

摘 要

针对铁路货车的车钩和上心盘等 C 级钢配件在检修时只能手工焊接,无法实现机械化自动焊接的问题,提出了采用“药芯焊丝+气体保护”或“药芯焊丝+焊剂保护”的方法焊补上述配件。

研制了 C 级钢专用的药芯焊丝,通过对 C 级钢的化学成分和机械性能进行分析,确定了 C 级钢药芯焊丝的设计目标和设计原则,在此基础上完成初步的配方设计。经多次对配方进行调整和反复的配制试验之后,确定了该渣系药芯焊丝的配方成分配比,并进行了熔敷金属和焊接接头的化学成分分析及力学性能试验。根据试验结果可知,该 C 级钢药芯焊丝的熔敷金属和焊接接头的各项机械性能指标均达到了母材的要求。焊后进行磁粉探伤和 X 射线探伤以及金属显微组织分析,焊缝表面及内部质量良好,因此焊缝不易产生裂纹和传播裂纹,是较理想的焊缝金相组织。

经小批量生产验证,具有良好的焊接工艺性能、电弧稳定、脱渣容易等优点,在 C 级钢生产中应用前景广阔。

关键词: C 级钢 药芯焊丝 焊接性

Abstract

According to solve the problem of railway train' s C level steel accessory , as the coupling and the upper center-plate etc. , when overhauling can only handwork welding , can not realize mechanization automatic welding, in this paper the author has put forward to use the method of “flux-cored wire + gas protection” or “flux-cored wire+soldering flux protection” to weld mend above-mentioned accessory.

A new type of special purpose flux-cored wire for the C level steel is developed. Through analysing to the chemical composition and the mechanical performance of C level steel, have determined the design goal and design principle of C level steel flux-cored wire, finish preliminary prescription design on this foundation. After adjusting for prescription many times and the technology properties tests repeatedly, has determined this slag system prescription of flux-cored wire. Side by side the chemical composition of deposited metal is analysed and the mechanics capability trial,the deposited metal tensile

experiment, low temperature toughness experiment and welding joint mechanical performance experiment show its mechanical performance and hardness as a result can reach or exceed C level steel. After welding, carry out the magnetic particle and X-ray flaw detection as well as metal microstructure analysis, weld metallographic organization is very small crystal and small acicular ferrite + pearlite (F + P), therefore weld don't be easy produce crack and spread crack, is more ideal weld metallographic organization.

By the production verification of small batch, the C level steel flux-cored wire provides good usability, electric arc to stabilize and take off dregs easy etc. that it is vast to apply the foreground in C level steel production.

Key words: C level steel, flux-cored wire, weldabilities

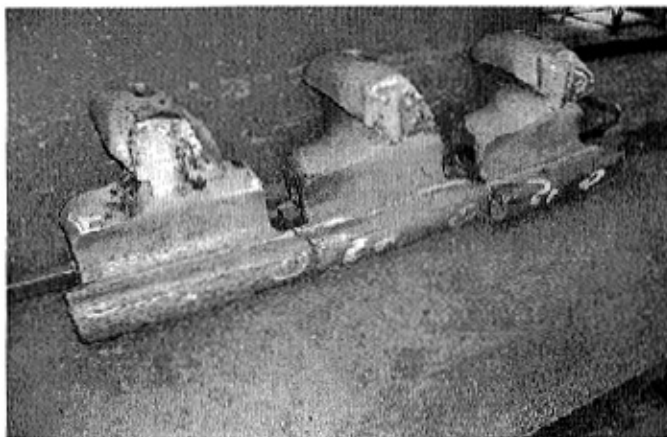
第一章 概述

1.1 前言

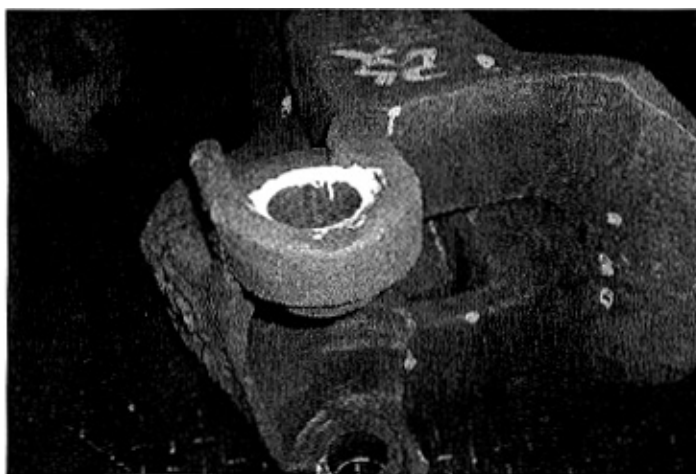
为适应铁路跨越式发展，推进铁路货车技术水平升级换代，满足新时期铁路运输的特点和需要。我厂自 1994 年以来开始承接大秦线专用的 C61 型运煤敞车的检修工作，车辆进入厂修后，除对裂损部位焊修外，大量的工作是对磨耗部位进行堆焊修理，达到恢复配件的原始尺寸和满足使用功能的目的。由于该型车的主要磨耗部件如上心盘、车钩等铸件材质均采用铸造 C 级钢（ZG25MnCrNiMo）（如图一、二、三），因此必须使用专用的焊接材料才能达到母材的强度要求。同时，铁道部运输局运装货车[2001]1 号文也要求：钩舌牵引面、钩耳孔磨耗焊修应采用自动焊。

近年来采用 C 级钢上心盘、车钩的新造货车也逐年增加并将陆续进入厂修期，因此对 C 级钢零部件焊修即将形成批量，而目前国内市场尚无用于 C 级钢焊接的气体保护焊及埋弧焊专用焊丝。因此，我厂现有的上心盘、钩舌、钩耳孔等自动焊修工装针对 C 级钢部件尚不能充分发挥其作用，只能采用手工电弧焊进行焊接，大大降低了生产效率，焊接质量

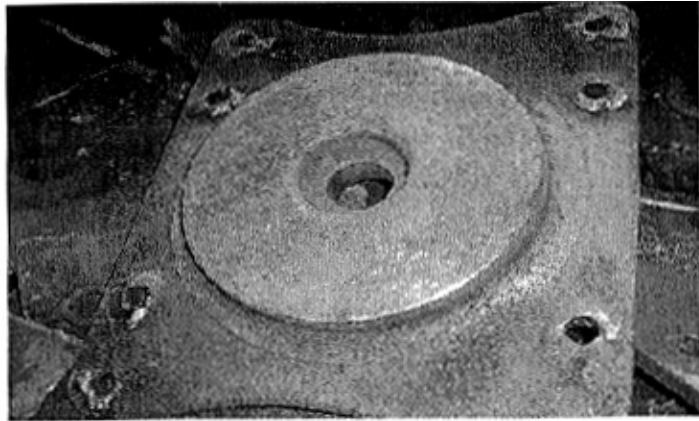
也难以保证。



图一 牵引面磨损超限的钩舌



图二 钩耳孔磨损超限的车钩



图三 磨耗超限的上心盘

由于普碳钢（ZG230-450）与 C 级钢（ZG25MnCrNiMo）的化学成份及机械性能均有很大差别。若采用自动焊，过去使用的普通焊丝均不能满足要求，为尽量保证焊丝与母材在化学成份与机械性能上匹配，工厂联合有关单位又开发了采用 CO₂ 气体保护自动焊和埋弧焊并适合 C 级钢成份和性能的 C 级钢药芯焊丝。

1.2 C 级钢化学成分和机械性能的分析

所谓 C 级钢，一般特指机械性能和化学成分均达到美国铁路协会（AAR）AAR-M-201 和 AAR-M-211C 级钢标准的钢材。从 1962 年开始，美国经 AAR 批准的货运列车，所有车钩均

