

# ZGCr17Ni4Cu3 铸造不锈钢的研制

北京航空航天大学 臧鑫士 沈纫秋

本文提出了 ZGCr17Ni4Cu3 铸造不锈钢的化学成分, 推荐成分和合理的铬、镍当量比。论述了钢的熔炼、铸造、热处理及焊接工艺。用该钢生产的发动机零件经受了长期考验, 证明该钢是成功的。

## Design and Research of ZGCr17Ni4Cu3 Casting Stainless Steel

Zang Xinshi

Shen Renqiu

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

In this paper, the recommended chemical composition and reasonable chromium-nickel equivalent ratio of ZGCr17 Ni4Cu3 casting stainless steel are proposed. The processing of melting, casting, heat treatment and welding is discussed. The long-term testing of the engine parts made of this steel shows that this steel is successful.

### 前 言

ZGCr17Ni4Cu3 钢是一种沉淀硬化马氏体铸造不锈钢, 相当于美国的 Cast17-4PH 钢。经 1040℃ 固溶处理, 480~630℃ 时效, 可以获得较好的综合力学性能。其抗腐蚀性优于 0Cr13 型不锈钢, 可与 0Cr18Ni9 型不锈钢媲美, 并有良好的铸造和焊接工艺性能。该钢属于中温高强度不锈钢, 可广泛应用于航空、航天、化工等部门。本研制任务是确定 ZGCr17Ni4Cu3 钢的化学成分范围、熔炼、铸造、热处理、焊接等工艺规范。并采用整体精密铸造法将这种钢制作某发动机的压气机轴流转子和导风轮。经过十多年的试车和飞行考验, 证明 ZGCr17Ni4Cu3 钢的化学成分和各种生产工艺规程是合理的、可靠的, 所做铸件承受了发动机各项复杂的工作条件, 满足了使用要求, 完成了国家定型试车与试飞任务。

### 一、成分控制

ZGCr17Ni4Cu3 钢的允许成分和推荐成分列于表 1。

沉淀硬化马氏体不锈钢的化学成分必须满足下列 3 个条件: ①在固溶温度必须形成以奥氏体为主, 加少量  $\delta$  铁素体的组织; ②从固溶温度冷却到室温, 奥氏体必须转变为马氏体,  $\delta$  铁素体不变; ③时效时, 基体必须产生沉淀硬化效果。前两个条件对所有马氏体强化钢是相同的, 但是对 17-4PH, 由于有少量  $\delta$  铁素体, 对成分控制更为敏感, 不适当的成分平衡会导致不希望的显微结构, 或者出现大量的  $\delta$  铁素体, 或者使奥氏体稳定化, 在室温存在马氏体、铁素体和残留奥氏体的三相结构。这两种情况均使钢的强度降低, 以致达不到技术条件要求。因此, 必须严

格控制钢中奥氏体生成元素 (C, N, Mn, Ni, Cu) 和铁素体生成元素 (Cr, Si, Nb) 含量的比例, 才能满足上述条件。

根据 Ni、C、Mn 等元素稳定奥氏体的强弱程度换算成 Ni 当量 ( $\%Ni + 30 \times \%C + 0.5 \times \%Mn$ ), 根据 Cr、Si、Nb 等元素形成铁素体的强弱程度换算成 Cr 当量 ( $\%Cr + 1.5\%Si + 0.5\%Nb$ ) 利用 Schaeffer 不锈钢组织图, 可以判断钢的组织以及马氏体和  $\delta$  铁素体的大致数量。但是, 定量的结果还需试验确定。通过大量的试验表明, 铬当量与镍当量之比在 2.7~3.0 之间比较理想。此时钢的组织为马氏体加少量  $\delta$  铁素体, 这就是表 1 中推荐成分的依据。

在 ZGCr17Ni4Cu3 中产生时效硬化的元素是铜, 它在奥氏体中有很高的溶解度 (最高达 8%), 而在铁素体中的溶解度很低 (在 700℃ 约 0.3%)。在固溶温度 (1040℃) 铜全部溶于奥氏体, 冷却时转变成马氏体, 有很高的铜过饱和度。随后的时效, 铜从基体中弥散析出, 产生明显的硬化效果。但铜的含量不宜过多, 超过 3.7% 时会产生晶界偏析, 降低钢的塑性和韧性, 还易产生焊接裂纹, 所以, 铜限定在 2.8~3.5% 之间。

