维普资讯 http://www.cqvip.com

●国外焊管

高强度连续管

毕宗岳，付宏强 编译
（宝鸡石油钢管有限责任公司 焊管研究所，陕西 宝鸡 721008）

摘 要：连续管强度级别的提高有利有弊。一方面由于其拉伸载荷极限、抗扭极限、爆破极限以及挤裂极限的增加，使得连续管可以在更高压力、更大长度范围内应用；另一方面，随着强度级别的提高，其塑性、韧性降低，并且对环境裂纹的敏感性也在增强。初步试验结果表明，对于屈服强度分别为690 MPa(100 ksi)和758 MPa(110 ksi)的新一代高强度连续管，其商业可适用的最小屈服强度级别为620 MPa(90 ksi)。

关键词：连续管；爆破压力；挤毁压力；高强度低合金钢（HSLA）；力学性能；抗疲劳性能；硫化物应力腐蚀（SSC）

中图分类号：TG142.12 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-3938(2007)06-0085-05

0 前 言

不断提高连续管各项性能已经成为连续管材料研究的热点课题之一。由于连续管在管径、长度、强度、质量和耐腐蚀性能等方面的提高，其应用领域不断扩大。目前已经扩展到多个方面，如钻井、测井、气举、酸化/压裂、挤水泥、生产管柱和防砂等。同时，连续管也已被用作输送管。

本文介绍这种高强度、精密连续管，研究其性能特点和潜在局限性，可以帮助我们慎重选材。文中所指的高强度连续管最小屈服强度≥620 MPa(90 ksi)。

1 连续管强度水平的发展历史及现状

连续管的发展已有数年时间，从20世纪60年代早期最小屈服强度为345 MPa(50 ksi)的连续管到90年代中期商业应用最小屈服强度上升到620 MPa(90 ksi)和690 MPa(100 ksi)的连续管，以及计划推出的强度水平为758 MPa(110 ksi)的连续管。各年代连续管强度水平的进展状况如图1所示。

制造连续管用材料发展了多年，从最初60年代的普通碳钢到90年代各种级别的低合金钢。随着强度水平的提高，人们对材料其它性能的关注随之增强，对材料性能的要求也越来越多。

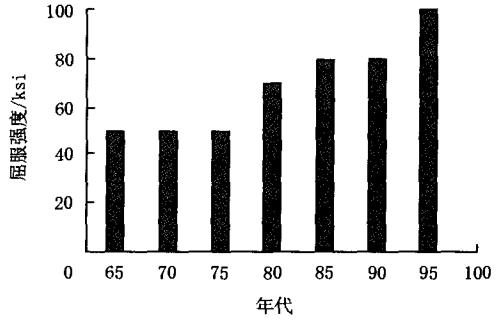


图1 各年代对应的连续管强度

2 连续管强度与其它性能的关系

钢级一般由材料的最小屈服强度来定义，随着屈服强度的增加，其抗拉强度也随之增加。强度提高后，材料的其它性能(包括成分、塑性、韧性、高周疲劳寿命、低周疲劳寿命、硬度、显微组织类型和焊接性能等)如何变化则难以预测，而这些性能与连续管不同工况下的特殊要求密切相关。

连续管的强度与这些性能之间的关系相互影响或相互制约，下面主要讨论其中三个性能(成分、塑性和硬度)的变化和影响情况。

2.1 成分

连续管材料的研究从碳钢到高强度低合金钢经过了数年，目前已经允许使用高强度低合金钢。在材料成分设计中尽管合金元素的添加量非常少，

维普资讯 http://www.cqvip.com

但是它们对最终交货产品的性能会有很大影响。特别对于高强度级别的连续管，Nb，Ti 和 V 在钢中形成碳化物和碳氮化物，在控轧控冷过程中产生沉淀物。这些细小的弥散物控制晶粒大小并且增强钢级强度水平，因此控轧工艺非常重要。目前大多数连续管趋向于高强度低合金类钢，在这些钢中都包含有一种或几种上面提到的微合金元素。

在其它微合金元素中，Mn，Cr 和 Mo 可用来增加强度，同时，随着连续管壁厚增加，这些强化元素显得更为重要。

高强度连续管材料中还需要添加 Ni 和 Cu 等元素，它们对强度影响不是很大，但是对提高塑性、韧性和抗腐蚀性能起着重要作用。

2.2 硬度

硬度与抗拉强度有直接的关系。当强度增加时，硬度也随之增加。然而，随着连续管强度水平的提高也会带来其它潜在的问题。特别对于屈服强度为 690 MPa 和 758 MPa 的连续管，其硬度会增加到较高水平，而其它性能（主要是塑性、韧性和抗硫化物应力腐蚀开裂的性能）会略微降低。连续管强度与最大硬度值的对应关系如表 1。