采用 C 级钢。为满足铁路高速重载运输的需求，C 级钢正逐步取代传统使用的普通碳素铸钢，成为我国铁路货车配件的主导材料。

美国专利 US5482675 涉及的一种高强度、细晶粒的中低碳合金钢铁，铸钢成分为 C 0.15-0.21%, Si 0.35-0.65%, Mn 0.90-1.30%, S 0.025%, P 0.025%, Cr 0.25-0.60%, Mo 0.10-0.30%, 余量为 Fe 和杂质，采用适当的淬火和回火温度，可使钢材的强度、塑性和低温韧性符合 AAR-M-201 标准对 C 级钢的要求。欧洲专利 EP1306458 公开的一种耐腐蚀、耐应力腐蚀破裂并具有适当的强度和韧性平衡的透平转子钢材，其含有（重量%）C 0.01-0.10%, Si 0.01-0.50%, Mn 0.1-1.0 %, Cr 9-13%, Ni 2-7%, Mo 0.3-3%, N 0.01-0.10%, 此外还含 B:0.0005-0.005%、Ca:0.001-0.009%、稀土元素：0.003-0.03%中的任何一种以上，其余为 Fe 和杂质。该合金钢的热处理采用淬火后于 500-700℃进行两次以上的回火。选用合适的成分配比，可使该钢材的抗拉强度、屈服点和断后伸长率达到 AAR 对 C 级钢的要求。

我国对低合金高强度的铸钢材料的开发历史还不长，目

前研制的 C 级钢主要有 ZG24SiMnVTi、ZG25MnCrNiMo 和 ZG32MnMoNiCu 等三个钢种。其中, ZG24SiMnVTi 系铸钢材料采用正火+回火的热处理方式, 力学性能指标: σ_b 688.8Mpa, σ_s 472.3Mpa, δ_4 24.3%, ψ 54%, Akv (常温) 71.8J/cm², 钢材料的强度和塑性达到了 AAR 对 C 级钢的要求。戚墅堰机车车辆工艺研究所开发的 ZG25MnCrNiMo C 级钢, 钢材成分为 C 0.25%, Si 0.36%, Mn 1.36%, S 0.031%, P 0.028%, Cr 0.42%, Mo 0.21%, Ni 0.43%, Cu 0.10%, 采用正火+回火的热处理方式, 力学性能指标为 σ_b 640Mpa, σ_s 470Mpa, ψ 51%, Akv (-18℃) 43J、44J、49J (平均为 45.3J), Akv (-40℃) 27J、35J、38J (平均为 33.3J)。内蒙古第一机械制造厂研制的 ZG32MnMoNiCu 钢车钩材料含有 Mo, Ni, Cu 等合金元素, 采用淬火+回火的热处理方式, 属于调质 C 级钢, 其力学性能指标: σ_b 623Mpa, σ_s 417Mpa, δ_4 22%, ψ 45%, Akv (-40℃) 27J。ZG25MnCrNiMo 铸钢克服了 ZG24SiMnVTi 铸钢的铸造性差、可焊性不好和裂纹敏感等缺点, 具有良好的机械性能和焊接性能。

根据 C 级钢有关技术标准规定, C 级钢化学成分如表 1,

机械性能如表 2。

表 1 C 级钢化学成分

碳(%)	硅(%)	锰(%)	磷(%)	硫(%)	铬(%)	镍(%)	钼(%)	铜(%)
0.22- 0.28	0.20- 0.40	1.20- 1.50	≤0.04	≤0.04	0.40- 0.60	0.35-0 .55	0.20- 0.30	<0.30

表 2 C 级钢机械性能

抗拉强度 σ_s (MPa)	屈服点 σ_s (MPa)	断后伸长率 δ_5 (%)	断面收缩 ψ (%)	冲击吸收功 (-18℃)Ak _v (J)	硬度 HB
≥620	≥415	≥22	≥45	≥27	179-241

根据有关技术标准规定,我国普通 B 级铸钢、低合金高强度 C 级铸钢的化学成分比较如表 3,机械性能比较如表 4。

表 3 C 级钢及普低钢化学成分对比

钢种	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Cr、Ni、 Mo(%)
C 级钢	0.22-0.28	0.2-0.4	1.2-1.5	≤ 0.04	≤ 0.04	
普碳钢	0.30	0.50	0.90	≤ 0.04	≤ 0.04	

表 4 C 级钢及普低钢机械性能对比

钢种	抗拉强度 σ_s (MPa)	屈服点 σ_s (MPa)	断面伸长率 δ_5 (%)	断面收缩率 ϕ (%)	冲击吸收功 -40AK _v (J)
C 级钢	≥620	≥415	≥22	≥45	≥44
普低钢	230	450	≥22	≥32	≥25

由上表可知, B 级钢与 C 级钢 (ZG25MnCrNiMo) 的化学

成份及机械性能均有很大差别。因此在焊修工作中，过去使用的普通钢的焊丝均已不能满足使用要求，采用的焊接材料也必须进行相应的改进。

由于 C 级钢的化学成分和机械性能都与常用中、低碳钢有一定的差别，因此若选用的常用的普通低碳钢焊材，就会造成机械性能的不匹配。尤其是对于接触磨耗面来讲，若一侧是 C 级钢材质，而另一侧为焊补后的低碳钢堆焊面，由于两者的硬度相差较大，一硬一软的两个接触面的磨耗，肯定会对较软的低碳钢一侧的磨耗明显加剧。

因此为了使配件接触面的机械性能相匹配，就必须保证焊补后的堆焊层应具有与母材接近的机械性能，这样就要求用于堆焊的焊丝的化学成分应与母材相配合，从而保证焊丝熔敷金属的化学成分和机械性能均与母材接近。

1.3 焊接方式的选择

CO₂ 气体保护焊是利用 CO₂ 气体为保护气体的一种熔化极气体保护焊的焊接方法，简称 CO₂ 焊。

在焊接过程中，由于 CO₂ 气体比空气重，因此从喷嘴中喷出的 CO₂ 气体可以在电弧区形成有效的保护层，防止空气

进入熔池，特别是空气中氮的影响。熔化电极也即是焊丝通过送丝滚轮不断地送进，与工件之间产生电弧，在电弧热的作用下，熔化焊丝和工件形成熔池，随着焊枪的移动，熔池凝固形成焊缝。

C02 气体保护焊按焊丝直径大小可以分为细丝 C02 焊（焊丝直径 $\phi \leq 1.2 \text{ mm}$ ）和粗丝 C02 焊（焊丝直径 $\phi \geq 1.6 \text{ mm}$ ），按操作方法可以分为 C02 半自动焊和 C02 自动焊两种。它们的区别在于 C02 半自动焊是手工操作完成热源的移动，而送丝、送气等与 C02 自动焊一样，是由相应的机械装置来完成。

C02 气保焊与普通的手工电弧焊相比，C02 焊主要有以下优点：

1、生产效率高 由于焊接电流密度较大，电弧热量利用率较高，焊丝又是连续送进，以及焊后不需清渣，因此提高了生产率。

2、成本低 C02 气价格便宜、电能消耗少，所以焊接成本低，仅为埋弧自动焊的 40%，为手工电弧焊的 37-42%。

3、焊接变形和应力小 由于电弧加热集中，工件受热

面积小，同时 CO₂ 气流有较强的冷却作用，所以焊接变形和应力小，一般结构焊后即可使用，特别适用于薄板的焊接。

4、焊缝质量高 由于焊缝含氢量少，抗裂性能好，焊接接头的力学性能良好，故焊接质量高。

正是由于 CO₂ 焊具有以上优点，因此根据铁道部运输局运装货车（2001）1 号文要求，决定在钩舌牵引面和钩耳销孔磨耗焊修时采用 CO₂ 气体保护焊。但由于上心盘的磨耗程度较大，综合考虑焊接成本和焊接效率，决定在上心盘磨耗焊修时采用埋弧自动焊。

1.4 焊接材料的选择

随着焊接自动化的不断发展与提高，焊丝的应用也日益广泛，有着极其广阔的发展前景。目前，在我国是仅次于电焊条用量的一种焊接材料。

焊丝的作用在于传导电流、填充金属、过渡合金，是埋弧焊、气体保护焊和电渣焊等工艺方法的主要焊接材料。通常焊丝可以分为实芯焊丝和药芯焊丝。近年来，药芯焊丝由于自身的优点，发展非常迅速，应用广泛。

众所周知，药芯焊丝 1954 年起源于美国，是从 20 年代

管状焊条的基础上发展起来的。由于药芯焊丝具有电弧稳定、飞溅小、成形美观、根据焊缝力学性能的需要调整药芯配方，可以大批量制造和实际焊接中连续使用的优越性。与实芯焊丝、手工焊条相比，生产效率高，焊工的操作环境得到改善，药芯焊丝的综合优势深受人们的欢迎。药芯焊丝在国外得到迅速发展和广泛应用于各种金属结构。但因药芯焊丝的制造技术难度大，国内相关技术和水平落后，我国药芯焊丝的发展经历了不平凡的历程。