碳与某些元素结合生成碳化物, 起强化作用, 但是在 ZGCr17Ni4Cu3 中起强化作用的是铜的弥散析出, 而不是碳化物。另外, 碳量增高会降低钢的韧性、耐蚀性和焊接性能, 碳又是强稳定奥氏体的元素, 所以希望碳量很低。在炉料中均有或多或少的碳, 必须限制在 0.06% 以下。

硅提高钢液的流动性, 保护铬和镍在熔化中不首先氧化。硅是强铁素体形成元素, 不宜太多, 0.5~1.0% 之间是适宜的。

表 1 ZGCr17Ni4Cu3 钢的化学成分(%)

成 分	C	Mn	Si	Ni	Cr	Nb	Cu	S	P	Fe
允许成分	<0.06	<0.7	0.5~1.0	3.6~4.6	15.5~16.7	0.15~0.40	2.8~3.5	<0.03	<0.04	余
推荐成分	<0.05	0.4~0.7	0.50~0.85	3.8~4.5	15.7~16.3	0.15~0.30	2.9~3.4	<0.02	<0.03	余

铌是强碳化物形成元素。NbC 呈细颗粒分布于基体中，而几乎不溶于奥氏体，这可减少时效时碳化物析出，使时效温度和时间有较大的自由度、可在较高温度时效，以提高钢的塑性和韧性，而不显著降低钢的强度。铌还使退火后的硬度降低，有利于机械加工，但铌不宜过高，因为它促使枝晶偏析，铌也是形成铁素体的元素，对钢的韧性不利。

铬和镍是钢的主要元素，铬保证钢的高抗蚀性，故不能低于 15.5%。镍的加入使钢保持高的强度和韧性。但是，超过 4.6% 时，出现较多的残留奥氏体。经验证明，铬取中下限，镍取中上限，可以控制  $\delta$  铁素体在 5% 以下，而无残留奥氏体，能获得满意的力学性能。所以，我们所取的化学成分也是 Cast17-4PH 的成分，但推荐的成分中，铬量低一点，镍量高一点。

钢的主要成分 Cr、Ni、Cu 必须控制在含量范围内，而非主要成分，如 Si、Mn 略微超过含量范围，只要性能合格，就定为合格件。因为该钢的化学成分是按当量计算的，只要 Cr、Ni 当量比值平衡、性能仍可合格。

## 二、熔炼和铸造

ZGCr17Ni4Cu3 钢具有良好的铸造性能，特别是钢液的流动性极好，可以浇注各种形状复杂的铸件。所研制的轴流转子毛重 35kg，直径 366mm，叶片端部只有 1.5~2mm 厚。钢液浇注于失蜡精密铸造法制得的陶瓷壳型内，可得到轮廓清晰、表面无脱碳、麻点等缺陷的铸造毛坯，经磨加工即可装机使用（图 1）。

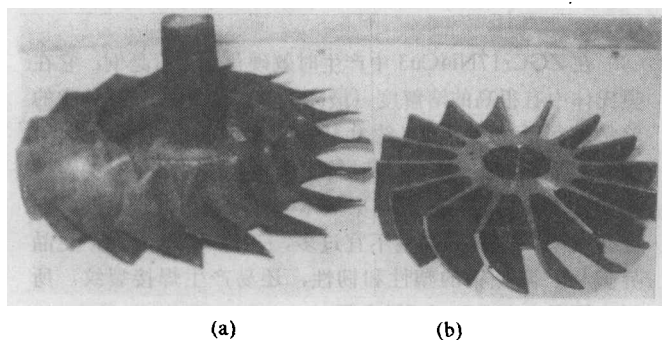


图 1 整体精铸的轴流转子(a)和导风轮(b)

用高频或中频感应炉熔炼，碱性炉衬（氧化镁和硼砂），为了保证钢的成分，需用母合金熔炼。我们的经验表明，也可不用母合金，直接用工业纯铁、纯镍、电解铜，以及 Cr-Fe、Si-Fe、Mn-Fe、Nb-Fe 中间合金。推荐的配料比列入表 2。金属熔化时用  $\text{CaO}+\text{CaF}_2$  渣料保护，用铝石灰和 Si-Ca 脱氧，出炉温度为 1680~1700℃。铝石灰用量不宜过多，因铝溶入钢中，其含量超过 0.15~0.20% 时，钢的塑性和韧性将明显下降。化学分析表明，与配料成分比较，镍量略有增高，铬量略有降低，其他元素波动很小，正好达到镍在中上限，铬在中下限的要求（表 2）。

