

国内外小口径TP347H钢管性能对比分析

■ 陈明健, 江克, 杨吉梅

TP347H不锈钢管是奥氏体型不锈钢, 有较好的抗晶间腐蚀性能、较高的持久强度、良好的组织稳定性和抗氧化性能, 还具有良好的弯曲和焊接性能, 用于承压部件, 其最高使用温度可达650℃, 用于抗氧化部件, 其最高抗氧化使用温度可达850℃, 故广泛应用于核电、石油、化工、食品机械等工业中。

考虑其优良性能, 小口径TP347H钢管在制氢转化炉入口管系猪尾管上使用越来越多。由于使用条件较苛刻, 从长周期安全运行角度考虑, 国内设计院往往偏向选择进口钢管制造猪尾管, 导致设备的采购周期较长及投资成本过高, 且不利于材料国产化进程。但近年来, 国产小口径TP347H钢管已逐渐在制氢转化炉猪尾管中使用, 并稳定发展, 取得良好使用业绩。本文通过对比分析国产和进口小口径TP347H钢管各项性能, 讨论国内外钢管制造的优劣以及国产钢管替代进口钢管的可能性, 并给制氢转化炉猪尾管等国内小口径钢管设计采购技术条件的制订提供参考建议, 工程意义十分重要。

1. 对比研究方案

对比试验采用TP347H材质 $\phi 31.8\text{mm} \times 2.9\text{mm}$ 钢管, 国产钢管选择国内生产制造小口径钢管使用业绩较多的两家, 国外钢管选择日本制造的进口钢管, 两种钢管制造及检验标准均执行ASME SA312。从成品钢管中分别取样进行化学成分分析、常温拉伸试验、晶间腐蚀试验、微观组织检验、晶粒度评定、压扁试验等项目检查, 每项试验均取4组试样, 其中编号1[#]、2[#]、3[#]为国产钢管试样, 编号4[#]为进口钢管试样。

2. 化学成分分析

通过Spectro MAXx落地式直读光谱仪对国产及进口TP347H钢管进行化学成分分析。各元素含量分析结果如表1所示。对比分析显示, 国内外钢管各元素含量均满足ASME SA312标准规定范围要求。有害元素S、P含量均得到有效的控制。国产钢管主要元素Cr、Ni、Nb含量偏于标准下限值, 且均低于进口钢管含量, 其中Ni、Nb偏差较大。由于Cr、Ni、Nb元素能够有效提高不锈钢的高温强度、抗氧化性、耐晶间腐蚀性能, 其含量偏高有利于钢

管整体性能的增强, 国产钢管在主要元素含量配比上应进一步改进提升, 采购国产钢管技术条件应在标准规定的基础上, 适当提高主要元素下限值。

此外, 进口钢管C元素含量明显高于国产钢管, 高C含量, 极易导致奥氏体晶界形成贫Cr区, 加大晶间腐蚀的敏感性, 但同时进口钢管的稳定化元素Nb的含量同样偏高, Nb与C亲和力比Cr大, 优先与C结合生成碳化铌, 避免析出碳化铬而造成晶界贫铬, 从一定程度上减少了晶间腐蚀敏感性。为提高抗晶间腐蚀性能, 国产TP347H钢管应避免出现C含量趋于标准上限值, 而Nb含量趋于标准下限值的情况。

随着国内炼钢技术的发展, 磷、硫含量下降且得到有效控制, 钢中氢氮氧对钢性能的危害愈加显露出来。通过氢氮氧测定仪(型号ONH-2000)对国内外钢管中氢氮氧质量分数进行测定。如表1所示, 国内外钢管氢含量基本相同, 且均较低, 氢含量无偏差, 但国产钢管氧和氮含量低于进口钢管。降低钢中氢氮氧含量, 对防止钢氢致开裂、氮致脆化以及氧致夹杂物等均有重要作用, 国产钢管对氢氮氧含量

的有效控制，完全能够满足使用要求。此外，痕量元素As、Sb、Bi、Sn、Pb的含量国内外钢管均偏低，且无明显偏差。

3. 拉伸性能试验

通过微机控制电液伺服万能试验及（KQS-600B）对国产及进口钢管进行常温拉伸性能试验。由于试验钢管管径及壁厚偏小，根据ASTM A370标准，取全尺寸纵向试样进行试验。

