

航空材料及其应用工艺 手册

胡福田 付 瑗 译



1981 • 北京

内 容 提 要

“航空材料及其应用工艺手册”一书系按苏联1979年最新版翻译印制的。内容丰富，数据完整。本书为金属部份：包括各种钢、有色金属、铆接材料、轴承材料。

本手册可供工程—技术人员及飞行人员使用；也可供航空院校及有关高等院校师生使用。本书还可作为干部和地勤人员、器材供应人员，技术管理人员业务学习的材料。



目 录

第一章 燃气涡轮发动机和飞行器用 钢及材料

1.1. 钢的特性和分类	1
1.2. 材料的纯度标准	2
1.3. 铁合金的定义和材料平衡组织的性能	3
1.4. 合金钢的特性, 标志和应用	5
1.4.1. 标记	7
1.4.2. 主要性能和用途	8
1.5. 碳素钢的性能和杂质的影响	18
1.6. 碳素钢和合金钢的分类和标记	19
1.7. 结构钢的特性、类别、牌号和用途	21
1.7.1 钢 的机械性能和用途	24
1.8. 非磁性钢和铸铁	26
1.9. 合金的性能及其组织	32
1.10. 航空燃气涡轮发动机用的材料	43
1.10.1. 耐高温珐琅涂层	43
1.11. 飞机和直升飞机结构用的材料的评价	44
1.12. 钢 (零件) 的冷处理	46
1.13. 快速冷却时钢的组织的变化	47
1.14. 丝 材	48
1.15. 材料的机械、物理和技术性能	50

第二章 有色金属及铆接材料

2.1. 钛合金	57
2.1.1. 纯钛的性质	60
2.1.2. 工业钛合金	63
2.1.3. 变形钛合金的性能	67
2.2. 铝及铝合金	68
2.2.1. 纯铝的性能	68
2.2.2. 合金元素对铝合金的影响	69
2.2.3. 铝及铝合金的标志	71
2.2.4. 变形铝合金	73
2.2.5. 铸造铝合金	79
2.2.6. 烧结铝合金	81
2.2.7. 铝基复合材料	82
2.3. 铆钉及油箱用铝合金	83
2.3.1. 铆钉的标志	86
2.3.2. 铝油箱	87
2.4. 铝粉及铝箔	88

第三章 滚动和滑动轴承及其应用

3.1. 滚动轴承的结构种类	90
3.2. 滚动轴承的标志及符号	90
3.3. 滚动轴承零件的材料	94
3.4. 滚动轴承的工作规范及条件	95
3.5. 滚动轴承工作性能的测定	95
3.6. 滚动轴承的安装和拆卸	97

3.7.金属陶瓷轴承.....	99
3.8.滑动轴承材料.....	100
3.8.1.巴比合金.....	101
3.8.2.铅青铜.....	102
3.8.3.镀银层.....	103
3.8.4.多层衬层.....	103
3.8.5.青铜轴承.....	104
3.9.滑动轴承材料用的性能比较.....	105
3.10.非金属轴承.....	106
3.10.1.塑料轴承.....	106
3.10.2.木质轴承.....	107
3.10.3.橡胶轴承套.....	107
3.10.4.无润滑下工作的滑动轴承.....	108
3.10.5.对开轴承.....	109

第一章 燃气涡轮发动机和 飞行器用钢及材料

1.1. 钢的特性和分类

钢的标记。含碳低于2%的、可锻的铁合金叫做钢。按其制造方法，钢可分为：柏塞麦钢、转炉钢（用氧吹炼）、马丁炉钢、电炉钢及坩埚钢。化学成分是分类的主要依据，每批钢的化学成分相同，除在渗碳、渗氮及其它扩散处理过程中，表面层成分有些变化外，热处理和其它处理均不能改变其化学成分。

