

高强钢焊接接头优化方法研究现状

张明瑞¹, 向婷¹, 高志伟¹, 曹积轩¹, 綦政凯¹, 余永辉¹, 李桓²

1. 天津职业技术师范大学 天津 300222

2. 天津大学 天津 300072

摘要: 高强钢以出色的力学性能在焊接结构的应用量急剧增加, 其焊接接头性能已逐步成为研究焦点。为了解决高强钢焊接易出现冷裂纹、热影响区软化脆化、低温冲击韧度不高等问题, 获得高强钢焊接接头优良强韧匹配。在使用熔化极气体保护焊接工艺的基础上采用不同的高强钢焊接接头优化方法, 对严格控制热输入、焊前预热并控制热输入和研发并采用药芯焊丝这3种焊接接头优化方法进行分析总结, 对3种优化方法下的焊接接头微观组织及力学性能进行分析, 发现通过这3种接头优化方法可避免焊接接头产生裂纹、获得良好的韧性组织和力学性能优良的焊接接头。

关键词: 高强钢; 焊接接头; 焊接热输入; 焊前预热; 药芯焊丝

Research status of optimization methods for high strength steel welded joints

ZHANG Mingrui¹, XIANG Ting¹, GAO Zhiwei¹, CAO Jixuan¹, QI Zhengkai¹, YU Yonghui¹, LI Huan²

1. Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China

2. Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: The application of high strength steel in welded structures with excellent mechanical properties has increased rapidly, and its welded joint properties have gradually become the focus of research. In order to solve the problems of cold crack, softening embrittlement in heat affected zone and low impact toughness of high strength steel welding, obtain excellent strength and toughness matching of high strength steel welding joints. On the basis of using gas metal arc welding, different optimization methods of high-strength steel welding joints were adopted to analyze and summarize the three optimization methods of welding joints: strict control of heat input, pre-welding preheating and control of heat input, and research and development and use of flux-cored wire. The microstructure and mechanical properties of welded joints under the three optimization schemes were analyzed. It is found that the three joint optimization methods can avoid cracks in welded joints, obtain good toughness structure and excellent mechanical properties of welded joints.

Keywords: high strength steel; welded joint; weld heat input; weld preheating; flux-cored wire

1 序言

近年来, 为落实“碳达峰”“碳中和”目标, 机械产业正稳步推进地绿色低碳转型, 节能、减排已经成为工艺设计理念的首要方向, 低碳化、轻量化设计已经是工程机械实施节能减排的有效途径之

一^[1, 2]。有研究表明^[3], 随着高强钢强度级别的不断提高, 钢板的减重量增加。此外, 工程机械作为机械工业中的重要组成部分, 随着我国经济迅猛发展, 持续为工程机械行业添加新动力, 工程机械已经是我国机械工业领域中的支柱性产业^[4]。工程机

基金项目: 天津市教委科研项目 (2022KJ130)。

械常见的产品设备包括挖掘机械、装载运输机械、起重机械等，在制造这些机械设备所需的焊接结构部件通常采用工程结构用钢^[5]。通过分析近几年我国工程机械的用钢情况，从中发现高强钢以出色的力学性能可以有效解决传统钢材因强度和韧性不足从而影响结构设计的问题^[6]，在焊接结构中的应用量急剧增加。因此，高强钢的焊接接头性能已经成为工程机械产品研发的关键。

2 高强钢的特点、应用及焊接接头缺陷

顾名思义，高强度钢相对于普通强度钢，具有更高的抗拉强度和屈服强度。目前各个国家没有给出高强钢严格的定义，按照我国惯例，将其屈服强度为355~780MPa的钢种称为高强钢，超过780MPa的钢种称为超高强钢^[7]。本文对前述高强钢和超高强钢不做特殊区分，一律统称为高强钢。高强钢不仅具有很高的抗拉强度和屈服强度，而且具有优异的低温韧性和抵抗脆性破坏的性能，并且含碳量很低，具有优异的焊接性能；此外，在增加载荷的同时能减轻自身重量，创造良好的社会效益、经济效益，并具有强度高、塑韧性好等优势，被作为工程材料大量用于绿色产业的焊接结构中，其特点与应用见表1。

表1 高强钢特点及应用		
高强钢特点	应用行业	实际应用
高强度、高耐磨性能	工程机械 ^[8]	起重机吊臂、装载机、大型挖掘机和液压支架等
强度高、减轻自重、强抗震性	桥梁制造 ^[9]	大型跨海、跨江和跨峡谷等桥梁
高强度、优良韧性、高承载力	交通制造 ^[10]	船舶制造、飞机、重型卡车和特种车辆
高强度和高耐腐蚀性	石油管线 ^[11]	制造油井管道、输油管道和储气罐等设备
高抗弯强度、低重量	建筑结构 ^[12]	大型结构中梁、柱、悬吊物

高强钢强度级别较高，其强化方式是在钢中加入较多的合金元素。由于加入的合金成分较多，致使高强钢中碳当量较大，因此会产生较强淬硬性，高强钢焊接接头易出现冷裂纹、热影响区软化脆化、低温冲击韧度不高等问题^[13]，严重时会影响焊接构件的安全性和使用寿命，无法充分体现高强度钢的优势。NEVASMAA等^[14]研究发现，裂纹在屈服强度580~900MPa的高强钢中出现的概率远大于580MPa以下的钢种，焊后氢致裂纹出现的速度与母