钢液由浇口杯注入，通过筛网过滤进入陶瓷壳型。浇

表 2 推荐配料比和分析结果

元素	C	Mn	Si	Ni	Cr	Nb	Cu	Fe
推荐配料比	<0.05	0.6	0.7	4.2	16.2	0.25	3.1	余
分析结果	<0.055	0.54~0.60	0.50~0.65	4.25~4.35	15.8~16.2	0.23~0.24	2.8~3.0	余

注温度为 1570~1590℃，过高的浇注温度会产生带状和网状  $\delta$  铁素体和大晶粒。为使钢液充满型腔，轮毂和叶片端部设有排气孔。为防止成分偏析，必须充分搅拌钢液，同时，浇注速度要快，一般在 2~3 秒内完成。图 2 为轴流转子的陶瓷壳型与铸得的毛坯。

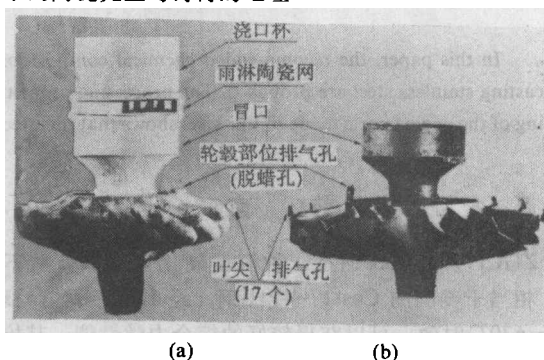
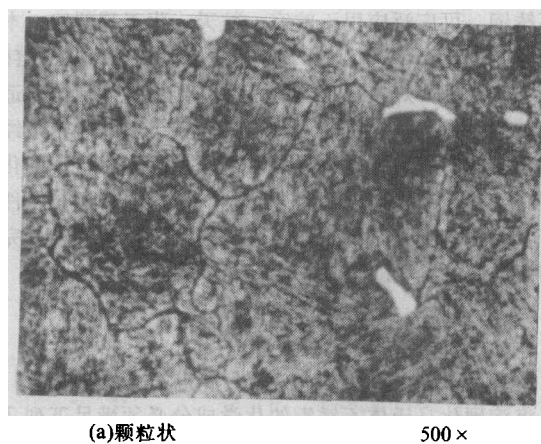
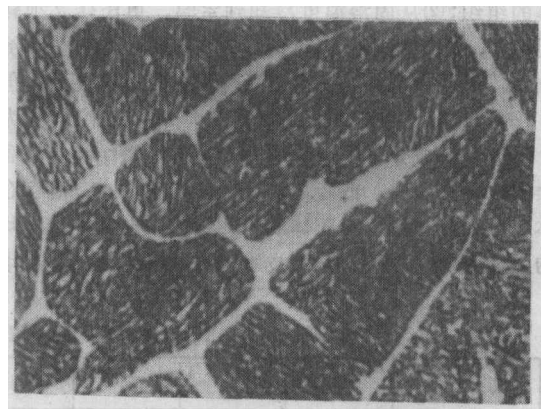


图 2 轴流转子的陶瓷壳型(a)和铸造毛坯(b)



(a)颗粒状



(b)网状

650×

图 3  $\delta$  铁素体的形态

经验证明, 较慢的凝固冷却速度较好。因为快速冷却易产生条带状和网状  $\delta$  铁素体, 显著降低钢的韧性。缓慢冷却虽然促使  $\delta$  铁素体的形成和晶粒长大, 但可以得到颗粒状  $\delta$  铁素体, 还可减少疏松, 对合金的力学性能有利, 所以, 只要合理调整合金元素的平衡, 采用较慢的冷却速度是有利的。实践中, 将陶瓷壳型装箱埋在厚 80mm 的镁砂内, 随炉加热至 950℃ 保温, 浇注时将箱取出, 将钢液注入热壳 (850℃) 中。为防止热应力, 经 20 小时后方可打箱清理。所得铸件中  $\delta$  铁素体呈颗粒状或短条状 (图 3a), 若浇注温度较高, 且凝固速度较快, 则呈网状或条带状 (图 3b)。

