

核用 Inconel 690 焊丝 TIG 焊微裂纹产生机理研究

机械科学研究院 哈尔滨焊接研究所(150080) 霍树斌 陈佩寅 陈 燕 吴 伟

摘要 针对国际上核用 Inconel 690 焊丝 TIG 焊微裂纹问题,利用扫描电镜、俄歇电子分析等方法对微裂纹断口微观组织形貌、特征点的成分进行研究。结果表明,Inconel 690 焊丝 TIG 焊微裂纹主要是结晶裂纹,原因是由 S, P 在晶界偏析引起的低熔点共晶物。通过对结晶裂纹的产生机理和影响因素的系统研究,指出 Inconel 690 焊丝 TIG 焊微裂纹主要是由 S, P 引起的结晶裂纹,而不是只有 DDC 裂纹,通过定量分析 S, P 与裂纹关系,提出了防止微裂纹产生的条件,并制造出无微裂纹的 HS690, HS690M 焊丝。

关键词: Inconel 690 焊丝 TIG 焊微裂纹 S + P 含量判据 HS690 HS690M

中图分类号: TG116

0 前 言

镍基合金焊接微裂纹问题,尤其是核电用镍基焊接材料微裂纹问题是行业内公认的难题与顽症,主要表现为长度小于 0.5 mm 的结晶裂纹和高温低塑性裂纹(简称 DDC)。Inconel 690 焊丝的微裂纹问题尤为突出,虽然研究者众多,却没有彻底解决问题。

美国 SMC 公司至今仍在进行 Inconel 690 焊丝的改进,从 20 世纪 90 年代开发出 FM52 焊丝,2003 年推出 FM52M 焊丝,2009 年又推出 FM52MSS,其研究的重点一直是如何解决焊接微裂纹问题,但他们认为焊接微裂纹是 DDC。

从国内应用的情况看,除 SMC 和 Sandvik 公司的产品比较理想外,其它公司的 690 焊丝都存在焊接微裂纹,例如 WEL - TIG - 52 焊丝。早期的 Sannicro 68HP 的微裂纹倾向比较严重,经过改进后有明显改

善,但在国内某骨干企业的产品焊接中仍然存在问题。就是 FM52 和 FM52M 焊丝在产品焊接时也不是完全没有问题,在 TIG 堆焊的边缘,偶尔也出现个别微裂纹,说明顽症并没有被根除。

从 2003 年开始研究 Inconel 690 焊丝,经过多年的努力,终于发现了问题的本质、产生的原因和条件,并研究出了解决问题的方法。

1 试验方法

试验焊丝采用研制的所有 Inconel 690 焊丝,其化学成分如表 1 所示。

试验是在 30 mm 厚平板表面采用 TIG 堆焊,焊接电流 $I = 180 \sim 220$ A,焊接速度 $100 \sim 120$ mm/min,送丝速度 $900 \sim 1\ 100$ mm/min,堆焊熔敷金属尺寸为 100 mm $\times$ 40 mm $\times$ 12 mm,每种材料截取金相试样 4 件,尺寸为 40 mm $\times$ 12 mm $\times$ 10 mm。

表 1 Inconel 690 焊丝的化学成分(质量分数,%)

C	Si	Mn	Cr	Fe	P	S	Ti	Al	Cu	Co
≤ 0.04	≤ 0.50	≤ 0.50	28.0 ~ 31.0	8.0 ~ 12.0	≤ 0.010	≤ 0.010	≤ 1.0	≤ 1.1	≤ 0.10	≤ 0.10

金相试样在磨床上加工后着色探伤检验,首先记录每个面上红点的数目,然后将红点圈起来在 200 倍金相显微镜下观察,确定缺陷的类型。将确定的裂纹断口在 FEI Sirion 扫描电镜下观察,确定裂纹的类型,

利用能谱仪和 PHI - 700 俄歇电子分析仪对裂纹表面区域进行成分分析,从而确定产生微裂纹的原因。

2 结果与分析

2.1 典型断口微观组织与分析

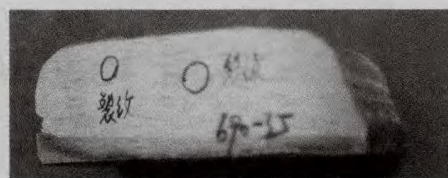
试验过程中发现,将金相试样利用手砂轮打磨、台

式砂轮打磨、砂纸打磨、抛光片抛光后着色探伤,均无法发现 0.2 ~ 0.5 mm 的焊接缺陷,只有经磨床磨削加工且磨削方向与焊接方向相同时,试样着色探伤才能发现此类缺陷,且不会出现裂纹遗漏问题。磨床加工后的金相试样着色探伤结果如图 1 所示。