合金钢的定义。按化学成分，钢可分为碳钢和合金钢。碳钢又可分为普通碳钢和优质碳钢。而合金钢可分为：低合金钢（合金元素的总含量不高于3%）；中合金钢（合金元素的总含量为3~5.5%），高合金钢（合金元素的总含量在5.5%以上）。

合金组分高于铁含量（铁含量小于50~55%）时，则这种钢称为合金，例如，高欧姆电阻合金、耐热合金等等。

钢中的常见杂质和特殊杂质。所有牌号的钢都存在一定数量的杂质。按钢的熔炼工艺，某些杂质（锰、硅）是必需加入的。其它有害的杂质（硫、磷）不可能完全除掉。正常性能的钢也含有少量潜在杂质（氧、氢、氮）。

为了使钢具有一定的性能，常把合金元素（镍、钼、钒、钛等）以及碳、锰、硅等作为特殊杂质加入钢中。在各种牌号的合金化金属和合金上均有俄文字母标示的各种元素符号。

钢的标号。经补充处理的钢均用以下字样为标记标在各种牌号上：

СЛЛ——在钢包中用液态合成炉渣处理的钢；

ЛЛ——电渣炉中重熔的钢；

ВД——真空电炉重熔的钢；

ВЛ——真空感应炉重熔的钢。

铸钢和锻钢的机械性能。化学成分相同的铸钢、轧钢和锻钢，其机械性能以铸钢较低。

从经济观点看，制造形状复杂的零件（例如：燃气涡轮发动机零件），铸造要比其它制造方法优越。锻钢（锻件和模压件）退火后具有良好的性能。轧钢（轧材）的质量相当稳定，纵向和横向的机械性能相差不大。

1.2. 材料的纯度标准

常见的杂质和偶然性的杂质。用工业方法制造的材料，一般均含有杂质，这些杂质会大大改变半导体，以及金属和介电质的性能。因此，“纯铁”在光谱分析时，可以观察到27种化学元素。含有杂质是正常的，这些杂质一般是伴随在构成材料的基本元素中或者在生产过程里落到采用的原材料中造成的。例如钢中常含有下列常见杂质：硅、锰、硫、磷、氧和氮。此外，材料中可能遇到偶然性的或局部的一些杂质。材料中之所以有这些杂质，是因为某些原材料中就有，或是因为所采用的工艺特殊性造成的。例如用乌拉尔铁矿石生产的铸铁和钢中，任何时候都含有铜。

材料的纯度。材料的技术要求，按纯度可以分成以下四级：

纯的一含有杂质为 $2 \cdot 10^{-5}$ 至1%；

分析纯的一含有杂质为 $1 \cdot 10^{-5}$ 至 0.4% ;

化学纯的一含有杂质为 $5 \cdot 10^{-6}$ 至 0.05% ;

特纯或光谱纯的一含有杂质小于 $10^{-4}\%$ 。

有时材料的纯度以小数点以后的数字《9》来表示。例如，主要材料以三个9来表示 99.999% ，杂质为 0.001% 。

纯度的级别。生产中不必采用高纯度的原材料，从经济观点来说采用高纯度的原材料也不合算。降低杂质含量的水平一般是从 $10^{-4}\%$ 开始，往往使制造费用成10倍乃至100倍的增加。

所以目前特别是纯材料和半导体均分为10级纯度：A1、A2、B3—B6、C7—C10、A1为 $1.0-0.1\%$ 的杂质，A2为 $10^{-1}-10^{-2}\%$ ，B3—B6为 $10^{-2}-10^{-3}$ 至 $10^{-5}-10^{-6}\%$ ，C7—C10为 $10^{-6}-10^{-7}$ 至 $10^{-9}-10^{-10}\%$ 的杂质。

对于A组级的材料可以用直接化学分析方法分析出主要材料和杂质的含量，对B组级的则要求采用光谱分析杂质，对C组级的则要求《高纯度》的材料。对于测定这些材料的杂质要求专门的物理—化学方法（质谱分析、放射性分析或放射性同位素分析）以及电动测量方法。