表 1 屈服强度与硬度的关系

屈服强度/MPa(ksi)	典型硬度值范围	屈服强度/MPa(ksi)	典型硬度值范围
483(70)	HRB85 ~ 94	690(100)	HRC20 ~ 25
552(80)	HRB90 ~ 98	758(110)	HRC22 ~ 28
621(90)	HRB94 ~ HRC22		

注：所有硬度值为粗略估计。

2.3 塑性

塑性与许多因素有关。一般而言，当强度增大时，塑性则会降低。这种趋势能够在连续油管制造规范及相关的行业标准如 ASTM 规范[1]中看到。表 2 为屈服强度与延伸率的变化关系，随着强度增加延伸率急剧下降，最终可能导致连续管在使用过程中出现断裂，并增大了管子可允许的缺陷尺寸，降低疲劳寿命等等。

表 2 延伸率随屈服强度的变化趋势

屈服强度/MPa(ksi)	最小延伸率/%	屈服强度/MPa(ksi)	最小延伸率*/%
483(70)	30	690(100)	22
552(80)	28	758(110)	18
621(90)	25		

注：* 屈服强度为 690 MPa 和 758 MPa 的延伸率为估计值。

3 高强度连续管的优点

由于高强度连续管在操作方面的优点促使了连续管强度水平的不断提高。如管体负载能力直接随着强度水平的增加而增加。对于外径 50.8 mm(2 in)、壁厚 4.445 mm(0.175 in)、屈服强度 482 MPa(70 ksi)的连续管，其管体最小负载为 312.3 kN (70 200 lbf)；同样尺寸最小屈服强度为 758 MPa (110 ksi)的连续管其管体最小负载为 490.6 kN(110 300 lbf)。管体载荷与连续管屈服前的承载质量有直接的关系，并且是确定连续管柱最大长度的主要因素。

扭转载荷同样随着管子强度水平的提高而增加。对上述尺寸的连续管，当屈服强度为 482 MPa (70 ksi)时，其抗扭极限为 3 716 J (2 741 ft·lbf)。当屈服强度为 758 MPa (110 ksi)时，其抗扭极限将增加到 7 919 J (4 307 ft·lbf)。

考虑管子承受组合载荷时，张应力下管子的挤裂极限和爆破极限可根据其屈服强度和几何尺寸来确定。通过数学方法计算组合载荷对爆破强度和挤裂强度的影响时，读者可直接查阅文献[2 - 4]。这种爆破压力和挤裂压力的计算公式如下

$$P_{挤裂} = -(-\sigma + \mathrm{SQRT}(4\sigma_S^2 - 3^2)/2c),$$

$$P_{爆破} = \frac{1}{2}/f\{\sigma(b-1) + \mathrm{SQRT}[\sigma^2(b-1) + 4f(\sigma_S^2 - \sigma^2)]\},$$

式中：σ—管体载荷；

σ_S—屈服强度；

$b = (D_{外}^2 + D_{内}^2)/(D_{外}^2 - D_{内}^2)$，其中 $D_{外}$ 为外径；$D_{内}$ 为内径；

$c = 2D_{外}^2/(D_{外}^2 - D_{内}^2)$；

$f = b^2 + b + 1$。

用以上公式对同样尺寸的连续管(外径 50.8 mm、壁厚 4.445 mm)进行爆破压力和挤裂压力计算，屈服强度在 482 ~ 758 MPa (70 ~ 110 ksi)之间变化，我们可以得到图 2 所示的爆破压力与屈服强度的关系以及图 3 所示的挤裂压力与屈服强度之间的关系。