将图 1 中发现的焊接缺陷,在金相显微镜下观察,确定缺陷的形式,比如是气孔、夹渣还是裂纹。在这种情况下,气孔和夹渣很容易区分,但个别微裂纹和未熔合区分比较困难,需要制备金相试样,进一步做微观组织分析。

图 2a 为磨床加工后微裂纹金相显微镜下观察到的形貌。图 2b 为典型的焊接微裂纹金相组织照片,裂纹沿奥氏体晶界扩展。

图 3a 为裂纹在扫描电镜下的形貌。裂纹断口形貌如图 3b 所示,为典型的结晶裂纹形态。

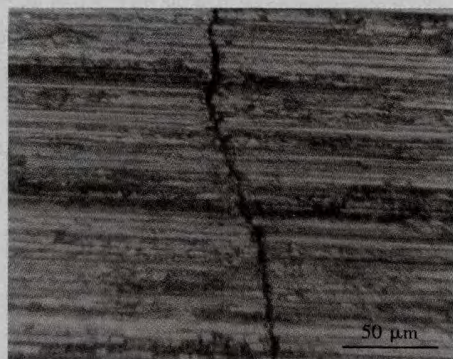


(a) 有缺陷试样

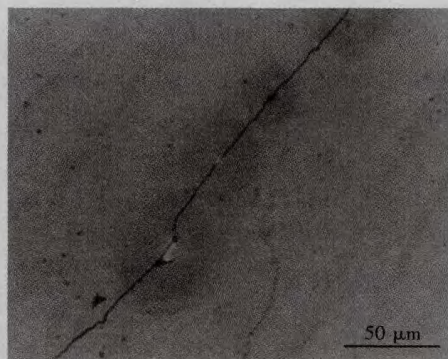


(b) 无缺陷试样

图 1 金相试样探伤结果



(a) 磨床加工后裂纹形貌

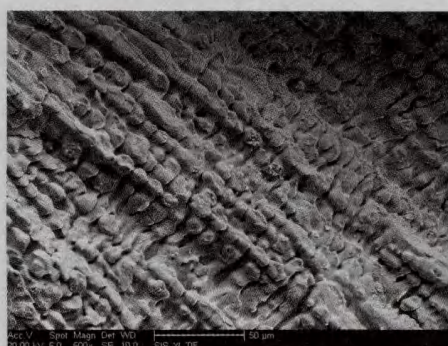


(b) 金相试样裂纹形貌

图 2 微裂纹金相照片



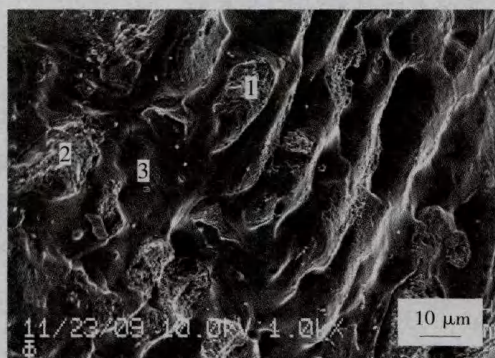
(a) 裂纹形貌



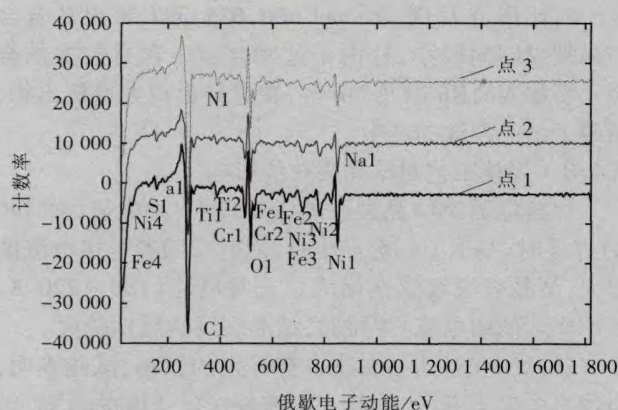
(b) 裂纹断口形貌

图 3 典型微裂纹 SEM 形貌

对于尺寸大于 0.5 mm 的裂纹,其断口表面形貌比较典型,液膜比较厚,利用能谱分析就能分辨。但绝大多数微裂纹,尺寸在 0.2~0.5 mm 之间,扫描电镜下虽然能判断是结晶裂纹,由于液膜太薄无法进行能谱分析,只能用俄歇电子分析。断口俄歇电子分析结果见图 4 和表 2。