纯和高纯度材料的制取可用蒸馏法、区域熔化等。

物理纯。对单晶体结构特征完善的材料来讲往往采用物理纯这个术语。这个术语应理解为没有影响材料的物理—化学性能的缺陷（如空位、错位），并且不是化学杂质浓度部分的缺陷，个别情况下要查明同位素的纯度，即纯物质中同类同位素的含量。

1.3. 铁合金的定义和材料平衡组织的性能

金属都具有良好的导电性、导热性、可锻性、必要的韧性、《金属》光泽、断裂强度、变形弹性以及一系列的其它性

能。在固体状态时均有晶体结构。

熔融金属冷却过程中就产生了结晶。快速冷却促使晶核数量增长，从而可获得细晶组织。慢速冷却时晶核产生得较少，在这种情况下得到的是粗晶组织。细晶组织的金属具有更高的强度。在锻造和轧制的过程中晶粒沿锻轧方向伸长，结果形成金属纤维状组织，从而提高了顺纤维方向的强度。

含碳的铁合金。根据铁合金的含碳量，分为以下几种：

工业用铁—含有0.04至0.2%碳的合金；

钢—含有0.2至2%碳的合金；

铸铁—含有2.0至6.67%碳的合金。

铁在液态中碳的溶解量为6.7%。在固态中碳的溶解度决定于变形的结晶组织，分成： α -Fe—低于0.03%的碳； γ -Fe—低于2%的碳； σ -Fe—低于0.1%的碳。

铁在不同变形情况下，碳和其它合金元素的固溶体分别称为：在 α -铁和 δ -铁中—铁素体（ α -铁素体和 δ -铁素体）；在 γ -铁中—奥氏体。

化学化合物和机械混合物。因为工业用钢中碳的含量在 α -铁中超过它的溶解度时，未溶于铁素体中的，剩余的碳原子与铁原子就形成了碳化铁化学化合物 Fe_3C ，称为渗碳体。

由此可见，在正常温度条件下，钢的组织形成为铁素体和渗碳体，这两者可能是个别的夹杂物或者是称为珠光体的细的机械混合物。

钢的平衡组织。在正常条件下，钢的平衡组织是铁素体，珠光体、渗碳体，其性能分别如下：

铁素体—具有必要强度和硬度（ $\text{HB}=80$ ）的高塑性材料；

渗碳体—熔点为 1600°C ，具有高的硬度（ $\text{HB}=700$ ）的脆性材料；在含碳量高（1.5—2%）的钢中可观察到大量渗碳体

组织。

珠光体—有两种形状：粒状珠光体，在这种珠光体中渗碳体呈小球形；片状珠光体，在这种珠光体中铁素体和渗碳体都是伸长的，呈薄片形。

奥氏体— γ -铁中碳的固溶体具有良好耐磨性和高的韧性。温度在723℃以上时，钢中存在此种组织。奥氏体组织的钢很软。工业生产中采用这种性能的钢时，应在保证钢的奥氏体组织的温度下进行轧制、冲压或锻造。

1.4. 合金钢的特性，标志和应用

钢中除了一般杂质外，含有专门添加的合金元素（铬、镍、锰、硅、钨、钼、钒、钴、钛、铌、铝、氮、硼、锆、钽、铜和其它元素）的钢称为合金钢。根据合金元素确定合金钢的名称，例如铬钢、镍钢、钒钢、铬镍钢、铬锰钼钢等等。钢中含有的锰和硅，视为常见杂质，只有当锰含量大于1%，硅大于0.8%时，才认为是合金的组份。

钢中添加合金元素可以提高钢的机械性能、工艺性能及其它性能。

合金元素对钢性能的影响。铬（Cr）的价格较贱，在合金钢中广泛采用（结构钢中低于3%），它可以提高钢的强度和硬度，同时塑性和韧性没有明显地下降，而钢的可淬性却提高了。由于铬钢具有高的耐磨性，可用来制造滚动轴承。在快速钢中加入铬，其含量超过13%时，即为不锈钢。进一步增加铬的数量则可以提高钢在高温下的抗氧化性并改进钢的磁性。

