。表2中的统计结果显示,随着铸造冷却速率的升高,K4208合金的平均晶 粒尺寸由2.07 mm减小至0.92 mm,二次枝晶间距由 122.67 μm减小至83.84 μm。



(a) 8 ℃/min (b) 27 ℃/min 图1 不同铸造冷却速率下K4208合金的晶粒组织 Fig. 1 Grain structure of K4208 alloy under different casting cooling rates

表2 不同铸造冷却速率下K4208合金的晶粒平均尺寸和二次枝晶间距

Tab. 2 Average grain size and secondary dendrite spacing ofK4208 alloy under different casting cooling rates

冷却速率	晶粒平均尺寸/mm	二次枝晶间距/µm
8 °C/min	2.07	122.67
27 °C/min	0.92	83.84

经过1 200 ℃ × 1 h/AC热处理后,合金的显微组 织如图2所示,主要由白色的析出相和深色的基体两部 分组成,其中,白色析出相为α-W和α-Mo,是合金 中的主要耐磨硬质相,主要呈条状和块状。可以观察 到,在同一放大倍数下,不同铸造冷却速率下的K4208 合金组织中析出相的尺寸存在明显差异。表3给出了两 种K4208合金中α-W/Mo相和基体γ'相的尺寸和含量 统计信息,这里统计的α-W/Mo相以图2(a)和2(c) 中的大尺寸 α -W/Mo相为主。冷却速率较慢时,K4208 合金中 α -W/Mo相的尺寸较大,平均尺寸约为20.9 μ m, 主要呈板状和条状,少量呈块状;随着冷却速率的增加,合金中 α -W/Mo相的数量明显增加,尺寸明显减小,平均尺寸仅为8.7 μ m,主要呈细长条状,长径比与 慢冷却速率下的板条状 α -W/Mo相比也明显增大。表3 的统计结果显示,基体中 γ '相的平均尺寸略有减小, 但整体形貌差异不大,这是因为在热处理过程中一次 γ '相会发生明显回溶,以细小二次 γ '相的形式析出, 而二次 γ '相的形貌尺寸等特征主要与热处理制度有 关,两种合金锭都经过了1 200 ℃高温固溶处理,二次 γ '相的分布特征极为相似。因此,可以判断,铸造冷 却速率主要影响K4208合金中 α -W/Mo相的尺寸和形貌。

表3中还给出了K4208合金的室温洛氏硬度。对于 含有大量硬质析出相的合金,硬质相的体积分数是影 444 **持造** FOUNDRY 试验研究



表3 不同铸造冷却速率下K4208合金的室温洛氏硬度和析出相的尺寸含量统计 Tab. 3 Average size and volume fraction of precipitated phases and room temperature Rockwell hardness of K4208 alloy under different casting cooling rates

必却演奏	α -W/M0)	γ ΄	波氏 研 度 UD C	
行动逐节	体积分数/%	平均尺寸/μm	平均尺寸/µm	一 佰以哎 及 ffKC	
8 °C/min	23.14	20.9	0.51	51.4	
27 °C/min	23.81	8.7	0.42	51.1	

响合金硬度的重要因素, α-W/Mo相是合金中最主要 的硬质析出相,虽然其在两种合金中的形态存在明显 差异,但体积分数非常接近,因此,在两种不同铸造 冷却速率下,K4208合金的室温洛氏硬度也非常接近。 然而,α-W/Mo的形态变化对合金的力学性能会产生 较大影响,因此,不同铸造冷却速度合金的力学性能 一定也存在显著差异,需要对具有不同组织状态K4208 合金的典型力学性能(主要包括室温、高温拉伸性能 和高温压缩性能)进行评估。

2.2 合金的拉伸性能和变形机制

表4给出了不同铸造冷却速率获得K4208合金的室

温和900 ℃拉伸性能。拉伸性能测试结果显示,不同铸造冷却速率下K4208合金的拉伸性能存在明显差异,主要体现在抗拉强度上,整体变化趋势是室温和900 ℃抗拉强度均随铸造冷却速率的增大而升高。室温抗拉强度由534 MPa提高至727 MPa,900 ℃抗拉强度由386 MPa提高至411 MPa。