(a) 液膜分析点



(b) 液膜分析谱线

图 4 裂纹断口俄歇电子分析

表 2 俄歇电子分析结果(质量分数,%)

位置	S	Ti	Cr	Fe	Ni
点 1	3.90	4.27	12.48	16.71	62.64
点 2	5.64	4.69	13.66	14.27	61.75
点 3	3.24	8.25	25.07	12.82	50.62
基体	0.4	2.4	27.6	11.4	58.2

由图 4 可以看出,基体上 S 的含量为 0.4%,而液

膜上 S 的含量是其 10 倍左右,可以认为系统误差为 0.4%,说明结晶裂纹液膜是 S 的低熔点共晶物。

试验中发现,绝大多数微裂纹是结晶裂纹,在结晶裂纹的低温段,有 DDC 的特征,因此认为结晶裂纹才是 Inconel 690 焊丝的微裂纹的主要原因,而不是国际上普遍认为的 DDC。

2.2 裂纹数量与 S,P 含量的关系

由俄歇电子分析发现,结晶裂纹主要是 S,P 引起的低熔点共晶物,而常规的分析方法下,S,P 的含量差别不大,于是寻找到 S,P 的精确分析方法,分析精度为 1×10^{-6} 。分析结果显示,S,P 的含量与微裂纹的数量有一定的对应关系,结果如图 5 所示。

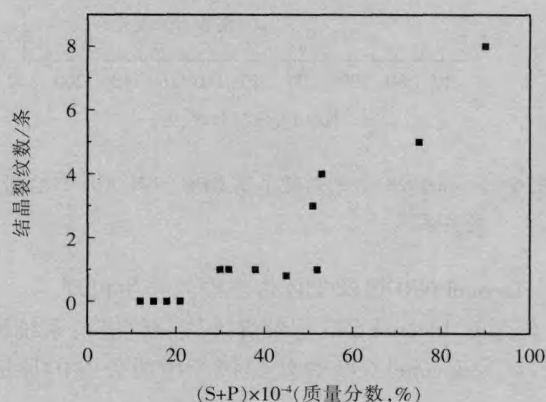


图 5 Inconel 690 焊丝熔敷金属 S,P 含量与结晶裂纹数量的关系

由图 5 可以看出,当 S+P 含量小于 30×10^{-6} 时,Inconel 690 焊丝焊接中不出现结晶裂纹。分析发现,SMC 和 SANDVIK 的产品控制得较好,尤其是 SMC 的产品,S+P 一般控制在 20×10^{-6} 以下。以前真空冶炼的 690 铸锭,S+P 在 $(40 \sim 60) \times 10^{-6}$ 之间,总是有微裂纹出现。

将 S+P 含量控制到 30×10^{-6} 之下后,对 DDC 裂纹进行了研究,同样得到不出现 DDC 的元素含量范围,如图 6 所示。

由图 6 可以看出,当熔敷金属中 N 的含量大于 60×10^{-6} 时,只要 Al+Ti 的含量大于 1.2%,就不会有 DDC 发生。这是因为当满足上述含量时,Inconel 690 焊丝焊接过程中晶界容易形成 (Al,Ti), (C,N) 化合物,防止 DDC 产生。

由此可见,Inconel 690 焊丝产品产生微裂纹的主要原因是 S,P 造成的结晶裂纹。其特征是 S,P 在很低

的含量条件下就可以产生结晶裂纹,但只要将 S + P 的含量控制到 30×10^{-6} 以下,同时让 N 的含量大于 100×10^{-6} , Al + Ti 的含量大于 1.2%,就不会产生焊接微裂纹。制成两个批次的 HS690 和两个批次的 HS690M 焊丝,经确认没有焊接微裂纹,并已经得到应用。

