

综 述

钻杆接头耐磨带焊接材料的选择及应用

孙 咸

(太原理工大学 焊接材料研究所, 太原 030024)

摘 要: 综述了钻杆接头耐磨带焊接材料的选用原则及工程应用。结果表明, 钻杆接头耐磨带焊接材料的选用可以采用“性能匹配”原则, 即在保证耐磨带具有一定高硬度(比如不低于HRC55)条件下, 尽量减小套管的被动磨损, 同时允许钻杆接头耐磨带适度磨损。钻杆接头耐磨带焊接材料的种类较多, 采用的工艺方法各具特色; 国外知名品牌焊接材料性能优良, 钻杆接头耐磨带焊接材料的国产化工作已经取得阶段性成果。国产化焊接材料生产的钻杆接头耐磨带已在各类钻井工程中成功应用, 其各项性能指标已经达到国外知名品牌水平, 发挥了良好的经济和社会效益。

关键词: 焊接材料; 耐磨带; 钻杆接头; 性能匹配; 套管友好型

中图分类号: TG42; TG457.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.10.006

Selection and Application of Welding Consumables for Wear Resistant Hardbanding of Drill String Joint

SUN Xian

(Institute of Welding Consumables, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The selection principles and engineering applications of welding consumables for wear resistant hardbanding of drill string joints were reviewed. The results show that the selection of the welding consumables for the wear resistant hardbanding of the drill string joint can adopt the principle of “property matching”, that is, under the condition of ensuring that the wear resistant hardbanding has a certain high hardness (such as not less than HRC55), the passive wear of the casing is minimized, and the wear resistant hardbanding of the drill string joint is allowed to wear moderately. There are many types of welding consumables, and the process methods used have their own characteristics. The properties of welding consumables of well-known foreign brands are excellent, and the localization of welding consumables for the wear resistant hardbanding of drill string joints has achieved phased results. The wear resistant hardbanding of drill string joints produced by the domestic welding consumables has been successfully applied in various types of drilling projects, and its performance indicators have reached the level of well-known foreign brands, and have played a good economic and social benefit.

Key words: welding consumables; wear-resistant hardbanding; drill string joint; property matching; casing friendly type

0 前 言

在钻井工程中, 为了保护套管并延长昂贵的钻具设备的寿命, 使其在钻井时和起下钻时免受旋转和轴向力的磨损, 几十年前就出现了耐磨带的需要。耐磨带是预先在钻杆接头与套管容易发生接触摩擦的点或部位, 采用冶金(熔焊)方法熔敷的一层耐磨金属。钻杆接头耐磨带不仅在深

井钻井、大位移井钻井和大斜度井钻井工程中获得了推广应用, 而且钻杆接头耐磨带技术已经成为国际重大石油工程项目招标中投标方中标的必备技术条件之一。然而, 钻杆接头耐磨带的焊接性并不太理想。钻杆接头的材质多为中碳调质钢, 碳当量高; 耐磨带熔敷层中的合金元素含量高, 堆层淬硬倾向大, 具有较强的裂纹敏感性。虽然现有的焊接材料和配套的焊接工艺基本能满

足耐磨带施工建设要求，但这并不意味着在所有情况下耐磨带都能获得满意的使用性能。在一些工程应用中，耐磨带上剥落、网状裂纹、周向裂纹等缺陷时有发生^[1-2]，严重影响钻杆接头的使用寿命。另一方面，耐磨带的工况条件比较复杂，性能要求比较苛刻，还要考虑生产成本，合理选用焊接材料显得非常重要。所谓合理选用焊接材料，既要考虑结构的工况条件，又要考虑中碳调质钢母材的焊接性，以及熔敷金属合金系统和匹配方式等因素，使耐磨带焊接材料的选用原则有些与众不同。具有高耐磨性的焊接材料已在钻杆接头耐磨带工程上推广应用。这些材料熔敷金属的合金系统及化学成分与母材不尽相同，堆层的显微组织各异。这种匹配既不是强度匹配，也不属于组织匹配，只能归于性能匹配。有关钻杆接头耐磨带焊接的文献逐年增多，内容涉及工艺试验、性能对比，以及焊接材料进展等^[3-5]，唯独难觅焊接材料选用原则的文献。为此，论文特意以焊接材料为切入点，将焊接材料选择与钻杆接头耐磨带的焊接性、焊接材料种类、工艺方法及工程应用相联系，专题性地探讨其选用原则。该项工作对推动钻杆接头耐磨带焊接材料的创新开发、配套工艺的锐意改进，以及钻井建设工程质量的提升，具有一定的参考价值和实用意义。

