

第六章 耐热钢和铁基高温合金

耐热钢和高温合金是指在高温下工作并具有一定强度和抗氧化、耐腐蚀能力的金属材料。

对蒸汽轮机和锅炉来讲，在本世纪 30~40 年代蒸汽温度不过 400~450℃，蒸汽压力不过近 100 大气压，而现在蒸汽温度已达 650℃，蒸汽压力也高达 340 大气压以上，因此所使用的金属材料也从低碳钢发展到复杂的各类合金钢。

耐热钢按合金元素多少通常可以分为两类：一类是在低合金结构钢基础上发展起来的低合金珠光体型热强钢，另一类是在不锈钢基础上发展起来的高合金专用耐热钢。专用耐热钢按对使用性能的要求可以分为热强钢和热稳定钢。热强钢是指在高温下有一定抗氧化能力并具有足够强度而不产生大量变形或断裂的钢种，如高温螺栓、涡轮叶片等。它们工作时要求承受较大的载荷，失效的主要原因是高温下强度不够。热强钢广泛用于制造锅炉管道、紧固件、汽轮机转子、叶片、排气阀等。热稳定钢是指在高温下抗氧化或抗高温介质腐蚀而不破坏的钢种，如炉底、炉栅等。它们工作时的主要失效形式是高温氧化，而单位面积上承受的载荷并不大。故又称抗氧化钢。热稳定钢广泛用于工业炉中的构件、炉底板、马弗罐、料架、辐射管等。按组织的晶体结构特征可以分为奥氏体型、铁素体型、马氏体型和沉淀硬化型四类，其中奥氏体型、铁素体型钢大都用于要求抗氧化性较高的场合，马氏体型和沉淀硬化型钢则多用于要求高温强度较高的场合。

现代航空工业的发展出现了超音速飞机，其发动机的工作温度高达 1200℃，从而，出现了各类镍基、钴基合金。由此可见，根据工程结构的要求不同，耐热钢和高温合金的使用温度范围是十分宽广的，从几百度到千度以上。一般来讲，耐热钢和高温合金工作温度是指该金属或合金的 $(0.3\sim0.5) T_{\text{熔点}}^{\circ}\text{C}$ 以上的温度。

高温合金根据成分、组织和成型工艺不同，有不同分类方法。按基体元素分类，以铁为主，加入的合金元素总量超过 50% 的铁基合金称为铁基高温合金；以镍为主或以钴为主的合金分别称为镍基或钴基高温合金。按制备工艺分类，有变形高温合金，铸造高温合金和粉末冶金高温合金。按强化方式分类，有固溶强化型、沉淀强化型、金属间化合物、氧化物弥散强化型和纤维强化型等。铁基、钴基和镍基合金的使用温度一般不超过 1000℃，温度再高就必须选用难熔金属（指熔点高于 1650℃ 的金属）或其合金了。本章主要讲述耐热钢和铁基高温合金。

必须指出的是，由于珠光体型热强钢、马氏体型热强钢在加热和冷却时会发生相变，所以要进一步提高使用温度受到限制。由于它们在中温下有较好的热强性、热稳定性及工艺性能，线膨胀系数小，含碳量也较低，价格低廉，广泛应用于制造锅炉、汽轮机及石油提炼设备等，是适宜在 600℃~650℃ 以下温度使用的热强钢。更高温度下则须使用奥氏体型热强钢。也就是说一种钢可以兼有多种用途。

第一节 珠光体型热强钢

这类钢是合金结构钢中的一部分钢种，其特点是碳含量较低，工艺性、导热性好，热处理工艺简单，价格便宜。同时，使用少量的合金元素固溶强化和改善 Fe_2O_3 氧化膜的稳定性；使这类钢经适当合金化后就成为 500℃~620℃ 以下良好的热强钢。珠光体型热强钢按碳含量和应用特点又可分为低碳珠光体热强钢和中碳珠光体热强钢。

一、低碳珠光体型热强钢 这类钢对应于普通低合金高强度结构钢，要求有制管、焊管、冷弯等良好工艺性能。由于这类钢主要用于制作锅炉钢管，对于锅炉钢管来说，管内是具有一定压力的过热蒸汽，外壁接触火焰。因此要求 500℃~600℃左右的高温持久强度和一定的抗氧化性。可见，低碳钢稍加合金化即能符合这些要求。经过多年来的研究和工业实践，形成了一些典型钢种，如 12Cr1MoV 和 12Cr2MoWSiVTiB 等，其中 12Cr1MoV 用于 540℃的导管或 580℃的过热蒸汽管，而 12Cr2MoWSiVTiB 用于 600℃~620℃的过热器管。

1. 低碳珠光体型热强钢的合金化 这类钢的成分设计主要包括：

(1) 低碳，即这类钢的碳含量一般为 0.08%~0.20%。低碳一方面不仅可使钢基体组织保持有大量的铁素体，利用铁素体的高熔点和组织稳定性的特点获得良好的耐热性；而且使钢中碳化物数量相对较少，钢中的珠光体不易发生球化，珠光体中的渗碳体也不易发生石墨化，这有利于组织稳定。另一方面，低碳还使钢具有良好的加工工艺性能（如容易轧制、穿管、拉拔、延伸、焊接、冷弯等）。

(2) 这类钢实现固溶强化的主加合金元素是铬和钼，辅加元素是 V、Ti、Nb、W 等。我们知道提高钢的热强性的途径有固溶强化和第二相强化，对于低碳珠光体型热强钢，固溶强化即加入合金元素固溶强化铁素体基体（包括珠光体和索氏体中的铁素体），以提高钢的热强性和再结晶温度；第二相强化即利用合金元素形成第二相并强化第二相，如加入合金元素形成一定数量的碳化物，并通过合金化稳定碳化物，使形成的碳化物不仅在高温下不易球化，不易石墨化，而且在 400℃~620℃形成弥散分布的、稳定性高的、不易聚集长大的碳化物，保持弥散强化作用。

主加元素铬和钼是铁素体基体的最有效的强化元素，使这类钢的热强性大为提高。但仅经过铬和钼固溶强化的铁素体在工作温度和应力的长期作用下，会缓慢地向碳化物中富集，而铁和锰等其它元素则被排挤到固溶体中去，产生合金元素在使用过程中的再分配现象，其结果将导致固溶体中的强化元素减少，热强性下降。为此钢中还需加入一定量的辅加元素，以减少合金元素的再分配趋势，如常加入的辅加元素主要有 V、Ti、Nb 等，这些合金元素与碳形成稳定的碳化物，使铬和钼等的固溶强化元素难以发生向碳化物转移的再分配现象，从而保持固溶体的强化特性。必须指出的是，还可以采用复合固溶强化，比如在钢中同时加入钼、钨、铬等合金元素，利用这些元素的复合作用，不仅提高了固溶体中的原子间结合力，而且还使扩散困难，阻碍合金元素发生再分配。

对于第二相强化，合金化的主要目的不仅是获得一定数量的强碳化物相，更重要的是阻止珠光体的球化和碳化物的聚集，阻止钢中的 C 发生石墨化，保证并促进碳化物弥散强化。

我们知道，珠光体球化及碳化物的聚集长大，在普通钢中需要经过球化退火等热处理时才会出现，但在珠光体耐热钢中，由于温度和应力的长期作用，片状珠光体转变为球状并聚集长大是降低表面自由能的自发过程，钢的这种组织变化将引起钢的高温强度明显降低。其中碳化物的析出和聚集长大又大多发生在晶界，严重时晶界长成连续的薄膜，使钢的持久强度和持久塑性显著降低。影响碳化物球化及聚集长大的主要因素是服役温度、时间和材料的化学成分。就化学成分而言，由于这种变化是通过 C 原子的扩散进行的，因此这种珠光体球化及碳化物的聚集长大倾向随着碳含量的增加而增加；在钢中凡是降低碳的扩散速度和增加合金碳化物稳定性（或原子结合力）的元素，如 Cr、Mo、V、Ti 等均

能阻碍或延缓珠光体球化及碳化物的聚集长大过程。

石墨化是珠光体型钢在工作温度和应力长期作用下，碳化物分解成游离石墨的过程。当石墨形成后，不但消除或降低了碳化物的第二相强化作用，而且石墨存在于钢中也割裂了基体（相当于小裂纹），使钢的强度及塑性显著下降。C、Al、Si 等是促进石墨化元素，因此这类钢冶炼时一般不用 Al 脱氧。V、Cr 等是阻碍石墨化的元素。

为了保证并促进碳化物弥散强化，这类钢中常加入 Mo、W、V、Nb、Ti 等附加合金元素，并配合适当的热处理，以获得稳定的弥散强化效果。经过热处理，在 500~750℃ 范围内析出 MeC 型或 Me₂C 型碳化物时，能产生沉淀强化效果，特别是 VC、NbC、TiC 一类的间隙碳化物，具有很高的稳定性。如果钢中 V/C 的比值符合 VC 的化学式的比例，C 和 V 几乎全部结合成 VC，可以达到最高的沉淀强化效果。这时 VC 既产生沉淀强化，又能保证 Cr、Mo 溶入 α 固溶体，从而使铁素体获得较好的强化。12Cr1MoV 钢就是在上述合金化思路下发展起来的典型的钢种。

2. 低碳珠光体型热强钢的热处理 低碳珠光体型热强钢在科学的合金化基础上还必须采取正确的热处理工艺才能获得满意的性能。由于这类钢中含有 Cr、Mo、V 等合金元素，因此显著提高了钢的淬透性，并强烈地推迟珠光体区的转变，使得这类钢在正火时可以获得大量的贝氏体组织。研究证明，合适的热处理制度可以使 Cr、Mo 保留在固溶体基体中，使 VC 均匀分布在马氏体、贝氏体的高密度位错网络上，此时强化效果可以得到充分发挥。因此，通过马氏体、贝氏体相变，细化基体嵌块结构，加上 VC 在此基体上的析出，则能得到上述的强化效果。又由于基体经过 Cr、Mo 的固溶强化，提高了基体的再结晶温度，使这种强化在高温回火时仍能保持。由此可见，只有含 Mo、W、V、Ti、Nb 等强碳化物形成元素的这类钢，马氏体和贝氏体的回火组织，才能显示这种优越性。若是 C 钢、Mn 钢，则因基体再结晶温度不高，渗碳体容易聚集长大，即使马氏体、贝氏体相变能进行，这种相变引起的强化也不能在高温下保持。