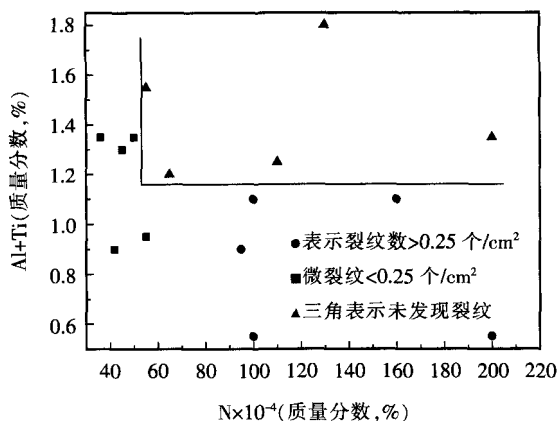


图6 Inconel 690 焊丝熔敷金属 DDC 与 N, Al + Ti 含量的关系

2.3 Inconel 690 焊丝 TIG 焊微裂纹产生机理

经过对 Inconel 690 焊丝焊接微裂纹进行系统研究分析,认为 Inconel 690 焊丝焊接产生微裂纹的原因如下:

(1) 由于 Inconel 690 焊丝成分过于纯净,晶界析出物很少,使得 S,P 在晶界的偏析(偏聚)系数增大,结果造成微量的平均成分就能够产生裂纹。由此推断:晶界析出物有利于防止镍基合金(奥氏体)焊缝的结晶裂纹。

对比试验表明, Inconel 600 焊丝、327 焊丝和 625 焊丝微裂纹倾向较小, 主要原因是这些焊丝晶界析出物较多, 阻碍了结晶裂纹的产生。

(2) 常规 TIG 焊由于送丝速度较低, 容易引起熔池过热, 给结晶裂纹的产生带来了有利条件。

试验表明,加大送丝速度,裂纹倾向变小。同样焊条电弧焊由于相对送进量较大而裂纹倾向小,MIG 焊裂纹倾向同样较小。

2.4 Inconel 690 焊丝 TIG 焊微裂纹的影响因素分析

Inconel 690 焊丝焊接微裂纹,主要表现为结晶裂纹。晶间低熔点共晶物是引发结晶裂纹最主要的冶金因素,同时结晶裂纹也与焊接工艺有关。

2.4.1 S,P 含量对结晶裂纹的影响

S 和 P 是钢中最有害的元素,能够形成低熔点共晶

物,在结晶过程中极易形成液膜,从而降低材料的塑性。S 和 P 容易发生偏析,从而增大脆性温度区间(BTR)的范围,增加结晶裂纹的敏感性。文献[1]认为,S 或 P 与 Fe 或 Ni 形成低熔点共晶偏析于晶界处,导致结晶裂纹的产生。Mn 能够通过增加液相和固相的界面能从而降低 P 和 S 对结晶裂纹的影响,另外 Mn 的加入还能够影响低熔点共晶物的形成、形成的数量和这些低熔点共晶物的熔点有关。

该研究指出, Inconel 690 焊丝中, 当 $S + P < 30 \times 10^{-6}$ 时, 便可防止由 S, P 引起的结晶裂纹的产生。

2.4.2 合金成分对结晶裂纹的影响

关于合金元素对结晶裂纹的影响问题,已经有了较多的文献。主要表现为合金元素可以增加晶界析出物,抑制低熔点共晶组织的形成,降低结晶裂纹敏感性。

文献[2,3]对镍基合金结晶裂纹进行了研究,指出 Ni - Nb 低熔点共晶是产生结晶裂纹的主要原因, Mn 的加入可抑制 Nb 在晶界的偏析,提高 Inonel 690 合金熔敷金属抗结晶裂纹能力。

对比研究发现, Inconel 600, 625, 327 等镍基合金结晶裂纹倾向较小, 是由于这些合金中含有较多的合金元素如 Mo, Nb 以及 Mn 等, 在晶界形成大量析出物, 阻碍了结晶裂纹的产生。

2.4.3 焊接工艺对结晶裂纹的影响

焊接电流对结晶裂纹的影响较大,小电流(如 140 A)焊接时,基本上不会产生结晶裂纹,随着焊接电流的增大,结晶裂纹敏感性增大。正常电流(180 ~ 220 A,工厂实际使用电流)焊接时,结晶裂纹敏感性较大。