表2为国内外钢管常温拉伸试验性能结果。国产与进口钢管常温拉伸性能相近，无明显偏差，均满足ASME SA312标准要求。拉伸性能的优劣对弯曲制造猪尾管十分重要，良好的断后伸长率能够保证弯管过程不宜出现超标缺陷，国产钢管拉伸性能完全能满足弯曲制造技术要求。

4. 晶间腐蚀试验

根据试验标准ASTM A262 Practice E方法对国产及进口TP347H管进行晶间腐蚀试验。检测试样每组取样2件，敏化处理后均弯曲180°处理，如图1所示试样，在10倍放大镜下检测弯曲部位，无龟裂及裂纹缺陷。

晶间腐蚀试验是在特定介质条件下检验金属材料晶间腐蚀敏感性的加速金属腐蚀试验方法，

目的是了解材料的化学成分、热处理工艺和制造工艺是否合理。钢管晶间腐蚀试验结果均未见龟裂及裂纹缺陷，表明国产与进口TP347H钢管制造工艺无明显偏差，在高温高压环境下耐晶间腐蚀性能方面，国产钢管能够符合使用技术要求。

5. 金相试验分析

对国产及进口TP347H钢管在晶间腐蚀试验前、后分别进行250倍金相显微组织观察。图2~图5分别对应1#~4#试样晶间腐蚀试验前、后显微组织。钢管试验前原始态下4组试样金相组织显示均为奥氏体+少量孪晶，晶间腐蚀试验后显示均为奥氏体+少量孪晶+碳化物，碳化物集中在晶界处，国产及进口钢管从原始态至晶间腐蚀试验后的微观组织变化趋势基本一致。

对比图5与图2~图4所示，晶间腐蚀试验后进口钢管在晶界处碳化物集中浓度明显大于国产钢管，产生该结果主要原因在于进口钢管中C元素含量偏高，在同一敏化处理条件下，晶间腐蚀的深度是随着碳含量的增加而加深。国产钢管对C元素含量的有效控制，从一定程度上降低了钢管晶间腐蚀敏感性，因此，采用

国产钢管制造猪尾管，完全能够满足其抗晶间腐蚀技术性能的要求。

6. 晶粒度评定

对国产及进口钢管进行晶粒度评定，其评定结果如表3所示，三组国产钢管晶粒度评定均在5.5级，相对进口钢管6.0级，晶粒尺寸稍微偏大，均满足标准ASME SA312小于7级的要求。由于晶粒尺寸偏大，其晶界总面积偏小，耐晶间腐蚀性能则更好，国产钢管对晶粒度的有效控制，能够满足标准及使用要求。

7. 压扁试验

通过压扁试验，检验国产和进口钢管抗纵向拉应力开裂和抗环向剪应力开裂的能力。试验执行标准为ASME A999，分两步进行冷态压扁。第一步延性试验将试样压制板间17.5mm，试样内、外及端部表面无裂纹或破裂缺陷。第二步完整性试验将试样压制钢管相对两壁接触状态，同样未发现裂纹或破裂缺陷。国产

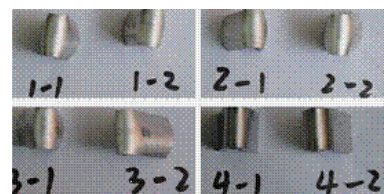


图1 晶间腐蚀弯曲试样

表1 ASME SA312化学成分对照

化学元素	质量百分含量 (%)													质量分数 (ppm)		
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Nb	As	Sb	Bi	Sn	Pb	N	H	O
Min	0.04	—	—	—	—	17.0	9.0	0.32	—	—	—	—	—	—	—	—
Max	0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	19.0	13.0	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—
1#	0.043	1.53	0.031	0.0018	0.348	17.10	9.97	0.484	0.0050	0.0025	0.0015	0.0100	0.0028	238.1	2.3	50.3
2#	0.051	1.35	0.034	0.0010	0.377	17.22	9.89	0.640	0.0054	0.0025	0.0015	0.0079	0.0037	248.6	2.3	67.2
3#	0.050	1.35	0.032	0.0010	0.378	17.18	9.89	0.640	0.0052	0.0025	0.0015	0.0080	0.0029	275.5	2.1	56.2
4#	0.078	1.58	0.030	0.0008	0.386	17.69	10.50	0.820	0.0030	0.0025	0.0015	0.0077	0.0024	682.8	2.1	93.8