由上分析可知，这类钢一般采用正火加高温回火。正火可以得到相当数量的贝氏体组织，工艺简便，生产上容易控制。正火的温度通常选择得较高，即 980℃~1020℃，以使碳化物完全溶解并均匀分布。由于经正火处理得到的组织是不稳定的，为了保证在使用温度下组织性能稳定，一般采用高于使用温度 100℃~150℃ 的回火处理。通常回火温度为 720℃~740℃，2h~3h。但回火温度也不宜过高，以避免超过 A_{c1}，出现局部高碳奥氏体，在回火冷却时出现少量黄色的高碳马氏体块，使钢的性能变坏。

这类钢经热处理后的高温力学性能如图 6-1 所示。图中表明，以铬、钼合金化的钢种，热强性和碳钢相比有显著提高。12Cr1MoV 钢的使用温度可达 580℃。此外，我国研制的 12Cr2MoWSiVTiB(钢研 102)和 12Cr3MoVSiTiB(II11)，在 620℃ 时的 σ_{100000}^{620} 均达到 75MPa，并具有良好的焊接及冷弯性能。这种钢中除了运用 Cr、Mo、W、V、Ti 的综合固溶强化和第二相强化作用外，还用微量 B 强化晶界，并适当提高 Si 含量，增强了钢的抗氧化性能，从而使使用温度有了较大的提高。

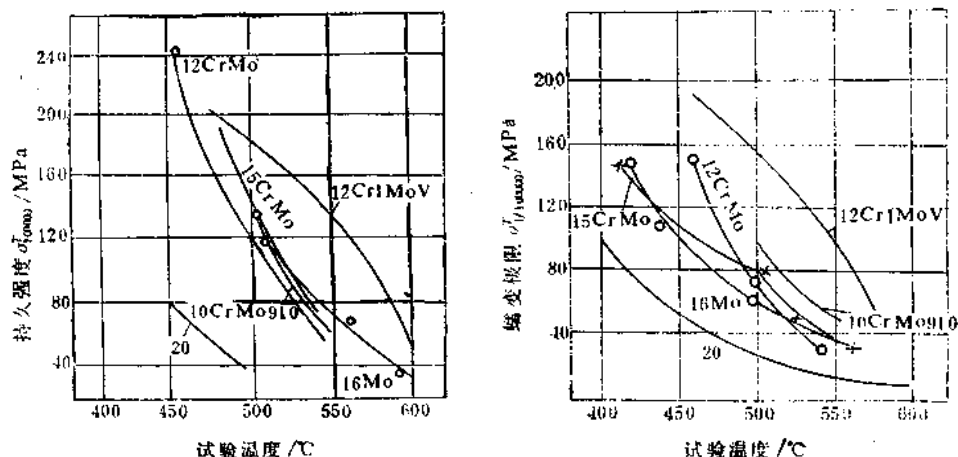


图 6-1 珠光体热强钢的持久强度和蠕变极限

二、中碳珠光体型热强钢 这类钢对应于中碳低合金调质钢，制造工艺上一般采用热锻成形，较少要求冷弯、焊接的耐热结构件。这类钢的使用温度低于过热蒸汽管道的温度，但对强度要求比低碳珠光体型耐热钢要高。因此将低碳珠光体型耐热钢中的碳含量适当提高即可满足上述的性能要求。这类钢主要用于制作汽轮机等耐热紧固件，汽轮机转子（主轴、叶轮等）。

中碳珠光体型热强钢在用于装配紧固，即紧固件时，由于处于初紧预应力状态，所以首先要求这类钢在初紧时不产生屈服，即钢在室温下应有高的屈服强度；其次，紧固件在高温和压力下工作，应能长期保持一定的预紧应力，因而要求钢有高的松弛稳定性；最后，为了保证紧固件在长期使用过程中不出现脆性断裂和氧化咬合，还要求钢有一定的持久塑性和一定的抗氧化性。

1. 中碳珠光体型热强钢的合金化 在低碳珠光体型热强钢的基础上适当地提高碳含量以提高室温下的屈服极限；增加 Cr、Mo、V 含量，促进正火后的贝氏体转变量，得到具有高的松弛稳定性的贝氏体组织。典型的钢种为 25Cr2Mo1VA。由于这种钢在螺栓的运行过程中，会发生碳化物沿晶界析出，易引起脆性断裂，因此又发展了 20Cr1Mo1VNbTiB 和 20Cr1Mo1VTiB 两个耐热紧固件钢种。这两种钢采用较低的 C 含量，进一步加入稳定碳化物的元素 Nb、Ti 等，并采用 B 强化晶界，从而使其不但具有高的持久强度，而且具有高的持久塑性，主要用于 570℃ 左右工作的紧固件上。

2. 中碳珠光体型热强钢的热处理 中碳珠光体型热强钢一般采用油淬加高温回火。和低碳珠光体型热强钢一样，回火通常要求高于使用温度 100℃ 左右。如 33Cr3WMoV 钢常采用 950℃ 油淬，640℃ 回火。需要指出的是，这类钢如用于要求良好的综合机械性能的场所（例如制造转子），还可以采用正火获得低碳贝氏体，然后再进行回火。

中碳珠光体型热强钢在用于汽轮机转子（主轴、叶轮）时，由于主轴和叶轮组成的汽轮机转子或整锻转子在过热蒸气的影响下，承受巨大的复杂应力，包括扭转应力、弯曲应力、温度梯度引起的热应力、振动的附加应力以及叶片离心力所产生的切向和径向应力等。因此要求高的沿轴向、径向均匀一致的综合机械性能，高的热强性和持久塑性以及良好的淬透性和工艺性能。由于这类钢一般不要求焊接和冷弯，因而也常选用中碳珠光体型，典型的钢种如 35Cr2MoV、33Cr3WMoV 等。显然这类钢与紧固件及管子用钢相比，除了 C

含量较高外，还具有更高的淬透性（铬含量的提高一方面可以提高淬透性，另一方面还可以提高耐热性）和更高的回火稳定性（钨、钒等的加入可以提高钢的回火稳定性，同时增加高温析出强化效应）。表 6-1 为典型的珠光体型热强钢（合金结构钢）的化学成分，表 6-2 为典型的珠光体型热强钢（合金结构钢）的力学性能、主要特性和用途举例。

表 6-1 珠光体型热强钢（合金结构钢）的化学成分（GB/T3077-1999）

牌号	化学成分/%					
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
12CrMo	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.40~0.70	0.40~0.55	-
15CrMo	0.12~0.18	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.40~0.55	-
20CrMo	0.17~0.24	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.15~0.25	-
30CrMo	0.26~0.34	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.15~0.25	-
30CrMoA	0.26~0.33	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.15~0.25	-
35CrMo	0.32~0.40	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.15~0.25	-
42CrMo	0.38~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	0.90~1.20	0.15~0.25	-
12CrMoV	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.30~0.60	0.25~0.35	0.15~0.30
35CrMoV	0.30~0.38	0.17~0.37	0.40~0.70	1.00~1.30	0.20~0.30	0.10~0.20
12Cr1MoV	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.90~1.20	0.25~0.35	0.15~0.30
25Cr2MoVA	0.22~0.29	0.17~0.37	0.40~0.70	1.50~1.80	0.25~0.35	0.15~0.30
25Cr2Mo1VA	0.22~0.29	0.17~0.37	0.50~0.80	2.10~2.50	0.90~1.10	0.30~0.50

表 6-2 典型的珠光体型热强钢（合金结构钢）的力学性能、主要特性和用途举例（GB/T3077-1999）

牌号	试样 毛坯尺寸 /mm	热处理				力学性能					钢材退火或 高温回火供应 状态布氏硬度 HB100/3000 不大于	主要特性	用途举例
		淬火		回火		抗拉 强度 σ_b /MPa	屈服 点 σ_s /MPa	断后 伸长 率 δ_5 /%	断面 收缩 率 ψ /%	冲击吸 收功 A_{ku2} /J			
		淬火 加热 温度/ ℃	冷 却 剂	加热 温度 /℃	冷 却 剂								
						不小于							
12CrMo	30	900	空	650	空	410	265	24	60	110	179	具有一定的热强性和稳定性，且无热脆性和石墨化敏感性。冷变形塑性良好	用于锅炉及汽轮机制造蒸汽参数达 510℃的主汽管，540℃以下的过热器管及相应的锻件，也可在淬火回火状态下使用，制作高温下工作的各种弹性元件
15CrMo	30	900	空	650	空	440	295	22	60	94	179	与 12CrMo 钢相比，具有更高的强度，但韧性较低	正火及高温回火后使用。用于制造汽轮机及锅炉业蒸汽参数达 530℃的高温锅炉的过滤器，中高温蒸汽导管及联轴等，也可在淬火、回火后使用，用于制造常温下工作的重要零件
20CrMo	15	880	水、油	500	水、油	885	685	12	50	78	197	广泛使用的一种铬钼钢，淬透性较高，可切削性和冷变形性良好，并具有较好的热强性	用于锅炉及轮机制造业中作隔板、叶片、锻件、型轧材，化工工业中制作高压管及各种紧固件，机器制造业中制作较高级的渗碳零件，如齿轮、轴等
30CrMo	25	880	水、油	540	水、油	930	785	12	50	63	229	具有高的强度和韧性，淬透性较高，可切削性良好，冷变形塑性中等	在中型制造业中用于制造截面较大，在高应力条件下工作的调质零件，如轴、主轴、操纵轮、螺栓、双头螺栓、齿轮等，在化工工业中用来制造焊接结构件和高压导管，在汽轮机、锅炉制造业中用来制造 450℃以下工作的金固件，500℃以下受高压的法兰盘和螺母，尤其适于制造 300 大气压 400℃以下工作的导管
30CrMoA	15	880	油	540	水、油	930	735	12	50	71	229		
35CrMo	25	850	油	550	水、油	980	835	12	45	63	229	有很高的静力强度、冲击韧性及较高的疲劳强度；淬透性较 40Cr 钢高，在高温下有较高的蠕变强度和持久强度，长期工作温度可达 500℃。钢的低温韧性也较好	在锅炉制造业中用作工作温度在 400℃以下的螺栓，510℃以下的螺母；在化工设备中用于非腐蚀介质中工作的、工作温度在 400~500℃的厚度无缝的高压导管。也可代替 40CrNi 钢制作大截面齿轮和高负荷传动轴、汽轮发电机转子、直径小于 500 的支承轴等
42CrMo	25	850	油	560	水、油	1080	930	12	45	63	217	特性和 35CrMo 钢相近，但强度和淬透性较高	用于制造较 35CrMo 钢强度更高或调质断面更大的锻件，如机车牵引用的大齿轮、增压器传动齿轮、发动机汽缸、受负荷极大的连杆及弹簧夹等类似零件
12CrMoV	30	970	空	750	空	440	225	22	50	78	241	在高温长期使用时有高的组织稳定性和热强性，冷变形塑性高，可切削性好	用于轮机中制作蒸汽参数达 540℃的主汽管道，转向导叶环、隔板外环，以及管壁温度小于 570℃的各种过热器管、导管和相应的锻件
35CrMoV	25	900	油	630	水、油	1080	930	10	50	71	241	有较高的强度，较好的淬透性，热处理时有轻微的回火脆性，冷变形塑性低，焊接性差	用来制造在高应力下工作的重要零件，如长期在 500~520℃下工作的汽轮机叶轮，高级涡轮鼓风机和压缩机的转子，盖盘、轴盘，功率不大的发电机轴，以及强力发动机的零件等
12Cr1MoV	30	970	空	750	空	490	245	22	50	71	179	具有较高的强度和足够的热稳定性，冷加工性和焊接性良好，焊后需进行局部去应力退火	用于制造高压设备中工作温度不超过 580℃的过热器管和联箱管道及相应的锻件
25Cr2MoVA	25	900	油	640	空	930	785	14	55	63	241	室温下强度和韧性均较高，淬透性较好。在小于 500℃时具有良好的高温性能与松弛稳定性	用于制造汽轮机整体转子，套筒，主汽阀、调节阀、蒸汽参数达 535℃、受热在 550℃的螺母及受热 530℃以下的螺栓和双头螺栓，以及其他在 510℃以下的紧固连接件，此外还可用作氮化钢，制作阀齿轮等
25Cr2Mo1VA	25	1040	空	700	空	735	590	16	50	47	241	与 25Cr2MoVA 钢相比，具有更高的高温强度和耐热性	用于制造汽轮机蒸汽参数达 560℃的前气缸，阀杆螺栓以及其他紧固件