药芯焊丝起源于 50 年代，发展于 60—70 年代，药芯焊丝主要以粗直径为主（3.2mm, 2.4mm）使用交流电源，气体保护药芯焊丝用于钢管的焊接，自保护药芯焊丝用于建筑结构。80 年代发展了细直径药芯焊丝（1.2~1.6mm）使用直流电源，其中直径为 1.2~1.6mm 的全位置药芯焊丝大量用于船舶的制造并得到飞速发展，大大提高了造船焊接的半自动化程度。在这期间开发了不锈钢、低温钢、590N/mm² 强度级别钢种使用的多种药芯焊丝，1.2~1.6mm 的细直径自保护药芯焊丝可以使用于钢管桩的焊接。80 年代后期以来，1.2~1.6mm 气保护药芯焊丝多品种的制造与使用范围

得到迅速推广，在非造船行业使用和扩大。随后发展了金属粉芯药芯焊丝和无缝药芯焊丝。目前药芯焊丝已广泛用于建筑、桥梁、化工、冶金、电力等制造与修复行业。

从药芯焊丝的总产量与占焊接材料总产量比例来看，1983年美国药芯焊丝的产量占焊接材料总产量的15%，药芯焊丝的总产量为4.2万吨左右，到1979年药芯焊丝的年产量达到7.6万吨。现在美国药芯焊丝占焊接材料总产量的比例为40%左右。美国生产粗直径药芯焊丝（2.0mm以上）比例较大，主要用于平焊和平角焊，用来焊接建筑机械、重型机械、钢架、桥梁等。1995年英国药芯焊丝年产量首次超过电焊条。日本主要生产细直径药芯焊丝，1983年药芯焊丝占焊接材料总产量的3.8%，1988年为焊接材料总产量的13%，1992年为焊接材料总产量的20%，1994年为焊接材料总产量的23%。在日本药芯焊丝的生产比例逐年提高，而实芯焊丝在1984年生产量占焊接材料总生产量的32%，逐步提高到1991年的50%。从1992年起实芯焊丝逐年下降，到1994年实芯焊丝的比例为42%。据最新资料报道，日本1997年药芯焊丝生产总量在10万吨左右，为焊接材料

总产量的 27%。由此看来，日本是药芯焊丝发展速度最快的国家。目前我国药芯焊丝与国外药芯焊丝的发展相比，差距甚远。我们就这样不知不觉地进入了药芯焊丝时代，加上技术经济落后，发展药芯焊丝将付出巨大的代价。近年来，由于药芯焊丝的性能特点，药芯焊丝的崛起和发展非常迅速，在焊补行业，药芯焊丝有逐步取代实芯焊丝的趋势。

药芯焊丝芯部粉剂的成分与焊条药皮相类似，含有稳弧剂、脱氧剂、造渣剂及铁合金等。在粉剂中含有较多的铁粉，其目的在于增加焊丝的熔敷速度和增加焊丝整个截面熔化的均匀性。目前国内焊接结构钢用的药芯焊丝已有定型产品，可以批量生产。国产药芯焊丝的直径有 1.6、2.0、2.4、2.8、3.2 mm 等几种，主要用于低碳钢和低合金钢焊接。

药芯焊丝按不同的情况有不同的分类方法。按保护情况可分为气体保护（CO₂、富 Ar 混合气体）和自保护两种。按焊丝直径可分为细直径（2.0mm 以下）和粗直径（2.0mm 以上）。按焊丝断面可分为简单断面和复杂断面。按使用电源可分为交流陡降特性电源和直流电源。按填充材料可分为造渣型药芯焊丝（氧化钛型、钛钙型、氟钙型）和金属粉芯药

芯焊丝。从药芯焊丝的开发及应用角度来看可作如下分类：

造渣型气保护药芯焊丝可分为 CO₂ 气体保护药芯焊丝，主要品种用于碳钢、50 公斤级低合金结构钢（全位置焊接）、高强度钢（60—70 公斤级）、低温钢（—45℃、—60℃冲击韧性）、耐热钢（1.25Cr-0.5Mo 系，2.25Cr-1Mo 系）、耐候钢（涂装与非涂装）、不锈钢（焊接 SUS304、304L、316、316L、317、317L、321、347、309S 不锈钢）、耐磨堆焊（Hv250、Hv350、Hv450、Hv600）。

造渣型气保护药芯焊丝可分为富 Ar 混合气体保护药芯焊丝，主要品种用于碳钢、50 公斤级低合金结构钢（全位置焊接）、高强度钢（60—70 公斤级）、低温钢（—45℃、—60℃冲击韧性）、耐磨堆焊（13Cr-2Ni 系）。

金属粉芯药芯焊丝可分为 CO₂ 气体保护药芯焊丝，主要品种用于碳钢、50 公斤级低合金结构钢、高强度钢（60 公斤级）、耐磨堆焊（高 Cr-Fe 系，Hv800）。

金属粉芯药芯焊丝可分为富 Ar 混合气体保护药芯焊丝，主要品种用于碳钢、50 公斤级低合金结构钢、低温钢（—60℃冲击韧性）、不锈钢（13Cr-5Ni 系，13Cr-4Ni-Mo 系，

17Cr 系)、耐磨堆焊 (13Mn 系、16Mn-16Cr 系)。

自保护药芯焊丝主要品种用于碳钢、50 公斤级低合金结构钢和耐磨堆焊。

总体看来药芯焊丝主要分为自保护药芯焊丝和气保护药芯焊丝,气保护药芯焊丝通常分为两种渣系,即酸性和碱性(T1 和 T5)。酸性渣系药芯焊丝工艺性能很好,可进行全位置焊接,该类型渣系药芯焊丝是造船工业最广泛使用的典型高效焊接材料。碱性药芯焊丝的焊缝金属有较好的净化作用,通过适当的配方调整可以获得优良的工艺性能,适合于平焊、平角焊位置。

药芯焊丝是由冷轧薄钢带经轧机纵向折叠加粉后拉拔而成。截面形状颇多,但简要地可分为两大类,简单断面的 O 形和复杂断面的折叠形。折叠形中又分为 T 形、E 形、梅花形和中间填丝形等。

O 形断面的焊丝通常称为管状焊丝。管状焊丝由于芯部粉剂不导电,电弧容易沿四周的钢皮旋转。而折叠形焊丝因钢皮在整个断面上分布比较均匀,焊丝中心部亦导电,所以电弧稳定,焊丝熔化均匀,冶金反应完善。

因小直径折叠形焊丝制造较困难，所以直径 $d \leq 2.4 \text{ mm}$ 的药芯焊丝均制成 O 形； $d \geq 2.4 \text{ mm}$ 时，才制成折叠形。

目前国际上采用的药芯焊丝大致分为三种：自保护药芯焊丝方法、药芯焊丝+气保护方法和药芯焊丝+埋弧焊剂保护方法。

自保护药芯焊丝在焊接时虽然方法较简单，又不需要其它保护材料，但缺点是焊补层金属的质量相对较低，焊补层中的夹杂物以及铝等元素含量较高。由于焊补时无气体或焊剂保护，焊补层容易产生气孔，因此其主要适合于奥氏体类型的金属焊补，而不适合铁素体及贝氏体类型金属的焊补。

CO_2 气体保护焊虽然具有生产效率高的突出优点，但它又有焊接飞溅大、焊缝外观及内在质量差的致命弱点，而药芯焊丝内的焊剂可以起到焊条药皮类似的保护熔滴、熔池免受氧化、氮化、辅助焊缝成形、稳定电弧、脱氧、脱硫、渗合金等一系列有益作用；焊丝的连续性又使其有利于进行自动化和半自动化生产，它兼具了手工焊条和 CO_2 实芯焊丝的优点^[1]，其特性集中表现在以下几个方面：

1、工艺性能和力学性能好 药芯焊丝由于其芯部焊

剂的作用，焊接时电弧稳定、飞溅很少，而且飞溅颗粒也小，比较容易清除；焊接时产生一定数量的熔渣，依靠熔渣的表面张力生成覆盖层，使焊道成型美观。利用熔渣对液体金属的承托作用，药芯焊丝比较容易实现全位置焊接，并且在各种位置焊时均可采用较大电流。

