# Q690高强钢焊接材料的选择及其应用

孙咸

**【摘要】**本文分析了Q690钢的焊接性，探讨了该钢焊接材料的选用原则，介绍了该钢焊接材料的种类及其应用。研究表明，Q690钢焊接材料的选用，可以采用“强度匹配”原则，等强匹配和低强匹配都可以获得满意的接头性能，低强匹配加低氢工艺可以明显改善钢的焊接性。受产品结构特点和焊接方法控制，Q690钢4种以上的焊接工艺方法和焊接材料各具特色；采用FCAW打底+FCAW或GMAW填充的工艺优势明显。在Q690钢焊接材料成功应用中，焊接材料自身的低氢化是必要条件，而焊接方法和工艺因素的低氢化则是充分条件，二者缺一不可。

**关键词：**焊接材料；Q690钢；选择及应用

## 1. 概述

Q690钢以其足够的高强度、低的韧脆转变温度和一定的伸长率，在工程机械、船舶起重机械、煤矿机械、风电和核电装置等行业获得了应用。虽然说现有的焊接材料及其匹配焊接工艺，基本能满足各类制造要求，但是，随着应用的进一步扩大，该钢焊接接头的使用性能方面仍然暴露出一些问题。这些问题依然涉及到焊接材料和配套工艺。在一些情况下，所谓的主流工艺依然不尽如人意，比如在大拘束条件下，或冬季严寒季节施工时，为防止裂纹发生，有的工艺变得复杂、辅助时间加长、工艺条件严紧，使其可操作性变差。另一方面，施工中存在这样的现象：有时候，焊接材料的变化可能改变工艺特性；反之，工艺方法的某些改变亦可能改变接头的性能。事实上焊接材料和配套工艺已经成为相辅相成、相得益彰的充分和必要条件相互关系，似有动一发牵全身之反应。鉴于Q690钢结构使用性能，主要是承载受力结构，非高温、耐腐蚀等特殊场合，属于强度用钢特点，该钢焊接材料的选用原则应当采用“强度匹配”原则。本文特意将Q690钢焊接材料的选择与该钢的焊接性、焊接材料种类、工艺方法及应用相联系，探讨其选用原则。该项工作对推动Q690钢焊接材料的创新开发，以及配套工艺的锐意改进，具有积极意义和参考价值。

## 2. Q690钢焊接性分析

Q690钢是采用低碳质量分数、细晶化冶金技术，以及微合金化和控轧、控冷等工艺开发的高强度低碳贝氏体钢。从化学成分看（见表1），采用了低碳成分（$w_C$＜1.0％），并用Mo- Ni-B微合金化，以及Nb- V- Ti复合微合金化；降低P、S有害元素含量，还用Ca对夹杂物进行球化处理。从力学性能看（见表2），该钢具有较高的强度和与之匹配的韧性。这是该钢独特的强化特性决定的。该钢的强化机制主要是贝氏体的相变强化、细晶强化和第二相析出强化，这些强化都与微合金化元素的作用有关。钢的供货状态为调质，显微组织为马氏体加贝氏体。虽然该钢采用了低碳和低杂质元素含量成分设计方案，碳当量为0.43%~0.48%，裂纹敏感指数为

0.22%左右，钢的焊接裂纹敏感性有所减弱，防止裂纹产生的工件预热温度随之而降，应该说钢的焊接性有所改善，具备低焊接裂纹敏感钢要求。但是这并不意味着在所有情况下都能获得满意的接头性能。

研究表明，该钢焊接性的主要问题如下：

（1）焊接裂纹敏感性。钢中合金元素种类较多，尤其含有一定量Ni、Cr、Mo元素，具有一定的空淬特性。焊后冷却时接头热影响区容易产生淬硬组织，冷裂纹敏感性较大（见图1）。