第二节 马氏体型热强钢

一、汽轮机叶片用钢

汽轮机叶片工作温度在 450℃~620℃ 范围内，和锅炉管工作温度相近，但要求更高的蠕变强度、耐蚀性和耐腐蚀磨损性能。因此珠光体型热强钢难以适应这些要求。必须选用马氏体型热强钢。最早使用的是 Cr13 型马氏体不锈钢。Cr13 型马氏体不锈钢经过热处理后，在大气、蒸气中具有较高的机械性能和良好的耐蚀性。Cr13 型马氏体热强钢的热处理工艺通常采用 1000℃~1150℃ 油淬，650℃~750℃ 高温回火，得到回火屈氏体和回火索氏体组织，以保证在使用温度下组织和性能的稳定。它们常用于制造使用温度低于 580℃ 的汽轮机和燃气轮机的叶片。如前级叶片温度较高，可选用 1Cr13；后级温度略低，冲刷磨损增加，故选用 2Cr13。由于 Cr13 型马氏体热强钢中的碳化物大都是铬的碳化物，弥散强化效果较差，而且在高温和应力的长期作用下，铬的碳化物的稳定性也较低。为此，通过进一步提高这类钢的合金化程度以提高其热强性。如向这类钢中再添加 Mo、W、V、Nb、Ti、B 等发展了一些新型马氏体型热强钢。添加 Mo、W 可以使钢中的两种主要碳化物 Cr₂₃C₆、Cr₇C₃ 变为 (Cr,Mo,W,Fe)₂₃C₆，产生一定的弥散强化作用，同时添加的 Mo 和 W 溶入固溶体，可以有效地提高固溶强化效果；添加 V、Nb、Ti 等更强的碳化物形成元素，则在钢中形成复合碳化物 (V,Nb,Ti)C，它比 Cr₂₃C₆ 型碳化物更加稳定，同时 V、Nb、Ti 的加入还有利于 Mo、W 进入固溶体，这就进一步提高了钢的热强性和使用温度；添加 B 则可以强化晶界，降低晶界扩散，有利于提高热强性。当然由于 Mo、W、V、Nb、Ti 都是铁素体形成元素，这些元素加入较多时容易导致在淬火时出现 δ 铁素体，对钢的蠕变强度和韧性都不利，并影响加工工艺性能。为了消除 δ 铁素体，对上述合金元素含量较多的钢种还需加入 1%Ni~2%Ni 以扩大 γ 相区，保证淬火时得到单相奥氏体组织；如将 Cr 含量降低到 12%或 11%，也可减少 δ 铁素体形成的倾向。

此外，在这类钢中还可以利用金属间化合物来沉淀强化，例如在 12%钢中加 2%~4%W，可以得到 AB₂Fe₂W 相，它有很高的稳定性，可以提高钢的高温强度。

表 6-3 汽轮机叶片用钢的牌号和化学成分（GB/T8732-1988）

类别	牌号	化学成分/%											
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V	Cu	其他
马氏体型	1Cr13	≤0.15	≤1.00	≤1.00	≤0.030	≤0.030	≤0.60	11.50~13.50	-	-	-	≤0.30	-
	1Cr12	0.10~0.15	≤0.60	≤0.60				12.00~14.00					
	2Cr13	0.16~0.24											
	1Cr12Mo	0.10~0.15	≤0.50	0.30~0.60			0.30~0.60	11.50~13.00	0.30~0.60	0.70~1.10	0.25~0.40		
	1Cr11MoV	0.11~0.18		≤0.60			≤0.60	10.00~11.50	0.50~0.70				
	1Cr12W1MoV	0.12~0.18		0.50~0.90			0.40~0.80	11.00~13.00			0.15~0.30		
	2Cr12MoV	0.18~0.23	0.50~0.90	0.30~0.80			0.30~0.50	11.00~12.50	0.80~1.20	0.25~0.35			
	2Cr12Ni1Mo1W1V	0.15~0.21		0.50~0.90			0.80~1.20	11.00~13.00	0.70~1.10	0.75~1.05	0.15~0.35	-	
	2Cr12NiMo1WV	0.20~0.25		0.50~1.00			0.50~1.00	11.00~12.50	0.90~1.25	0.90~1.25	0.20~0.30	≤0.30	
沉淀硬化型	0Cr16Ni4Cu4Nb	≤0.055	≤1.00	≤0.50	≤0.035		3.80~4.50	15.00~16.00	-	-	-	3.00~3.70	Al≤0.050 Ti≤0.050 N≤0.050 Nb+Ta0.15~0.35

注：在满足力学性能的条件下，0Cr16Ni4Cu4Nb 的 Cr 含量可达到 16.50%。

表 6-4 汽轮机叶片用马氏体型钢材或试样毛坯的热处理制度、经热处理后的力学性能（GB/T8732-1988）

牌 号	热处理/℃				力学性能					
	退 火	高温回火	调 质		$\sigma_{0.2}$ /MPa (kgf/mm ²)	σ_b /MPa (kgf/mm ²)	δ_5 /%	Ψ /%	Ak/J (kgfm/cm ²)	试样硬度 HB
			淬 火	回 火						
1Cr13	800~900 缓冷	700~770 快冷	950~1000 油	700~750 空	345 (35)	540 (55)	25	55	78 (10)	≥159
1Cr12	800~900 缓冷	700~770 快冷	980~1040 油	660~770 空	440 (45)	615 (63)	20	60	71 (9)	187~229
2Cr13	800~900 缓冷	700~770 快冷	950~1020 油	660~770 油、水、空	490 (50)	665 (68)	16	50	63 (8)	207~241
1Cr12Mo	800~900 缓冷	700~770 快冷	950~1000 油	650~710 空	550 (56)	685 (70)	18	60	78 (10)	217~248
1Cr11MoV	800~900 缓冷	700~770 快冷	1000~1050 空、油	700~750 空	490 (50)	685 (70)	16	55	47 (6)	269~302*
1Cr12W1MoV	800~900 缓冷	700~770 快冷	1000~1050 油	680~740 空	590 (60)	735 (75)	15	45	47 (6)	269~302
2Cr12MoV	880~930 缓冷	750~770 快冷	1020~1070 油	680~740 空	600 (61)		15	50	47 (6)	241~285
2Cr12Ni1Mo1W1V	800~900 缓冷	700~770 快冷	1020~1060 油	660~720 空	735 (75)	880 (90)	14	42	47 (6)	-
2Cr12NiMo1WV	860~930 缓冷	750~770 快冷	980~1040 油	650~750 空	760 (78)	930 (95)	12	32	-	277~311

注：①表中为经调质处理后的数值。②热处理用试样毛坯尺寸为 25mm，小于 25mm 的用原尺寸钢材进行热处理。③表中所列力学性能适用于截面尺寸小于等于 60mm 的钢材。尺寸大于 60~100mm 的钢材，其伸长率和断面收缩率允许较表中的规定值分别降低 1%和 5%。当冲击功小于 63J（8kgfm/cm²）时，允许降低 4J（0.5kgfm/cm²），当冲击功大于 63J（8kgfm/cm²）时，允许降低 8J（1kgfm/cm²）。截面尺寸大于 100mm 的钢材，力学性能可在 90~100mm 的熔检坯上检验，其伸长率和断面收缩率同样允许按上述规定降低。④冲击试验除 1Cr12Mo 用 V 型缺口试样外，其余均按 U 型缺口试样进行。⑤经国家技术监督局 1991 年 6 月 4 日技监国标发（1991）125 号文件批准，自 1991 年 8 月 1 日起将 1Cr11MoV 钢的热处理后的试样硬度由 HB269~302 改为 HB207~248。将修改后的水平等级标记为 GB8732-1988I。

表 6-5 0Cr16Ni4Cu4Nb 沉淀硬化型汽轮机叶片用钢的热处理工艺制度、经热处理后的力学性能和硬度（GB/T8732-1988）

热处理 种类	热处理工艺制度				力学性能				试样硬度
	回火	固溶	第一种 时效方式	第一种 时效方式	$\sigma_{0.2}$ /MPa (kgf/mm ²)	σ_b /MPa (kgf/mm ²)	δ_5 /%	ψ /%	HB
							不小于		
I	600~700℃	1020~1060℃ 1h 空冷*	650±5℃ 4 h 空冷	-	590~755 (60~77)	≥890 (≥91)	16	55	262~302
II	600~700℃	1020~1060℃ 1h 空冷*	820±5℃ 0.6 h 空冷*	570±5℃ 3 h 空冷*	890~980 (91~100)	950~1020 (97~104)	16	55	293~321
III	600~700℃	1020~1060℃ 1h 空冷*	820±5℃ 0.5 h 空冷*	610±5℃ 5 h 空冷*	755~890 (77~91)	890~1030 (91~98)	16	55	277~311