1 钻杆接头耐磨带焊接性分析

钻杆接头耐磨带是一个沿接头圆周方向，具有一定宽度和一定厚度的隔离带（图 1 和图 2）。通过这个隔离带，使钻杆接头外壁和套管壁或井壁隔离，避免钻杆接头与套管壁或井壁直接接触，以保护钻杆接头和套管免遭强烈磨损，从而延长钻具使用寿命。耐磨带的工况条件比较复杂，性能要求比较苛刻，应当具有良好的综合抗磨性能。

钻杆接头用钢有很多种，德国钢种 36CrNiMo4

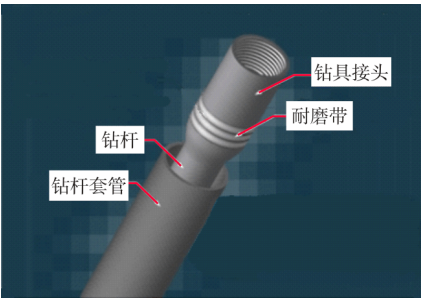


图 1 钻具接头、耐磨带与钻杆套管的相对位置示意图



图 2 钻具接头上的耐磨带实物

是其中一种，类似我国的 40CrNiMo 以及美国的 ASTM/AISI 4340。可以用我国钢种的命名法，将德国的 36CrNiMo4 钢命名为 36CrNiMo，其化学成分范围见表 1^[6]。该钢经 880 ℃退火，保温3~4 h，炉冷至 550 ℃空冷，可以进行粗加工。然后进行调质（860~880 ℃油淬，540~650 ℃回火）处理。热处理后钢的力学性能满足 API SPEC 5DP 要求，在-10 ℃的冲击功可以达到 100 J。另一种广泛应用于钻杆接头的钢种是美国钢种 AISI 4137H，类似于我国的 35CrMo，主要区别是 AISI 4137H 的 C、Mn 含量稍高些。AISI 4137H 的改良型 ASTM 4137H 钢中适当增加了 Cr、Mn 和 Mo 含量，且钢液进行了钙处理，其化学成分见表 1^[6]。按照我国钢号编制方法，可以将改良型 ASTM 4137H 钢、德国钢种 37 CrMnMo4H1 的国产化钢种命名为 37CrMnMo（化学成分见表1）。该钢经

表 1 钻杆接头用钢种及其化学成分

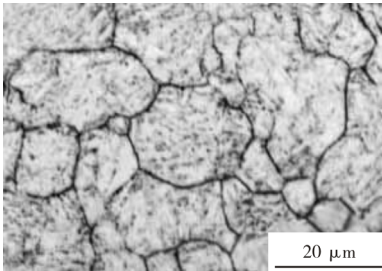
钢牌号	化学成分/%							
	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(Cr)	w(Ni)	w(Mo)	w(P)	w(S)
36CrNiMo	0.32~0.40	≤0.40	0.50~0.80	0.90~1.20	0.90~1.20	0.15~0.30	≤0.008	≤0.005
ASTM4137H (改良型)	0.36	0.25	1.04	1.03	w(Cu)=0.13 w(Ca)=0.004 5	0.31	0.019	0.008
37CrMnMo	0.35~0.38	0.15~0.35	0.85~1.00	0.90~1.20	0~0.25	0.28~0.33	≤0.005	≤0.008
35CrMnMo	0.32~0.38	0.15~0.35	0.85~1.00	0.90~1.20	—	0.28~0.35	≤0.015	≤0.008

880 ℃保温 2.5 h 油中淬火、605~610 ℃保温 4 h 回火，热处理后钢的力学性能见表 2⁶⁾。目前大多数钻杆接头用 35CrMnMo 钢制造（化学成分见表 1）。其热处理工艺与钢种 37CrMnMo 差别不大，