### 三、热处理

根据设计要求, 轴流转子和导风轮的力学性能应达到如下指标:  $\sigma_b > 930\text{MPa}$ ,  $\delta_5 > 10\%$ ,  $A_{KU} > 440\text{kJ/m}^2$ ,  $\text{HRC} = 28 \sim 34$ 。

参考有关资料, 通过试验确定的热处理规范为: 1050℃ / 4h 固溶处理 + 630℃ / 4h 时效。铸件装在密封的不锈钢箱内, 通氩气保护, 随炉加热到  $1050 \pm 10^\circ\text{C}$ , 保温 4 小时后出炉, 打开密封盖, 取出铸件空冷。采用空冷, 而不水冷, 是为了防止叶片变形和叶根处产生裂纹。固溶处理的目的是部分消除成分偏析、得到过饱和马氏体、细化晶粒, 改善  $\delta$  铁素体形态。金相观察发现, 放大 100 倍, 固溶处理后晶粒尺寸由铸态的 4~5 级变为 6~7 级。 $\delta$  铁素体的尖角变得钝化, 细长条变成断续状。这些均提高钢的韧性。

Cast17-4PH 一般需要 1150℃ 均匀化处理, 可使合金元素更充分扩散, 分布更均匀, 枝晶结构基本消除, 还减少  $\delta$  铁素体的数量、改善其形状和分布。所以均匀化处理后, 钢的塑性和韧性大有提高。但是, 由于温度太高, 铸件易氧化、脱碳, 也增加成本。对于整体精铸的轴流转子和导风轮, 会使叶片严重变形。故未进行均匀化处理。也有资料介绍只进行固溶处理, 有的资料提出在 1040℃ 双重固溶处理细化组织的方法。必须指出, 因为铜易偏析在晶界, 若不进行均匀化, 铜含量不宜太高。

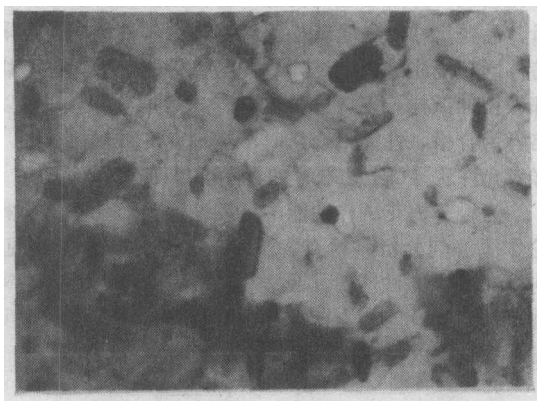
如果合金元素平衡不当, 固溶处理后存在较多的残留奥氏体时, 可以在低于 1040℃ 的温度 (例如 950~800℃, 甚至 750℃) 固溶处理。此时碳化物溶入奥氏体的量减少, 奥氏体稳定程度降低, 容易转变成马氏体, 钢的强度随之提高, 曾对轴流转子进行过 950℃ 和 750℃ 固溶处理试验, 发现, 即使不从减少残留奥氏体考虑, 只要铬镍比值恰当, 熔炼和铸造工艺正确, 采用 950℃ 固溶处理是可以满足性能要求的, 并有利于防止铸件变形。

时效规范是 630℃ / 4h, 采用如此高的时效温度是因为整体精铸的轴流转子必须有很好的韧性。在保证强度的前提下, 应尽可能提高钢的韧性。如果叶片发生断裂, 将造成整台发动机报废。因合金中的钨有抗过时效的作用, 提高时效温度明显提高钢的塑性和韧性, 而强度降低不大。

虽有资料指出, 17-4PH 加热时马氏体转变为奥氏体的开始温度为 627℃, 故时效温度不能超过 627℃, 我们

对 100 多炉的铸件进行的力学性能测试表明, 630℃ 时效完全满足性能要求, 使用中也未出现问题。

至于时效时间, 资料介绍以 1~2 小时为好, 考虑零件尺寸大, 局部截面较厚, 另一方面, 为防止氧化, 零件装在密封箱内加热, 故定为 4 小时。试验证明, 4 小时时效的性能比 2 小时好。时效过程中析出的富铜相呈颗粒状、短条状和薄片状, 弥散分布于基体, 起强化作用 (见图 4)。