上述力学性能差异主要与不同冷却速率下合金的 晶粒和枝晶组织以及析出相的形态有关。从组织观察 的结果可知,K4208合金的晶粒尺寸和二次枝晶间距均 随铸造冷却速率的增大而减小,而研究表明,铸造晶 粒和枝晶组织的细化有利于改善合金的强度。K4208 合金中的主要析出强化相α-W/Mo相对铸造冷却速率

		室温				90	0 ℃	
冷却速率	R _m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	Z/%	R _m /MPa	$R_{p0.2}/MPa$	<i>A</i> /%	Z/%
8 °C/min	534	-	1.0	2	386	372	0.5	1
27 °C/min	727	-	1.5	2	411	377	0.5	1

表4	不同铸造冷却速率下K4208合金的拉伸性能	
Tab. 4 Tensile pro	perties of K4208 alloy under different casting cooling ra	te

也较为敏感, 冷却速率的增加有利于 α -W/Mo相以尺 寸更细小的形式析出。虽然合金基体中γ/相的体积分 数较高, $(\alpha - W/Mo$ 相的强度和硬度很高, 相对于基 体而言属于硬脆相。在不同铸造冷却速率下,合金中 α-W/Mo相的体积分数均在20%以上,析出相含量在 高温合金中属于较高水平,因此,不同铸造冷却速率 下获得的K4208合金塑性均比较差。析出相的尺寸和分 布情况对合金的强度和塑性影响也较大,在K4208合金 中, γ / γ' 基体和 α -W/Mo相的强度和塑性变形能力存 在明显差异,当 α -W/Mo相尺寸过大,分布不均匀弥 散时,基体与析出相之间的协同变形能力变差,从而 对合金的强度和塑性产生不利影响。随着冷却速率的 增加, K4208合金中α-W/Mo相的尺寸变得更加细小, 分布也更加弥散,合金的强度明显提高,室温塑性也 略有提高。合金在900 ℃时的拉伸性能也随铸造冷却速 率的增加而提高,但提高的幅度没有室温拉伸性能明 显,这可能与高温下基体 γ /反常屈服效应有关。高温 下γ'的反常屈服效应使得基体的强度进一步提高,与 析出相强度的差异减小,二者的协同变形能力改善, 合金强度对析出相尺寸和分布的敏感性降低。

为了进一步深入研究显微组织对K4208合金在拉 伸应力作用下的变形和断裂机制的影响,需要对拉伸 断口进行显微组织观察,图3和图4分别给出了K4208合 金在室温和900 ℃时拉伸试样断口形貌。可以看出, K4208合金的室温和900 ℃拉伸断口表面均呈现凹凸 不平的形貌,但无法明显区分纤维区、放射区和剪切 唇。结合拉伸性能数据结果,K4208合金的室温和 900 ℃断后伸长率和断面收缩率数值都很小,合金的塑 性较差,体现在断口形貌上即为三个断口典型区域差 异不明显。

当铸造冷却速率较慢时(8℃/min),合金室温拉 伸断口上存在明显的脆性断裂特征,可以观察到面积较 大,微观表面非常平整的解理面,如图3(b)所示。其 中,部分解理面的形状为长条状,与合金中α-W/Mo相 的形状非常相似,周围存在明显的裂纹。可以判断, K4208合金的脆性断裂主要是由大尺寸α-W/Mo相与基 体的脱粘造成的。与基体相比, α -W/Mo属于硬脆相, 塑性变形能力较差。K4208合金中的α-W/Mo相不但体 积分数多,尺寸大,而且长径比也较大。在外加应力作 用下,由于 α -W/Mo相无法像周围基体一样通过塑性变 形释放应力,其与基体界面处极容易产生应力集中。 板条状 α -W/Mo相的两端曲率变化较大,应力集中更加 严重,容易成为裂纹源,裂纹沿着析出相/基体界面扩 展,会造成 α -W/Mo相与基体之间的脱粘。从图3(c) 中可以看出,冷却速率较慢时,K4208合金室温断口表 面存在明显的一次和二次裂纹,这些裂纹周围没有明显 的α-W/Mo相脱粘痕迹,主要为沿晶裂纹。断口表面 的韧窝形貌不明显,结合拉伸性能测试结果显示,断 后伸长率和断面收缩率较低,可以进一步判断K4208合 金的断裂机制主要为α-W/Mo相脱粘造成的脆性断裂 和裂纹沿晶扩展造成的脆性断裂。

