
合金元素在熔炼中的作用

内部培训资料

为了改善和提高钢的某些性能和使之获得某些特殊性能而有意在冶炼过程中加入的元素称为合金元素。常用的合金元素有铬，镍，钼，钨，钒，钛，铌，锆，钴，硅，锰，铝，铜，硼，稀土等。磷，硫，氮等在某些情况下也起到合金的作用。

(1) 铬(Cr)

铬能增加钢的淬透性并有二次硬化的作用，可提高碳钢的硬度和耐磨性而不使钢变脆。含量超过 12%时，使钢有良好的高温抗氧化性和耐氧化性腐蚀的作用，还增加钢的热强性。铬为不锈钢耐酸钢及耐热钢的主要合金元素。

铬能提高碳素钢轧制状态的强度和硬度，降低伸长率和断面收缩率。当铬含量超过 15%时，强度和硬度将下降，伸长率和断面收缩率则相应地有所提高。含铬钢的零件经研磨容易获得较高的表面加工质量。

铬在调质结构中的主要作用是提高淬透性，使钢经淬火回火后具有较好的综合力学性能，在渗碳钢中还可以形成含铬的碳化物，从而提高材料表面的耐磨性。

含铬的弹簧钢在热处理时不易脱碳。铬能提高工具钢的耐磨性、硬度和红硬性，有良好的回火稳定性。在电热合金中，铬能提高合金的抗氧化性、电阻和强度。

(2) 镍 (Ni)

镍在钢中强化铁素体并细化珠光体，总的效果是提高强度，对塑性的影响不显著。一般地讲，对不需调质处理而在轧钢、正火或退火状态使用的低碳钢，一定的含镍量能提高钢的强度而不显著降低其韧性。据统计，每增加 1% 的镍约可提高强度 29.4Pa。随着镍含量的增加，钢的屈服程度比抗拉强度提高的快，因此含镍钢的比可较普通碳素钢高。镍在提高钢强度的同时，对钢的韧性、塑性以及其他工艺的性能的损害较其他合金元素的影响小。对于中碳钢，由于镍降低珠光体转变温度，使珠光体变细；又由于镍降低共析点的含碳量，因而和相同的碳含量的碳素钢比，其珠光体数量较多，使含镍的珠光体铁素体钢的强度较相同碳含量的碳素钢高。反之，若使钢的强度相同，含镍钢的碳含量可以适当降低，因而能使钢的韧性和塑性有所提。镍可以提高钢对疲劳的抗力和减小钢对缺口的敏感性。镍降低钢的低温脆性转变温度，这对低温用钢有极重要的意义。含镍 3.5% 的钢可在 -100℃ 时使用，含镍 9% 的钢则可在 -196℃ 时工作。镍不增加钢对蠕变的抗力，因此一般不作为热强钢的强化元素。

镍含量高的铁镍合金，其线胀系数随镍含量增减而显著变化，利用这一特性，可以设计和生产具有极低或一定线胀系数的精密合金、双金属材料等。

此外，镍加入钢中不仅能耐酸，而且也能抗碱，对大气及盐都有抗蚀能力，镍是不锈钢中的重要元素之一。

(3) 钼 (Mo)

钼在钢中能提高淬透性和热强性，防止回火脆性，增加剩磁和矫顽力以及在某些介质中的抗蚀性。

在调质钢中，钼能使较大断面的零件淬深、淬透，提高钢的抗回火性或回火稳定性，使零件可以在较高温度下回火，从而更有效地消除（或降低）残余应力，提高塑性。

在渗碳钢中钼除了具有上述作用外，还能在渗碳层中降低碳化物在晶界上形成连续网状的倾向，减少渗碳层中残留的奥氏体，相对地增加了表面层的耐磨性。

在锻模钢中，钼还能保持钢有比较稳定的硬度，增加对变形、开裂和磨损等的抗力。

在不锈耐酸钢中，钼能进一步提高对有机酸（如蚁酸、醋酸、草酸等）以及过氧化氢、硫酸、亚硫酸、硫酸盐、酸性染料、漂白粉液等的抗蚀性。特别是由于钼的加入，防止了氯离子的存在所产生的点腐蚀倾向。