镍（Ni）可以提高钢的抗腐蚀性、提高强度和塑性、可淬性、抗冲击强度，降低热膨胀系数。镍还可以提高钢的致密度，因此是良好的脱氧剂。在结构钢中镍的含量为1—5%，高

含量时，则可以获得无磁性钢并提高了抗腐蚀性。

钨 (W) 在钢中形成很硬的化学化合物—碳化物，剧烈地提高钢的硬度和热脆性。在加热时，钨妨碍晶粒的增长，回火时促使脆性的消除。在结构钢中钨含量不超过1.5%；在工具钢中不大于22%，即可以改善切削性能；而在快速钢中只是作为添加剂。

钼 (Mo) 可提高钢的强度和硬度，但塑性和韧性稍有降低，并降低回火脆性。在结构钢中其量为0.2—0.6%。在工具钢和快速钢中钼可以提高热硬性。钼也可提高钢的耐热性。

钒 (V) 可提高钢的硬度，形成细晶组织，从而提高了钢的弹性和疲劳极限。在结构钢中其含量为0.1—0.3%，在工具钢中为0.15—0.65%，而在快速钢中低于2.5%。

锰 (Mn) 含量大于1%可以提高钢的硬度、耐磨性、抗冲击载荷强度，并不降低塑性，提高钢的淬透性并可以增高非磁化率。在结构钢中其含量不大于2%。

硅 (Si) 含量为1—1.5%，可以不降低韧性而提高强度，含量大的时候便提高电阻和导磁系数。硅也提高钢的弹性、耐酸性、耐热性。在结构钢中含硅低于2%。

钛 (Ti) 可提高钢的强度和致密度，促使晶粒细化，是良好的还原剂，能改善可加工性和抗腐蚀性；加入量为0.1—0.2%。

铌 (Nb) 能改善耐酸性并有助于降低焊接结构的腐蚀。加入量为0.1—0.2%。

铝 (Al) 加入进行渗氮的钢中可以提高硬度。此外，钢的铝含量到5—6%，可提高钢的耐热性；供制造高磁性磁铁用的合金中，其铝的含量为12—15%。

硼 (B) 含量达0.002%可以大大提高钢的可淬性，以及低

温回火后的冲击韧性。在耐热合金中即使只加入0.01%硼，就可提高耐热合金的耐热性能。

钴 (Co) 可以提高钢的耐热性和磁性，并改善抗冲击强度。

铜 (Cu) 可以提高钢的抗腐蚀性，主要添加于结构钢中。

* 铈 (Ce) 可以提高钢的强度。特别是塑性。

锆 (Zr) 能影响晶粒的大小和晶粒的生长 (细化晶粒) 并可使钢得到预先所规定的晶粒度。

镧 (La) 和钕 (Nd) 可减低疏松度，降低钢中硫的含量，改进表面质量，细化晶粒。不锈钢，变压器钢和耐热钢中加入这些元素。

1.4.1. 标 记

字母+数字标记。合金钢按字母+数字系列标记。合金元素分别用下列字母表示：镍—H、铬—X、钨—B、钒—Φ、钼—M、钛—T、钴—K、硅—C、锰—Г、铝—Ю、铜—Д、铌—Б、硼—Р、磷—П。

牌号上的第一个数字表示碳的平均百分之零点零几含量。如果元素含量超过1.5%，则字母后面的数字就表示钢中该元素的平均的百分含量。牌号末尾的字母A表示钢的高质量 (有害杂质的纯度) 和冶金检验的高要求。例如30XГCA钢表示它的平均含量为：0.30%碳、1%铬、1%锰、1%硅、0.03%硫和0.03%磷。如果牌号之前有一位数字，则该数字表示含碳量为百分之零点几。例如2×18H9钢，表示它含有0.2%碳、18%铬和9%镍。如果牌号之前有两位数字，则表示平均含碳量的百分之零点零几。若牌号之前没有数字，则表示钢中碳的平均