（2）热影响区的软化。受焊接热循环的影响，HAZ出现软化层，可能恶化该区的力学性能。

（3）热影响区塑性降低。受焊接热循环的影响，HAZ晶粒有长大倾向，使该区塑性降低。

（4）热影响区韧性降低。HAZ粗晶区为粗大的上贝氏体基体+上贝氏体板条束间长条状分布的M-A组元，对韧性的危害使该区的韧性恶化。

### 3. Q690钢焊接材料的选用原则

（1）焊缝金属强度匹配类型　为了同时满足Q690钢高强度和优良的低温韧性要求，从焊接接头使用安全性考虑，通常高强钢焊接材料的选用原则应当是强度匹配。焊缝的强度匹配方式可以分五种类型（见表3）。

从表3可以看出，等强匹配的工艺焊接性不是很好，施工条件要求严格，施工成本较高，比较适合低强度钢种或者高强度钢种的焊接。高强度匹配的工艺焊接性更差，施工条件要求更严格、更复杂，成本更高，焊接质量稳定性难以保证，较适合于低强度钢的焊接。低强度匹配的工艺焊接性得到改善，施工条件也改善，成本降低，适合于高强度钢种及大刚性结构件的焊接。对于Q690钢而言，屈服强度≥690MPa、抗拉强度770~940MPa，属于高强度低合金钢，大多数焊接结构选用焊接材料时，首选了等强匹配原则，因为更多的考虑了接头的安全性，而较少顾及施工工艺性及施工条件。多数焊接材料手册在推荐这类钢选用焊接材料时，亦是等强匹配材料。然而，焊接工艺或力学理论已经指出，采用低强匹配原则也

**表1　Q690钢的化学成分（质量分数）　（%）**

| 牌　号 | C | Si | Mn | P | S | Cu | Cr | Ni | Mo | B | V | Nb | Ti | Al | CEV |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q690 | 0.07 | 0.24 | 1.74 | 0.014 | 0 | 0.02 | 0.21 | 0.01 | 0.111 | 0.017 | 0.07 | 0.055 | 0.15 | 0.034 | 0.43 |
| GB/T16270—2009 | ≤0.20 | ≤0.80 | ≤1.80 | ≤0.020 | ≤0.010 | ≤0.50 | ≤1.50 | ≤2.00 | ≤0.70 | ≤0.0050 | ≤0.12 | ≤0.06 | ≤0.05 | ≥0.015 | ≤0.65 |

**表2　Q690钢的力学性能**

| 牌　号 | 屈服强度 / MPa | 抗拉强度 / MPa | 断后伸长率 (%) | 冲击吸收能量 /J(-20℃) |
|---|---|---|---|---|
| Q690 | 725 | 800 | 38.5 | 100 102 142 |
| GB/T16270—2009 | ≥690 | 770～940 | ≥14 | ≥47(-20℃) |