注：空冷速度不小于 14℃/min。

二、马氏体型耐热钢

虽然上述介绍的马氏体热强钢有较好的综合机械性能，可以满足叶片使用的要求。但因 C 含量较低，强度和耐磨性不够高，耐蚀抗氧化性也不够高，耐热温度也稍低，不能满足内燃机排气阀使用的要求。因为内燃机的进气阀虽然在 300℃~400℃下工作，但排气阀的阀端处在燃烧室中，工作温度常为 700℃~850℃，且燃气中又常含有 V₂O₃、Na₂O、SO₂ 等成分，为了防止“爆震”，在燃油中还常加乙基铅等防爆剂，故燃气中又有 PbO 的成分，这些成分都会对阀门产生严重的高温腐蚀和氧化腐蚀。阀门的高速运动和频繁的起动还使阀门受机械疲劳和热疲劳，阀门对冲刷的燃气和阀门座的相对运动，还使阀门受冲刷腐蚀磨损以及摩擦磨损。因此叶片用马氏体热强钢显然不能满足排气阀的使用要求，也就是说

阀门用钢应有更高的热强性、硬度、韧性、高温下的抗氧化性、耐腐蚀性以及高温下的组织稳定性和良好的工艺性能等。

因为进气阀的工作温度较低，一般可采用 40Cr、38CrSi 钢。对排气阀用马氏体热强钢应具有更高的 C 含量，更高的 Cr、Si 等抗氧化和提高耐热性的合金元素。因此发展了 4Cr9Si2、4Cr10Si2Mo 钢。这类钢的 C 含量增高到 0.4%，以提高其综合机械性能和耐磨性；Cr、Si 的配合添加，还可提高 A_{c1} 和 A_{c3} （4Cr9Si2 的 A_{c1} 为 870℃~890℃， A_{c3} 为 950℃~970℃），提高 $Fe_2O_3 \rightarrow FeO$ 的相变温度，从而提高钢的抗氧化性和热强性；加 Mo 既能提高热强性，又能溶于 Cr 的碳化物中，提高其稳定性，Mo 还能降低这类钢的高温回火脆性。所有这些使得 4Cr9Si2 钢可用于 700℃，而 4Cr10Si2Mo 则可用于 750℃。4Cr9Si2 的热处理工艺常采用 1020℃~1040℃油淬，以获得马氏体和少量碳化物组织，700℃回火获得保持马氏体形貌特征的回火索氏体组织。必须指出的是，由于这类钢具有回火脆性，所以高温回火时应避开 400℃~600℃的回火脆性区，并且回火后通常采用空冷或油冷。这类钢主要用于制造汽轮机叶片和汽轮机或柴油机的排气阀等。

典型的马氏体型耐热钢的牌号和化学成分如表 6-6。

表 6-6 马氏体型耐热钢的牌号和化学成分（GB/T1221-1992，GB/T4238-1992）

牌号	化学成分/%									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	其他
1Cr12	≤0.15	≤0.50	≤1.00	≤0.035	≤0.030	1)	11.50~13.00	-	-	2)
1Cr5Mo	≤0.15	≤0.50	≤0.60	≤0.035	≤0.030	≤0.60	4.00~6.00	0.45~0.60	-	-
4Cr9Si2	0.35~0.50	2.00~3.00	≤0.70	≤0.035	≤0.030	≤0.60	8.00~10.00	-	-	-
4Cr10Si2Mo	0.35~0.45	1.90~2.60	≤0.70	≤0.035	≤0.030	≤0.60	9.00~10.50	0.70~0.90	-	-
8Cr20Si2Ni	0.75~0.85	1.75~2.25	0.20~0.60	≤0.030	≤0.030	1.15~1.65	19.00~20.50	-	-	-
1Cr11MoV	0.11~0.18	≤0.50	≤0.60	≤0.035	≤0.030	≤0.60	10.00~11.50	0.50~0.70	0.25~0.40	-
1Cr12Mo	0.10~0.15	≤0.50	0.30~0.50	≤0.035	≤0.030	0.30~0.60	11.50~13.00	0.30~0.60	-	2)
2Cr12MoVNbN	0.15~0.20	≤0.50	0.50~1.00	≤0.035	≤0.030	1)	10.00~13.00	0.30~0.90	0.10~0.40	N0.05~0.10 Nb0.20~0.60
1Cr12WMoV	0.12~0.18	≤0.50	0.50~0.90	≤0.035	≤0.030	0.40~0.80	11.00~13.00	0.50~0.70	0.18~0.30	W0.70~1.10
2Cr12NiMoWV	0.20~0.25	≤0.50	0.50~1.00	≤0.035	≤0.030	0.50~1.00	11.00~13.00	0.75~1.25	0.20~0.40	W0.70~1.25
1Cr13	≤0.15	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	1)	11.50~13.50	-	-	-
1Cr13Mo	0.08~0.18	≤0.60	≤1.00	≤0.035	≤0.030	1)	11.50~14.00	-	-	2)
2Cr13	0.16~0.25	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	1)	12.00~14.00	-	-	-
1Cr17Ni2	0.11~0.17	≤0.80	≤0.80	≤0.035	≤0.030	1.50~2.50	16.00~18.00	-	-	-
1Cr11Ni2W2MoV	0.10~0.16	≤0.60	≤0.60	≤0.035	≤0.030	1.40~1.80	10.50~12.00	0.35~0.50	0.18~0.30	W1.50~2.00

注：①允许含有≤0.60% Ni。②允许含有≤0.30% Cu。

我国还研制了无 Cr、Ni 的奥氏体阀门钢 6Mn18Al15MoV，可代替 4Cr10Si2Mo 和 4Cr14Ni14W2Mo 钢，但 6Mn18Al15MoV 钢的工艺性能稍差，并存在 σ 相脆化等问题。

表 6-7 马氏体型耐热钢棒的热处理制度、力学性能、特性及用途（GB/T1221-1992，GB/T4238-1992）

牌号	热处理			退火后的 硬度 HB	经淬回火的力学性能						特性及用途
					拉伸试验				冲击 试验	硬度 试验	
	退火/℃	淬火/℃	回火/℃		$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	Ψ /%	Ak/J	HB	
					不小于						
1Cr5Mo	-	900~950 油冷	600~700 空冷	≤200	390	590	18	-	-	-	能抗石油裂化过程中产生的腐蚀。作再热蒸汽管、石油裂解管、锅炉吊架、蒸汽轮机汽缸衬套、泵的零件、阀、活塞杆、高压加氢设备部件、紧固件
4Cr9Si2	-	1020~1040 油冷	700~780 油冷	≤269	590	885	19	50	-	-	有较高的热强性。作内燃机进气阀、轻负荷发动机的排气阀
4Cr10Si2Mo	-	1010~1040 油冷	120~160 空冷	≤269	685	885	10	35	-	-	有较高的热强性。作内燃机进气阀、轻负荷发动机的排气阀
8Cr20Si2Ni	800~900 缓冷或约 720 空冷	1030~1080 油冷	100~800 快冷	≤321	685	885	10	15	8	≥262	作耐磨性为主的吸气、排气阀、阀座
1Cr11MoV	-	1050~1100 油冷	720~740 空冷	≤200	490	685	16	55	47	-	有较高的热强性、良好的减震性及组织稳定性。用于透平叶片及导向叶片
1Cr12Mo	800~900 缓冷或约 750 空冷	950~1000 油冷	700~750 快冷	≤255	550	685	18	60	78	217~248	作汽轮机叶片
2Cr12MoVNBn	850~950 缓冷	1100~1170 油冷	600 以上空冷	≤269	685	835	15	30	-	≤321	作汽轮机叶片、盘、叶轮轴、螺栓
1Cr12WMoV	-	1000~1050 油冷	680~700 空冷	-	585	735	15	45	47	-	有较高的热强性、良好的减震性及组织稳定性。用于透平叶片、紧固件、转子及轮盘
2Cr12NiMoWV	830~900 缓冷	1020~1070 油冷	600 以上空冷	≤269	735	885	10	25	-	≤341	作高温结构部件、汽轮机叶片、盘、叶轮轴、螺栓
1Cr13	800~900 缓冷或约 750 空冷	950~1000 油冷	700~750 快冷	≤200	345	540	25	55	78	≥	作 800℃ 以下耐氧化部件
1Cr13Mo	800~900 缓冷或约 750 空冷	970~1000 油冷	650~750 快冷	≤200	490	685	20	60	78	≥	作汽轮机叶片、高温、高压蒸汽用机械部件
2Cr13	800~900 缓冷或约 750 空冷	920~980 油冷	600~750 快冷	≤223	440	635	20	50	63	≥192	淬火状态下硬度高，耐蚀性良好。作汽轮机叶片
1Cr17Ni2	-	950~1050 油冷	275~350 空冷	≤285	-	1080	10	-	39	-	作具有较高程度的耐硝酸及有机酸腐蚀的零件、容器和设备
1Cr11Ni2W2MoV	-	1000~1020 正火 1000~1020 油冷 或空冷	660~710 油冷 或空冷	≤269	735	885	15	55	71	269~321	具有良好的韧性和抗氧化性能。在淡水和湿空气中有较好的耐蚀性
		1000~1020 正火 1000~1020 油冷 或空冷	540~600 油冷 或空冷		885	1080	12	50	55	311~388	