送丝速度对结晶裂纹也有一定的影响,试验表明,当焊接电流不变(如 200 A),随着送丝速度的增加,结晶裂纹敏感性减小。对比试验发现,焊条电弧焊和 MIG 焊结晶裂纹敏感性明显小于 TIG 焊,从另一方面验证了试验结果的可靠性。

焊接工艺对结晶裂纹的影响,主要表现为降低焊接热输入,减少高温停留时间。由于自动 TIG 焊焊接电流和焊接电压基本固定,可增加焊接速度从而达到降低焊接热输入的目的。另外,适当增加送丝速度降低结晶裂纹敏感性。

2.4.4 B 和 Zr 含量对结晶裂纹的影响

对 Inconel 690 焊丝力学性能和裂纹敏感性研究过程中,发现 B 和 Zr 并未对 Inconel 690M 的性能有多大改善,同时,少量的 B 和 Zr 极易引起结晶裂纹,而且随着 B 和 Zr 含量的增加,结晶裂纹敏感性增大。文献

[4]认为,Zr作为强硫化物形成元素,可以降低晶界硫的含量,但Nb,B和Zr对DDC无任何作用,B的含量应该限制的越低越好。文献[5]指出,EN52只发现DDC,而EN52M不仅有DDC还有结晶裂纹出现,主要原因是Nb,B和Zr元素的添加增大了凝固温度区间和降低了固相线所致。

试验研究用焊丝成分如表3所示。

试验表明,少量的B和Zr就容易引起低熔点共晶而产生结晶裂纹,同时,B和Zr的加入对Inconel 690焊丝的结晶裂纹并未产生多大影响。B和Zr焊接试验试样的裂纹形貌如图7所示。

表3 B和Zr性能试样用Inconel 690焊丝成分
(质量分数,%)

试验编号	Zr	B
1	0.016 0	0.011 0
2	0.031 0	0.012 0
3	0.004 4	0.000 7
4	0.011 0	0.000 6
5	0.008 7	0.001 6
6	0.004 8	0.003 0
7	<0.001	<0.000 5
8	0.012	0.000 5

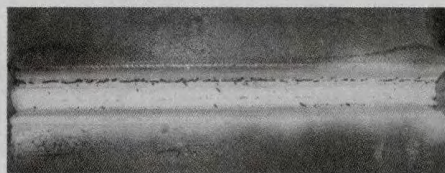
由图7可以看出,对于1号焊丝和2号焊丝,结晶裂纹敏感性非常大,当焊接两层时,结晶裂纹肉眼就可以看到,为了图片明显,直接进行着色探伤。对于8号焊丝,在裂纹断口上也发现了Zr,证明结晶裂纹是由于Zr的低熔点共晶物引起的。

1号焊丝焊接试样的能谱分析结果见图8和表4。

同时,对不同B和Zr含量的焊丝熔敷金属进行力学性能试验,试验结果表明,试验范围内B和Zr含量对Inconel 690焊丝力学性能影响不大,但少量的B和Zr就极易引起结晶裂纹。

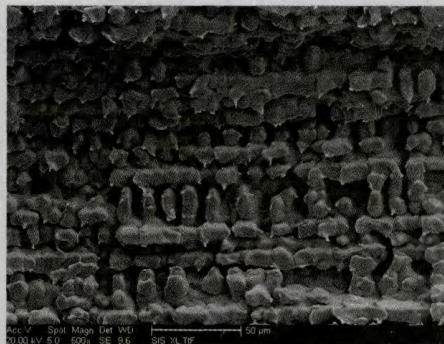


(a) 堆焊试样裂纹形貌

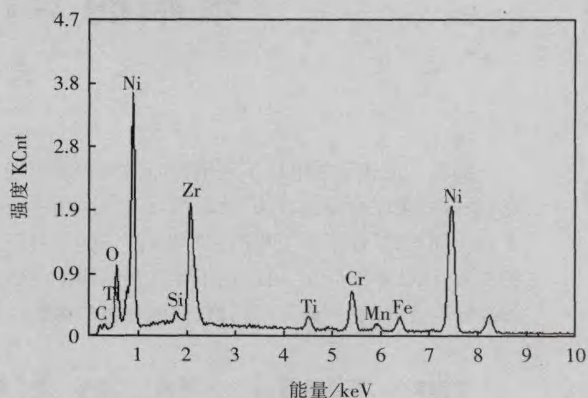


(b) 对接焊试样裂纹形貌

图7 B和Zr焊接试样的图片



(a) 1号焊丝结晶裂纹形貌



(b) 1号焊丝能谱分析

图8 B和Zr引起的结晶裂纹形貌及能谱分析

表4 1号焊丝能谱分析结果(质量分数,%)