材的屈服强度密切相关，母材屈服强度越高，焊后氢致裂纹出现的时间越快。

3 高强钢焊接接头优化研究方法

为了使得高强钢焊缝成形组织良好，并且具有良好强韧性匹配性能的高强钢焊接接头是国内外许多焊接工作者一直孜孜以求的目标。目前，针对900MPa以上的高强钢大多采用熔化极气体保护焊的焊接工艺，此焊接工艺效率高，且可较轻易地实现机械化和自动化的高强钢焊接。此外，许多焊接学者使用熔化极气体保护焊工艺焊接高强钢时，为了获得优质的高强钢焊接接头，焊接工作者通过采用不同的焊接方法来有效改善高强钢焊接接头组织、提高接头力学性能，如采用控制焊接热输入的方法、焊前预热并控制焊接热输入的方法以及研发并采用药芯焊丝焊接高强钢的优化方法，如图1所示。

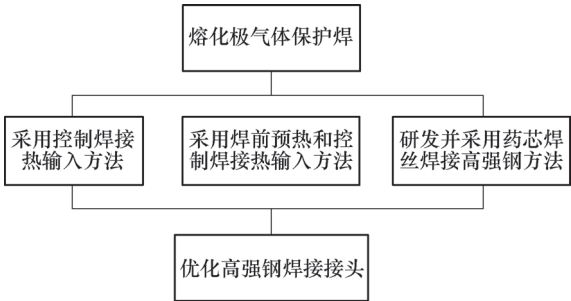


图1 优化高强钢焊接接头的研究方法

3.1 采用控制焊接热输入法优化高强钢焊接接头

焊接的热输入是影响焊接热循环的一个十分重要的因素，高强钢强度级别较高，对焊接热输入敏感性大。过大的热输入会导致焊接接头组织的晶粒粗化，使得性能恶化，过小的热输入会使接头脆化。因此，采用控制热输入的焊接方法可有效优化高强钢焊接接头。吴炳智^[15]采用GMAW工艺焊接Q960高强钢，图2所示为不同焊接热输入下的焊缝组织。由图2a可知，当焊接热输入为8.3kJ/cm时，焊缝金属组织主要包括马氏体（M）和贝氏体（B）组织，贝氏体铁素体组织晶粒尺寸大小较细；热输入增至11.7kJ/cm时，组织中开始出现大量板条贝氏体（LB）且相互交错，有较好的韧性，如图2b所示；当焊接热输入为16.9kJ/cm时，贝氏体铁素体组织晶粒变得粗大，并且出现较多的粒状贝氏体，该组织会使得韧性下降，如图2c所示。此外，随着焊接热输入的增大，热影响区的组织也出现粒

状贝氏体,板条贝氏体占比增多且呈粗大态。不同热输入下焊接接头的抗拉强度变化不大,均接近母材。不同焊接热输入下焊接接头冲击吸收能量如图3所示。由图3可知,焊缝区冲击吸收能量在热输入为8.3kJ/cm和11.7kJ/cm时相近,分别是87.7J和88.7J,当热输入增至16.9kJ/cm时,冲击吸收能量下降至75.7J;热影响区的冲击吸收能量呈下降趋势。因此,当焊接热输入为8.3~11.7kJ/cm时,焊接接头具有良好性能。

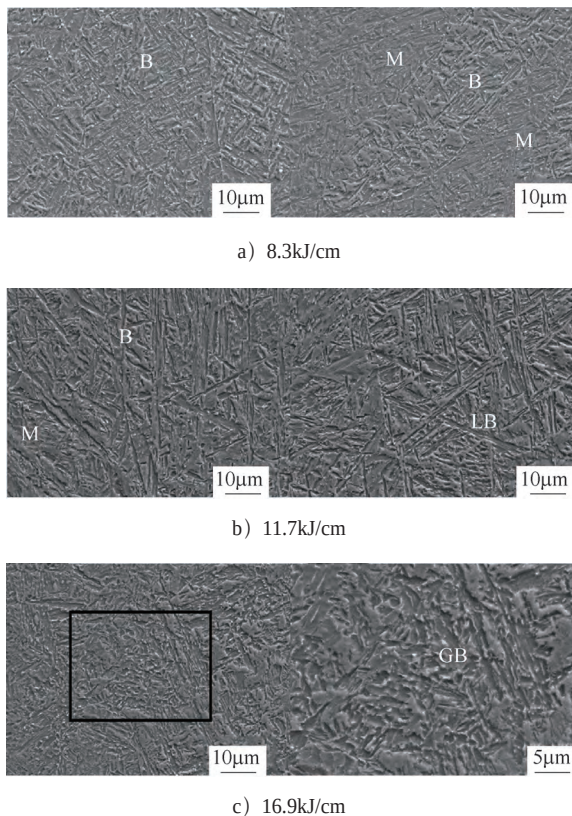


图2 不同焊接热输入下的焊缝组织^[15]