随着铸造冷却速率的增大,K4208合金室温断口 表面上解理面的尺寸和数量明显减少,如图3(e)和 3(f)所示。这是因为铸造冷却速率增大后,合金中 α-W/Mo相的尺寸减小且分布更加均匀弥散,拉伸过 程中的应力集中情况有所减缓,α-W/Mo相与基体的





图3 不同铸造冷却速率下K4208合金室温拉伸断口形貌 Fig. 3 Tensile fracture morphology of K4208 alloy at room temperature under different casting cooling rates

协同变形能力有所改善,基体中的应力分布更加均 匀。然而,断口表面裂纹沿晶界分布的现象依然存 在,韧窝依旧不明显,这说明尽管α-W/Mo相形态有 所改善,但由于硬度较高,快冷工艺制备的K4208合金 的室温断裂机制仍以脆性断裂为主。

与室温拉伸断口相比,K4208合金900 ℃拉伸断

口存在明显的氧化现象,如图4所示。在高温氧化作用下,合金表面能够观察到的光滑解理面较少,但仍存在明显的析出相脱粘痕迹。断口表面的韧窝形貌依旧不明显,但可以观察到少量撕裂岭和裂纹,说明合金900℃拉伸断裂机制仍以脆性断裂为主。



(d)~(f)27 °C/min

图4 不同铸造冷却速率下K4208合金900 ℃拉伸断口形貌 Fig. 4 Tensile fracture morphology of K4208 alloy at 900℃ under different casting cooling rates

2.3 合金的高温压缩性能

受服役工况条件的影响,高温抗压缩性能也是叶 冠耐磨材料主要关注的服役性能之一。在初步确认合 金的晶粒、枝晶和析出相组织对拉伸性能的影响规律 后,还要进一步验证其对合金高温压缩性能的影响。 因此,对不同铸造冷却速率获得的K4208合金进行 1 000 ℃/200 MPa加载10 min高温压缩性能测试,表5 给出了两种K4208合金样品的压缩率,图5给出了压缩 过程中位移随时间的变化曲线。

从表5中可以看出,K4208合金的压缩率随铸造冷 却速率的增加而逐渐减小,说明合金的高温抗压缩性 能随晶粒尺寸、二次枝晶间距和α-W/Mo相尺寸的减 小而提高。从图5中可以看出,K4208合金的压缩位移 随压缩时间的延长而逐渐增大,但当铸造冷却速率为 8℃/min时,位移随时间的变化速率明显逐渐增大,而

表5 不同铸造冷却速率下K4208合金的压缩率 Tab. 5 Compression ratio of K4208 alloy at different casting cooling rates

冷却速率	压缩率/%		
8 °C/min	0.6		
27 °C/min	0.1		



图5 不同铸造冷却速率下K4208合金在1 000 ℃/200 MPa下加载10 min压缩过程中的位移-时间曲线

Fig. 5 Displacement-time curves of K4208 alloy under different casting cooling rates during 10 min compression at 1 000 °C/200 MPa

当铸造冷却速率为27 ℃/min时,位移-时间曲线基本保 持平缓,即位移随时间的变化速率基本保持稳定。上 述结果进一步说明提高铸造冷却速率引起的晶粒和枝 晶组织的细化以及α-W/Mo相的细小、均匀和弥散析 出有利于改善合金的高温抗压缩性能,与拉伸性能随 铸造冷却速率的变化规律相同。

3 结论

(1)随着铸造冷却速率的增大,K4208合金的晶 粒组织和二次枝晶间距明显细化,α-W/Mo相的尺寸 明显减小,并以更加均匀弥散的状态析出,枝晶干γ' 相的尺寸也随铸造冷却速率的增大而减小,但变化程 度不明显。因此,铸造冷却速率主要影响K4208合金的 晶粒尺寸和α-W/Mo相形貌。

(2)K4208合金硬度较高,室温和900 ℃拉伸断裂机制均以脆性断裂为主。合金中板条状α-W/Mo相

含量多,尺寸较大,分布不均匀的α-W/Mo相周围容 易发生应力集中,成为裂纹源,裂纹沿α-W/Mo相与 基体界面扩展,最终造成析出相脱粘。此外,沿晶裂 纹也是造成K4208合金脆性断裂的原因之一。