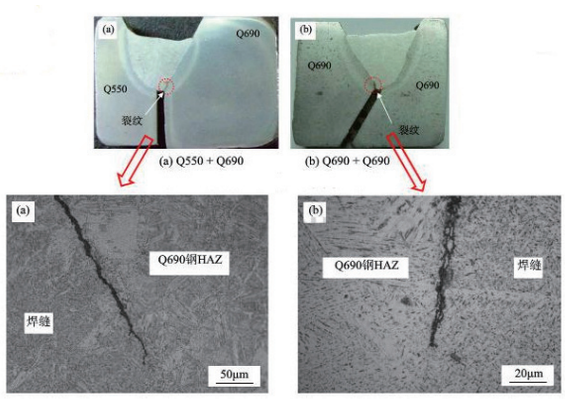


**图1　Q690钢焊接HAZ裂纹**

**表3　焊缝金属强度匹配工艺焊接性**

| 焊缝强度匹配类型 | 适用钢种 | 工艺焊接性 | | | 接头的抗脆断性能 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 工件预热温度 | 接头抗裂性 | 施工条件及成本 | |
| 等强度匹配 | 低强度钢种、高强度钢种 | 预热温度较高 | 存在裂纹倾向 | 施工条件严格成本较高 | 比较优良 |
| 高强度匹配 | 低强度钢种 | 预热温度高 | 存在裂纹倾向 | 施工条件严格，成本高 | 观点Ⅰ：比较差<br>观点Ⅱ：比较好 |
| 低强度匹配 | 高强度钢种，大刚度结构 | 降低50～70℃ | 接头抗裂性提高 | 施工条件改善，成本降低 | 易于改善 |
| 组合匹配 | 高强度钢种、异种钢 | 降低50～100℃ | 接头抗裂性提高 | 施工条件改善，成本降低 | 可以控制 |
| 等韧性匹配 | 低温用或特殊用途强度钢种 | 随钢种变化 | 随钢种变化 | 施工条件较严格，成本较高 | 比较优良 |

是非常不错的选择，它使焊接裂纹敏感性减小，工件预热温度降低，材料的焊接性得以改善。此外，组合匹配也是不错的选择。当然，在考虑焊材的匹配方式同时，也不能忽略焊接材料的含氢量、结构特点、工况条件，以及焊接工艺的影响。

（2）强度匹配与焊接工艺的关系　这类钢的焊缝强度匹配对接头性能的影响，必然涉及焊接工艺因素。不同的工艺条件，接头性能及裂纹倾向各异。也就是说，焊缝强度匹配、焊接工艺与裂纹的关系是复杂多变的。并不是在所有匹配条件下都能防止裂纹发生，并保证接头优良的性能。如图2所示，只有后两种匹配（低强匹配、低强匹配+低氢工艺），才能既防止裂纹又兼顾HAZ韧性。第一种匹配方式（高强或等强匹配）预热温度高，虽然裂纹倾向被减小，可是热输入增大后，HAZ韧性降低。焊接裂纹的防止必须辅以合理的工艺。合理的工艺就是低氢工艺，它包括主体工艺方法和辅助工艺技术两方面。主体工艺方法，如SMAW(碱性焊条)、GTAW、GMAW、FCAW、FAW（碱性焊剂）等。辅助的低氢工艺包括：低氢焊接材料（包括焊条、实芯焊丝、药芯焊丝、焊剂、保护气体等）、焊件的预热、缓冷、后热、紧急后热、控制层间温度、焊后热处理、多道焊接、多层焊接等等。根据结构的特点，为了防止裂纹产生，通常需要对工件预热，随工件预热温度的提高，裂纹倾向减小，直到裂纹被防止。但是预热温度不能提得太高，因为预热温度高，增大热输入量，影响HAZ韧性下降。于是提出所谓优化低氢工艺，即采用复合型工艺措施，比如不太高的预热温度+缓冷（或后热、紧急后热、焊后热处理）等。在防止裂纹产生方面，复合工艺的效果与单一提高预热温度一样好，但复合工艺的工件预热温度更低，焊接热输入减至需要的数值，兼顾了HAZ韧性不受影响。

**4. Q690钢焊接材料的种类及工艺方法**

从表4和表5（其中，SR—580℃～620℃消除应力退火处理，①等强匹配。②低强匹配，C1—100%$CO_2$，M21—5～25%$CO_2$+95～75%Ar混合气体）可看出，Q690钢熔化焊的主要焊接方法4种以上，比较常用的是SMAW、GMAW、FCAW和SAW。焊接材料的种类取决于所用工艺方法，而工艺方法又取决于产品结构特点、焊缝位置、接头形式及使用条件等。表6列出了Q690钢所用焊接材料特点对比（其中C1和M21含义同前）。可以看出，4种焊接材料在含C量、脱氧方式、合金化类型、含氢量、力学性能、低温韧性等方面基本是一样的，保护气体方面只有GMAW和FCAW两种方法具有，分别为C1（100%$CO_2$）、M21(5～25)%$CO_2$+(95～75)%Ar。从综合评价看，FCAW方法的焊接材料优势明显。因为与其余3种方法比较中，虽然GMAW和SAW方法用焊接材料都具有高效、自动化属性，可是前者在实施单面焊反面成形时反面保护有一定困难（需要专用装置），而后者全位置焊接有困难（尽管国外有SAW全位置焊接报道，但国内并无工程应用信息）。唯有FCAW方法能克服GMAW和SAW方法的缺点，并充分发挥其优点，尤其在管接头单面焊双面成形焊接中，接头反面无需衬垫或气体保护，即可获得满意的反面成形。有的单位在管接头焊接中采用FCAW打底＋FCAW或GMAW填充的工艺，优势凸显。