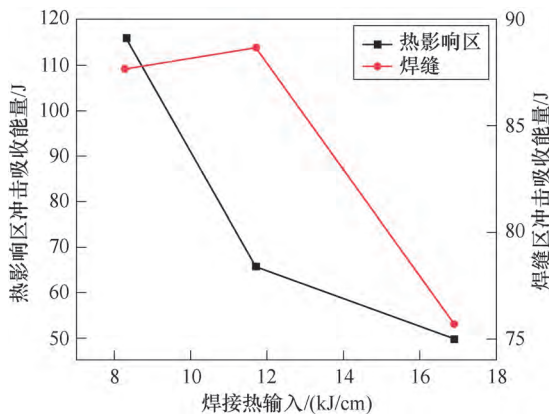


图3 不同焊接热输入下焊接接头冲击吸收能量^[15]

管彦朋等^[16]通过GMAW焊接试验研究了

1200MPa高强耐磨钢焊接接头。结果表明,当热输入为9.7kJ/cm时,焊缝区主要为针状铁素体组织(AF),晶粒较细小且含量较多,此外,还含有占比较少的侧板条铁素体(FSP)组织和呈板条态分布的先共析铁素体,如图4a所示;焊接热输入增至15.5kJ/cm时,针状铁素体晶粒长大,并且焊缝组织中针状铁素体所占区域减少,先共析铁素体组织晶粒粗化,且部分呈块态分布,含量较多,此外侧板条铁素体组织粗化并且含量较多,如图4b所示。其不同热输入下的低温冲击性能见表2。由表2可知,焊缝区的冲击吸收能量随着热输入的增大而变小。

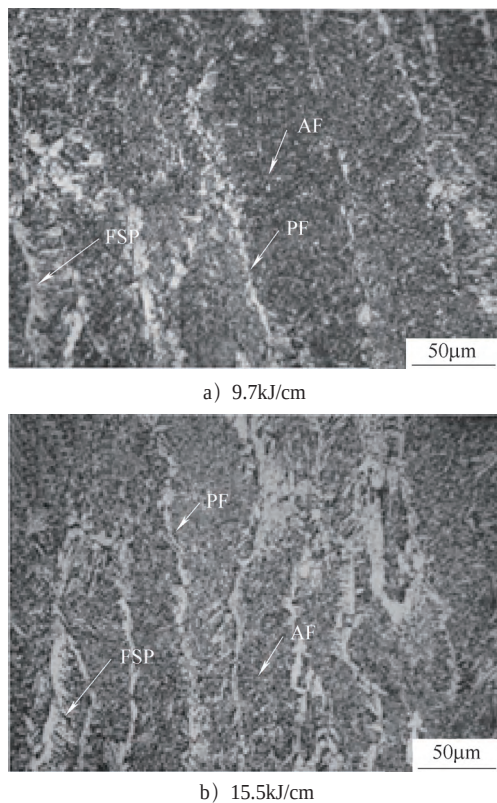


图4 不同热输入的焊缝区显微金属组织^[16]

表2 焊缝区冲击性能^[16]

焊接热输入/(kJ/cm)	试验温度/℃	平均冲击吸收能量/J
9.7	-20	107
9.7	-40	80
15.5	-20	94
15.5	-40	67

康丹丹等^[17]设计15kJ/cm、25kJ/cm和35kJ/cm这3种不同焊接热输入参数对1000MPa级的高强钢进行熔化极气体保护焊。研究发现,随着焊接热输入增加,焊缝中针状铁素体所占区域面积减小,开始出现板条态贝氏体,并且组织晶粒长大,导致焊缝冲

击吸收能量下降。此外,钢中合金元素C、Si、Mn的损烧量随着热输入的增加而增加,因此焊接接头的抗拉强度呈下降趋势,如图5所示。

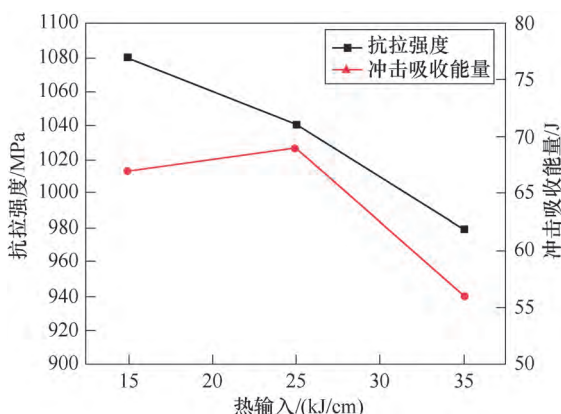
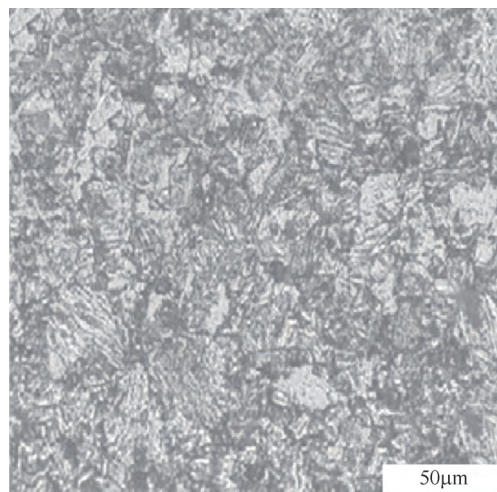