尽管爆破压力和挤裂压力直接与屈服强度大小有关，但屈服强度大小又受到塑性、韧性和抗腐蚀性能的影响和制约，使得连续管应用范围进一步受到限制。

维普资讯 http://www.cqvip.com

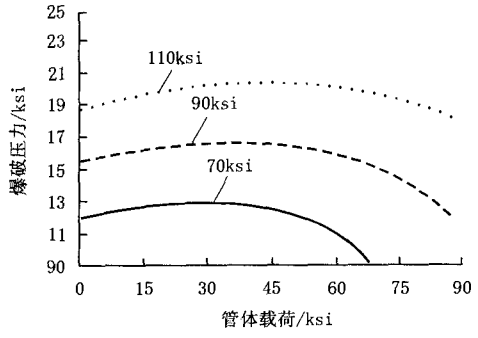


图2　爆破压力与屈服强度的关系

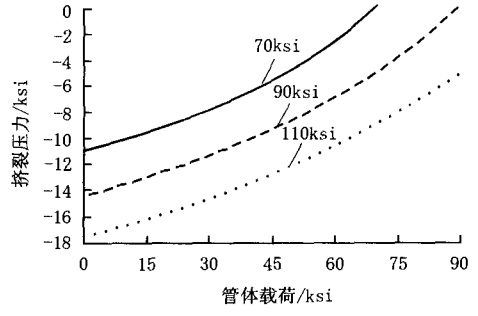


图3　挤裂压力与屈服强度的关系

4　高强度连续管的缺点

更高强度的连续管,其缺点是降低了塑性和韧性,增强了对环境裂纹的敏感性,同时制管成本和人工成本更高。一般来说,随着连续管强度的增加,相应的加工制造成本和原料成本也随之增加。另外,由于高强度连续管疲劳寿命和抗断裂性较低,对环境裂纹的敏感性较高,其产品寿命降低,进而导致连续管的运转成本也随着强度级别的升高而增加。

塑性和韧性的降低限制了高强度连续管的应用。由于高强度连续管塑性、韧性以及现场焊接的局限性,人们担心使用中发生脆性失效而带来更大损失,使得人们不能冒险使用这种更高强度的连续管。因此对于690 MPa(100 ksi)或更高强度级别的连续管用于井下作业并非合理。

对于高强度连续管,如果壁厚减薄,其塑性、韧性会受到进一步限制。当壁厚减少时,缺陷的尺寸和剩余壁厚的百分比变得越来越重要。当壁厚百分比一定时临界缺陷尺寸增加,而临界缺陷尺寸就是导致管子快速断裂的缺陷尺寸。实际上,强度增加和壁厚减少使缺陷或临界缺陷的尺寸减小,这就意味着对于给定壁厚和强度级别在621 MPa(90 ksi)的连续管可接受的缺陷尺寸为0.8 mm($^1/_{32}$ in);当强度级别增加到690 MPa (100 ksi)时,其临界缺陷尺寸可减小到0.4 mm($^1/_{64}$ in)。当使用1.6 mm($^1/_{16}$ in)或0.8 mm($^1/_{32}$ in)校验标样对690 MPa (100 ksi)钢级的连续管进行校验时,很可能检测不到0.4 mm($^1/_{64}$ in)的缺陷,连续管因此而过早失效。

此外,最常见的问题是随着更高强度钢材的使用,其环境开裂的敏感性也随之增强。在各种环境开裂失效机制中,硫化物应力腐蚀开裂是合金钢产品在油气行业中失效的最主要的表现方式。当金属暴露在含有硫化氢气体环境中时,金属将变脆,易产生裂纹或者失效,这种脆化称为硫化物应力腐蚀(SSC)。发生SSC现象的因素,一个是要有易受影响的材料,一个是要包含有硫化氢气体的环境,再一个是材料受应力作用。在油气行业里,大多数生产井至少含有少量的硫化氢气体,大多数构件包括连续管,都是在高应力水平下进行服役。因此,连续管的抗SSC性能很重要。

材料硬度大小已经被广泛用来预测和确保其抗SSC性能。NACE M0175[5]要求服役在含有硫化氢酸性环境中的碳钢和低合金钢其最大硬度值为HRC22。石油行业在API 5CT[6]中对L80强度级油管产品要求最大硬度值为HRC23,对在酸性服役条件下的C90和T95强度级油管产品最大硬度为HRC25.4,这些情况都说明了材料硬度与其强度水平有很大关系。

研究证明[7],最小屈服强度为621 MPa (90 ksi) 套管用钢,在酸性条件下对其进行三点弯曲试验发现,随着材料硬度值增加其抗SSC性能下降。这种关系如图4所示,其中SC是抗SSC性能的量度(值越大代表抗SSC性能越高)。