注：马氏体型钢棒采用 750℃ 左右回火时，其硬度由双方协议规定。

表 6-1 典型的珠光体型热强钢（锅炉管钢与汽轮机叶轮、转子、紧固件用钢）

类别	钢号	化学成分 (%)							热处理	力学性能 (不小于)					用途举例
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	其它		σ_b (MPa)	σ_s (MPa)	δ_5 (%)	Ψ (%)	α_k (J·cm ⁻²)	
低 碳 珠 光 体 热 强 钢	16Mo	0.13~0.19	0.17~0.37	0.40~0.70		0.40~0.55			880℃空冷, 630℃空冷	400	250	25	60	120	管壁温度<450℃
	12CrMo	≤0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.40~0.60	0.40~0.55			900℃空冷, 650℃空冷	420	270	24	60	140	管壁温度<510℃
	15CrMo	0.12~0.18	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.40~0.55			900℃空冷, 650℃空冷	450	300	22	60	120	管壁温度<560℃
	12CrMoV	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.40~0.60	0.25~0.35	0.15~0.30		970℃空冷, 750℃空冷	450	230	22	50	100	
	12Cr1MoV	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.90~1.20	0.25~0.35	0.15~0.30		970℃空冷, 750℃空冷	500	250	22	50	90	管壁温度<570℃~580℃
	10CrMo910(德)	≤0.15	≤0.5	0.40~0.60	2.0~2.5	0.90~1.1									管壁温度<565℃
	15CrMoV	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.90~1.20	1.0~1.2	0.15~0.25								蒸汽参数到 580℃的主汽管
	12MoWVBRE	0.08~0.15	0.60~0.90	0.40~0.70		0.45~0.65	0.35~0.55	W0.15~0.30 Ti0.06B0.07 RE0.15	1000℃空冷, 760℃空冷	650	510	21	71	100	管壁温度<580℃
中 碳 珠 光 体 热 强 钢	12Cr2MoWSiVTiB (钢研 102)	0.08~0.15	0.46~0.75	0.45~0.65	1.6~2.1	0.5~0.6	0.28~0.42	W0.30~0.50 Ti0.06~0.12 B0.008	1205℃空冷, 770℃空冷	600	450	18	60	100	管壁温度<600℃~620℃
	12Cr3MoVSiTb(Π11)	0.09~0.15	0.60~0.90	0.50~0.80	2.5~3.0	1.0~1.2	0.25~0.35	B0.005~0.011	1050℃~1090℃空冷, 720℃~790℃空冷	640	450	18			管壁温度<600℃~620℃
	24CrMoV	0.20~0.28	0.17~0.37	0.30~0.60	1.2~1.5	0.5~0.6	0.15~0.25		900℃油淬, 600℃水或油	800	600	14	50	60	450℃~500℃工作的叶轮, <525℃的紧固件
	25Cr2MoVA	0.22~0.29	0.17~0.37	0.40~0.70	1.5~1.8	0.25~0.35	0.15~0.30		900℃油淬, 620℃空冷	950	800	14	55	80	<540℃的紧固件
	25Cr2Mo1VA	0.22~0.30	0.17~0.37	0.55~0.80	2.1~2.50	0.90~1.10	0.30~0.50		1040℃空冷, 670℃空冷	750	600	16	50	60	<565℃的紧固件
	25Cr1Mo1VA(P2)	0.22~0.29	0.30~0.50	≤0.6	1.5~1.8	0.6~0.8	0.20~0.30		970℃~990℃及 930℃~950℃二次正火 680~700℃空冷	650	450	16	40	50	<535℃整锻转子
	35CrMo	0.32~0.40	0.17~0.37	0.40~0.70	0.8~1.1	0.15~0.25			850℃油淬, 560℃油或水	1000	850	12	45	80	<480℃螺栓, <510℃螺母
	35CrMoV	0.30~0.38	0.17~0.37	0.40~0.70	1.0~1.3	0.2~0.3	0.10~0.20		900℃油淬, 630℃水或油	1100	950	10	50	90	500℃~520℃工作的叶轮及整锻转子
	35Cr2MoV	0.26~0.34	0.17~0.37	0.40~0.70	2.3~2.7	0.15~0.25	0.10~0.20		860℃油淬, 600℃空冷	1250	1050	9	35	90	<535℃工作的叶轮及整锻转子
	34CrNi3MoV	0.30~0.40	0.17~0.37	0.50~0.80	1.2~1.5	0.25~0.4	0.10~0.20	Ni3~3.5	820℃~830℃ 油 淬 , 650~680℃空冷	870	750	13	40	60	≤450℃工作的叶轮及整锻转子
	20Cr1Mo1VNbTiB	0.17~0.23	0.35~0.50	0.30~0.60	0.9~1.3	0.75~1.0	0.50~0.70	Nb0.11~0.25 Ti0.05~0.14 B0.004~0.011	1050℃油淬, 700℃回火 4~6h 上贝氏体						570℃的紧固件
	20Cr1Mo1VTiB	0.17~0.23	0.35~0.50	0.30~0.60	0.9~1.3	0.75~1.0	0.45~0.65	Ti0.12~0.28 B0.004~0.011	1050℃油淬, 700℃回火 4~6h 上贝氏体						570℃的紧固件

表 6-42 典型的马氏体型热强钢（叶片钢与阀门钢）

钢号		化学成分（%）						热处理	力学性能（不小于）					用途举例	
		C	Si	Mn	Cr	Mo	其它		σ_b (MPa)	σ_s (MPa)	δ_5 (%)	Ψ (%)	α_k (J·cm ⁻²)		
叶片钢	马氏体型	1Cr13	0.08~0.15	≤0.6	≤0.6	12~14		S≤0.03, P≤0.035	1000℃~1050℃油、水 700℃~790℃油、水、空	600	420	20	60	90	460℃~480℃工作的汽轮机叶片
		2Cr13	0.16~0.24	≤0.6	≤0.6	12~14		S≤0.03, P≤0.035	1000℃~1050℃油、水 660℃~770℃油、水、空	600	450	16	55	80	460℃~480℃工作的汽轮机叶片
		15Cr11MoV	0.11~0.18	≤0.5	≤0.6	10~11.5	0.5~0.7	V0.25~0.40	1050℃~1100℃空冷 720℃~740℃空冷	700	500	16	55	60	535℃~540℃工作的汽轮机叶片
		15Cr12WMoVA		≤0.4	0.5~0.6	11~13	0.5~0.7	W0.7~1.1, Ni0.4~0.8 V0.15~0.30							550℃~580℃工作的汽轮机叶片
		Cr12WMoVNB (ЭИ993)	0.14~0.19	0.2~0.4	0.4~0.6	11~12	0.45~0.6	W0.45~0.6, Nb0.25~0.35 B0.010~0.24, V0.2~0.3	1150℃油淬, 700℃空冷	1060	800	16	56	56	<620℃工作的燃气轮机叶片
阀门钢	马氏体型	4Cr9Si2	0.35~0.50	2~3	≤0.70	8~10			1050℃油淬, 700℃油冷	900	600	20	55		<700℃工作的排气阀
		4Cr10Si2Mo (ЭИ107)	0.35~0.45	1.9~2.6	≤0.70	9~10.5	0.7~0.9	Ni≤0.5	1010℃~1040℃油冷 740℃空冷	900	700	10	35		<750℃工作的排气阀
	奥氏体型	4Cr14Ni4W2Mo (ЭИ69)	0.40~0.50	≤0.8	≤0.70	13~15	0.26~0.4	W1.75~2.25 Ni13~15	1170℃~1200℃固溶水冷, 750℃, 5h, 空冷	720	320	20	35	50	<800℃工作的排气阀
		6Mn18Al5MoV	0.65~0.70	≤0.8	18~20		0.5~0.8	Al5~5.5 V0.4~0.5	1050℃水淬, 750℃水冷						<750℃工作的排气阀 可代替 ЭИ107 及 ЭИ69
		5Cr21Mn9Ni4N (LV21-4N)	0.47~0.57	<0.25	8~10	20~22		Ni3.25~4.5 N0.38~0.5	1185℃固溶, 0.5 h, 水冷, 沉淀强化 760℃10h, 空冷	900	700	5	5	285HB	<850℃工作的排气阀
		2Cr21Ni12MnSiN (21-12N)	0.2~0.3	0.6~1.2	1.0~1.5	20~22		Ni11~13 N0.20~0.35	1100℃~1200℃水冷 650℃~750℃空冷	700		35	40	163HB	<800℃工作的大型柴油机排气阀

第三节 铁素体型、奥氏体型及沉淀硬化型耐热钢

铁素体型、奥氏体型耐热钢主要作热稳定钢使用，其中奥氏体型也可作更高温度条件下的热强钢使用。

一、铁素体型耐热钢

铁素体型耐热钢是在铁素体不锈钢的基础上进一步进行合金化而形成的钢种。具有单相铁素体组织。表面容易获得致密的、连续的保护性薄膜。根据使用温度的不同，这类钢可以分为以下三类：

(1) Cr13 型铁素体型耐热钢。这类钢主要用于使用温度在 800℃~850℃的构件。典型的钢种如 0Cr13Al、00Cr12 等。

(2) Cr18 型铁素体型耐热钢。这类钢主要用于使用温度在 1000℃左右的构件。典型的钢种如 1Cr17、1Cr19Al3 等。

(3) Cr25 型铁素体型耐热钢。这类钢主要用于使用温度在 1050℃~1100℃左右的构件。典型的钢种如 2Cr25N 等。

铁素体型耐热钢和铁素体不锈钢一样，因为无固态相变，同样有晶粒长大倾向引起的韧性下降。但抗氧化性能强，还可耐含硫气氛的腐蚀。

表 6-8 铁素体型耐热钢的牌号和化学成分（GB/T1221-1992，GB/T4238-1992）

牌号	化学成分/% ①								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	N	Al	其他
2Cr25N	≤0.20	≤1.00	≤1.50	≤0.035	≤0.030	23.00~27.00	≤0.25	-	②
0Cr13Al	≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	11.50~14.50	-	0.10~0.30	-
00Cr12	≤0.030	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	11.00~13.00	-	-	-
1Cr17	≤0.12	≤0.75	≤1.00	≤0.035	≤0.030	16.00~18.00	-	-	-
1Cr19Al3	≤0.10	≤1.50	≤1.00	≤0.035	≤0.030	17.00~21.00	-	2.00~4.00	-
0Cr11Ti	≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	10.50~11.75	-	-	Ti6×C%~0.75