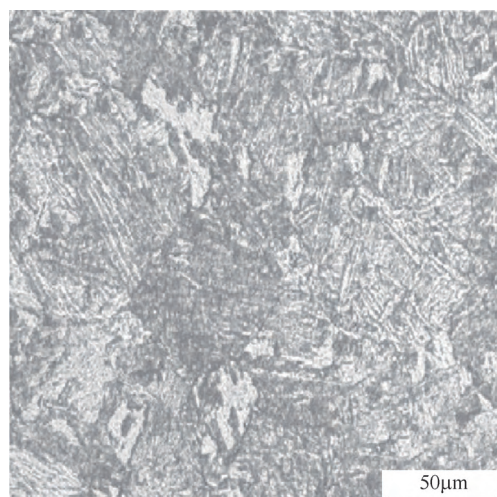
图5 不同热输入下焊接接头冲击吸收能量和抗拉强度^[17]

邓才智等^[18]通过改变不同热输入对1000MPa的低合金高强钢进行气体保护焊,热输入太小时,致使钢板根部无法焊透;热输入太大时,致使组织晶粒粗大,影响其性能。不同焊接热输入热影响区粗晶区显微组织如图6所示。通过图6可观察到,随着焊接热输入的升高,板条马氏体粗化,且出现上贝氏体,对韧性不利。不同热输入的抗拉强度和冲击性能曲线如图7所示。由图7可知,随着热输入的增大,焊接接头的抗拉强度有所下降,当热输入>1.55kJ/mm时,抗拉强度明显下降。冲击吸收能量随着热输入的上升呈先增高到一定值后逐渐下降趋势。当热输入为1.55kJ/mm时,低合金高强钢焊接接头达到优良强韧匹配。

袁耀等^[19]选用高强钢Q960E作为焊接母材,并采用熔化极气体保护平板对接焊,采用Image Pro Plus 软件测得高热输入下试样热影响区粗晶区板条束平均尺寸比低热输入的宽约10 μ m,高热输入试样未完全相变区回火马氏体组织所占比例比低热输入试样的少,且马氏体含量增多。安同邦等^[20]设计12kJ/mm、15kJ/mm和18kJ/mm这3种热输入参数对1000MPa级的高强钢进行熔化极气体保护焊接,发现焊缝区组织在3种不同热输入下均以板条马氏体组织为主,随着焊接热输入上升,组织晶粒粗态化,并且粒状贝氏体组织区域面积增多,板条马氏体占比减少,焊缝区韧性下降,抗拉强度随着热输入的增加逐步下降。WEN等^[21]研究了不同热输入条件下超高强度结构钢焊接接头的组织和力学性能。



a) 1.36kJ/cm



b) 1.92kJ/cm

图6 不同焊接热输入热影响区粗晶区显微组织^[18]

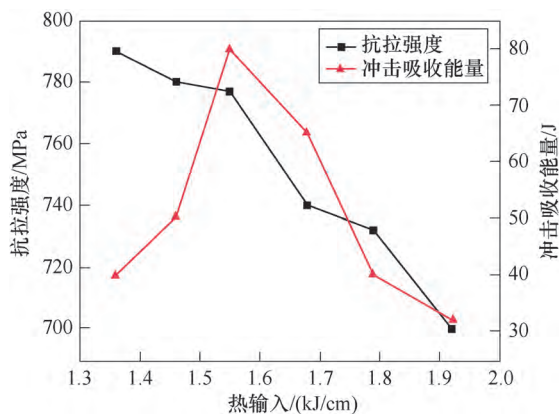


图7 不同热输入的抗拉强度和冲击性能曲线^[18]

结果表明,当输入热量达到18.5kJ/cm,针状铁素体由B-AF变为WF-AF。随着热输入的增加,抗拉强度逐渐降低。HU等^[22]获得了热轧V-N微合金高强度S-Lean钢模拟焊缝中合适的热输入。结果表明,随

着焊接热输入的增大,冷却速率下降,铁素体晶粒尺寸从 $3\sim 5\mu\text{m}$ 粗化至 $10\sim 20\mu\text{m}$,低温冲击性能随热输入的增加呈先上升后下降趋势。WANG等^[23]对HQ130超高强度钢热影响区的断口形貌和精细组织进行了研究。当焊接热输入为 $9.2\sim 18.6\text{kJ/cm}$ 时,热影响区微观结构由板条马氏体变为板条马氏体+板条贝氏体,当焊接热输入升至 26.4kJ/cm ,热影响区主要为板条贝氏体组织,且板条间组织方向性强的碳化物抑制冲击高能量断裂,导致韧性急剧下降。

综上所述,当热输入过高时,高强钢焊接接头焊缝区和热影响区的组织晶粒粗化,并且促使侧板条铁素体、粒状贝氏体和板条间组织方向强的碳化物等对焊接接头韧性不利的组织生成,使得接头韧性较低。此外,钢中合金元素的损烧量会较大,焊接接头的抗拉强度会下降。因此应严格控制热输入,以获得力学性能优良的焊接接头。

3.2 采用焊前预热和控制热输入方法优化高强钢焊接接头

为获得优异的高强钢焊接接头,许多焊接学者采用焊前预热的方法,在此基础上优化焊接工艺,并严格控制焊接热输入。选择合适的预热温度可以降低焊接接头冷却速度,减小冷裂纹倾向。此外,采用焊前预热的方法使得焊接接头温度分布均匀,从而降低焊接接头的残余应力。