Q690钢结构焊接工艺通用要点是：①采用正确的坡口形状和尺寸。②选用合理的焊接材料（填充材料、保护气体、焊剂等）。③选用正确的焊接规范（包括焊接材料牌号和直径、焊接电流、电弧电压、气体流量、电源极性、焊缝层数、道数等）。④选用正确的工件预热温度、焊缝层间温度。⑤选用合理的焊后热处理参数。⑥坚持正确的接头装配定位焊和熟练、高超的手工操作技能等。上述方法及工艺的应用，取得了较为满意的效果

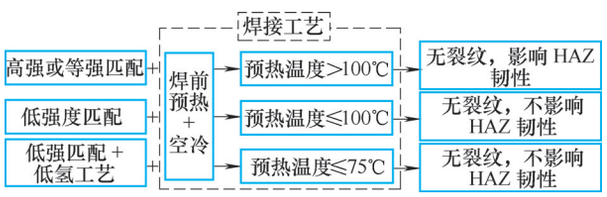


图2　焊缝强度匹配与焊接工艺的关系

表4 Q690钢典型焊接材料化学成分（质量分数） （%）

| 焊接方法 | 焊接材料 | 焊接标准(AWS) | C | Mn | Si | Cr | Mo | Ni | P | S |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SMAW | SHNi2K100① | E11018－M | 0.06 | 1.60 | 0.20 | 0.38 | 0.40 | 1.85 | ≤0.025 | ≤0.025 |
| | SHNi2K90② | E11018－M | 0.06 | 1.40 | 0.25 | — | 0.44 | 1.70 | ≤0.025 | ≤0.025 |
| GMAW | Union NiMoCr① | ER100S－G | 0.08 | 1.70 | 0.60 | 0.20 | 0.50 | 1.50 | ≤0.015 | ≤0.015 |
| | Union NiMo② | ER90S－G | 0.10 | 1.55 | 0.65 | — | 0.40 | 1.10 | ≤0.015 | ≤0.015 |
| FCAW | TWE－110K3① | E111T1－K3CJ | 0.045 | 1.50 | 0.34 | 0.03 | 0.51 | 2.21 | 0.010 | 0.007 |
| | FabCO XTREME 120① | E121T5－GC H4 | 0.07 | 1.35 | 0.14 | 0.33 | 0.22 | 3.90 | 0.008 | 0.005 |
| SAW | Union S 3 NiMoCr① | 焊丝EG(～EF6) | 0.14 | 1.70 | 0.10 | 0.35 | 0.60 | 2.10 | — | — |
| | | 熔敷金属F11A8－EG－F6 | 0.08 | 1.50 | 0.20 | 0.32 | 0.58 | 2.00 | — | — |
| | UV 421 TT | 焊剂EN760 SA FB165 DC H5 | $W(SiO_2+TiO_2)$ | | $W(CaO+MgO)$ | | $W(Al_2O_3+MnO)$ | | $W(CaF_2)$ | |
| | | | 18 | | 36 | | 24 | | 20 | |

