合金元素对压力容器钢材影响浅析

赵斐 郝加封

北京航天试验技术研究所

摘要：压力容器材料的选择与压力容器的安全性与经济性息息相关，合理选择的基础是对材料的深刻认识与了解。本文探究了压力容器用钢的分类情况，着重分析了压力容器用钢的一些选择要求以及钢材中的诸多合金元素的作用。本文加深了读者对压力容器用钢的认识，有助于帮助设计者合理地选择钢种。

**关键词：压力容器;材料选择;合金元素**

**The investigation on steel used in pressure vessel**

**Zhao Fei, Li Zhong**

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology)

**Abstract** :The selection of materials used in pressure vessel is closely related to the vessel’s safety and economics, and the appropriate selections are based on the well understanding to the materials. This paper analyzed the rules in selections of vessel materials and the function of many alloying element. Finally, this article could deepen readers’ recognitions to steel used in pressure vessel and is good for designers to select appropriate materials.

**Key words: pressure vessel; material selection; alloying element**

1. 引言

压力容器发展的程度制约了石油化工行业的发展速度，而钢材（包括钢板、钢管和锻件）的正确选择是维持设备稳定的先决条件。因此，正确认识压力容器用钢中的钢材成分、特点以及牌号等信息，不仅可以使我们了解压力容器的选材经验，更有助于我们立足现状进行革新。

2. 压力容器用钢的分类

压力容器用钢的类别可以按照多种方式划分，按照钢材的材料来划分，压力容器用钢可分为碳素钢、低合金钢和高合金钢[1]。

碳素钢又称碳钢，指的是含碳量在0.02%—2.11%（一般低于1.35%）的铁碳合金，压力容器用的碳钢可分为三类，第一类是碳素结构钢如Q235-B和Q235-C；第二类是优质碳素结构钢，优质碳素结构钢一般为含碳量在0.8%以下的碳素钢，同时其中S与P元素的含量较低，机械性能良好，如10钢、20钢优质碳素结构钢；第三类是压力容器专用钢板，它是在优质碳素结构钢的基础上，更加严格地控制钢材内的S与P元素的含量，同时对钢材内部缺陷以及表面质量的要求也较高，在钢号后也会有“R”标识，R读作“容”，表示压力容器专用钢板，如Q245R。碳钢强度较低，塑性和可焊性较好，同时价格低廉，因此常常用于常压或中、低压容器的制造。

低合金钢是在碳素钢的基础上加入少量合金元素的合金钢，其合金元素有Cr、Mo、Ni、Mn、Nb等，加入的合金元素总量不超过5%。低合金钢在经过热处理后会表现出较高的强度[2]，此外，还具有优良的韧性、焊接性能、成形性能和耐腐蚀性能。压力容器用钢中常见的低合金钢与Q345R、15CrMoR等。

高合金钢是在碳素钢的基础上加入一定量合金元素的合金钢[3]，所加入元素种类以铬（Cr）为主，其他合金元素按比例适量加入，可以提高钢的抗腐蚀能力，只是在量上面，高合金钢的合金元素总量一般高于10%，高合金钢的特点是耐腐蚀、耐高温，同时还具有良好的低温性能。一种典型的高合金钢为0Cr18Ni9，又称304不锈钢。

1. 钢材中的重要元素及其作用

合金钢的性能要优于普通的碳素钢，控制铁碳合金中碳的含量对钢材的强度与韧性的影响很大，与此同时，有些特殊合金元素的加入，即便是微量的，也会对钢材整体的强度、硬度、韧性和塑性等产生极大的影响。本文将以各个元素为出发点，探究压力容器用钢中添加的各个元素对钢材的影响。