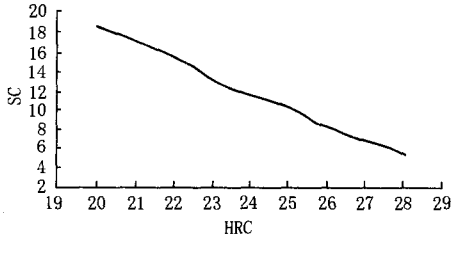


图4　硬度与抗SSC性能

维普资讯 http://www.cqvip.com

5 高强度连续管的发展

新一代高强度连续管料的发展着重在于最大可能地减少高强度所带来的其它缺点，而非先前的一味强调达到规定的屈服强度目标。在硫化氢服役条件下通过对连续管的屈服强度、抗拉强度和硬度进行分析研究，发现强度级别为621 MPa (90 ksi)的连续管其抗SSC性能较好，而强度级别为690 MPa (100 ksi)或更高强度级别的连续管对环境开裂的抵抗性较差。因此，应该在两个方面开展工作，第一个方面是调整现有的化学成分和制造工艺，生产出强度级别为621 MPa(90 ksi)的连续管；第二个方面是研究新的材料和技术，开发出强度级别为690 MPa (100 ksi)和758 MPa (110 ksi)的连续管。

6 高强度连续管抗SSC性能、塑性、硬度和疲劳寿命试验研究

6.1 抗SSC性能

目前HSLA钢类别多为屈服强度为482 MPa (70 ksi)和552 MPa (80 ksi)，这两种强度水平的钢通过控制其强度和硬度，可符合NACE MR0175要求，并经过试验显示出很好的抗SSC性能，目前已成功地应用于生产实践[8~9]。对于强度水平为621 MPa (90 ksi)的连续管，通过强度、硬度控制也达到了NACE MR0175的要求。经证实这种连续管在极限应力水平达到实际屈服强度时具有优良的抗SSC性能[9]。在最近研究中，按照NACE TM0177方法C[10]进行4点弯曲试验和C形环试验，并使用NACE标准要求的环境，即由0.1 MPa的硫化氢气体与含有5%氯化钠和含有0.5%的乙酸的脱离子水组成，且溶液初始pH值大约为2.7。

对新开发的强度级别为690 MPa (100 ksi)的连续管进行C形环试验，试验环境也是在同样的SSC环境中。结果表明，其极限应力可达到规定最小屈服强度的90%。然而同样试验条件下其焊缝区的极限应力低于规定最小屈服强度的90%。试验结果见表3。

6.2 抗疲劳性能

虽然疲劳试验仍在进行之中，但是初步试验结果比较理想，对于强度级别为690 MPa(100 ksi)连续管已显示出优异的抗疲劳性能。对强度为758 MPa (110 ksi)的连续管疲劳试验正在进行，疲劳试验初步结果如图5所示。

表3 高强度连续管的抗SSC试验结果

试样		施加应力/ksi	实际屈服强度/ksi	结果
母材	C形环	90	105	无裂纹
母材	C形环	70	105	无裂纹
焊缝	C形环	90	105	开裂
焊缝	C形环	70	105	无裂纹

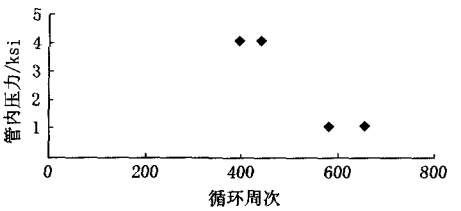


图5 HS100疲劳试验结果

6.3 塑性和硬度

材料屈服强度为690 MPa (100 ksi)的连续管很有希望发展为管体实际屈服强度为724 MPa (105 ksi)的连续管，最大管体硬度为HRC22，最大焊缝及热影响区硬度值在HRC21~24范围内，全管体拉伸试验延伸率已经超过30%。对强度为758 MPa (110 ksi)连续管研究试验结果表明，管体实际屈服强度为793 MPa (115 ksi)，延伸率约为25%。正如上面所预测的，这个强度级别的硬度更高，其最大管体硬度值为HRC24，最大焊缝及热影响区硬度值为HRC23~26。

6.4 试验结果分析

尽管本文所述试验结果非常好，但这只是对几个小批量连续管和一个生产批的两个标准厚度3.40 mm(0.134 in)和3.96 mm(0.156 in)连续管的试验结果。其最终产品性能可能会发生一些改变。

需要再次注意的是，当连续管强度越来越高时，其塑性和对环境开裂的抵抗性会降低。尽管经过本文所述改进后其试验结果很好，但塑性和抗SSC性能仍会降低。这些高强度连续管的成功应用还需做进一步的研究分析。

7 结 论

(1)随着连续管长度的增加和承压能力的提高，更高强度级别的连续管有一定的市场需求，其

维普资讯 http://www.cqvip.com

应用不断增加。

(2)由于连续管强度的增加,与之关联的塑性和抗SSC性能会有所降低。

(3)规定最小屈服强度为621MPa(90ksi)的连续管商业上是适用的,它表现出了良好的塑性和对SSC环境的抵抗性。

(4)正在研究开发的690MPa(100ksi)和758MPa(110ksi)强度级别的连续管初步试验结果已经很有希望。

参考文献:

[1]ASTM Standard A607, Specification for Steel, Sheet and Strip, High-strength, Low-alloy, Columbium or Vanadium, or Both, Hot-rolled and Cold-rolled[S].