* 原文中为铈 (Цезий) ——译者注。

含量为1%或大于1%。例如，XB5钢，表示它含1.25~1.5%碳，1%铬和5%钨。

在个别情况下，允许简化钢的标记，省略一些数字。如18X2H4BA可以简写成18XHBA。

高合金钢。某些高合金钢可以按以下字母标记分组：
Ж—铬不锈钢；Я—铬镍不锈钢；Е—特种磁性电工钢；Р—高速钢；Ш—滚珠轴承钢。（如Ж1、Я1、Е12、Р18）。

《电钢厂》熔炼的非标准合金钢。用字母Э标记，试制的钢的牌号用字母ЭИ（电钢研制）或ЭП（П—试验）加上顺序号标记，如ЭИ402和ЭП716等等。工业试制后，可用规定的牌号来代替表示钢的标准成分之标记。

1.4.2. 主要性能和用途

锰钢。10Г2(0.08—0.17%C, 1.2—1.6%Mn)钢和12Г2А(0.12—0.20%C, 2.0—2.4%Mn)钢具有高的塑性。良好的各种焊接性能，正火后可以用来制作焊接件和模锻件(10Г2钢— $\sigma_B=400-600\text{H}/\text{mm}^2$, 12Г2А钢— $\sigma_B=600-900\text{H}/\text{mm}^2$)。热处理规范：淬火、退火和正火温度为 $890\pm 10^\circ\text{C}$ 。

20ГA高强度钢(0.18—0.26%Cu和1.3—1.6%Mn)具有高塑性，良好的铆接性能和焊接性能，可用来制作重要零件的铆钉。热处理规范：退火和淬火温度为 $880\pm 10^\circ\text{C}$ ，淬火介质—油。制成的铆钉于 $600-620^\circ\text{C}$ 淬火和回火。

65Г钢(0.60—0.70%C, 0.90—1.20%Mn)加工性较差，进行热处理(淬火和回火)，可以提高钢的强度和弹性($\sigma_B=1500-1650\text{H}/\text{mm}^2$, $\delta=4\%$)，可以制成棒材，丝材，板材供应，可用来制作弹簧和螺帽下的弹簧垫片。

25XГCA 铬锰硅钢 (0.22—0.28% C, 0.8—1.1% Mn, 0.9—1.2% Si, 0.8—1.0% Cr) 具有高的强度, 退火状态具有良好的塑性, 满意的切削加工性, 电弧焊、原子氢焊的性能良好, 也适于气焊和接触焊。此种钢可以用于制造重要的焊接件和模锻件 (可热处理至 $\sigma_B = 800 - 1300 \text{H/mm}^2$)。需气焊的零件最好采用这种钢。25XCA 和 30XГCA 钢制造的组合件, 禁止采用同一热处理规范, 因为这两种钢的回火规范不同。

热处理规范: 正火、高温退火, 淬火温度为 $900 \pm 10^\circ\text{C}$, 低温退火为 $690 \pm 10^\circ\text{C}$, 淬火介质—油。

30XГCA 比 25XГCA 钢的含碳量高 (0.28—0.35%), 因前者提高了机械性能, 退火状态的塑性较好, 电弧焊性能良好, 其它各种焊接性能也较好; 可用于制造焊接件、模锻件、铆接件及机械加工零件 ($\sigma_B = 1100 - 1400 \text{H/mm}^2$) 以及螺栓、起落架零件、对头结合件、缘板、螺桩、管子、喷嘴等。