含 1%左右钼的 W12Cr4V4Mo 高速钢具有耐磨性、回火硬度和红硬性。

(4) 钨 (W)

钨在钢中除形成碳化物外，部分地溶入铁中形成固溶体。其作用与钼相似，按质量分数计算，一般效果不如钼显著。钨在钢中主要作用是增加回火稳定性、红硬性、热强性以及由于形成碳化物而增加的耐磨性。因此它的主要用于工具钢，如高速钢、热锻模具用钢等。

钨在优质弹簧钢中形成难熔碳化物，在较高温度回火时，能缓解碳化物的聚集过程，保持较高的高温强度。钨还可以降低钢的过热敏感性、增加淬透性和提高硬度。65SiMnWA 弹簧钢热轧后空冷就具有很高的硬度，50mm² 截面的弹簧钢在油中即能淬透，可作承受大负荷、耐热（不大于 350℃）、受

冲击的重要弹簧。30W4Cr2VA 高强度耐热优质弹簧钢，具有大的淬透性，1050~1100℃淬火，550~650℃回火后抗拉强度达 1470~1666Pa。它主要用于制造在高温（不大于 500℃）条件下使用的弹簧。

由于钨的加入，能显著提高钢的耐磨性和切削性，所以，钨是合金工具钢的主要元素。

（5）钒（V）

钒和碳、氮、氧有极强的亲和力，与之形成相应的稳定化合物。钒在钢中主要以碳化物的形式存在。其主要作用是细化钢的组织 and 晶粒，降低钢的强度和韧性。当在高温溶入固溶体时，增加淬透性；反之，如以碳化物形式存在时，降低淬透性。钒增加淬火钢的回火稳定性，并产生二次硬化效应。钢中的含钒量，除高速工具钢外，一般均不大于 0.5%。

钒在普通低碳合金钢中能细化晶粒，提高正火后的强度和屈服比及低温特性，改善钢的焊接性能。

钒在合金结构钢中由于在一般热处理条件下会降低淬透性，故在结构钢中常和锰、铬、钼以及钨等元素联合使用。钒在调质钢中主要是提高钢的强度和屈服比，细化晶粒，降低过热敏感性。在渗碳钢中因能细化晶粒，可使钢在渗碳后直接淬火，不需二次淬火。

钒在弹簧钢和轴承钢中能提高强度和屈服比，特别是提高比例极限和弹性极限，降低热处理时脱碳敏感性，从而提高了表面质量。五铬含钒的轴承钢，碳化物弥散度高，使用性能良好。

钒在工具钢中细化晶粒，降低过热敏感性，增加回火稳定性和耐磨性，从而延长了工具的使用寿命。

(6) 钛 (Ti)

钛和氮、氧、碳都有极强的亲和力，与硫的亲和力比铁强。因此，它是一种良好的脱氧去气剂和固定氮和碳的有效元素。钛虽然是强碳化物形成元素，但不和其他元素联合形成复合化合物。碳化钛结合力强，稳定，不易分解，在钢中只有加热到 **1000**°C 以上才能缓慢地溶入固溶体中。在未溶入之前，碳化钛微粒有阻止晶粒长大的作用。由于钛和碳之间的亲和力远大于铬和碳之间的亲和力，在不锈钢中常用钛来固定其中的碳以消除铬在晶界处的贫化，从而消除或减轻钢的晶间腐蚀。

钛也是强铁氧体形成元素之一，强烈的提高了钢的 **A1** 和 **A3** 温度。钛在普通低合金钢中能提高塑性和韧性。由于钛固定了氮和硫并形成碳化钛，提高了钢的强度。经正火使晶粒细化，析出形成碳化物可使钢的塑性和冲击韧性得到显著改善，含钛的合金结构钢，有良好的力学性能和工艺性能，主要缺点是淬透性稍差。