徐震霖等^[24]采用熔化极气体保护焊的焊接方法对Q960E高强钢板进行焊接,通过改变不同预热温度,通过焊接热影响区斜Y形坡口焊接裂纹试验,讨论了Q960E钢板的焊接性,得出预热温度为 120°C 时,钢板产生淬硬概率较小,表面和断面裂纹率为0。焊接接头金相组织和扫描电镜显微组织如图8所示。由图8可知,焊缝区为针状铁素体和马氏体组织;粗晶区主要为板条马氏体组织;细晶区组织为细小的马氏体和贝氏体;不完全淬火区为粒状贝氏体混合组织和回火索氏体。此外,焊缝的硬度高于母材, -40°C 的焊缝冲击吸收能量为 55J 。

樊新波等^[25]探索了Q960E钢板的焊接性能,首先进行斜Y形坡口焊接裂纹试验,结果见表3。由表3可知,当预热温度为 120°C 和 150°C 时,试样焊缝表面裂纹率为0。在此基础上,使用3种不同焊丝对Q960E高强钢进行熔化极气体保护焊试验,分析比较在不同焊接热输入下高强钢接头的组织与力学

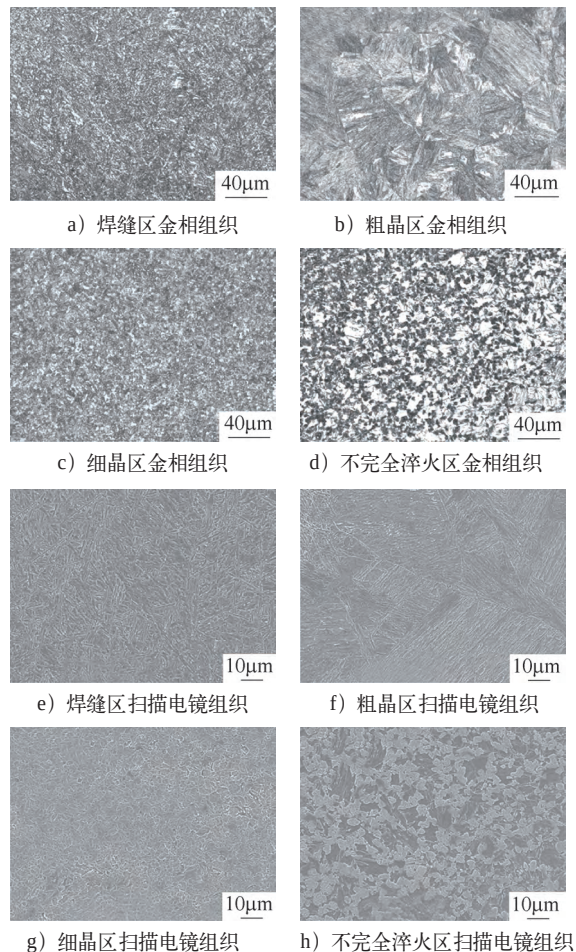


图8 焊接接头金相和扫描电镜显微组织^[24]

表3 焊接表面裂纹试验结果^[25]

编号	预热温度/ $^\circ\text{C}$	表面裂纹率 (%)	断面裂纹率 (%)
1	18	30	30
2	18	30	20
3	100	10	5
4	100	0	0
5	120	0	0
6	120	0	0
7	150	0	0
8	150	0	0

性能。试验研究结果表明,在热输入为 $8\sim 10\text{kJ/cm}$ 时,采用T union GM120型号焊丝获得的焊接接头的组织力学性能最好,其金相显微组织如图9所示。由图9可知,焊缝区为针状铁素体和细小的马氏体组织,热影响区中粗晶组织主要为板条马氏体,细晶组织为细小的粒状贝氏体和回火索氏体混合组织,母材组织为回火索氏体。

马天恒等^[26]对Q960E高强钢进行气体保护焊,焊接裂纹试验结果见表4。由表4可知,当预热温度 $\geq 175^\circ\text{C}$ 时,试样裂纹率为0。当预热温度为 180°C 、

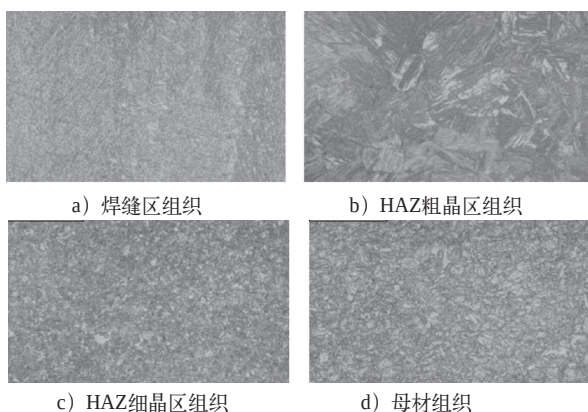


图9 Q960E高强度钢焊接接头金相显微组织^[25]

焊接电流为260A、电弧电压为28V时，接头抗拉强度为1052MPa，-40℃冲击吸收能量为24J。

表4 焊接裂纹试验结果^[26]

标号	预热温度 /℃	表面裂纹率 (%)	表面裂纹率 (%)	根部裂纹率 (%)
1	135	0	97	87
2	155	100	100	100
3	175	0	0	0