(3)铸造冷却速率的增加有利于获得尺寸更加 细小的晶粒和枝晶组织以及分布更加均匀弥散的析出 相组织,有利于改善析出相与基体之间的协同变形能 力,减缓应力集中,从而使合金的抗拉强度和抗压缩 性能提高。

参考文献:

- [1] 李尚平, 骆合力, 曹栩, 等. 铸态T800合金及其焊层的组织和高温耐磨性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42 (3): 603-606.
- [2] 凌晨,李尚平,刘栋,等.一种钴基耐磨材料的高温氧化行为 [J]. 稀有金属材料与工程,2023,52(5):1708-1716.
- [3] 凌晨,李尚平,林筠,等. Co-Cr-Nb-W合金碳化物组织转变及力学性能研究 [J]. 稀有金属材料与工程,2024,53(3): 815–824.
- [4] 国为民,赵明汉,曾强. K4208镍基耐磨高温合金组织与微动磨损性能测试研究 [C]// 第十三届中国高温合金年会摘要文集. 2015: 1.
- [5] 国为民,赵明汉,吴剑涛,等. K4208耐磨铸造高温合金的组织和性能 [C]// 第十一届中国高温合金年会论文集. 2007:4.
- [6] 国为民,燕平,吴剑涛,等.新型镍基耐磨高温合金组织与微动磨损性能测试研究 [C]// 2017年全国高品质特殊钢生产技术研讨会论 文摘要. 2017: 2.
- [7] 杨升,国为民,杜静,等.新型镍基耐磨高温合金浇注温度研究 [C]// 2017年全国高品质特殊钢生产技术研讨会论文摘要. 2017:2.
- [8] 杨升,国为民.新型镍基耐磨高温合金浇注温度研究[C]//第十三届中国高温合金年会摘要文集.2015:1.
- [9] 吴剑涛,袁晓飞,宋圣玉,等. Al含量对一种高W铸造高温合金组织与持久性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程,2021,50(4): 1342–1349.
- [10] 朱玉平,盛乃成,谢君,等.高钨镍基高温合金K416B富W相的析出行为[J].金属学报,2021,57(2):215-223.
- [11] 郑亮. 含Ta低Cr高W铸造镍基高温合金中 α 相的形成与转变 [J]. 中国有色金属学报, 2005(10): 90-95.
- [12] 张小丽,冯丽,杨彦红,等. 二次枝晶取向对镍基高温合金晶粒竞争生长行为的影响 [J]. 金属学报,2020,56(7): 969–978.

[13] 钟文惠,丁鹏飞,谢维,等.型壳温度对DZ22B合金叶片枝晶组织的影响 [J]. 铸造, 2024, 73 (4): 489-497.

- [14] 沈鸿, 骆合力, 李尚平, 等. 晶粒度对Ni₃Al基MX246AG合金铸态组织及性能的影响 [J]. 铸造, 2016, 65(10): 960-962, 969.
- [15] 潘晓光,彭志江,李宝峰,等. DZ125合金枝晶与拉晶速率的关系及对蠕变性能的影响 [J]. 铸造, 2016,65(12):1224-1227.

Effetc of Microstructure on the Mechanical Properties of Cast Super Alloy K4208

FU Shan-shan¹, LING Chen², LI Shang-ping²

(1.Guiyang AECC Power Precision Casting Co., Ltd., Guiyang 550014, Guizhou, China; 2.GAONA Aero Material Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract:

This article investigates the effect of the morphology of grain structure and precipitation phase morphology on the mechanical properties and deformation mechanism in K4208 alloy. K4208 alloy has high hardness, and the fracture mechanism at room temperature and 900 °C is brittle fracture caused by α -W/Mo phase debonding and crack propagation along the grain. An increase in casting cooling rate is beneficial for obtaining finer rain size and secondary dendrite spacing and finer and more uniformly dispersed α -W/Mo phases, improving the synergistic deformation ability between the precipitate phase and the matrix, reducing stress concentration, and thereby enhancing the tensile strength of the alloy. In addition, the refinement of grain structure and the fine, uniform, and dispersed precipitation of α -W/Mo phase are also beneficial for improving the hightemperature compression resistance of the alloy.

Key words:

Ni-based supperalloy; superalloy; microstructure; tensile property; compression property