在高铬不锈钢中通常需加入约 **5** 倍碳含量的钛，不但能提高钢的抗蚀性（主要是抗晶间腐蚀）和韧性；还能组织钢在高温时的晶粒长大倾向和改善钢的焊接性能。

(7) 铌/钨 (Nb/Cb)

铌与钨常和钽共生，它们在钢中的作用相近。铌和钽部分溶入固溶体，起固溶强化作用。溶入奥氏体时显著提高钢的淬透性。但以碳化物和氧化物微粒

形式存在时，细化晶粒并降低钢的淬透性。它能增加钢的回火稳定性，有二次硬化作用。微量铌可以在不影响钢的塑性或韧性的情况下提高钢的强度。由于有细化晶粒的作用，能提高钢的冲击韧性并降低其脆性转变温度。当含量大于碳的 8 倍时，几乎可以固定钢中所有的碳，使钢具有良好的抗氢性能。在奥氏体钢中可以防止氧化介质对钢的晶间腐蚀。由于固定碳和沉淀硬化作用，能提高热强钢的高温性能，如蠕变强度等。

铌在建筑用普通低合金钢中能提高屈服强度和冲击韧性，降低脆性转变温度有益焊接性能。在渗碳及调质合金结构钢中在增加淬透性的同时。提高钢的韧性和低温性能。能降低低碳马氏体耐热不锈钢的空气硬化性，避免硬化回火脆性，提高蠕变强度。

(8) 锆 (Zr)

锆是强碳化物形成元素，它在钢中的作用与铌、钽、钒相似。加入少量锆有脱气、净化和细化晶粒作用，有利于钢的低温性能，改善冲压性能，它常用于制造燃气发动机和弹道导弹结构使用的超高强度钢和镍基高温合金中。

(9) 钴 (Co)

钴多用于特殊的钢和合金中，含钴的高速钢有高的的高温硬度，与钼同时加入马氏体时效钢中可以获得超高硬度和良好综合力学性能。此外，钴在热强钢和磁性材料中也是重要的合金元素。

钴降低钢的淬透性，因此，单独加入碳素钢中会降低调质后的综合力学性能。钴能强化铁素体，加入碳素钢中，在退火或正火状态下能提高钢的硬度、屈服点和抗拉强度，对伸长率和断面收缩率有不利的影响，冲击韧性也随着钴

含量的增加而降低。由于钴具有抗氧化性能，在耐热钢和耐热合金中得到应用。钴基合金燃气涡轮中更显示了它特有的作用。

(10) 硅 (Si)

硅能溶于铁素体和奥氏体中提高钢的硬度和强度，其作用仅次于磷，较锰、镍、铬、钨、钼、钒等元素强。但含硅量超过 3% 时，将显著降低钢的塑性和韧性。硅能提高钢的弹性极限、屈服强度和屈服比 (σ_s/σ_b)，以及疲劳强度和疲劳比 (σ_{-1}/σ_b) 等。这是硅或硅锰钢可作为弹簧钢种的缘故。

硅能降低钢的密度、热导率和电导率。能促使铁素体晶粒粗化，降低矫顽力。有减小晶体的各向异性倾向，使磁化容易，磁阻减小，可用来生产电工用钢，所以硅钢片的磁阻滞损耗较低。硅能提高铁素体的导磁率，使钢片在较弱磁场下有较高的磁感强度。但在强磁场下硅降低钢的磁感强度。硅因有强的脱氧力，从而减少了铁的磁时效作用。