YANG等^[27]采用脉冲三熔化极气体保护焊焊接Q960E高强度钢。研究表明，当预热温度区间控制在100~120℃，焊接热输入为1.26kJ/mm时，焊接接头性能最优。焊缝区为针状铁素体组织，热影响区粗晶区为板条马氏体和板条贝氏体组织，焊接接头处抗拉强度为905MPa，冲击吸收能量为81J。

综上所述，采用焊前预热并控制热输入的方法，选择合适的预热温度是避免高强度钢焊接接头产生裂纹的有效方法之一。焊前预热可有效降低焊接接头冷却的速度，减少冷裂纹的生成，控制预热温度也可使得高强度钢焊接接头进一步优化。

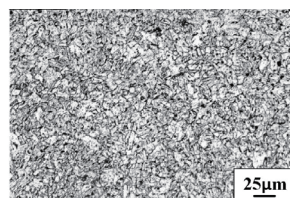
3.3 采用药芯焊丝焊接高强度钢优化焊接接头

除了上述几种采取严格控制焊接热输入、焊前预热等措施优化高强度钢焊接接头性能外，对高强度钢的焊接材料进行研究以实现高强度钢良好的焊接性能。金属粉芯药芯焊丝具有良好的药粉合金体系和焊药成分可调的优点，可有效控制焊缝金属成分可获得良好的韧性组织，广泛应用于高强度钢结构的焊接^[28]。国内外焊接工作者针对高强度钢的焊接研发了各类药芯焊丝。

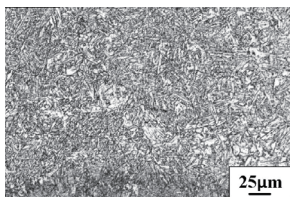
制造原油储罐的高强度钢焊接接头必须承受较高的热输入，但过高的热输入会使得接头性能恶化。QU等^[29]采用药芯焊丝BH610-EG焊接高强度钢

B610E，在80~100kJ/cm的热输入范围内，使用药芯焊丝的焊接过程非常稳定，焊缝表面良好，焊接接头的各试件力学性能满足储罐的设计要求。

刘政军等^[30]针对960MPa高强度钢焊接研发了一种金属粉芯型药芯焊丝，采用熔化极气体保护焊接工艺，药芯焊丝主要合金体系为Mn、Ni、Mo和Cr元素，微合金元素为Ti、B、Nb和Al元素。图10所示为无微量元素和添加微量合金元素的焊缝组织。由图10可看出，添加合金元素的焊缝组织针状铁素体更多。其焊接接头显微组织如图11所示。由图11可知，焊缝区组织中针状铁素体所占比例较大，块状铁素体较少，热影响区为块状铁素体和粒状贝氏体混合组织。在药芯焊丝成分设计中，主要合金元素起到固溶和弥散强化作用，微量合金元素起到细化晶粒、抑制块状铁素体作用，焊接接头抗拉强度平均值为952.24MPa，-20℃焊缝平均冲击吸收能量为70J。

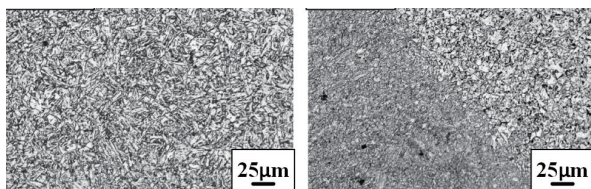


a) 无微合金元素



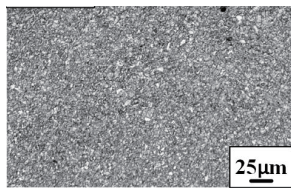
b) 添加微合金元素

图10 焊缝显微组织^[30]



a) 焊缝区

b) 熔合区



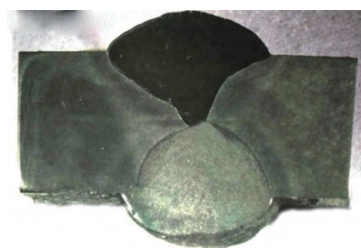
c) 热影响区

图11 焊接接头显微组织^[30]

吕小松^[31]针对Q960E高强度钢优化设计出一种药芯焊丝，并与实心焊丝SNi6617一起对钢板进行双丝焊接，采用熔化极气体保护焊的焊接方法实施双面焊接。如图12所示，焊缝成形较好，焊缝熔合较好，无裂纹产生。焊接接头金相组织如图13所示。由图13可知，焊缝区的基体为FCC相，在基体上交替分布着纳米BCC相，起到纳米析出强化作用，焊缝区晶粒呈板条状，由白色块状和灰色块状两相交替混合组成。粗晶区组织为马氏体，细晶区组织为细小的马氏体，两相区组织为马氏体和索氏体，回火区组织为回火马氏体。Q960E高强度钢焊接接头的抗拉强度为1025MPa，在母材位置断裂，-40℃的冲击吸收能量为89J，焊接接头综合性能良好。



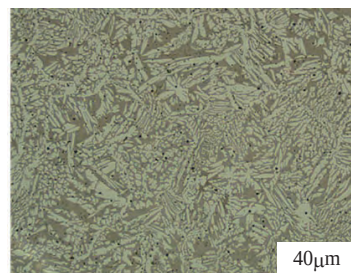
a) 焊缝宏观成形



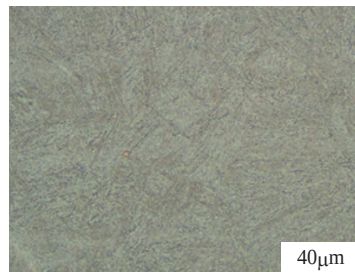
b) 焊缝横截面

图12 焊缝成形^[31]