[2]Coiled Tubing Technical Handbook: Precision Tube Technology[M]. Houston: [s. n.], 1997.

[3]API Bulletin 5C3, Bulletin on Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill Pipe, and Line Pipe, Failures in Coiled Tubing[S].

[4]NEWMAN K. Coiled Tubing Pressure and Tension Limits [C]// Offshore Europe Conference. Aberdeen: SPE, 1991.

[5]NACE Standard MR0175, Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials for Oilfield Equipment[S].

[6]API Specification 5CT, Specifcation for Casing and Tubing[S].

[7]IKEDA A. Development of High Strength Oil Country Tubular Goods Highly Resistant to Sulfide Stress Corrosion Cracking[C]// H_2S Corrosion in Oil and Gas Production - A Compilation of Classic Papers. Houston: NACE, 1981:548-557.

[8]CAYARD M S, KANE R D. Serviceability of Coiled Tubing for Sour Oil and Gas Wells[C]// 2nd SPE/ICOTA North American Coiled Tubing Roundtable. Montgomery: SPE, 1997.

[9]BADRAK R P. High Strength Materials for Coiled Tubing [C]// 6th International Conference on Coiled Tubing Technologies. Houston: 1997.

[10]NACE Standard TM0177, Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking in H_2S Environments[S].

译自1998年4月休斯顿SPE连续管会议论文。

译者简介:毕宗岳(1962-),男,高级工程师,宝鸡石油钢管有限责任公司焊管研究所所长,在读硕士,长期从事焊管技术工作,发表论文10多篇。

收稿日期:2007-06-19

中国钢结构协会钢管分会四届四次会议在无锡召开

[本刊讯] 2007年11月12~15日,由中国钢结构协会钢管协会主办、江苏振达钢管有限公司协办的全国钢管协会四届四次会员大会在江苏无锡召开。无锡市副市长谈学明、中国钢铁协会常务副秘书长李世俊、中国钢结构协会秘书长刘毅、钢管协会常务副理事长庄刚、中国冶金质量协会常务副秘书长潘锦浩以及来自77个会员单位的140余名代表出席了此次大会。

会上,李世俊常务副秘书长做了题为"中国钢铁行业变化的形势"的重要报告;潘锦浩常务副秘书长做了题为"企业推进名牌工作"的重要报告;庄刚副理事长代表钢管协会理事长严泽生先生做了钢管协会2007年工作报告。

严理事长报告指出,2007年以来,钢管行业总体运行良好。产量持续创新高,2007年1~9月钢管产量3 090.33万t,同比增长17.52%,增幅同比降低17.25%,其中无缝钢管产量1 389.68万t,同比增长24.1%,环比降低6%;焊接钢管产量1 700.9万t,同比增长12.2%,环比降低12.6%。产业结构调整已见成效,作为无缝钢管中高技术含量、高附加值的品种——无缝油井管(油管、钻杆、套管),从2002年实现出口零的突破到2007年1~9月出口量达到11.14万t,预计2007年出口15万t,这是一个了不起的进步;作为高压油气输送用管线管的重要产品——大直径(>406 mm)、高强度焊管,2007年1~9月出口量达到74.81万t,预计2007年出口100万t。出口量激增,产需基本平衡,2007年1~9月我国钢管累计出口量同比增长72.64%,其中无缝管增长75.24%,焊接钢管增长70.71%;1~9月钢管进口量同比降低22.31%,其中无缝管降低23.22%,焊接钢管降低19.9%。钢管价格处在高位小幅波动。严理事长工作报告对钢管行业下一步的工作做出了明确的指示:①贯彻落实国家对钢铁工业的宏观调控政策;②积极适应国内外市场的发展变化,保持市场稳定运行;③进一步优化出口产品结构,实施多元化出口政策;④改进和加强营销工作,着力提高市场竞争能力。

与会代表根据中国钢铁行业的形势和严泽生理事长的工作报告进行了热烈地讨论。本次会议是在中国共产党的十七次代表大会胜利闭幕的形势下召开的,十七大为钢铁行业的发展指明了方向。会议代表一致认为,在十七大精神的指引下,钢管行业将迎来更加美好的明天。