注：①为等强匹配，②为低强匹配。

表5 Q690钢典型焊接材料力学性能

| 焊 接方法 | 焊接材料 | 焊接标准(AWS) | 保护气体 | 热处理 | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 断后伸长率（%） | 冲击吸收能量/J |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SMAW | SHNi2K100① | E11018－M | | SR | 690 | 740 | 19 | 47(-50℃) |
| | SHNi2K90② | E11018－M | | SR | 570 | 650 | 21 | 47(-50℃) |
| GMAW | Union NiMoCr① | ER100S－G | C1 | AW | 680 | 740 | 18 | 45(-40℃) |
| | | | M21 | AW | 720 | 780 | 16 | 45(-60℃) |
| | Union NiMo② | ER90S－G | C1 | AW | 550 | 640 | 20 | 35(-40℃) |
| | | | M21 | AW | 620 | 700 | 18 | 40(-60℃) |
| FCAW | TWE-110K3① | E111T1－K3CJ | C1 | AW | 750 | 830 | 18 | 72(-40℃) |
| | FabCO XTREME120① | E121T5－GC H4 | C1 | AW | 763 | 866 | 17.8 | 101(-60℃) |
| SAW | Union S 3 NiMoCr① | 熔敷金属F11A8－EG－F6 | — | AW | 690 | 760 | 17 | 47(-40℃) |
| | | | — | SR | 690 | 780 | 18 | 47(-40℃) |

注：①为等强匹配，②为低强匹配。

表6 Q690钢焊接材料特点对比

| 焊接方法 | 焊接材料 | 含C量 | 脱氧方式 | 合金化类型 | 含H量 | 保护气体 | 力学性能 | 低温韧性 | 综 合 评 价 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SMAW | 电焊条 | 低 | Si- Mn | Ni- Mo-Cr | 碱性低氢 | — | 高强度 | 高韧性 | 1)保证质量<br>2)简便实用全位置，焊根反面免保护<br>3)手工、低效率 |
| GMAW | 焊丝 | 低 | Si- Mn | Ni- Mo-Cr | 低氢 | C1①和M21② | 高强度 | 高韧性 | 1)保证质量<br>2)实用全位置，焊根反面需保护<br>3)高效、自动化 |
| FCAW | 焊丝 | 低 | Si- Mn | Ni- Mo-Cr | 低氢 | C1和M21 | 高强度 | 高韧性 | 1)保证质量<br>2)实用全位置，焊根反面免保护<br>3)高效、自动化 |
| SAW | 焊丝 | 低 | Si- Mn | Ni- Mo-Cr | 低氢 | 焊剂保护 | 高强度 | 高韧性 | 1)保证质量<br>2)实用水平位置<br>3)高效、自动化 |

### 5. Q690钢焊接材料的工程应用

实例一，我国自主研发制造的“蓝鲸”号全回转起重船，最大起重能力达7500t，是世界上最大的单臂起重船。“蓝鲸”号的主臂架主要采用Q690高强钢焊接而成。上海海事大学物流工程学院对该钢的焊接性进行了工艺评定。试板尺寸为300mm×150mm×30mm，单面V形坡口，反面清根双面接头。采用具有低强匹配药芯焊丝的FCAW方法，在执行表7中实例①的焊接工艺要点制作试板同时，严格控制焊接参数，始终保持工件预热温度≤165℃。试件经过外观检查及RT探伤后，进行了抗拉、弯曲、冲击等试验及金相组织分析。结果表明，焊缝的抗拉强度均在840MPa以上，试件断口位于焊缝上，表明母材的强度更高（国标规定770～940MPa）；弯曲试件180°无裂纹，表明焊缝具有良好的塑性；试件-40℃冲击吸收能量，焊缝及HAZ均低于母材，但远高于47J（-20℃）的国标规定值；金相分析表明，焊缝具有合理的组织分布。试验确定的焊接工艺，用于Q690高强钢厚板焊接，可以获得良好的接头综合力学性能，满足工程使用要求。