2、熔敷速度高 药芯焊丝焊接时，由于电流通过很薄的金属外皮，因此与实芯焊丝相比，其电流密度较高，焊丝伸出长度部分的焦耳热较大，从而形成药芯焊丝高熔化速度的特点。与药皮焊条相比，因药芯焊丝可以使用更大的焊接电流，同时药芯焊丝中只含 15%~20%左右的药粉，而焊条的涂料药皮则占 25%以上，因此电能可以更有效地用来熔化焊丝的金属部分，并且以连续焊接代替了药皮焊条的断续焊接，因而熔敷速度明显提高。

3、熔深大 药芯焊丝因其焊接电流密度大，穿透力强，使得焊道熔深较深。焊道熔深大有助于提高角焊缝的根部熔深。与实芯焊丝相比，还可以改善融合不良的现象，减少修补工作量。

4、焊工培训容易 与实心焊丝相比，药芯焊丝由于

有熔渣的作用，焊工操作容易，因此在焊工培训上省却许多时间。

5、合金系调整方便 药芯焊丝可通过金属外皮和药芯两种途径过渡合金元素，这是由药芯焊丝结构决定的，是实心焊丝无法比拟的。药芯焊丝的许多品种，是实心焊丝难以冶炼或轧制的。目前药芯焊丝的品种已包括了各种常用的金属材料，如低碳低合金系列、不锈钢系列、耐热钢系列、堆焊合金系列及铸铁等。

6、综合成本低 焊接生产的总成本是由所消耗的焊接材料、辅助材料、人工和动力等诸项费用所构成。

(1)药芯焊丝有效利用率高，通常手工焊条焊接时，每根焊条均要丢掉 50~60mm 长的电焊条头，引弧时还要消耗 5mm 左右，因此实际的有效长度只占焊条全长的 85%左右，而药芯焊丝则有效利用率近 100%。

(2)药芯焊丝的熔敷效率高，气保型药芯焊丝药粉填充比约为 15%，而且粉芯中一般含 20%左右的铁粉，焊接时飞溅也极小，所以熔敷效率可高达 85%~90%左右；而手工焊条药皮重量系数约为 25%，再考虑飞溅损失，其熔敷效率一般

为 70%~75%。

(3)单位长焊缝消耗的熔敷金属量小,因为药芯焊丝焊接电流密度大,穿透力强,允许采用的坡口钝边较大;同时由于焊丝易于深入坡口底部,所以一般药芯焊丝焊接时的坡口角度设计较小,约为 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。

(4)人工工时费用低,由于药芯焊丝焊接熔敷速度是手工焊条焊接的 3~5 倍,同时由于飞溅小,比 CO_2 实芯焊丝焊接节约了大量清理飞溅的辅助时间。因此焊接同类产品时药芯焊丝的人工费用最低。

(5)能源消耗少,一是由于连续生产使得焊机空载损耗大为减少;二是由于电流密度大,增加了电阻热,提高了热能利用率;三是与焊条相比,减少了熔化非金属药皮成分消耗的能量。上述各项使其电能消耗比焊条少 1 倍以上,与 CO_2 气保护实芯焊丝相比也约节能 20%左右。^[1]

药芯焊丝因其熔敷速度高,消耗的熔敷金属量小,人工工时费用低、消耗能源少等优势,其综合生产成本最低。

由于药芯焊丝具有上述的诸多优点,因此采用这种形式的焊材,在其药芯中加入适当成分和数量的合金元素,并配

以 CO₂ 气体保护或焊剂保护，可以实现对 C 级钢上心盘、钩舌、钩耳孔等自动堆焊的目的。针对铁路车辆的配件材质和形状的要求，我们确定对 C 级钢钩舌和钩耳孔的磨耗堆焊采用“药芯焊丝+气体保护”的方法，对 C 级钢上心盘采用“药芯焊丝+焊剂保护”的方法，进行课题研究。

1.5 本课题研究内容

根据以上所述，本论文主要研究内容如下：

1、对 C 级钢药芯焊丝焊接工艺性能进行试验，研究熔敷金属的拉伸、弯曲、冲击韧性等性能；

2、针对试生产阶段出现的一些质量问题进行缺陷分析，并提出改正措施。

3、该焊丝经过各项焊接工艺性能试验后，进入试生产阶段，针对在试生产阶段中出现的一些质量问题，如堆焊厚度不够、焊缝表面不平、加工后出现气孔等缺陷以及电弧不稳飞溅较大等缺陷，进行了焊丝成分改进、焊接工艺调试和焊接设备的调整及改进等工作。

第二章 焊材成分研究

2.1 C 级钢药芯焊丝设计目标的确定

设计焊接材料的原则是：首先保证熔敷金属的合金成分和母材基本相同，以使焊缝金属具有与母材相同或更好的强度，又能防止高温下熔合区合金元素的扩散；其次要求焊接接头强度与母材强度一致或略高于母材强度。为提高焊缝金属抗裂能力，焊接材料中碳的总含量应略低于母材的碳含量。遵照这一原则，针对 C 级钢化学成分和机械性能指标，确定研制焊丝熔敷金属化学成分与母材应基本相同，机械性能略高于母材。

根据上心盘、钩舌 S 面、钩耳孔的磨损情况和堆焊面的特点，设计药芯焊丝规格分别为： $\phi 3.2$ 、 $\phi 1.6$ 、 $\phi 1.2$ 。其中上心盘采用焊剂保护，钩舌 S 面和钩耳孔采用 CO_2 气体保护。

2.2 合金系的选择

采用微量合金元素，来改善和提高焊缝金属的低温冲击韧性，并提高多道堆焊时焊缝金属抗回火的能力。

焊缝金属低温冲击韧性的改善，要靠控制焊缝的金相组

织来获得。大量的研究工作表明：铁素体钢焊缝金属最适宜的金相组织是针状铁素体。通过化学成分的调整，如加入 Ni 和 Mo 等合金元素可促进针状铁素体的形成。

在焊丝合金配比中，另一关键是 Mn、Si 元素的含量和保持适当的比值，可改善低温冲击韧性。并获得较好的强韧性匹配。

因此，在低 C-Mn 合金的基础上，采用微量多元素合金化，焊缝金属既可达到与母材相近的强度等级和屈服极限，又可大幅度地提高焊缝金属的低温冲击韧性。结合 C 级钢化学成分和机械性能并查阅有关技术标准，我们选择 C 级钢药芯焊丝合金系为：Mn-Ni-Cr-Mo 合金钢焊丝。初步确定其熔敷金属化学成分如表 5。

表 5 Mn-Ni-Cr-Mo 合金钢焊丝的熔敷金属化学成分

碳(%)	硅(%)	锰(%)	磷(%)	硫(%)	铬(%)	镍(%)	钼(%)	铜(%)
≤ 0.15	≤ 0.40	0.50- 1.75	≤ 0.03	≤ 0.03	0.40- 1.00	0.40- 1.10	0.20- 0.65	< 0.30

2.3 渣系的确定

研制的药芯焊丝必须同时满足焊缝金属具有良好的机

械性能、优良的工艺性能等方面的综合要求。为满足上述要求，通过理论分析和对比试验，C级钢药芯焊丝的渣系初步确定为以金红石为主体的 $(\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-MnO})$ 渣系，外加 CO_2 保护气或焊剂保护，焊丝接正极。

TiO_2 是金红石的主要成分，可调整渣系的熔点和粘度，随着 TiO_2 量的增加，熔渣的凝固温度范围减小，即造成“短渣”能适应全位置焊接。此外，钛还是一种很好的稳弧元素，它经常以金属或矿物形式加入到药粉中，使电弧柔软； TiO_2 是非常稳定的化合物，不易分解，不会增加焊缝中的含氧量。为了使药芯焊丝的熔滴过渡形式达到稳定的射流过渡，必须降低深滴表面张力。当钛型药芯焊丝渣中有硅酸盐或酸性氧化物存在时，渣和液态金属都含有一定量的氧，一般焊缝含氧量不低于0.065%，所以在金属与渣的界面上表面张力较小，易于实行射流过渡。因此为改善药芯焊丝的工艺性能，必须增加硅酸盐或酸性氧化物的含量。