150000 ×

图 4 弥散析出的富铜相(620℃ / 4h)

### 四、焊 接

ZGCr17Ni4Cu3 钢的焊接性能是好的, 虽然是马氏体型不锈钢, 其焊接性能却类似镍铬奥氏体不锈钢。可用电弧、电阻法焊接, 热处理后其力学性能可达到基体的水平。

为进行焊接试验, 将 ZGCr17Ni4Cu3 浇注成 5mm × 15mm × 25mm 的平板两块, 经 1050℃ 固溶处理和 630℃ 时效, 以获得较高的塑性和韧性, 防止焊接裂纹。经机加工去掉氧化皮。再用同炉料浇注平板一块, 加工成焊条。利用氩弧焊将两块平板对焊, 经 X 光探伤确认无缺陷后, 进行最终热处理, 加工成拉伸试样, 焊缝在试样中间。与未焊接试样一起进行拉伸试验。发现焊接与未焊接试样的拉伸性能基本相同, 而且均断裂在基体, 而不在焊缝和过渡区。

另外, 用对焊和点焊法制成的试样进行了疲劳试验。点焊法是在试棒上钻一小孔, 进行补焊, 热处理后加工成疲劳试样, 同样与未焊接试棒进行对比试验。结果表明, 焊接处的疲劳强度不低于基体, 甚至高于基体, 因为断裂并未发生在试样高应力区的焊缝处, 而发生在基体。

金相观察发现, 基体中的  $\delta$  铁素体为 6~10%, 过渡区中为 3~5%, 焊缝区未见  $\delta$  铁素体。基体、过渡区、焊缝区的硬度分别为: HRC28、29、31。这就是未断裂在焊缝和过渡区的原因。铁素体量减少是由于焊接时铬易烧损, 而镍不易烧损的缘故。所以, 为使焊缝区和基体的显微组织基本一致, 焊条的含铬量应在成分上限为宜。曾对轴流转子的叶片进行过补焊, 在试车和使用中均正常, 使废品变为成品。

## 五、检 验

常规的检验有化学分析, X 光探伤, 表面着色探伤, 金相检验和力学性能测定等。如前所述, 该钢的化学成分可以以一种成分补偿另一种成分, 只要铬镍当量保持平衡, 性能仍可合格。所以, 非主要元素, 如 Si、Mn 略有不足或过多, 均不作报废论, 而 Cr、Ni 和 Cu 的含量必须严格控制。X 光探伤时, 由于转子和导风轮的叶片取向, 使某些部位是 X 光的盲区。因此, 铸件加工后应作第二次 X 光检查, 并用着色法复查。金相检验主要检查  $\delta$  铁素体量、晶粒尺寸和显微疏松等缺陷。力学性能测定是采用与铸件同炉浇注的梅花试棒, 并与铸件同炉热处理, 切取上部做拉伸试样, 下部做冲击试样。各取 3 根, 2 根以上合格者为合格, 性能不合格时, 零件允许重复热处理, 无试样者允许从冒口上切取, 如再不合格即报废。

为检验梅花试棒性能的可靠性, 曾对轴流转子和导风轮作了解剖分析, 检查各部位的性能, 取样部位见图 5, 与梅花试棒的性能对比见表 3。从表中可以看出, 铸件与梅花试棒的性能相近, 叶片的性能还优于试样, 说明梅花试棒完全可以作为铸件的性能依据。

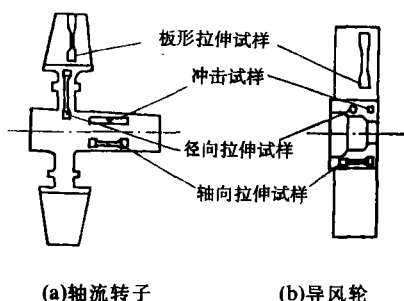


图 5 解剖取样部位

表 3 解剖铸件与梅花试棒的性能对比

性 能		$\sigma_b$ MPa	$\sigma_{0.2}$ MPa	$\delta_5$ %	$A_{KU}$ kJ/m <sup>2</sup>
梅花试棒		964	870	14.9	657
导风轮	叶片	963	—	18.5	—
	轴部	945	—	13.6	—
	轮毂	963	—	16.0	745
轴流转子	叶片	1016	—	16.0	627
	轴部	973	838	—	—
	轮毂	943	821	15.8	559
技术条件		>930	—	>10	>440