含硅的钢在氧化气氛中加热时，表面将形成一层 SiO_2 薄膜，从而提高钢在高温时的抗氧化性。

硅能促使铸钢中的柱状晶成长，降低塑性。硅钢若加热时冷却较快，由于热导率低，钢的内部和外部温差较大，因而断裂。

硅能降低钢的焊接性能。因为与氧的结合能力硅比铁强，在焊接时容易生成低熔点的硅酸盐，增加熔渣和融化金属的流动性，引起喷溅现象，影响焊接质量。硅是良好的脱氧剂。用铝脱氧时酌情加一定量的硅，能显著提高率的脱氧性。硅在钢中本来就有一定的残存，这是由于炼铁炼钢时作为原料带入

的。在沸腾钢中，硅限制在 $<0.07\%$ ，有意加入时，则在炼钢时加入硅铁合金。

(11) 锰 (Mn)

锰是良好的脱氧剂和脱硫剂。钢中一般都含有一定量的锰，它能消除或减弱由于硫引起的钢的热脆性，从而改善钢的热加工性能。

锰和铁形成的固溶体，提高钢中铁素体和奥氏体的硬度和强度；同时又是碳化物形成的元素，进入渗碳体中取代一部分铁原子，锰在钢中由于降低临界转变温度，起到细化珠光体的作用，也间接地起到提高珠光体钢强度的作用。锰稳定奥氏体组织的能力仅次于镍，也强烈增加钢的淬透性。已用含量不超过 2% 的锰与其他元素配合制成多种合金钢。

锰具有资源丰富、效能多样的特点，获得了广泛的应用，如含锰较高的碳素结构钢、弹簧钢。

在高碳高锰耐磨钢中，锰含量可达 $10\% \sim 14\%$ ，经固溶处理后有良好的韧性，当收到冲击而变形时，表面层将因变形而强化，具有高的耐磨性。

锰与硫形成熔点较高的 MnS ，可防止因 FeS 而导致的热脆现象。锰有增加钢晶粒粗化的倾向和回火脆性敏感性。若冶炼浇注和锻轧后冷却不当，容易使钢产生白点。

(12) 铝 (Al)

铝主要用来脱氧和细化晶粒。在渗氮钢中促使形成坚硬耐蚀的渗氮层。铝能抑制低碳钢的时效，提高钢在低温下的韧性。含量高时能提高钢的抗氧化性

及在氧化性酸和 H₂S 气体中的耐蚀性，能改善钢的电、磁性能。铝在钢中固溶强化作用大，提高渗碳钢的耐磨性、疲劳强度及芯部力学性能。

在难冶合金中铝与镍形成化合物，从而提高冶强性，含铝的铁铬铝合金在高温下具有接近恒电阻的特性和优良的抗氧化性，适于做电冶合金材料与铬铝电阻丝。

某些钢脱氧时，如果铝用量过多，则会使钢产生反常组织和有促进钢的石墨化倾向。在铁素体及珠光体钢中，铝含量较高时，会降低其高温强度和韧性，并给冶炼、浇注等方面带来若干困难。

(13) 铜 (Cu)

铜在钢中的突出作用是改善普通低合金钢的抗大气腐蚀性能，特别是和磷配合使用时，加入铜还能提高钢的强度和屈服比，而对焊接性能没有不利的影晌。含铜 0.20%~0.50%的钢轨钢 (U-Cu)，除耐磨外其耐腐蚀寿命为一般碳素钢轨的 2-5 倍。

铜含量超过 0.75%时，经固溶处理和时效后，可产生时效强化作用。含量低时，其作用与镍相似，但较弱。含量较高时，对热变形加工不利，在热变形加工时导致铜脆现象。2%~3%铜在奥氏体不锈钢中可以对硫酸、磷酸及盐酸等抗腐蚀性能及对应力腐蚀的稳定性。

(14) 硼 (B)

硼在钢中的主要作用是增加钢的淬透性，从而节约其他较稀贵的金属，与镍、铬、钼等。为了这一目的，其含量一般规定在 0.001%~0.005%范围内。它可以代替 1.6%的镍、0.3%的铬或 0.2%的钼，以硼代钼应注意，因钼能