SiO_2 是石英的主要成分，它可以调整熔渣的粘度， SiO_2 含量增加，使熔滴中的含氧量增加，起到氧化熔滴的作用，有利于减少飞溅，改善焊丝的工艺性能。但含量较高时，熔

渣氧化性变大，使渣与焊缝表面的结合强度增加，脱渣变得困难。此外， SiO_2 含量较高时，又使焊缝韧性明显下降。

MgO 是镁砂的主要成分，用于造渣和改善熔渣的透气性，并可调整熔渣熔点、粘度，因此可改善渣覆盖及焊缝成形等。

Na_2SiF_6 （氟硅酸钠）的作用首先是可以降低熔渣的表面张力，从而使渣变得铺展开来；其次利用 Na_2SiF_6 中的钠离子可以增强电弧

烧结预处理剂是将两种或两种以上氧化物通过高温烧结后生成一些吸潮倾向小，可以被 Al 、 Mg 等强还原剂还原出金属化合物。将烧结预处理剂技术应用到气保护药芯焊丝配方中，改善了药粉的不均匀性、吸潮性以及电弧的过渡形式，使得焊接电弧在很大电流范围内是喷射过渡形式，大大提高了焊丝的焊接工艺性能。

Al-Mg 合金，属于强脱氧剂，对于降低焊缝的氧含量起重要作用，同时也有利于稳定电弧和减少飞溅。当它们含量增加时，会增加电弧的挺度，但不利于焊缝成形。若焊缝中 Al 、 Mg 的残存含量过高，会使焊缝强度过高，也不利于焊

缝的韧性。

铁粉，在药粉中加入适量的铁粉，不仅可以改善药芯熔化状况，有利于改善焊丝的工艺性能，如提高电弧稳定性，降低飞溅等。铁粉还可增加焊丝熔敷速度，提高焊丝熔敷效率。^[2]

该渣系一方面具有脱 S、P 和脱氧作用，另一方面能有效地减少焊缝金属的非金属夹杂物和向焊缝的渗钛，从而提高焊缝的洁净度和力学性能。

渣系确定之后即可根据渣系图及焊丝对熔渣熔点、表面张力、粘度等方面的要求进行焊丝药芯的基础配方设计。焊丝的药芯主要以矿物粉（金红石、硅石等）和金属粉末（锰、铬、钼等微合金化元素）混合以调整成分组成，配方初步设计见表 6 “药芯主要成分”。

表 6 药芯主要成分（%）

金红石	石英砂	镁砂	锰矿	脱氧剂	铁粉及合金剂	烧结预处理剂
30-50	10-20	10-20	10-20	3-20	30-60	3-10

第三章 焊材性能研究

3.1 焊丝工艺性能试验

由于该焊丝主要应用于心盘和车钩堆焊,因此工艺性能试验主要进行 C 级钢板(300×150×14)表面堆焊的试验,保护措施分别采用 CO₂ 气体保护和 HJ431 焊剂保护,通过堆焊时观察电弧稳定性、飞溅大小,焊后观察熔渣覆盖情况、脱渣性能以及熔敷金属成形情况。

经多次对配方进行调整和反复试验之后,确定了该渣系药芯焊丝的配方。

3.2 焊丝熔敷金属化学分析

经过焊丝工艺性试验,按 GB/T 17493-1998《低合金钢药芯焊丝》5.2 条规定进行熔敷金属化学分析堆焊试块的制备,加工后做直读光谱化学分析,C 级钢药芯焊丝熔敷金属化学成分分析结果见表 7。

表 7 C 级钢药芯焊丝熔敷金属化学成分

碳(%)	硅(%)	锰(%)	磷(%)	硫(%)	铜(%)	铬(%)	镍(%)	钼(%)
0.109	0.36	1.43	0.02	0.027	0.03	0.65	0.70	0.35

由上表可以看出，C 级钢药芯焊丝熔敷金属化学成分达到了 TB/T 2942-1999 《铁道用铸钢件采购与验收技术条件》标准要求。

3.3 焊丝熔敷金属机械性能试验

按 GB/T 17493-1998 《低合金钢药芯焊丝》有关规定进行熔敷金属拉伸试验和冲击韧性试验。

3.3.1 试件的制备

施焊位置：平焊。施焊工艺参数如表 8。

表 8 机械性能试验试板焊接工艺参数

试件编号	焊丝直径 (mm)	焊接方法	焊接电流 (A)	电弧电压 (V)	层间温度 (°C)	气体流量 (L/min)	焊丝干伸长度 (mm)
1	Φ 1.2	CO ₂ 气体保护焊	200-300	18-22	150 ±15	15	15
2	Φ 1.6		220-350	25-33		18	15
3	Φ 3.2	埋弧焊 (HJ431)	450-500	38-40		—	18

试板材质与规格：Q235-A，300×130×20，垫板材质与

规格：Q235-A， $300 \times 25 \times 10$

由于 Q235-A 材质与 C 级钢材质相差悬殊，因此组装前需先堆焊隔离层。试板与垫板组装时，预制反变形约 5° 。

3.3.2 X 射线探伤试验

采用 X 射线探伤技术对焊缝内部进行 X 射线探伤检测。焊缝探伤试验在冲击样和拉伸试样加工前，在试件的垫板采用机械加工方法去除之后进行。

1、探伤设备为 XX-2005 携带式 X 射线探伤机；

2、专用胶片为天津 N-III 型，规格： $80 \times 360\text{mm}$ ；

3、增感屏为铝箔增感屏，规格：前屏 $0.03 \times 80 \times 360\text{mm}$ ，后屏 $0.1 \times 80 \times 360\text{mm}$ ；

4、线型象质计为线编号为 6~12 钢丝型；

5、显、定影液使用天津远大感光材料公司的显、定影粉自配；

6、探伤灵敏度为 a、焦距： 630mm ； b、曝光时间： 7min ；
c、管电流： 5mA ；管电压 190KV ； d、显影时间： 3.5min ；
e、定影时间： 15min ；

7、质量评定：

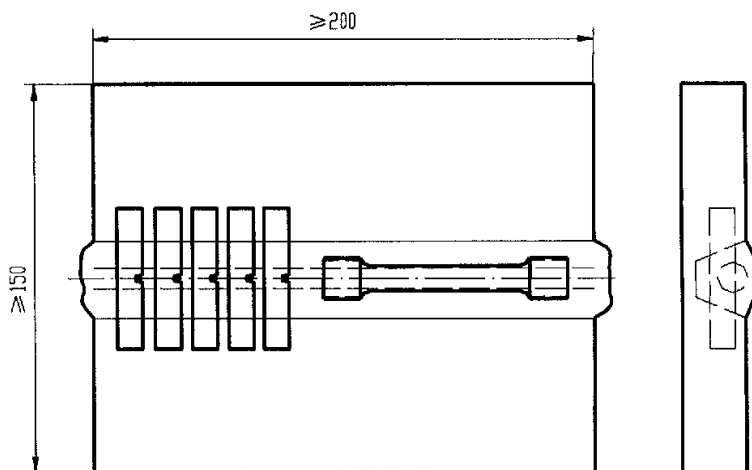
按 GB 3323-87 标准中的 I 级进行质量评定；

8、评定结果：

在底片的有效评定区域内，焊缝内部无裂纹、未焊合、未焊透及条状夹渣，单个气孔不大于 3 点，评定等级均为 I 级。

3.3.3 机械性能试验

对上述试件按 GB/T 17493-1998《低合金钢药芯焊丝》标准规定,加工拉伸试样和冲击韧性试样。拉力试验利用：WE-30 液压式万能材料试验机。冲击试验利用：JBN-300B 冲击试验机。



图四 熔敷金属拉伸及冲击试样取样示意图

熔敷金属机械性能试验结果见表 9。

表 9 熔敷金属机械性能试验结果

试样	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服点 σ_s (Mpa)	断后伸 长率 δ_s (%)	冲击吸收功 (-18°C) Ak _v (J)					硬度 HB
				1	2	3	4	5	
1	635	430	24	32	66	38	44	46	195
2	625	450	25	42	38	69	50	37	186
3	655	425	23	39	35	42	38	43	203