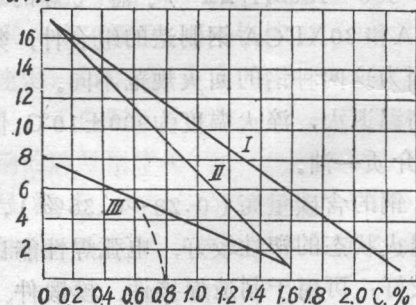
此种钢的淬透性不深, 用它制作的零件厚度仅限于: 圆柱形和正方形的零件小于 25mm, 管形和平面形零件小于 15mm。锻造温度为 $850 - 1150^\circ\text{C}$; 热处理 (高温退火、正火、淬火) 温度为 $900 \pm 10^\circ\text{C}$, 淬火介质—油。

30XГCHA 钢 (0.27—0.34% C, 1.0—1.3% Mn, 0.9—1.2% Si, 1.4—1.8% Cr) 具有高的强度, 良好的电弧焊性能, 氢原子焊性能也较好, 但不适于气焊。具有高塑性和韧性, 但比 30XГCA 钢低, 应力集中敏感度高, 厚度小于 50—60 mm 的零件的淬透性良好, 可用于制造高载荷零件 ($\sigma_B = 1400 - 1800 \text{H/mm}^2$)、起落架、缘条、机翼和中翼缘条、对头结合件、螺栓等。热处理规范: 油中淬火——温度为 $900 \pm 10^\circ\text{C}$, 回火温度为 $200 - 300^\circ\text{C}$, 随后空冷。

30X2ГCH2BM (БЛ1) 钢, 可用来制造形状复杂的零件。

翼梁、水平安定面梁、机身隔框及其它等。手工电弧焊之后，焊缝不能冷却到低于 200°C ，就将零件放入 650°C 的炉中，空气中进一步冷却。

铬钢(表1.1, 图1.1)。15XA 钢 ($0.12-0.17\%$ 和 $0.7-1.02\%\text{Cr}$) 可用来制造



截面小于 30mm 的渗碳零件，以及不渗碳的热处理状态的零件 ($\sigma_B=600-650\text{H/mm}^2$)，油中淬火，可以代替 13H2A 和 12XH3A 钢。锻造温度为 $800-1500^{\circ}\text{C}$ 。

图 1.1 铬钢的组织曲线

I—二元碳化物；

II—马氏体；III—珠光体

热处理规范：正火和退火温度为 $880-900^{\circ}\text{C}$ ，高温回火为 $700\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，

$880\pm 10^{\circ}\text{C}$ 油中淬火， $480-540^{\circ}\text{C}$ 回火。

渗碳规范： $900-920^{\circ}\text{C}$ 下渗碳， $880\pm 10^{\circ}\text{C}$ 油中淬火， $780\pm 10^{\circ}\text{C}$ 油中淬火， $150-170^{\circ}\text{C}$ 回火，空气中冷却。

38XA 钢 ($0.34-0.42\%\text{C}$, $0.8-1.1\%\text{Cr}$) 具有高的强度和韧性，油中淬火，淬透性良好，可用于制造机械加工零件 (套筒、衬套、螺钉、齿轮、螺栓、螺柱、螺帽等)，这些零件经淬火，随后回火处理。锻造温度范围： $800-1140^{\circ}\text{C}$ 。

热处理规范：退火、正火和淬火温度为 $850\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，淬火介质—油， $500-660^{\circ}\text{C}$ 回火，油中或水中冷却，因为此种钢易引起回火脆性。回火温度建议为：对 $\sigma_B=700-900\text{H/mm}^2$ 的零件为 $640-660^{\circ}\text{C}$ ；对 $\sigma_B=900-1100\text{H/mm}^2$ 的零件为 $580-600^{\circ}\text{C}$ ；对 $\sigma_B=1100-1300\text{H/mm}^2$ 的零件为 $500-520^{\circ}\text{C}$ 。作