防止或降低回火脆性，而硼却略有促进回火脆性的倾向，所以不能用硼将钼完全代替。

中碳碳素钢中加硼，由于提高了淬透性，可使厚 20mm 以上的钢材调质后性能大为改善，因此，可用 40B 和 40MnB 钢代替 40Cr，可用 20Mn2TiB 钢代替 20CrMnTi 渗碳钢。但由于硼的作用随钢中碳的含量的增加而减弱，甚至消失，在选用含硼渗碳钢时，必须考虑到零件渗碳后，渗碳层的淬透性将低于芯部的淬透性的这一特点。

弹簧钢一般要求完全淬透，通常弹簧面积不大，采用含硼钢有利。对高硅弹簧钢硼的作用波动较大，不便采用。

硼和氮及氧有强的亲和力，沸腾钢中加入 0.007% 的硼，可以消除钢的时效现象。

(15) 稀土 (Re)

一般所说的稀土元素，是指元素周期表中原子序数从 57 号至 71 号的镧系元素（15 个）加上 21 号钪和 39 号钇，共 17 个元素。他们的性质接近，不易分离。未分离的叫混合稀土，比较便宜，稀土元素能提高锻轧钢材的塑性和冲击韧性，特别是在铸钢中尤为显著。它能提高耐热钢电热合金和高温合金的抗蠕变性能。

稀土元素也可以提高钢的抗氧化性和抗腐蚀性。抗氧化性的效果超过硅、铝、钛等元素。它能改善钢的流动性，减少非金属夹杂，使钢组织致密、纯净。

普通低合金钢中加入适当的稀土元素，有良好的脱氧去硫作用，提高冲击韧性（特别是低温韧性），改善各向异性性能。

稀土元素在铁铬铝合金中增加合金的抗氧能力，在高温下保持钢的细晶粒，提高高温强度，因而使电热合金的寿命得到显著提高。

(16) 氮 (N)

氮能部分用于铁中，有固溶强化和提高淬透性的作用，但不显著。由于氮化物在晶界上析出，能提高晶界高温强度，增加钢的蠕变强度。与钢中其他元素化合，有沉淀硬化作用。对钢抗腐蚀性能不显著，但钢的表面渗氮后，不仅增加其硬度和耐磨性，也显著改善抗腐蚀性。在低碳钢中残留氮会导致时效脆性。

(17) 硫 (S)

提高硫和锰的含量，可以改善钢的被切削性能，在易切削钢中，硫作为有益元素加入。硫在钢中偏析严重。恶化钢的质量，在高温下，降低钢的塑性，是一种有害元素，它以熔点较低的 FeS 形式存在。单独存在的 FeS 的熔点只有 1190°C ，而在钢中与铁形成共晶体的共晶温度更低，只有 988°C ，当钢凝固时，硫化铁析集在原生晶界处。钢 $1100\sim 1200^\circ\text{C}$ 进行轧制时，晶界上的 FeS 就将熔化，大大的削弱了晶粒之间的结合力，导致钢的热脆现象，因此对硫应严加控制。一般控制在 $0.020\%\sim 0.050\%$ 。为防止因硫导致的脆性，应加足够的锰，使其形成熔点较高的 MnS 。若钢中含流量偏高，焊接时由于 SO_2 的产生，将在焊接金属内形成气孔和疏松。

(18) 磷 (P)

磷在钢中固溶强化和冷作硬化作用强。作为合金元素加入低合金结构钢中，能提高其强度和钢的耐大气腐蚀性能，但降低其冷冲压性能。磷与硫和锰联

合使用，能增加钢的被切削性能，增加加工件的表面质量，用于易切削钢，所以易切削钢含磷也比较高。磷用于铁素体，虽然能提高钢的强度和硬度，最大的害处是，偏析严重，增加回火脆性，显著增加钢的塑性和韧性，致使钢在冷加工时容易脆裂也即所谓“冷脆”现象。磷对焊接性也有不利影响。磷是有害元素，应严加控制，一般含量不大于 0.03%~0.04%。

张亮

2016.4.13