注：①允许含有≤0.60% Ni。②允许含有≤0.30%Cu。

表 6-9 铁素体型耐热钢棒的热处理制度、力学性能、特性及用途（GB/T1221-1992，GB/T4238-1992）

牌 号	热 处 理 /℃	拉 伸 试 验				硬 度 试 验	特 性 及 用 途
		$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%	HB	
		不小于					
2Cr25N	退火 780~880 快冷	275	510	20	40	≤201	耐高温腐蚀性强，1082℃以下不产生易剥落的氧化皮，用于燃烧室
0Cr13Al	退火 780~830 空冷或缓冷	177	410	20	60	≥183	由于冷却硬化少，作燃气透平压缩机叶片、退火箱、淬火台架
00Cr12	退火 700~820 空冷或缓冷	196	365	22	60	≥183	耐高温氧化，作要求焊接的部件，汽车排气阀净化装置、锅炉燃烧室、喷嘴
1Cr17	退火 780~850 空冷或缓冷	205	450	22	50	≥183	作 900℃以下耐氧化部件，散热器，炉用部件、油喷嘴

注：表中所列数值仅适用于尺寸小于等于 75mm 的钢棒；大于 75mm 的钢棒可改锻成 75mm 的样坯检验或由供需双方协议规定，允许力学性能降低数值。

表 6-1 典型的抗氧化钢的化学成分及用途

钢种		化学成分 (%)							用途举例
		C	Si	Mn	Cr	S(<)	P(<)	其它	
铁素体型	Cr3Si	≤0.10	1.0~1.5	≤0.70	3.0~3.5	0.030	0.035		<750℃下工作的炉用构件
	Cr6Si2Ti	≤0.15	2.0~2.5	≤0.70	5.8~6.8	0.030	0.035	Al0.08~0.15	<800℃下工作的炉用构件
	Cr11SiTi (日 SUH409)	≤0.08	1.0	1.0	10.5~11.75	0.030	0.04	6×C%~0.75	
	Cr13Si3	≤0.12	2.3~2.8	≤0.70	12.5~14.5	0.030	0.035		<800℃~1000℃下工作的炉用构件
	Cr13SiAl	0.10~0.20	1.0~1.5	≤0.70	12.0~14.0	0.030	0.035	Al1.0~1.8	<800℃~1000℃下工作的炉用构件
	Cr18Si2	≤0.12	1.9~2.4	≤1.0	17.0~19.0	0.030	0.035		<1000℃下工作的炉用构件及渗碳箱等
	Cr17Al4Si	≤0.10	1.0~1.5	≤0.70	16.5~18.5	0.030	0.035	Al3.5~4.5	<1000℃下工作的炉用构件及渗碳箱等
	Cr19Al3Si (日 SUH21)	≤0.10	1.5	1.0	17~21	0.030	0.04	Al2~4	
	Cr24Al2Si	≤0.12	0.8~1.2	≤1.0	23.0~25.0	0.030	0.035	Al1.4~2.4	~1050℃及温度波动下工作的炉用构件
	Cr25Si2	≤0.10	1.6~2.1	≤1.0	24~26	0.030	0.035		~1050℃及温度波动下工作的炉用构件
奥氏体型	Cr25SiN (日 SUH446)	≤0.20	1.0	1.5	23~27	0.030	0.04		
	Cr18Ni25Si2 (苏 3X3C)	0.3~0.4	2.0~3.0	≤1.5	17~20	0.025	0.035	Ni23~26	≤1100℃下工作的炉用构件、渗碳箱及炉内传送带等
	6Mn18Al5Si2Ti	0.6~0.7	1.7~2.2	18~20		0.030	0.06	Ti0.15~0.25 Al4.5~5.5	≤950℃下工作的炉用构件及渗碳箱等
	Cr19Mn12Si2N	0.24~0.34	1.7~2.4	11~13	18~20	0.035	0.05	N0.24~0.32	850℃~1000℃下工作的炉用构件及渗碳箱等
	Cr20Mn9Ni2Si2N	0.18~0.28	1.8~2.7	8.5~11	17~21	0.030	0.03	Ni2~3 N0.2~0.28	850℃~1050℃下工作的炉用构件可代Cr18Ni25Si2

二、奥氏体型耐热钢

我们知道珠光体、马氏体类耐热钢一般使用温度在 650℃以下，不能适用于更高的使用温度。其原因在于，无论是珠光体基体还是马氏体基体的耐热钢，其基体组织都是铁素体。我们已经知道，铁的 γ 晶型原子间结合力比 α 晶型的大，且再结晶温度高 (γ -Fe 的 $T_{再} > 800^{\circ}\text{C}$ ， α -Fe 的 $T_{再}$ 为 $450\sim 600^{\circ}\text{C}$)； γ -Fe 中铁和其它元素原子扩散系数小。这样以 γ -Fe 为基体的合金固溶体就可能在 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ 下具有好的热强性，高温和室温还有好的塑性和韧性，良好的可焊性和冷作成形性等。虽然奥氏体型钢的切削加工性较差，但由于其热强性好的优点，特别满足了提高喷气发动机推力要求高的燃气温度条件下的材料的需要。因此得到了充分的发展和广泛的应用。

1. 奥氏体型抗氧化钢

为了获得高的抗氧化性能，在奥氏体不锈钢的基础上通过进一步加入 Si、Al 抗氧化合金化而形成的奥氏体型耐热钢可以获得很高的热稳定性，如 Cr18Ni25Si2、6Mn18Al5Si2Ti 等。这类钢的使用温度不仅和 Cr25 型铁素体型热稳定钢相当，而且比铁素体型钢有更好的热强性和工艺性能。但这类钢因消耗大量 Cr、Ni 的资源，所以现已逐渐被 Fe-Al-Mn 系和 Cr-Mn-N 系热稳定钢所替代。

(1) Fe-Al-Mn 系热稳定钢 Cr、Si、Al 是有效的抗氧化合金元素。为了节约 Cr，研究发展了用 Si、Al 合金化的钢。其中 Si 的加入量超过 3%以后会引起钢的脆性，因此很难靠单独用 Si 来获得所要求的抗氧化性能；Al 在 Fe 中含量增加能使钢具有高的抗氧化性，但 Al 和 Fe 的合金是体心立方结构，高温强度很低，为了使钢具有足够高的高温强度，应使钢具有奥氏体组织，然后再对这个基体用 Al 来进行抗氧化的合金化。使钢形成奥氏体

基体的元素有 Ni、Mn、C、N 等，Ni 的资源较少，要求不用，而以 C、N 合金化的奥氏体在低温下要发生分解。因此重点选用 Mn，这样就形成了 Fe-Al-Mn 抗氧化钢的系列。

对于 Fe-Al-Mn 系列抗氧化钢，要获得抗氧化和具有高温强度（800℃~900℃）的全奥氏体，可根据 Fe-Al-Mn 三元相图在 760℃的等温截面分析设计钢的成分。由于 Mn 含量太多对抗氧化不利，所以在 γ 相区中获得全奥氏体的前提下，应该使用下限 Mn 含量，上限 Al 含量，比如，25%~30%Mn，0.65%~0.85%C，7.0%~7.5%Al，1.0%~1.5%Si， $Re \leq 0.1\%$ 。

如果使用温度更高（950℃），要求进一步提高抗氧化性，Al 含量则要求进一步增加。如 7.6%~8.5%Al，选用 0.65%~0.85%C，25%~30%Mn， $RE \leq 0.1\%$ 。这时钢的组织为奥氏体中加入少量的铁素体的复相相组织。

Fe-Al-Mn 系抗氧化钢在熔炼浇铸中要尽可能地减少夹杂，严格控制浇注温度，防止 Al 的氧化。铸件冷凝过程中，因线收缩较大，还易产生裂纹，故对铸件结构的截面突变应加以限制。研究和生产实践表明，Fe-Al-Mn 系钢的使用寿命虽然只有 Cr20Ni25Si2 钢的 1/3，但成本只有 Cr20Ni25Si2 钢的 1/4~1/5。因此推广使用 Fe-Al-Mn 系钢还是有其重要意义的。

（2）Cr-Mn-N 系热稳定钢 Cr-Mn-N 系奥氏体型热稳定钢（如 Cr19Mn12Si2N 和 Cr20Mn9Ni2Si2N）和 Fe-Al-Mn 系钢相比，由于还保留了大量的 Cr，所以保护性氧化膜是 Cr 和 Si 的氧化物，使用温度可从 850℃~1100℃。在 Cr20Mn9Ni2Si2N 钢中保留了少量的 Ni，能进一步稳定奥氏体，使钢中的 Cr 含量上限提高，从而提高钢的抗氧化性，同时也改善了的工艺性能。这类钢在高温下有较高的持久强度，除做铸件外，还可以制作锻件。可用作连续加热炉的传送带。

2. 奥氏体型热强钢

根据提高钢的热强性的合金化原理，奥氏体耐热钢有固溶强化型、碳化物沉淀强化型及金属间化合物强化型三种类型（其中金属间化合物强化型的热强钢，其使用温度高于 600℃，也称铁基高温合金）。下面仅介绍固溶强化型和碳化物沉淀型奥氏体耐热钢。

（1）固溶强化型奥氏体耐热钢 固溶强化型奥氏体耐热钢是在 18-8 奥氏体不锈钢的基础上发展起来的，它们的特点是，在具有良好的耐蚀性的奥氏体基体中，添加 Mo、W、Nb 等合金元素，提高 γ 固溶体的原子间结合力，强化固溶体；Nb 还可以形成部分 NbC，强化晶界。Mo、W、Nb 等都是强铁素体形成元素，为了保持奥氏体组织，则要在钢中提高 Ni 含量或在适当提高 Ni 含量的同时再降低一点 Cr 含量，以保持奥氏体的平衡，从而将 18-8 型发展成 18-11 和 14-19 型的 Cr-Ni 成分。这类钢具有良好的焊接性能以及压力热加工和冷冲压性能，能制管和轧成薄板，能通过薄板冲压和焊接制成零件。

因为这类钢主要是固溶强化，所以其热处理一般也配以固溶处理（淬火）。

（2）碳化物沉淀型奥氏体耐热钢 碳化物沉淀型奥氏体耐热钢的特点是既具有较高的 Cr、Ni 含量以形成奥氏体，又具有 W、Mo、V、Nb 等强碳化物形成元素和较高的 C 含量以形成碳化物强化相。由于 V 和 Nb 是更强的碳化物形成元素，所以形成的碳化物主要是 VC 和 NbC；其次，由于钢中 Cr 含量较多，还会形成 $(Cr,V,Mo,Fe)_{23}C_6$ 。同时在这类钢中还可以用 Mn 代替部分 Ni，这在降低价格的同时也能满足性能的要求。为了获得沉淀强化效果，这类钢一般配以固溶淬火和时效沉淀的热处理。