为予先热处理最好是在850℃退火或650—680℃回火（对棒材而言），850—890℃正火，或正火和回火（对锻件而言）。

表 1.1 铬钢的机械性能

牌 号	状 态	机 械 性 能, 不 低 于			
		$\sigma_B, \text{H}/\text{MM}^2$	$\delta, \%$	$\alpha_H, \text{H} \cdot \text{M}/\text{CM}^2$	$\text{HB}, \text{H}/\text{MM}^2$
15 XA	860℃油中淬火, 然后 760—810℃ 第二次油中淬火, 150—170℃回火。	600	15	90	1700—3020
38 XA	860℃下淬火, 500—590℃回火, 油冷或水冷。	950	12	100	2690—3210
III X15	820—840℃油中 淬火, 300—350℃ 回火。	HRC57—59			

注：40X、45X、50X铬钢属于昂贵的结构材料。在这些钢中增加碳的含量可以提高强度，但降低了塑性和韧性，提高了冷脆性界限。铬钢有回火脆性的倾向，要消除这一倾向必须从高温回火温度下快速冷却。这些钢的淬火深度为15—25mm，可用于截面不大的零件。因此，45X和50X钢由于韧性不高，只能用于制造承受不大的动载荷的零件。在摩擦或磨损条件下工作的铬钢零件，应进行氮化处理。

III X15钢（1.0%C，1.5%Cr）用于制造滚珠、滚棒及轴承滚动环。制造这些零件以前，将钢进行锻造以破坏网状碳化物，然后在680—690℃进行予先球化热处理。碳化物变为颗粒的形状，从而提高了硬度和抗磨损性。钢在淬火和低温回火

以后，其组织是带有碳化物的马氏体。

铬钼钢。20XMA 钢 (0.15—0.25% C, 0.8—1.1% Cr, 0.15—0.25% Mo) 具有高的强度, 高的韧性, 优异的焊接性, 用 30XГЧА 和 30XГCA 及 25XГCA 钢制造 $\sigma_B > 900 \text{H/mm}^2$ 的零件, 当这些零件气焊、电弧焊和氢原子焊时经常采用 20XMA 钢作焊料。热处理规范: 正火、高温退火、淬火温度为 $890 \pm 10^\circ\text{C}$, 低温退火温度为 $700 \pm 10^\circ\text{C}$, 油中淬火。

35XMΦA 钢 (0.30—0.38% C, 1.0—1.3% Cr, 0.1—0.2% V, 0.2—0.3% Mo) 具有高的强度, 可于热处理状态制造螺旋桨零件, 小功率发动机的曲轴以及其它零件。锻造温度范围为 $1200-800^\circ\text{C}$ 。热处理规范: 880°C 退火, $930-970^\circ\text{C}$ 正火, 900°C 油中淬火。预先热处理: 880°C 退火或 $650-680^\circ\text{C}$ 回火 (对棒材而言), $930-970^\circ\text{C}$ 正火和回火 (对锻件而言)。

铬钒钢。40XΦA 钢 (0.37—0.45% C, 0.8—1.1% Cr, 0.1—0.2% V) 具有高强度, 淬透性不高, 易引起回火脆性。于热处理状态用于制造螺旋桨零件: 轴套、支架、横梁、螺栓, 还可用于制造要求渗氮的零件。锻造温度范围: $1140-800^\circ\text{C}$ 。热处理规范: $850-890^\circ\text{C}$ 退火和正火, 880°C 淬火, $620-680^\circ\text{C}$ 回火, 水冷。预先热处理规范: $850-890^\circ\text{C}$ 退火或 $650-680^\circ\text{C}$ 回火 (对棒材而言), $850-890^\circ\text{C}$ 正火或正火并回火 (对锻件而言)。

50XΦA 钢 (0.47—0.55% C, 0.75—1.1% Cr, 0.15—0.25% V) 具有高的强度和弹性极限, 用于制造重要的弹簧。热处理规范: 淬火 (油中), 正火和退火温度为 $850 \pm 10^\circ\text{C}$; 弹簧在 $370-460^\circ\text{C}$ 的盐槽中回火 5 分钟。

铬镍钢 (表 1.2)。同时加入铬和镍对钢的性能有良好的作用。可以使钢获得高的强度、硬度、足够的韧性和塑性。