实例二，为荷兰Gusto、美国Amclyde公司承建多台海上吊机，吊机主要受力部件拔杆使用S690QL高强钢材料。蓬莱巨涛海洋工程有限公司以拔杆中的高强钢对接管为例，研究该钢的焊接工艺及控制措施。选用$\phi$406mm×25mm厚壁钢管，60°V形坡口对接接头，管接头置于6G位置施焊。采用单面焊双面成形技术，制定了两套试验方案：方案一采用STT打底，SMAW填充、盖面；方案二采用STT打底，FCAW-G填充、盖面。两种方案中均采用等强匹配焊接材料，在执行表7中实例②的焊接工艺要点制作试板同时，阐明工件预热温度控制在100~120℃及层间温度不超过200℃的必要性，分析了工艺参数，尤其热输入对接头性能的影响，推出了合理的焊接参数；强调了过程控制措施的细节，如下料及开剖口前的预热温度及之后的保温缓冷，工件装配点焊时工件的预热、焊接时的引弧、熄弧应在坡口内进行，以及焊后在焊缝两侧150mm范围内进行后热处理等等。结果表明，试件的NDT检测及力学性能均能满足规范标准要求，该工艺已成功应用于多个吊机项目中，赢得了业主和第三方的好评。

实例三，针对液压支架结构件用Q690高强钢特点，铁法煤业集团机械制造公司进行了焊接工艺评定试验研究。试板尺寸为300mm×150mm×20mm，45°单V形坡口，反面清根双面接头。采用具有等强匹配实芯焊丝的GMAW方法，在执行表7中实例③的焊接工艺要点制作试板同

**表7　Q690钢焊接材料应用案例及焊接工艺要点**

| 实例号 | 接头类型 | 焊接方法 | 坡口形状 | 焊接材料 | | 保护气 | 电源极性 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 牌号/型号 | $\phi$/mm | | |
| ① | Q690+Q690（对接接头） | FCAW | 60°V形坡口，间隙：2mm，钝边：2mm，板厚：30mm | TWE-110K3 / AWS:E111T1-K3CJ | 1.2 | 80% Ar+20%$CO_2$ | DCEP 直流反接 |
| ② | S690QL+ S690QL（厚壁管对接接头） | a) GMAW打底＋SMAW填充<br>b) GMAW打底＋FCAW填充 | 60°V形坡口，间隙：2~4mm，钝边：1~1.5mm，板厚：25mm | UnionK52Ni | 1.0 | M21 | DCEP |
| | | | | K-11018M | 3.2 | — | DCEP |
| | | | | FabCO XTREME120 | 1.6 | C1 | DCEN |
| ③ | Q690+Q690（对接接头） | GMAW | 45°单V形坡口，间隙：2mm，钝边：2mm，板厚：20mm | G76 | 1.2 | 80%Ar+20%$CO_2$ | DCEP |

| 实例号 | 焊接电流/A | 氩气流量/L·min$^{-1}$ | 焊缝层数/道数 | 预热温度/℃ | 层间温度/℃ |
|---|---|---|---|---|---|
| ① | 打底：220填充：230~240 | 20 | 6/20 | 150～200 | 道间温度150～200 |
| ② | 80~100 | 20 | 4/8(6G位置)<br>焊缝背面加垫或清根 | 100～120 | ＜200 |
| | 90~140 | | | | |
| | 220~240 | | | | |
| ③ | 第1组：260<br>第2组：280 | 20~22 | 3/7 | 150 | 150 |