由上表可知，研制的 C 级钢药芯焊丝机械性能试验结果与 C 级钢比较，力学性能达到了 C 级钢母材的要求。

3.4 焊接裂纹试验

3.4.1 试件的制备

试板材质与规格为 C 级钢；200×75×14，每组两块，共需 8 块；试验焊缝长 80mm，开斜 Y 型坡口；两端拘束焊缝长各为 60mm，开 X 型坡口。

斜 Y 型坡口焊接裂纹试验的试件加工按照 GB4675.1—84 规定进行。

3.4.2 试验工艺过程

针对 $\phi 1.2$ 和 $\phi 1.6$ 焊丝进行斜 Y 型坡口焊接裂纹试验，

每项试样取试块两块。分别为 Y01, Y02, Y03, Y04。

接头型式：对接接头。施焊位置：平焊。

斜 Y 型坡口焊接裂纹试验的焊接试验要求按照

GB4675.1—84 规定进行。试验焊接工艺参数见表 10：

表 10 焊接工艺参数

试件 编号	焊丝 直径 (mm)	焊接 方法	焊接电流 (A)	电弧电 压 (V)	层间 温度 (℃)	气体流量 (L/min)	焊丝干 伸长度 (mm)
φ1.2	φ1.2	CO ₂ 气	200-300	18-22	150±	15	15
φ1.6	φ1.6	体保 护焊	220-350	25-33	15	18	15

3.4.3 试验结果

试件焊后在室温下放置 48 小时后，用磁粉探伤方法检验试验焊缝表面裂纹，用磁粉探伤及机械弯断方法检验试验焊缝的根部裂纹和断面裂纹。

1、探伤设备为 B310S 便携式磁轭探伤仪、紫外灯

2、探伤器材为 A 15/50 标准试片、400 目荧光磁粉、

梨形沉淀管、3.5Kg 提升力试块

3、执行标准:

JB/T6061-92 焊缝磁粉检验方法和缺陷磁痕的分级

4、检测范围: 焊缝及焊缝两侧的热影响区

5、质量评定: 按本标准的 I 级进行质量评定

6、斜 Y 型坡口焊接裂纹试验评定结果见表 11。

表 11 斜 Y 型坡口焊接裂纹试验结果

试件编号	表面裂纹率 Cf (%)	根部裂纹率 Cf (%)	断面裂纹率 Cf (%)
Y01	0	0	0
Y02	0	0	0
Y03	0	0	0
Y04	0	0	0

由表 11 可以知道, 试验焊缝熔合良好, 焊缝及焊缝两侧的热影响区内无异常发现, 评定等级为 I 级, 由此说明该 C 级钢药芯焊丝采用 CO₂ 气体保护焊时抗裂性良好。

3.5 焊接接头机械性能试验

按照 GB 2649-89《焊接接头机械性能试验取样方法》、GB 2650-89《焊接接头冲击试验方法》和 GB 2651-89《焊接接头拉伸试验方法》分别进行接头的低温冲击试验和接头

拉伸试验。

试验母材：300×150×14 C 级钢

坡口形式：V 形坡口 40°-60°

接头型式：开 V 形坡口对接接头

施焊位置：平焊

焊接工艺参数如表 12。

表 12 机械性能试验试板焊接工艺参数

试 件 编 号	焊丝 直径 (mm)	焊接方 法	焊接电 流 (A)	电弧电 压 (V)	层间 温度 (°C)	气体流 量 (L/min)	焊丝 干伸 长度 (mm)
1	Φ 1.2	CO ₂ 气 体保护 焊	200-300	18-22	150 ±15	15	15
2	Φ 1.6		220-350	25-33		18	15
3	Φ 3.2	埋弧焊 (HJ431)	450-500	38-40		—	18

冲击试样缺口分别开在焊缝、熔合线或热影响区，试样编号分别为：Φ 1.2-F、Φ 1.2-R；Φ 1.6-F，Φ 1.6-R；Φ 3.2-F，Φ 3.2-R。

机械拉伸试样编号： $\phi 1.2-1$ 、 $\phi 1.2-2$ 、 $\phi 1.6-1$ 、 $\phi 1.6-2$ 、 $\phi 3.2-1$ 、 $\phi 3.2-2$ 。

CO_2 保护焊焊接接头机械性能试验结果见表 13，埋弧焊焊接接头机械性能试验结果见表 14。

表 13 CO_2 保护焊焊接接头机械性能试验

试样	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服点 σ_s (MPa)	断后伸 长率 δ_s (%)	冲击吸收功 (-18°C) AkV (J)					硬度 HB
				1	2	3	4	5	
$\phi 1.2-1$	665	550	25	36	86	42	54	40	213
$\phi 1.2-2$	695	610	25	38	33	42	38	46	208
$\phi 1.6-1$	645	530	28	40	29	42	68	36	210
$\phi 1.6-2$	625	520	26	44	38	29	58	38	205

表 14 埋弧焊焊接接头机械性能试验

试样	抗拉强 度 σ_b (MPa)	屈服点 σ_s (MPa)	断后伸长率 δ_s (%)	冲击吸收功 (-18°C) AkV (J)					硬度 HB
				1	2	3	4	5	
$\phi 3.2-1$	685	605	26	40	35	39	42	48	203
$\phi 3.2-2$	655	615	28	36	46	33	38	56	195

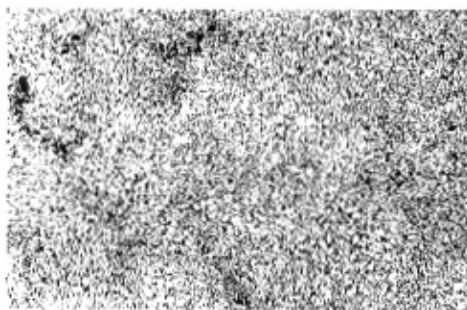
由试验报告表明：采用 C 级钢药芯焊丝焊缝及热影响区机械性能均高于母材。

C 级钢药芯焊丝熔敷金属化学成分和机械性能均能达到 TB/T 2942-1999 《铁道用铸钢件采购与验收技术条件》标准要求。

3.6 C 级钢药芯焊丝熔敷金属的显微组织分析

3.6.1 金相组织分析

用光学显微镜观察所研制焊丝熔敷金属焊缝区金相组织（见图五）。观察三种规格焊丝熔敷金属显微组织及其特征，均为极细小晶粒及细小针条状铁素体+珠光体（F+P），另有少量回火索氏体，因此焊缝不易产生裂纹和传播裂纹，是较理想的焊缝金相组织。



图五 焊缝区金相组织 100×

3.6.2 断口形貌分析

对拉伸试样断口和冲击试样断口通过显微镜下观察，均属于典型的韧性断口。

第四章 焊丝试生产焊接缺陷分析

依据焊接试验所采用的焊接规范参数，对工件进行了试生产工作，在试生产工作中，主要发生的问题为：裂纹、气孔及电弧稳定性差和飞溅大等质量问题。下面对以上所产生的问题进行分析讨论。

4.1 焊接裂纹缺陷产生的原因分析

焊接过程中，裂纹是最严重的一种工艺缺陷，导致焊缝金属开裂的诸因素，大体可归结为两大类：即冶金因素和力学因素。对于焊缝金属来说，一定的冶金因素与力学因素的配合，是焊接裂纹产生的充分而必要的条件。

4.1.1 氢的影响

从上面的斜 Y 型坡口焊接试验可知，该 C 级钢焊丝的抗裂性能良好。但由于焊接填充材料，包括焊丝和保护气体中以各种形式（结晶水、化合水、吸附水和水蒸汽存在的水分，焊丝表面的吸附水、油脂、有机物质、涂料和大气污染物）存在的含氢物质都是焊接过程中的重要氢源，这些物质在焊接过程中进入电弧分解出氢气。焊缝含氢量增加而导致开裂过程中进入电弧分解出氢气。焊缝含氢量增加而导致开

裂。

氢属于奥氏体稳定元素，且氢在奥氏体内具有较高的溶解度。当金属自奥氏体化温度冷却时，高浓度的氢可能使奥氏体局部过冷，其结果是形成高硬度的组织组分，严重时甚至在渗碳体界面引起显微裂纹。