碳化物沉淀型奥氏体耐热钢典型的钢种为 4Cr14Ni14W2Mo、5Cr21Mn9Ni4N 和 4Cr13Ni8Mn8MoVNb(GH36)等。其中 4Cr14Ni14W2Mo（常称 LV21-4N）是较早使用的排

气阀钢，该钢由于含有大量的 Ni 而获得奥氏体组织，经固溶及时效处理析出碳化物强化。固溶温度常用 1170℃~1200℃，小件可空冷，大件在水中淬火，时效温度常用 750℃，5h，时效后空冷，硬度为(241~248)HB。由于 4Cr14Ni14W2Mo 钢含有较高的 Ni，使用温度一般在 750℃以下，因此自五十年代起，已渐被 5Cr21Mn9Ni4N 钢所代替。5Cr21Mn9Ni4N 钢含有更高的 Cr，这使得该钢具有高的抗氧化性和抗蚀性，加 Mn、Ni、N 可获得奥氏体组织，加 C、N 还可获得沉淀强化相。该钢经 1175℃~1185℃固溶处理 0.5h~1h，水冷，750℃~850℃时效 10h~14h 后空冷，硬度为 34HRC。5Cr21Mn9Ni4N 常用于 850℃左右工作的高速大功率内燃机排气阀。需要指出的是，由于 5Cr21Mn9Ni4N 钢中的 Si 含量较低，因此抗腐蚀能力低，不宜作柴油机排气阀。柴油机上的排气阀钢采用 2Cr21Ni12MnSiN。

GH36 固溶处理的温度通常采用 1140℃加热，保温 1.5h~2h 后水冷，水冷的目的是防止冷却过程中析出 VC 相，造成时效时沿截面内外性能不均。固溶处理后进行两次时效，第一次时效温度为 670℃，时效 12h~14h，可获得非常细小且分布均匀的 VC 相，此时硬度最高，但塑性和韧性较低，有缺口敏感性；第二次时效温度为 770℃~800℃（高于工作温度），时效 10h~12h，此时的 VC 颗粒略有长大，但仍分布均匀，而这时已改善了塑性和韧性，并降低了缺口敏感性。这种组织在低于第二次时效温度 30℃~50℃，即 750℃左右下工作，有很好的组织稳定性。GH36 钢常用于低于 650℃下工作的涡轮盘材料，也可做高温紧固件。

表 6-10 奥氏体型、沉淀硬化型耐热钢的牌号和化学成分（GB/T1221-1992，GB/T4238-1992）

类型	牌号	化学成分/%									
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	其他
奥氏 体 型	5Cr21Mn9Ni4N	0.48~0.58	≤0.35	8.00~10.00	≤0.040	≤0.030	3.25~4.50	20.00~22.00	-	0.35~0.50	-
	2Cr21Ni12N	0.15~0.28	0.75~1.25	1.00~1.60	≤0.035	≤0.030	10.50~12.50	20.00~22.00	-	0.15~0.30	-
	2Cr23Ni13	≤0.20	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	12.00~15.00	22.00~24.00	-	-	-
	2Cr25Ni13	≤0.25	≤1.50	≤2.00	≤0.035	≤0.030	19.00~22.00	24.00~26.00	-	-	-
	1Cr16Ni35	≤0.15	≤1.50	≤2.00	≤0.035	≤0.030	33.00~37.00	14.00~17.00	-	-	-
	0Cr15Ni25Ti2MoAlVB	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	24.00~27.00	13.50~16.00	1.00~1.50	-	V0.10~0.50;Ti1.90~2.35 Al<0.35;B0.001~0.010
	0Cr18Ni9	≤0.07	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00~11.00	17.00~19.00	-	-	-
	0Cr23Ni13	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	12.00~15.00	22.00~24.00	-	-	-
	0Cr25Ni20	≤0.08	≤1.50	≤2.00	≤0.035	≤0.030	19.00~22.00	24.00~26.00	-	-	-
	1Cr17Ni12Mo2	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	10.00~14.00	16.00~18.00	2.00~3.00	-	-
	4Cr14Ni14W2Mo	0.40~0.50	≤0.80	≤2.00	≤0.035	≤0.030	13.00~15.00	13.00~15.00	0.25~0.40	-	W2.00~2.75
	3Cr18Mn12Si2N	0.22~0.30	1.40~2.20	10.50~12.50	≤0.060	≤0.030	-	17.00~19.00	-	0.22~0.33	-
	2Cr20Mn9Ni2Si2N	0.17~0.26	1.80~2.70	8.50~11.00	≤0.060	≤0.030	2.00~3.00	18.00~21.00	-	0.20~0.30	-
	0Cr19Ni13Mo3	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.00~15.00	18.00~20.00	3.00~1.00	-	-
	1Cr18Ni9Ti	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00~11.00	17.00~19.00	-	-	Ti5×(C%-0.02)~0.80
	1Cr18Ni9Si3	≤0.15	2.00~3.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	8.00~10.00	17.00~19.00	-	-	-
	0Cr18Ni10Ti ^①	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	9.00~12.00	17.00~19.00	-	-	Ti≥5×C%
	0Cr18Ni11Nb	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	9.00~13.00	17.00~19.00	-	-	Nb≥10×C%
	0Cr18Ni13Si4	≤0.08	3.00~5.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	11.50~15.00	15.00~20.00	-	-	②
	1Cr20Ni14Si2	≤0.20	1.50~2.50	≤1.50	≤0.035	≤0.030	12.00~15.00	19.00~22.00	-	-	-
	1Cr25Ni20Si2	≤0.20	1.50~2.50	≤1.50	≤0.035	≤0.030	18.00~21.00	24.00~27.00	-	-	-
沉淀 硬化 型	0Cr17Ni4Cu4Nb	≤0.07	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	3.00~5.00	15.50~17.50	-	-	Cu3.00~5.00;Nb0.15~0.45
	0Cr17Ni7Al	≤0.09	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.030	6.50~7.75	16.00~18.00	-	-	Cu≤0.50;Al0.75~1.50

注：①除专用外，一般情况下不推荐使用。②必要时，可添加上表以外的合金元素。

表 6-11 奥氏体型耐热钢棒的热处理制度、力学性能、特性及用途（GB/T1221-1992，GB/T4238-1992）

牌 号	热处理/℃	拉伸试验				硬度试 验	特性及用途
		σ _{0.2} /MPa	σ _b /MPa	δ ₅ /%	ψ /%	HB	
5Cr21Mn9Ni4N	固溶 1100~1200 快冷， 时效 730~780 空冷	560	885	8	-	≥302	以经受高温强度为主的汽油及柴油机用排气阀
2Cr21Ni12N	固溶 1050~1150 快冷， 时效 750~800 空冷	430	820	26	20	≤269	以抗氧化为主的汽油及柴油机用排气阀
2Cr23Ni13	固溶 1030~1150 快冷	205	560	45	50	≤201	承受 980℃ 以下反复加热的抗氧化钢。加热炉部件、重油燃烧器
2Cr25Ni13	固溶 1030~1180 快冷	205	590	40	50	≤012	承受 1035℃ 以下反复加热的抗氧化钢。炉部件、喷嘴、燃烧器
1Cr16Ni35	固溶 1030~1180 快冷	205	560	40	50	≤201	抗渗碳、氮化性大的钢种，1035℃ 以下反复加热。炉用钢料、石油裂解装置
0Cr15Ni25Ti2MoAlVB	固溶 885~915 或 965~995 快冷 时效 700~760，16h 空冷或缓冷	590	900	15	18	≥248	耐 700℃ 高温的汽轮机转子，螺栓、叶片、轴
0Cr18Ni9	固溶 1010~1150 快冷	205	520	40	60	≤187	通用耐氧化钢，可承受 870℃ 以下反复加热
0Cr23Ni13	固溶 1030~1150 快冷	205	520	40	60	≤187	比 0Cr18Ni9 耐氧化性好，可承受 980℃ 以下反复加热。炉用材料
0Cr25Ni20	固溶 1030~1180 快冷	205	520	40	50	≤187	比 0Cr23Ni13 抗氧化性好，可承受 1035℃ 加热，炉用材料、汽车净化装置用材料
1Cr17Ni12Mo2	固溶 1010~1150 快冷	205	520	40	60	≤187	高温具有优良的蠕变强度，作热交换器用部件、高温耐蚀螺栓
4Cr14Ni14W2Mo	退火 820~850 快冷	315	705	20	35	≤248	有较高的热强性，用于内燃机重负荷排气阀
3Cr18Mn12Si2N	固溶 1100~1150 快冷	390	685	35	45	≤248	有较高的高温强度和一定的抗氧化性，并且有较好的抗硫及抗增碳性。用于吊挂支架，渗碳炉构件，加热炉传送带、料盘、炉爪
2Cr20Mn9Ni2Si2N	固溶 1100~1150 快冷	390	635	35	45	≤248	特性和用途同 3Cr18Mn12Si2N，还可用作盐浴坩埚和加热炉管道等
0Cr19Ni13Mo3	固溶 1010~1150 快冷	205	540	40	60	≤187	高温具有良好的蠕变强度，作热交换用部件
1Cr18Ni9Ti	固溶 920~1150 快冷	205	520	40	50	≤187	有良好的耐热性及抗腐蚀性。作加热炉管、燃烧室筒体、退火炉罩
0Cr18Ni10Ti ^①	固溶 920~1150 快冷	205	520	40	50	≤187	作在 400~900℃ 腐蚀条件下使用的部件，高温用焊接结构部件
0Cr18Ni11Nb	固溶 980~1150 快冷	205	520	40	50	≤187	作在 400~900℃ 腐蚀条件下使用的部件，高温用焊接结构部件
0Cr18Ni13Si4	固溶 1010~1150 快冷	205	520	40	60	≤207	具有与 0Cr25Ni20 相当的抗氧化性，汽车排气净化装置用材料
1Cr20Ni14Si2	固溶 1080~1130 快冷	295	590	35	50	≤187	具有较高的温度强度及抗氧化性，对含硫气氛较敏感，在 600~800℃ 有析出相的脆化倾向，适用于制作承受应力的各种炉用构件
1Cr25Ni20Si2	固溶 1080~1130 快冷	295	590	35	50	≤187	