## 六、结 论

1. ZGCr17Ni4Cu3 钢的化学成分同 Cast17-4PH, 为保证合理的组织结构和可靠的力学性能, 提出推荐成分。实践中应保持铬当量和镍当量比值在 2.7~3.0 之间, 或铬取中下限, 镍取中上限。

2. 钢在铸态中有少量  $\delta$  铁素体, 对钢的性能起决定的影响, 而且基本不受热处理的影响。 $\delta$  铁素体量应小于 8%, 以块状分布为佳。不当的成分平衡、过高的浇注温度和较快的凝固冷却速度, 会使  $\delta$  铁素体呈网状、条带状

或树枝状分布, 严重影响钢的韧性。

3. 钢的热处理规范为 1050℃ 固溶处理, 480~630℃ 之间时效。性能不合格时可作一次重复热处理; 发现铜等元素偏析、或  $\delta$  铁素体呈不利形态时, 可作 1150℃ 均匀化处理; 出现过氧残留奥氏体时, 可作 -74℃ 冰冻处理。

4. 钢的铸造性能良好, 可精铸形状复杂、厚度不等的铸件, 合金元素烧损少, 表面光洁。

5. 该钢可以焊接, 用同材质焊条, 不用预热, 氩弧焊接产生裂纹的倾向小, 焊缝性能达到基体水平, 可对铸件进行补焊。

6. 梅花试棒的性能可作为铸件验收的根据。

注: 参加本研制工作的还有许昌淦、方建、孙玉香、吴述龙等同志。

## 快速压实工艺 CERACON

Ti<sub>3</sub>Al、TiAl 和 NbAl 等金属间化合物是很有希望的高温材料, 是目前重点研究领域之一。已采用热等静压和热压工艺压实这些金属间化合物粉末, 并取得较好结果。但在这两种工艺中, 材料在高温滞留时间长, 易导致原有粉末的快速凝固组织发生相变, 并使晶粒长大。最新发展的快速压实工艺 CERACON (CERAmic CON solidation) 克服了这些缺点, 已用于压实金属间化合物粉末。

与热等静压工艺不同, CERACON 工艺以粒状陶瓷材料作为压力传递介质。待压实材料的预形件预热, 然后浸入灼热的陶瓷压力传递介质中。金属间化合物这类活性金属预形件应有包套。通过压力传递介质向预形件加高达 1241MPa 的压力, 时间为 30~60s。施加在压力传递介质床上的单向压力作为准静压传递到预形件上。整个压实过程非常迅速, 只有 30~60s。然后卸压, 取出零件, 清除零件上的压力介质。快速取出零件, 易于控制被压实零件的冷却。

CERACON 工艺的主要优点是压实压力高, 因而降低被压实材料经受的温度 (与热等静压和热压相比), 缩短在该温度下的滞留时间。这样, 既保持快速凝固组织, 又得到完全致密组织的材料。铝化物与韧性相之间, 金属间化合物基体与强化相之间的界面反应也可减到最小或被消除。CERACON 工艺的主要参数有: 零件温度, 压力介质温度, 施加的压力, 应变速率, 预热时间和温度, 保温时间等。

已用 CERACON 工艺试验压实多种金属间化合物。例如由等离子旋转电极制成的 Ti-34%Al (重量) 快速凝固粉末, 把这种粉末装入压模, 在氩气氛的电阻炉中加热 30min 到 1200~1300℃ 的温度, 压力传递介质温度应高于这个温度 100℃ 左右, 然后用 1241MPa 的压力加压 45s, 结果得到完全致密的微观组织。

除用于金属间铝化合物以外, NASA Lewis 研究中心还把 CERACON 工艺用于压实熔炼纺丝法制取的 Nb 基金属间化合物颗粒, 他们的研究表明: 这种快速压实工艺也适用于金属间化合物复合材料, 机械合金化金属间化合物, 反应烧结化合物, 高温硅化物等。

(张峰摘译)