注：1#、2#、3#为国产，4#为进口。

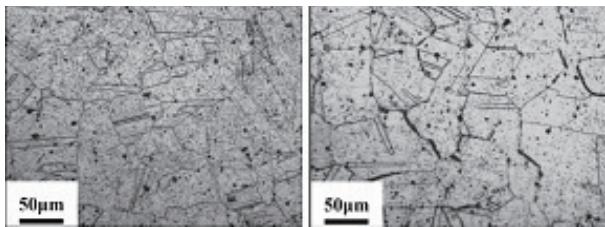


图2 1#晶间腐蚀试验前后250倍金相组织

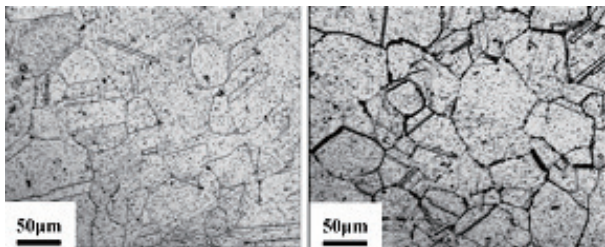


图3 2#晶间腐蚀试验前后250倍金相组织

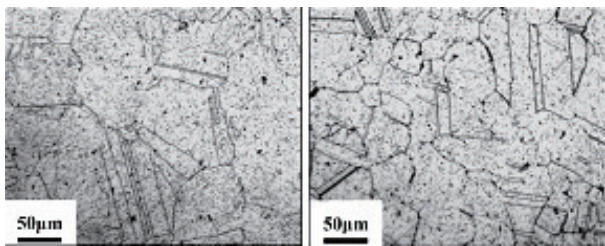


图4 3#晶间腐蚀试验前后250倍金相组织

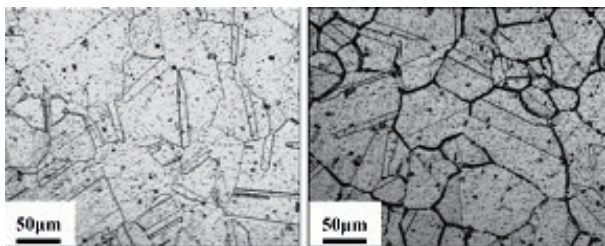


图5 4#晶间腐蚀试验前后250倍金相组织

表2 常温拉伸性能对照

项 目		抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率 (%)
ASME SA312		515 (min)	205 (min)	35 (min)
国产	1#	605/610	265/260	53.0/52.5
	2#	605/605	270/255	56.0/57.0
	3#	615/610	285/298	54.5/56.5
进口	4#	615/630	250/285	54.5/55.0

注：每组数据为2件试样的拉伸结果。

表3 晶粒度评定对照

项 目		晶粒度级别/级
ASME SA312		≤7
国产	1#	5.5
	2#	5.5
	3#	5.5
进口	4#	6.0

与进口钢管压扁试验均满足要求。

8. 结语

(1) 国内外TP347H钢管化学成分均满足ASME SA312标准要求，进口钢管主要元素Cr、Ni、Nb含量高于国产钢管。采购国产钢管时应适当提高主要元素下限值。有害元素S、P、N、O、H及痕量元素As、Sb、Bi、Sn、Pb均能够有效控制并满足使用要求。

(2) 国内外TP347H钢管拉伸性能均满足ASME SA312标准要求，国产钢管拉伸性能完全能满足弯曲制造技术要求。

(3) 国内外TP347H钢管微观金相组织均为奥氏体+少量孪晶，晶间腐蚀试验后晶界形成碳化物，进口钢管由于碳元素含量偏高，碳化物集中浓度偏高，晶间腐蚀敏感性大于国产钢管。

(4) 国产钢管晶粒度为5.5级别，进口钢管晶粒度为6.0级，均满足标准ASME SA312小于7级的要求。

(5) 国内外TP347H钢管压扁试验均未裂纹或破裂缺陷，抗纵环向应力开裂性能良好。

(6) 国产小口径TP347H钢管各项性能均满足标准规定要求，抗晶间腐蚀性能稍优于进口钢管，可替代进口钢管用于制造制氢转化炉入口管系猪尾管。

作者简介：陈明健、江克、杨吉梅，合肥通用机械研究院合肥通安工程机械设备监理有限公司。

MW 20161208