1、碳（C）：铁碳合金中碳素钢和铸铁的不同就在于含碳量的多少，铸铁是合金中C的质量分数大于2.11%，虽然铸铁的抗拉强度，但是塑性和韧性比钢要差，不过具有良好的铸造性能，耐磨性、减震性等良好性能。而在碳素钢中，随着C元素质量分数的提高，钢材的抗拉强度会升高，布氏硬度也有显著提高。以45钢和65钢为例，两种钢材的Si含量都在0.17%-0.37%之间，Mn含量在0.50%—0.80%之间。45钢的含碳量在0.42%—0.50%之间，其抗拉强度为600MPa，布氏硬度为229；65钢的含碳量在0.62%-0.70%—之间，其抗拉强度为710MPa，布氏硬度为255。由此可见，一般来说钢中含碳量增加会提高钢材的硬度与耐磨性，不过相对应地，钢材的塑性与韧性也会下降。对于抗拉强度而言，在一定的范围内（C的质量分数在0.9%以下），C含量的增高可以提高钢材的抗拉强度，超出了这个范围，钢材的抗拉强度会显著下降。与此同时，碳含量还影响着钢材的腐蚀性和可焊性，含碳量的升高会使钢材在空气中发生电化学反应，造成钢铁的腐蚀，对设备有严重危害；就可焊性而言，当碳量0.23%超过时，钢的焊接性能变坏，在压力容器选材时，需要焊接的部件一般采用低合金钢，铸铁一般用于鞍座或者不重要的部件。

2、 硅（Si）：钢铁炼制过程中，会加入硅作为脱氧剂，故一般的钢材中都会含有少量的硅，多数优质碳素结构钢的硅含量在0.17%—0.39%之间，此时硅不算作合金元素，但当硅元素的质量分数超过0.5%—0.6%是，即为合金元素。压力容器的工作环境通常较为恶劣，硅元素的加入，能够提高钢铁在高温下的抗氧化腐蚀性，因为高温下，Si与氧气接触，形成致密的高熔点的耐高温氧化物，覆盖钢的表面，能够阻止钢材被进一步腐蚀。[4]

3、锰（Mn）：在炼钢过程中，锰是良好的脱氧剂，Mn元素的存在，可以提高Si的脱氧能力，同时它又可以与S元素反应生成MnS从而降低S的质量分数，也是脱硫剂。作为炼钢时的添加元素，多数钢中都含有少量的锰，如碳素结构钢中的锰含量一般为0.50%—0.80%。

4、磷（P）：不像其他元素对钢材性能具有增益作用，P元素的存在会对钢材性能产生很大的负面影响。微观层面上将讲，P可以溶于钢中的铁素体，进而使得铁的晶格发生剧烈歪曲，最终表现出来的，则是钢铁的强度和硬度增大，韧性与塑性降低。P元素对钢材的影响在低温时尤其明显，因此认为P可以增大钢材的冷脆性。P元素在钢材中是需要严格限制质量分数的元素：普通钢中P的质量分数0.045%；优质钢中要求P的质量分数0.035%；高级优质钢中P的质量分数0.030%；特级优质钢中P的质量分数0.025%。

5、硫（S）：S元素的存在对钢材的危害甚至比P还要大。由于铁矿石的原因，S元素在钢铁中的存在形式为FeS,它的熔点约为985℃,大量存在于钢材的晶界处。当钢材在1000℃以上的高温进行压力加工时，FeS会变为熔融状态，这就使得各个晶粒在界面处发生了晶界分离，钢材就会被破坏。因为这种现象常常在高温状态下发生，故认为S元素能够加剧钢铁的热脆性。S元素对钢铁危害极大，它的质量分数需要严格控制：普通钢中S的质量分数0.050%；优质钢中要求S的质量分数0.035%；高级优质钢中S的质量分数0.020%；特级优质钢中P的质量分数0.015%。

6、铬（Cr）：铬在压力容器用钢中出现得十分频繁，碳钢中Cr元素的加入能够使钢材的各项性能得到极大的改善。对于碳质量分数较高的钢材，铬元素的加入能够在钢材热处理中有效细化晶粒，均匀组织，提高淬透性和耐腐蚀性。有些水下的压力容器设备采用的是含有Cr元素的高合金钢，一个典型的钢种为0CCr18Ni9（304不锈钢），有时候为了降低成本，会采取固相渗铬等工艺。此外，铬能显著提高强度、硬度和耐磨性，但同时降低塑性和韧性。因此，铬元素是不锈钢，耐热钢的重要合金元素。

7、镍(Ni)：Ni元素与Cr元素在我国钢铁冶炼史上是1965年之后才开始出现的，最开始使用这两种元素的原因是，实践证明，镍是提高耐大气腐蚀钢性能的有效元素[5]。同时，特种设备钢材的总和性能要求比较高，要求钢有一定的强度、硬度以及韧性，与Cr类似，镍能提高钢的强度，而又保持良好的塑性和韧性。但由于镍价格的限制，目前很多学者在寻找廉价材料来代替合金元素镍，如近年来有学者研究以锰代镍的合金钢的性能。