时，强调焊接热输入、预热及层间温度的控制，确定执行消除应力回火温度为（520±20）℃。结果表明，拟定的焊接工艺已成功地应用于液压支架结构件的生产。

综上不难看出，Q690钢焊接材料工程应用中，突出的特点是低氢化（见表8）：一是采用的焊接方法低氢化。二是所用的填充焊接材料低氢化。这其中，在案例①所用填充焊接材料为美国ITW焊接集团天泰焊材公司生产的TWE—110K3高强钢药芯焊丝。该焊丝的国标（GB/T17493—2008）型号为E761T1—K3CJ，属于金红石型，规定的保护气体为100%$CO_2$，有利接头低氢化，可是文献采用日本弧焊机器人焊接时却用了富氩（80%Ar+20%$CO_2$）混合保护气体，估计是为了改善焊接工艺性。即便如此，所用焊材配合辅助工艺亦属于低氢化，获得了满意的接头性能。三是辅助工艺低氢化。涉及预热温度、层间温度、道间温度、焊后热处理等工艺措施，无一不是低氢化措施。进一步分析，在焊接材料成功应用中，焊接材料自身的低氢化是必要条件，而焊接方法和工艺因素的低氢化则是充分条件。二者缺一不可。

**6. 结语**

（1）Q690钢焊接性的主要问题是焊接裂纹敏感性较强，以及HAZ晶粒长大塑性降低倾向，同时也不可忽视热影响区韧性降低（HAZ粗晶区上贝氏体板条束间长条状分布的M-A组元对韧性的危害）。选用优质、合适的焊接材料和合理的焊接工艺，是控制和改善该钢焊接性的重要技术手段。

（2）Q690钢焊接材料的选用，可以采用“强度匹配”原则，等强匹配和低强匹配都可以获得满意的接头性能，低强匹配加低氢工艺可以明显改善钢的焊接性。

（3）受产品结构特点和焊接方法控制，Q690钢4种以上的焊接工艺方法和焊接材料各具特色；采用FCAW打底＋FCAW或GMAW填充的工艺优势明显。

（4）在Q690钢焊接材料成功应用中，焊接材料自身的低氢化是必要条件，而焊接方法和工艺因素的低氢化则是充分条件。二者缺一不可。

**表8 应用案例中的低氢工艺要点**

| 实例号 | 焊接方法 | 焊接材料 | 辅助工艺 | 效果 |
|---|---|---|---|---|
| ① | Ⅰ FCAW<br>Ⅱ 多层多道焊接 | 焊丝：TWE-110K3<br>保护气体：80％Ar+20％$CO_2$ | 预热温度：150~200℃<br>道间温度：150~200℃ | 试验确定的焊接工艺，用于Q690钢厚板焊接，可以获得良好的接头综合力学性能，满足工程使用要求 |
| ② | a) GMAW打底＋SMAW填充<br>b) GMAW打底＋FCAW填充（含多层多道） | a) GMAW打底：UnionK52Ni<br>SMAW填充：K-11018M<br>b) GMAW打底：UnionK52Ni<br>FCAW填充：FabCO XTREME120<br>保护气体：M21、C1 | 预热温度：100~120℃<br>层间温度：＜200℃<br>后热处理：焊缝两侧局部（200~300℃）×2h | 该工艺已成功应用于多个吊机项目中，为焊接制造提供了有效技术支持，赢得了业主和第三方的好评 |
| ③ | Ⅰ GMAW<br>Ⅱ 多层多道焊接 | 焊丝：G76<br>保护气体：80％Ar+20％$CO_2$ | 预热温度：150℃<br>道间温度：150℃<br>消除应力回火：（520±20）℃×2h | 拟定的焊接工艺已成功地应用于液压支架结构件的生产 |

**参考文献：**

[1] 李秉军，等．TMCP生产低碳贝氏体钢中微合金化元素的作用机理研究[J]．钢铁钒钛，2013,34（3）：77-82.

[2] 孙咸．异种钢焊缝中熔合区裂纹与低氢工艺的关系[J]．机械制造文摘 焊接分册，2015（3）：17-23.

[3] 高明霞，张明达．液压支架结构低合金高强度钢板Q690焊接工艺研究[J]．金属加工（热加工），2010（20）：49-51.

作者简介：孙咸，太原理工大学焊接材料研究所，长期从事焊接材料及金属焊接性方面的研究和教学工作。

MW 20160823