C	O	Si	Zr	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
5.99	11.17	0.51	21.14	1.80	6.91	0.64	3.18	48.66

3 结 论

(1) Inconel 690 焊丝 TIG 焊微裂纹主要是由 S, P 引起的结晶裂纹, 而不是只有 DDC 裂纹, 通过定量分析 S, P 与裂纹关系, 提出了防止微裂纹的条件, 并制造出无微裂纹的 HS690、HS690M 焊丝。

(2) 对 Inconel 690 焊丝而言, 当 S + P 的含量小于 30×10^{-6} 时, 就不会产生结晶裂纹; 同时, 当 N 含量大于 100×10^{-6} , 且 Al + Ti 含量大于 1.2%, 就不会产生 DDC。

(3) Inconel 690 焊丝结晶裂纹产生机理是 S, P 在晶界的偏析而引起的低熔点共晶体, TIG 焊送丝速度对结晶裂纹有一定的影响。

(4) 在 Inconel 690 焊丝中, 少量的 B 和 Zr 就极易引起结晶裂纹。

参 考 文 献

[1] Kuo T Y, Lee H T, Tu C C. Evaluation of effects of niobium

and manganese addition on nickel base weldments [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8 (1): 39.

[2] 薄春雨, 杨玉亭, 丑树国, 等. 690 镍基合金焊接结晶裂纹形成机理分析 [J]. 焊接学报, 2007, 28 (10): 69 - 74.

[3] 薄春雨, 杨玉亭, 李向阳, 等. Nb 对 690 镍合金带极堆焊金属结晶裂纹的影响 [J]. 焊接, 2006 (6): 41 - 46.

[4] Hannu Hänninen, Anssi Brederholm, Tapio Saukkonen. Metallurgy of BMWs as affected by welding procedures. Range of metallurgies. Differences in Alloy 182/82 and Alloy 152/52 [C]. International Seminar on Welding and Non - Destructive Examination in Nuclear Power Plants, 2009, 6, 27 - 7. 1, Suzhou, China.

[5] Collins M G, Ramirez A J, Lippold J C. An investigation of ductility dip cracking in nickel based weld metals - part II [J]. Welding Research, 2003 (9): 348s - 354s.

作者简介: 霍树斌, 1975 年出生, 硕士, 高级工程师。主要从事镍基焊接材料及工艺的研究, 已发表论文 10 多篇。

核电厂不锈钢覆面带垫板焊缝中焊接缺陷的 RT 定位检测技术

北京四达贝克斯工程监理公司 (050019) 马新朝

摘要 论述了核电厂不锈钢覆面衬里的带垫板焊缝中焊接缺陷的 RT 定位检测方法, 总结了该检测的检测重点, 采取二次联合曝光方法, 并运用几何作图法进行缺陷的准确定位, 以判断该缺陷的埋藏深度, 为建造阶段缩短了判定周期, 从而指导工程的正常进行。同时, 对于焊件中的缺陷给出了一种立体拍片定位方法, 可准确判定缺陷的位置; 该技术的应用, 可适用于各类钢结构中带垫板的焊接接头的缺陷定位, 更利于压力容器、锅炉的封口焊缝的缺陷定位, 减少不必要的返修, 并缩短生产周期。

关键词: 不锈钢覆面 (SS 覆面) 垫板 RT 定位检测技术 对照检测 缺陷模拟
中图分类号: TG441.7

0 前 言

对于带垫板的焊接接头的射线检测, 在实际 RT

底片的缺陷判定过程中容易出现垫板缺陷及焊缝缺陷的误判现象, 为减少此类现象对核电项目生产工期及质量验收的影响, 需要对此问题做出明确的处理依据, 以符合“凡是有据可查, 凡是有人验证”的质保要求。

收稿日期: 2012 - 05 - 19