4.1.2 C、S、P 的影响

硫、磷是焊缝金属中的有害杂质，在焊接时，原材料中的大部分硫、磷将进入焊缝金属中。

硫通常以两种形式存在于焊缝中，即 MnS 、 FeS 。 MnS 几乎不溶于液态铁，在焊接冶金过程中可以浮到熔渣中去，使焊缝脱硫。而当硫以 FeS 的形式存在时最有害。因为 FeS 与铁在液态时可以无限互溶，而在固态时其溶解度急剧下降，故在溶池结晶时它容易发生偏析，以低熔点共晶的形式形成片状或链状分布于晶界。这样就增加了焊缝产生结晶裂纹的倾向，同时还会降低冲击韧度和抗蚀性。同时硫与镍形成 NiS ，而镍与 NiS 形成共晶物，产生结晶裂纹的倾向更大，危害更为严重。当焊缝金属中含碳量增加时，会促使硫发生偏析，从而增加它的危害。

P 在固态中的溶解度很小，它的存在严重降低焊缝金属的冲击韧度，并使其韧脆转变温度升高。磷在液态铁中主要以 Fe_2P 和 Fe_3P 的形式存在，它们与铁、镍形成低熔点共晶，含磷的铁基合金的结晶温度区间很宽，这样在凝固过程中，高磷的铁水将填充在晶枝之间，使分布于晶界，削弱了晶间结合力。因此，钢中含磷较多时，冲击韧度和低温韧性下降，脆性就越严重。同时由于镍的存在，磷会形成熔点很低的共晶物而产生结晶裂纹。

4.1.3 焊接规范的影响

可能与焊接规范，尤其是焊接电流、电弧电压以及焊接线能量匹配不当而引起开裂。在焊接过程中，由于不平衡的快速加热与快速冷却，堆焊层金属承受了热循环的作用；在焊缝的不同区域，加热的峰值温度不同，冷却速度也不同，这样就产生了不均匀的组织区域。此外，由于热应变不均匀，不同区域间会产生不同的应力联系。所有这些，使整个焊缝金属处于复杂的应力-应变状态。内在的热应力、组织应力以及应力集中相叠加，构成了导致焊缝金属开裂必不可少的力学条件。因此，在焊接过程中一定要采用适当的焊接工艺

规范，严格按照焊接工艺卡片的要求进行施焊。

4.2 产生气孔缺陷的原因分析

焊接时产生气孔的气体主要是氢气、一氧化碳和氮气，其主要原因如下。

4.2.1 焊丝及工件受潮引起

由于焊丝保管不当，造成焊丝受潮，工件表面的氧化铁皮、铁锈、水分、油渍是导致气孔产生的重要原因。加热时氧化皮和铁锈中的高价氧化物及结晶水分解后可产生 FeO 、 H_2 、 H 、 O 及 OH 等，使 CO 气孔与氢气孔的倾向都有可能增大。

4.2.2 气体保护不良引起

由于焊接过程焊枪的角度不正确，造成保护气体保护不良，空气进入了焊接区，失去保护效果而产生氮气孔。此外，电弧电压越高，空气侵入的可能性越大，电弧电压高达一定值后，焊缝中就出现了气孔。

4.2.3 焊丝化学成分不当引起

当焊丝金属中含脱氧元素不足时，焊接过程中就会有较多的氧化亚铁溶于熔池金属中，并与碳发生反应生成铁和一

氧化碳气体。这个反应在熔池处于结晶温度时进行的比较剧烈。由于此时熔池已开始凝固，一氧化碳气体不易逸出，于是在焊缝中形成了气孔。这可以通过在焊丝中加入足够的脱氧元素硅和锰，以及限制焊丝中的含碳量，就可以抑制上述的反应过程，有效防止一氧化碳气孔的产生。

4.3 出现电弧不稳与飞溅大原因分析

4.3.1 焊接规范匹配不当引起

在本次试验中，对于直径为 1.2 mm 的焊丝，通常采用短路过渡形式进行焊接。短路过渡焊接时的主要工艺参数有电弧电压、焊接电流、焊接速度、气体流量以及焊丝伸出长度等。生产实践表明，焊接工艺参数的选择正确与否会直接影响焊接过程的稳定性。电弧电压是焊接参数中关键的一个，在一定的焊丝直径和焊接电流下，电弧电压若过低，电弧引燃困难，焊接过程不稳定。电弧电压过高，则由短路过渡转变成大颗粒的长弧过渡，焊接过程也不稳定。只有电弧电压与焊接电流匹配得较为合适时，才能获得稳定的焊接过程，飞溅才能减少。此外，焊丝伸出长度也与飞溅大小有关。焊

丝伸出长度过大时，焊丝容易发生过热而熔断，飞溅严重焊接过程不稳定。而焊丝伸出长度过小，势必缩短喷嘴与工件间的距离，造成飞溅金属堵塞喷嘴。因此在焊接过程中，注意合理调整焊接工艺参数的合理匹配可以减少焊接过程中的飞溅大小。

4.3.2 焊接操作初始定位不当

在药芯焊丝 CO₂ 焊时，焊枪角度也与焊接飞溅量有关。试验表明，焊枪垂直焊接时飞溅量最少，倾斜角度越大，飞溅越多。焊枪的前倾及后倾最好不要超过 20°。

4.3.3 焊接电源动特性不好

实践表明，短路过渡时，当熔滴与熔池接触时，由熔滴把焊丝与熔池连接起来，形成液体小桥。随着短路电流的增加，小桥处的液体金属在电磁力作用下急剧收缩成较细的缩颈并被迅速加热，最后导致小桥金属发生汽化爆炸，并产生飞溅。飞溅量大小与液体小桥汽化爆炸时能量有关，该能量是在小桥破断之前的 100-150us 短时间内聚集起来的，并由这段时间内短路峰值电流大小所决定，所以减少飞溅的重要途径是改善电源的动特性，限制短路峰值电流。

第五章 焊接工艺改进措施

5.1 调整焊接规范。

在 CO_2 气体保护自动焊的条件下，适当增加焊接电流，降低焊接速度，即适当增大焊接线能量，有利于气体的逸出，可降低焊缝中的气孔倾向。并且在 CO_2 气体保护自动焊中，对于每种直径的焊丝，其飞溅率和电流之间都存在着一定的规律。一般来说在小电流区和大电流区飞溅率较小，而在中间区飞溅率最大。所以在选择焊接电流时应尽可能避开飞溅较高的电流区域，电流确定后再匹配适当的电压，以保证飞溅量最少。

5.2 改善焊丝存储方式

在 C 级钢钩舌药芯焊丝 CO_2 气体保护自动焊中氢的有害作用主要表现为组织变化，显微裂纹和宏观裂纹。低合金钢焊接接头冷裂倾向，随焊缝金属扩散氢含量的提高而加剧。因此，在焊接前应当保证焊丝不受潮，将焊丝存放在阴凉干燥处。

第六章 小批量生产验证

6.1 C 级钢钩舌牵引面堆焊试验

焊丝直径： $\phi 1.6$

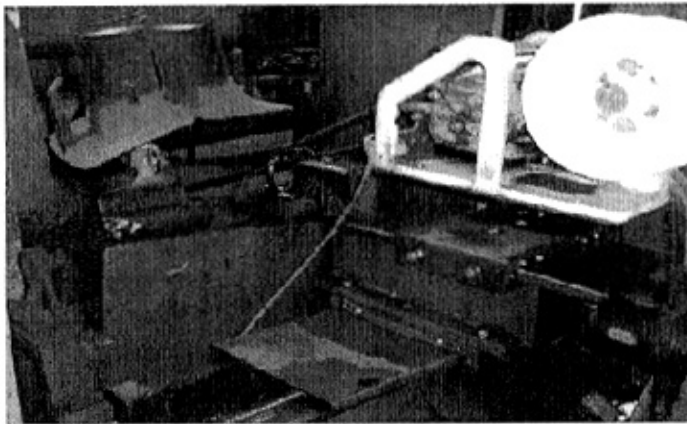
保护气体： CO_2 气体

焊拉位置：水平位置

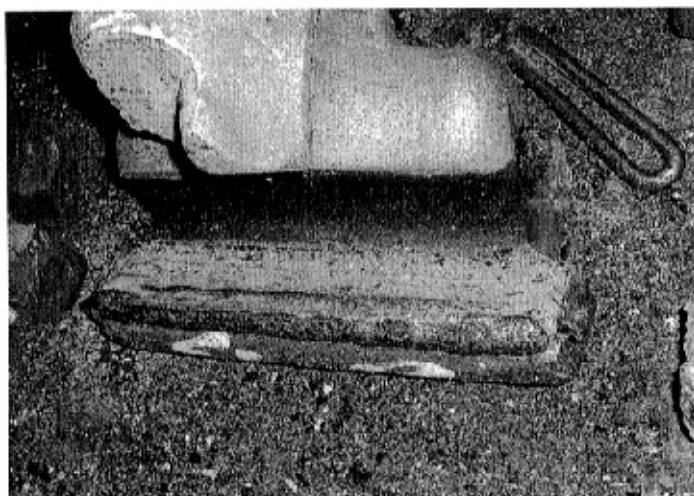
焊接电流：220-350A

电弧电压：25-32V

采用自动焊工装进行钩舌牵引面堆焊，观察焊缝堆焊层成形质量良好，焊缝与母材熔合良好，焊缝脱渣较易，电弧稳定性好，弧光柔和，加工表面也未出现气孔、夹渣、裂纹等缺陷。应用于钩舌 S 面堆焊，完全能满足其相关技术要求。