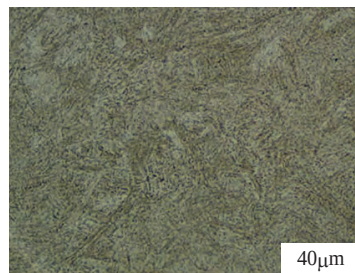
SMOLENTSEV等^[32]采用气体保护焊针对低合金钢研制出最优合金配比的药芯焊丝，最优测定了C-Si-Mn-Ni-Mo合金体系中锆的附加微合金化， $w_{Zr}=0.007\% \sim 0.009\%$ 是其在焊缝金属中的最佳含量，在此含量下，非金属夹杂物的体积分数和尺寸减小，金属组织中分散成分的分分数增加。BHATTACHARYA等^[33]使用药芯焊丝Auto-MIG 420焊接低合金高强度钢板，焊接工艺采用熔化极气体保护焊，焊缝金属组织主要由板条马氏体和少量M-A成分（马氏体-奥氏体交替层）组成。在较高的热输入和较低的预热温度等特殊焊接条件下，针状铁素体与板条马氏体相结合，由针状铁素体组成的焊缝具有较好的力学性能和较低的吸氢倾向。



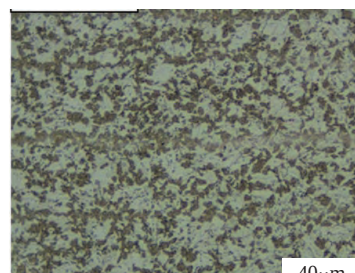
a) 焊缝区



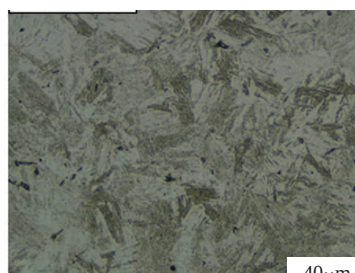
b) 粗晶区



c) 细晶区



d) 两相区



e) 回火区

图13 焊接接头金相组织^[31]

GÁSPÁR等^[34]比较了两种药芯焊丝（基本和金属粉末）与传统实心焊丝对AHSS（高级高强度钢）的焊接接头，发现金属粉末型药芯焊丝焊接高强钢的

接头力学性能良好。

综上所述,焊接工作者可通过研发调整药芯焊丝的成分,优化合金元素配比,焊接高强钢时可获得良好的组织和较高的力学性能。

4 结论与展望

获得优良强韧性能匹配的高强钢焊接接头是许多焊接工作者一直追求的目标。熔化极气体保护焊是焊接工作者常用的焊接工艺,在此基础上,采用不同的研究方法优化高强钢焊接接头,获得优良的强韧匹配。

1) 为了获得优质的焊接接头,应严格控制焊接的热输入。热输入过大时,会使得焊接接头焊缝区和热影响区的组织晶粒粗化,促使侧板条铁素体、粒状贝氏体等对焊缝和热影响区低温韧性不利的组织生成,此外,热输入过高时,钢中合金元素损烧量会较大,焊接接头的抗拉强度会下降。因此,应严格控制热输入,以获得优良匹配的焊接接头性能。

2) 采用焊前预热并控制热输入的方法,选择合适的预热温度是避免焊接接头产生裂纹的有效方法之一。焊前预热可有效降低焊接接头冷却的速度,减少冷裂纹的生成。因此,控制预热温度也可使得焊接接头进一步优化。

3) 研发并采用药芯焊丝优化高强钢焊接接头。药芯焊丝具有良好的金属粉芯合金体系,其微量合金元素可有效细化焊缝组织晶粒,抑制对韧性不利的组织生成,因此,可有效控制焊缝金属成分,以获得良好的韧性组织,且熔敷效率高,有助于实现高强钢的优良焊接,从而获得优异的接头力学性能。

4) 高强钢的焊接接头性能已经成为工程机械产品研发的关键,为了获得力学性能优良的焊接接头,其优化方法仍需继续创新。开发智能化的焊接系统是未来研究的热点,通过智能监控系统对焊接过程进行实时监测,获得稳定的焊接过程和良好的力学性能;此外,可采用多目标协同优化焊接参数,避免高强钢焊接接头出现冷裂纹、热影响区脆化等问题。

参考文献:

[1] 袁亮. 煤炭工业碳中和发展战略构想[J]. 中国工程科

学, 2023, 25 (5) : 103-110.