注：①对于 1Cr18Ni9Ti、0Cr18Ni10Ti 和 0Cr18Ni11Nb 根据需方要求可进行稳定化处理，此时的热处理温度为 850~930℃。②1Cr18Ni9Ti 与 0Cr18Ni10Ti 牌号，其力学性能指标一致，需方可根据耐腐蚀性的差别进行选用。
③表中奥氏体型钢所列数值：5Cr21Mn9Ni4N、2Cr21Ni12N 仅适用于尺寸小于等于 25mm 的钢棒；大于 25mm 的钢棒，可改锻成 25mm 的样坯检验或由供需双方协议规定，允许力学性能降低数值。其他牌号仅适用于尺寸小于等于 180mm 的钢棒；大于 180mm 的钢棒可改锻成 180mm 的样坯检验或由供需双方协议规定，允许力学性能降低数值。

表 6-12 沉淀硬化型耐热钢棒的热处理制度、力学性能、特性及用途（GB/T1221-1992，GB/T4238-1992）

牌号	热处理		拉伸试验				硬度试验		特性及应用
	种类	条件	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%	HB	HRC	
0Cr17Ni4Cu4Nb	固溶	1020~1060℃快冷	-	-	-	-	≤363	≤38	作燃气透平压缩机叶片、燃气透平发动机绝缘材料
	480℃时效	经固溶处理后，470~490℃空冷	≥1180	≥1310	≥10	≥40	≥375	≥40	
	550℃时效	经固溶处理后，540~560℃空冷	≥1000	≥1060	≥12	≥45	≥331	≥35	
	580℃时效	经固溶处理后，570~590℃空冷	≥865	≥1000	≥13	≥45	≥302	≥31	
	620℃时效	经固溶处理后，610~630℃空冷	≥725	≥930	≥16	≥50	≥277	≥28	
0Cr17Ni7Al	固溶	1000~1100℃快冷	≥380	≥1030	≥20	-	≤229	-	作高温弹簧、膜片、固定器、波纹管
	565℃时效	经固溶处理后，760±15℃保持90min，在1h冷却到15℃以下，保持30min，再加热到565±10℃保持70min，空冷	≥960	≥1140	≥5	≥25	≥363	-	
	510℃时效	经固溶处理后，955±10℃保持10min，空冷到室温，在24h内冷却到-73±6℃保持8h，再加热到510±10℃保持60min后空冷	≥1030	≥1230	≥4	≥10	≥388	-	

注：①各类钢的屈服强度和奥氏体型、铁素体型钢的硬度，仅当需方要求时（合同中注明）才进行测定。②力学性能表中，一个牌号有两种以上硬度指标时，供方可根据尺寸或状态任选一种方法测定。③热处理用试样毛坯尺寸一般为25mm，当钢棒尺寸小于25mm时，用原尺寸钢棒进行热处理。④直径或对边距离小于等于16mm的圆钢、六角钢、八角钢和边长或厚度小于等于12mm的方钢、扁钢不作冲击试验。⑤经热处理的钢棒（除马氏体退火外）其试样不再进行热处理。不经热处理的钢棒其钢棒试样均应进行热处理后测试力学性能。

表 6-43 典型奥氏体热强钢的化学成分、热处理及力学性能

类别	钢号	化学成分（%）					热处理工艺	持久强度（MPa）	使用温度（℃）
		C	Cr	Ni	Mo,W ₂ Mn	Ti,Al,Nb,Ta,B			
固溶强化	1Cr18Ni9Mo	<0.14	17~19	9~11	Mo2.5		1050℃~1100℃空冷		
	1Cr18Ni11Nb (347H)	≤0.10	17~20	9~13		Nb<0.15	1100℃~1150℃固溶	$\sigma_{10^5}^{700} = 30 \sim 50$	
	1Cr14Ni19W2Nb (ЭИ695)	0.07~0.12	13~15	18~20	W2.0~2.7	Nb0.9~1.3	1140℃~1160℃水淬		
	Cr20Ni32 (Incolg-800)	<0.10	20.5	32		Ti0.3 Al0.3 Cu0.3	1100℃~1150℃固溶	$\sigma_{10^5}^{871} = 20$	
碳化物沉淀强化	Cr25Ni20 (A351、HK-40)	0.35~0.45	24~26	19~26			铸态	$\sigma_{10^5}^{600} = 100 \sim 135$ $\sigma_{10^5}^{200} = 21 \sim 40$	
	4Cr13Ni8Mn8MoVNb (GH36、ЭИ481)	0.34~0.40	11.5~13.5	7~9	Mn7.5~9.5 Mo1.1~1.4	Nb0.25~0.50 V1.25~1.55 Si0.3~0.8	1140℃1.5h水冷 ①650℃~670℃12~14h时效 ②770℃~800℃10~12h时效	$\sigma_{100}^{650} > 350$	650~700
	4Cr14Ni14W2Mo (ЭИ69)	0.40~0.50	13~15	13~15	Mn0.7 Mo0.25~0.4 W2.0~2.75	Si≤0.8	1150℃~1200℃淬水 650℃~750℃时效	$\sigma_{100}^{650} > 170$ $\sigma_{1000}^{650} > 400$	600
金属间化合物强化	0Cr15Ni26MoTi2AlVB (GH132、A286)	0.08	13.5~16.0	24~27.0	Mn1.0~2.0 Mo1.0~1.5	Ti1.75~2.30 Al≤0.4 Si0.4~1.0 B0.001~0.01	980℃~1000℃2h油冷 700℃~720℃时效16h	$\sigma_{100}^{650} > 400$	650~700
	0Cr15Ni35W2Mo2Ti2Al3B (GH135、808)	≤0.08	14~16	33~36	Mn0.5 Mo1.7~2.2 W1.7~2.2	Ti2.1~2.5 Al2.4~2.3 B≤0.015 Ce≤0.03 Si≤0.40	1140℃4h空冷 830℃时效8h 650℃时效16h	$\sigma_{100}^{750} > 300$	700~750

化	0Cr14Ni37W6Ti3Al2B (GH130)	≤0.08	12~16	35~40	Mn≤0.5 W5~6.5	Ti2.4~3.2 Al1.4~2.2 B<0.02 Ce<0.02 Si<0.6	1180℃1.5h 空冷, 1050℃4h 空冷 800℃时效 16h	$\sigma_{100}^{800} > 250$	700~800
---	-------------------------------	-------	-------	-------	------------------	---	---	----------------------------	---------

3. 金属间化合物沉淀强化型奥氏体热强钢

金属间化合物沉淀强化型奥氏体热强钢的特点是 C 含量很低（一般为 0.08%），形成的碳化物很少或几乎没有，钢中的强化相是金属间化合物 γ' -Ni₃(Al,Ti)，所以这类钢又称为铁基合金（或铁基高温合金）。 γ' -Ni₃(Al,Ti)相具有和奥氏体相同的面心点阵，但有点阵常数的差异，由于点阵的匹配度的差异，导致强化。在合金化上，为了获得金属间化合物强化相，钢中 Ni 含量除保证获得奥氏体外，还要保证有一部分能形成金属间化合物，因此 Ni 含量一般较高，为 25%~40%；同时还应加入 Al、Ti、Mo、V、B 等，其中 Al、Ti 和 Ni 能形成 γ' 相，Mo 能溶于奥氏体，产生固溶强化效应，并减慢奥氏体中铁的扩散，从而提高合金的高温强度，改善合金的高温塑性和减小缺口敏感性。V 和 B 能强化晶界，B 的加入还可使晶界的网状沉淀相变为断续沉淀相，因而提高了合金的持久强度。

为了使金属间化合物相 γ' -Ni₃(Al,Ti)产生较好的强化效果，需要进行适当的热处理。如这类合金中最典型的 GH132。通常采用 980℃~1000℃，2h 的固溶处理，然后在 704℃~760℃范围内经过 16h 的时效处理，此时 γ' -Ni₃(Al,Ti)相及极微小的颗粒状分布于奥氏体基体上，从而达到了最好的强化效果。

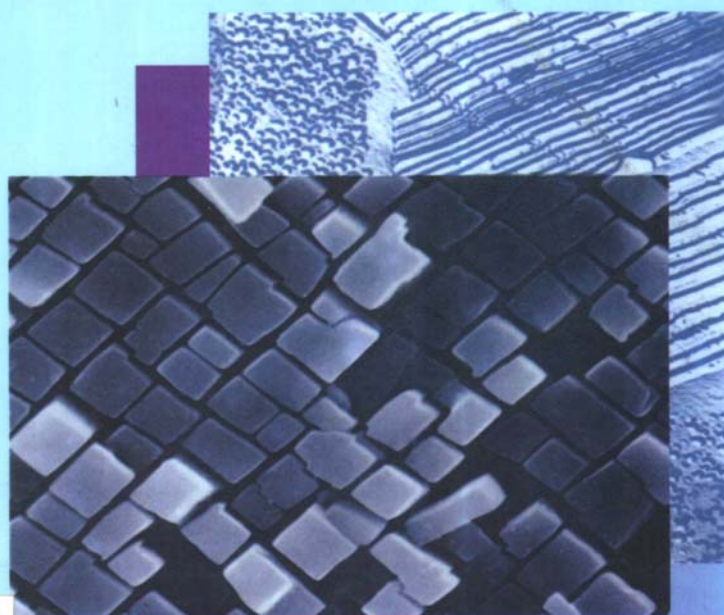
如果对 GH132 合金配以冷变形时效，则强化效果将进一步增强。需要注意的是变形量必须避免导致临界变形量（通常冷变形量必须超过 6%，热变形量必须超过 10%），以防止晶粒的异常长大。因为冷变形加速了 γ' 相的沉淀，所以随着变形量的增加，时效后达到最大硬度的温度移向低温，而且冷变形后钢的结构稳定性较差，为此，冷变形后的时效通常采用两次时效，即第一次为 760℃，16h，第二次为 704℃，16h，以增加组织结构的稳定性和硬度的均匀性。

若在 GH132 合金的基础上再进一步增加 Mo、W、Ti、Nb 等强化元素，则合金的热性能和耐热温度都将进一步提高。但由于这类元素都是铁素体形成元素，增加这些元素的含量，将导致奥氏体基体不稳定，并容易析出脆性金属间化合物 σ 相和 χ 相等。为此，在钢中增加 Mo、W、Ti、Nb 等强化元素的同时，提高 Ni 的含量，以稳定奥氏体，使用温度可提高到 750℃~800℃。这类钢（GH130、GH135）与 GH132 相比，可提高使用温度 50℃~100℃，有时还可代替镍基高温合金使用。

特 殊 钢 丛 书

高温合金

黄乾尧 李汉康 等编著



冶 金 工 业 出 版 社