8、钼(Mo)：钼对钢材的强度、抗蠕变能力有极大的改善作用，强化的原理是异类原子之间的相互作用[6]。钼（Mo）元素加入钢材中之后，会与钢材中的C、Fe以及其他合金元素发生作用，钢材中各相原有的稳定性被打破，产生了一部分新相，令人欣喜的是产生的新相稳定性更好。

9、钛(Ti)：Ti元素与许多非金属元素（C、N、O、S）都具有较强的亲和力，以C为例，钛（Ti）可以与碳（C）形成具有较高硬度和稳定性的碳化物[7]，这些碳化物也可以作为晶核，在钢进行再结晶时，使晶粒更加细化，微观上的改善可以提高钢材整体的强度、硬度与耐磨性；钛（Ti）与硫（S）的结合也是值得注意的，由于Ti和S的亲和力比Fe和S的亲和力大，所以Ti可以把S从Fe手中“夺回来”，一定程度上限制了FeS的形成，Ti在钢材中加入可以减少钢的热脆性。

10 钒(V)：V在压力容器用钢材中的溶解度较高，一般钢材中V元素作为合金元素时质量分数都在1%以下。与Ti类似，V也可以与C形成硬度较高的碳化物，V元素在高温下对于提高钢材抗氢腐蚀的能力效果显著。钒的另一特点是“亲氮性”，它可以“捕捉”到钢铁中自由形态的N元素，形成氮化物粒子，有效地阻止奥氏体晶粒的长大，达到细化晶粒的目的。由此可见，V与N在合金元素中是一对搭档，需要配合使用，在缺少N元素时，V对钢材强度的提高作用并不明显。

11、铌(Nb)：钢铁的合金元素中铌（Nb）的含量一般都是比较小的，但是它的作用却不容小觑，它对提高钢材韧性有极大的作用。生产中，一般Nb元素的质量分数在0.05%以下，Nb元素与C元素可以形成稳定性较高的碳化物，能细化铁素体晶粒。当钢材整体铁素体晶粒性能良好时，韧性就会得到提高，但是当Nb加入的质量分数大于0.05%时，提升效果不再十分明显。故有些用作储罐的压力容器选材，都会选用带有铌为合金元素的钢材。

通过以上对合金钢中诸多合金元素的逐个介绍，可以发现，钢材中合金元素合理的配比或使用可以改善钢的综合力学性能、淬透性、热稳定性和耐蚀性等[8]。将各个元素的特点总结起来，可以得到合金元素在压力容器用钢中，可以提高提高钢材的力学性能。

1. 结论
2. 压力容器用钢多为低/高合金高强度钢，一些不太重要或者机械性能要求较低的部件会用碳钢。
3. 压力容器用钢中Cr、V、Nb元素有助于提高钢材的硬度、抗腐蚀性，Ni、Mn元素有助于提高材料的低温性能与韧性，S、P属有害元素，需要严格控制。通过容器使用时特征的分析，选取元素含量不同的钢材，既可以满足强度的需求，又能够保证经济性。

参考文献

[1] 郑津洋,董其伍,桑芝富.过程设备设计.北京:化学工业出版社，2010.

[2] 张晓刚. 近年来低合金高强度钢的进展[J]. 钢铁,2011(11):1-9.

[3] 邢文静,丁厚福,杜晓东等. 碳含量对低碳高合金钢组织及耐腐蚀行为的影响热加工工艺,2006(07):35-37.

[4] 周兰新,杨朝东. 浅析化学元素对钢丝性能的影响[J]. 新疆钢铁,2002(01):14-19.

[5] 杨晓娟,杜晓东,汪瑞俊等. 镍、钼含量对低碳高合金钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理,2008(11):49-51.

[6] 董瀚,马党参,郎宇平等. 钼在合金钢中的特性与应用[J]. 世界有色金属, 2010(11):66-69.

[7] 韩孝永. 铌、钒、钛在微合金钢中的作用[J]. 宽厚板, 2006(01):39-40.

[8] 陈学东,崔军,章小浒,等. 我国压力容器设计、制造和维护十年回顾与展望[J]. 压力容器, 2012(12):1-23.