- [2] 张琦, 田硕硕, 沈佳林. 中国钢铁行业碳达峰碳中和时间表与路线图[J]. 钢铁, 2023, 58 (9) : 59-68.
- [3] 张岩. 高强钢在轻量化结构设计中的应用及其焊接[J]. 电焊机, 2021, 51 (12) : 34-40.
- [4] NASKOUDAKIS I, PETROUTSATOU K. A thematic review of main researches on construction equipment over the recent years[J]. Procedia Engineering, 2016, 164: 206-213.
- [5] ZHANG Y, ZHANG F. Application of new automatic welding equipment and welding technology in the future construction machinery field[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 637 (1) : 1-7.
- [6] 陈付红, 丁伟, 黄维, 等. 国外先进公司工程机械用高强钢发展现状[J]. 上海金属, 2015, 37 (1) : 47-51.
- [7] SOLBERG J K, LEINUM J R, EMBURY J D, et al. Localised shear banding in Weldox steel plates impacted by projectiles[J]. Mechanics of Materials, 2007, 39 (9) : 865-880.
- [8] 位亮. 高强度工程机械用钢应用现状和发展前景[J]. 冶金与材料, 2021, 41 (1) : 147-148.
- [9] 韩大章, 华新. 我国大跨桥梁建设成就及与世界先进水平的差距[J]. 现代交通技术, 2005 (4) : 1-4, 9.
- [10] BOUAZIZ O, ZUROB H, HUANG M. Driving force and logic of development of advanced high strength steels for automotive applications[J]. Steel Research International, 2013, 84 (10) : 937-947.
- [11] 朱镔年, 耿拥华, 赵明. 三峡引水压力钢管高强钢的焊接及质量控制[J]. 焊接技术, 2006 (3) : 56-58.
- [12] 祁海坤. 深圳会展中心高强度钢拉杆施工技术[J]. 钢结构, 2005 (2) : 63-65, 36.
- [13] FYDRYCH D, ŁABANOWSKI J, TOMKÓW J, et al. Cold cracking of underwater wet welded S355G10+N high strength steel[J]. Advances in Materials Science, 2015, 15 (3) : 48-56.
- [14] NEVASMAA P. Predictive model for the prevention of weld metal hydrogen cracking in high-strength

- multipass welds[D]. Finland: University of Oulu, 2003.
- [15] 吴炳智. 高强钢气体保护焊丝熔敷金属强韧化研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2014.
- [16] 管彦朋, 李亚江, 王娟. 1200MPa高强耐磨钢焊缝显微组织及冲击韧性的研究[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2015(2): 5-9.
- [17] 康丹丹, 万天明, 王高见, 等. 不同热输入对1000MPa级水电工程用高强钢B950CF焊接接头组织及力学性能的影响研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(17): 221-224.
- [18] 邓才智, 邓文科, 何蔚, 等. 1000MPa级高强钢焊接试验研究[J]. 焊接技术, 2019, 48(8): 38-40.
- [19] 袁耀, 王金凤, 蔡笑宇, 等. Q960E超高强钢焊接接头组织和性能研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 97-104.
- [20] 安同邦, 单际国, 魏金山等. 热输入对1000MPa级工程机械用钢接头组织性能的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22): 42-49.
- [21] WEN C, WANG Z, DENG X, et al. Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of low alloy ultra - high strength structural steel welded joint[J]. Steel Research International, 2018, 89(6): 1700500.
- [22] HU J, DU L X, WANG J J, et al. Effect of welding heat input on microstructures and toughness in simulated CGHAZ of V-N high strength steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 577: 161-168.
- [23] WANG J, LI Y J, LIU P. Effect of weld heat input on toughness and structure of HAZ of a new super-high strength steel[J]. Bulletin of Materials Science, 2003, 26: 301-305.
- [24] 徐震霖, 方俊飞. Q960E调质钢厚板的MAG焊接性及接头力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(15): 82-85.
- [25] 樊新波, 王桂红, 王志辉, 等. 工程机械用钢Q960E高强钢焊接工艺研究[J]. 机械工程与自动化, 2022(4): 131-132, 134.
- [26] 马天恒. O960E 钢气保护焊配套实心焊丝的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2013.
- [27] YANG K, WANG F, DUAN D, et al. Experimental investigation of integrated circular triple-wire pulse GMAW of Q960E high-strength steel for construction machinery[J]. Materials, 2021, 14(2): 375.
- [28] LATHABAI S, STOUT R D. Shielding gas and heat input effects on flux cored weld metal properties[J]. Welding Journal, 1985, 64(11): 303-313.
- [29] QU Z X, ZHANG H Q. Research on high heat input welding of the high strength electro-gas flux-cored wire used for large storage tank: Materials Science Forum[C]. Switzerland: Trans. Tech. Publications Ltd., 2010.
- [30] 刘政军, 袁荣鹏, 武丹, 等. 960MPa高强钢金属粉芯型药芯焊丝焊缝金属韧化机理[J]. 焊接学报, 2018, 39(1): 105-109, 136.
- [31] 吕小松. 超高强钢双丝气体保护焊焊缝成分设计及组织与性能的研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- [32] SMOLENTSEV A S, VOTINOVA E B, VESELOVA V E, et al. Study of microstructure and properties of high-strength alloy steel welded joints made with austenitic flux-cored wire with nitrogen[J]. Metallurgist, 67(7): 928-937.
- [33] BHATTACHARYA J, PAL T K. Optimal weld parameters, weld microstructure, mechanical properties, and hydrogen absorption: An effective analysis[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20: 1336-1345.
- [34] GÁSPÁR M, BALOGH A. Efficient increase of the productivity of GMA welding of AHSS using flux cored wire: Design, Fabrication and Economy of Metal Structures: International Conference Proceedings 2013[C]. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 463-468.

MW 20240409