图六 钩舌牵引面自动焊装备



图七 焊修后的钩舌牵引面



图八 加工后的钩舌牵引面

6.2 C级钢钩耳孔堆焊试验

焊丝直径： $\phi 1.2$

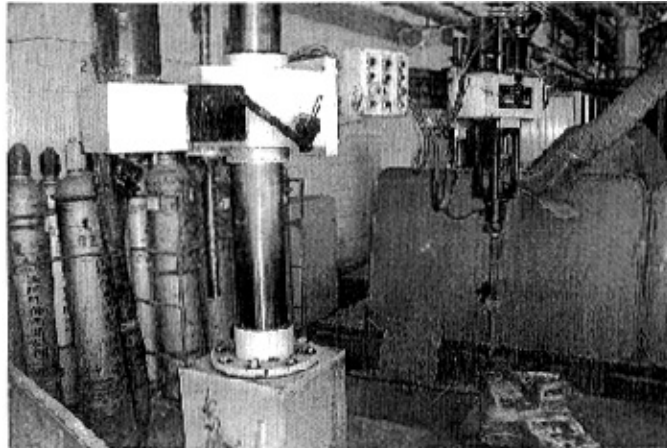
保护气体： CO_2 气体

焊拉位置：横焊位置

焊接电流：100-110A

电弧电压：18-19V

采用自动焊工装堆焊钩耳孔，观察焊缝堆焊层成形质量良好，焊缝与母材熔合良好，焊缝熔渣浮出较易，电弧稳定性好，弧光柔和，加工表面也未出现气孔、夹渣、裂纹等缺陷。应用于钩耳孔堆焊，完全能满足其相关技术要求。



图九 钩耳孔自动焊装备



图十 堆焊后的车钩钩耳孔



图十一 堆焊后的车钩钩耳孔

6.3 C 级钢上心盘堆焊试验

焊丝直径： $\phi 3.2$

焊剂：HJ431

焊拉位置：水平位置

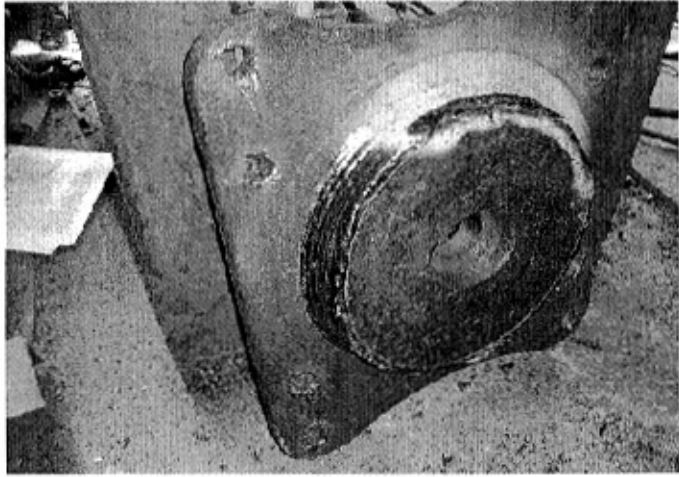
焊接电流：450-500A

电弧电压：38-40V

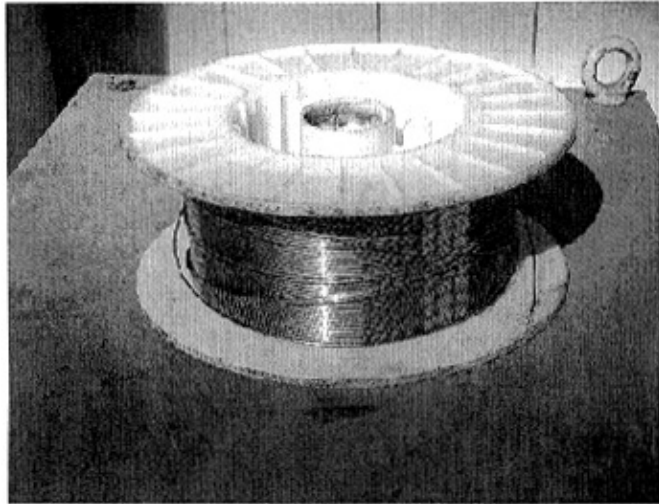
采用自动焊工装堆焊上心盘，观察焊缝堆焊层成形质量优良，焊缝与母材熔合良好，焊缝熔渣浮出较易，电弧稳定性好，加工表面也未出现气孔、夹渣、裂纹等缺陷。完全能满足 C 级钢上心盘堆焊技术要求。



图十二 上心盘自动焊接装备



图十三 焊修后的上心盘



图十四 C 级钢焊丝

第七章 结论

7.1 针对 C 级钢钩舌牵引面、钩耳孔及上心盘焊修技术要求，决定采用药芯焊丝+CO₂焊和药芯焊丝+埋弧焊进行堆焊，并研制成功了 C 级钢专用药芯焊丝，与相应的自动焊修工装配套使用。

7.2 通过调整 C 级钢药芯焊丝中的合金成分配比，各项技术指标满足 GB/T 17493-1998《低合金钢药芯焊丝》的各项要求，其熔敷金属机械性能和硬度均能达到或超过母材等级，C 级钢药芯焊丝与 C 级钢母材焊接接头机械性能优于母材。

7.3 C 级钢药芯焊丝应用于生产中，具有良好的焊接工艺性能、电弧稳定、脱渣容易、综合成本低等优点，使其具有广阔的应用前景。

致 谢

何庆复教授作为我的导师，在学习的每个阶段都给予我无私的帮助和悉心的指导，使我在学习新知识的同时，能不断提高自己的创造性思维能力，基本掌握了独立开展科研工作的程序和方法。论文的完成离不开何老师的耐心指导和帮助，在此我向何老师表示衷心的感谢。

在论文的写作过程中，我也得到了北京二七车辆厂王秀琴高工和李艳琴高工等许多同行和同事的帮助。在此谢谢所有曾经帮助过我、关心过我和支持过我的人，向你们致以崇高的敬意。我将不断向各位专家和师长学习，掌握更多的新知识和工作技能，为国家和企业的发展作出贡献。

参考文献

- [1] 陈邦固等 《药芯焊丝——焊材工业面临的机遇与挑战(上)》, 焊接技术, 1993(6).
- [2] 潘川等 《低氢高韧性全位置用气体保护药芯焊丝的研制》, 焊接, 2001(12).
- [3] 中国焊接协会 编 《焊接标准汇编》
中国标准出版社 1996.
- [4] 中国机械工程学会焊接学会 编 《焊接手册》第 1、
2 卷 机械工业出版社 1992.
- [5] 陈裕川 主编 《焊接工艺评定手册》
机械工业出版社 1999.
- [6] 傅积合 孙玉林 主编 《焊接数据资料手册》
机械工业出版社 1997
- [7] 《国内无损检测标准汇编》
机械工业部机械标准化研究所、机械工业部上海材料
研究所、全国无损检测标准化技术委员会。
- [8] 尹士科 编 《国外药芯焊丝发展概况》 1988
- [9] 唐伯钢等 编著 《低碳钢与低合金高强度钢焊接材

料》 机械工业出版社 1987

[10] 曾乐 主编 《现代焊接技术手册》

上海科学技术出版社 1993