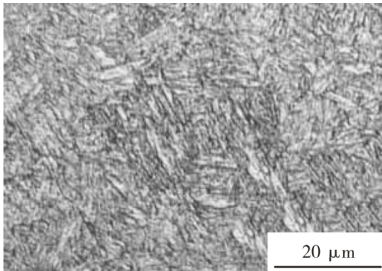
即 870~880 ℃加热后进行水淬，然后经 600~610 ℃回火，可以达到性能要求。图 3⁷⁾显示了 JIS-SCM440 钢（JIS-SCM440 相当 AISI 4137H）供货状态的回火马氏体显微组织。

表 2 37CrMnMo 钢的力学性能

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	冲击吸收能量/J (RT)	硬度 (HB)
790~1 088	831~949	19~21	102~134	298~324



(a) 初始奥氏体晶界



(b) 马氏体板条

图 3 调质状态下 SCM440 钢的光学显微组织

钻杆接头耐磨带是在钻杆接头钢上堆焊的金属保护层。钻杆接头钢属于中碳调质钢（见表 1），其成分中含碳量高（0.32%~0.40%）、合金元素多（Cr、Ni、Mo 等），钢的屈服强度可达到 831~949 MPa，淬硬倾向大。所用填充焊丝的成分中（见表 3^{3-4,8)}含碳量更高（0.30%~0.50%，0.88%或更高）、合金元素更多（Cr、Ni、Mo、Nb 等），熔敷金属的淬硬倾向很大。可以看出，钻杆接头耐磨带焊接性的主要问题是：①焊接裂纹倾向严重。无论母材（钻杆接头钢）还是焊接材料中的含碳量高和合金元素种类和数量多，

马氏体相变温度低，堆层和 HAZ 的淬硬倾向大，冷裂纹敏感性大。同时焊缝中含有碳、铌等促进热裂纹产生的元素，因此还具有一定的热裂纹倾向。②HAZ 的脆化和软化。由于母材中含碳量高、合金元素多，受焊接热循环的影响，HAZ 产生了大量马氏体，导致该区严重脆化。在调质状态下焊接时，受焊接热循环的影响，在 HAZ 将出现强度、硬度低于母材的软化区，恶化了该区的力学性能（影响堆层与母材的结合强度）。选用合适的焊接材料和合理的焊接工艺，是控制和改善钻杆接头耐磨带焊接性的重要技术手段。

表 3 钻杆接头耐磨带用焊丝化学成分及硬度

焊丝牌号 /文献号	焊接方法	化学成分/%									硬度 (HRC)
		w(B)	w(C)	w(Mn)	w(Si)	w(Cr)	w(Ni)	w(Mo)	w(Nb)	其他	
ARNCO 100XT[4]	GMAW	—	0.30	1.50	1.20	7.00	2.00	1.00	—	—	55.7
鸣锐 150GH[4]	GMAW	—	0.50	1.60	1.20	12.00	4.00	0.50	7.00	—	61.3
GD-100[3]	GMAW	—	0.30	1.50	1.20	7.00	—	—	7.00	—	61.2
鸣锐 160GH[8]	GMAW	0.15	0.88	1.05	0.85	11.5	0.03	1.25	2.13	w(Ti)=0.11 w(V)=0.28 w(Al)=0.05	62.1

2 钻杆接头耐磨带焊接材料的选用原则

堆焊层焊缝实质上是异质焊缝。堆焊焊缝焊

接材料的选用，通常需考虑母材材质、供货状态及堆焊件的工况条件等方面。具体到钻杆接头耐磨带，其被堆焊母材为中碳调质钢（成分见表1）

耐磨带的工况条件较为复杂,性能要求苛刻。首先自身要耐磨,也就是说在裸眼钻井过程中,耐磨带与岩石井壁会发生持续摩擦运动,耐磨带必须经受住岩石的长时间磨损。为此,希望耐磨带的硬度、耐磨性越高越好。第二,必须考虑钻井过程中耐磨带与套管不可避免的接触摩擦,以致于磨损(见图4^[9])。如果耐磨带的硬度和耐磨性比套管高许多,那么套管磨损程度一定比耐磨带大得多。在这种情况下,耐磨带的硬度、耐磨性越高,套管磨损程度越严重。因此,并不是说耐磨带的硬度和耐磨性越高越好,而是应当综合考虑,使其具有良好的综合抗磨性能。所谓综合抗磨性能,是指在具有较高耐磨性前提条件下,适当降低硬度和耐磨性,以其适度的减磨性改善套管的磨损性能。据此,钻杆接头耐磨带焊接材料的选用可以采用“性能匹配”原则。所谓性能匹配原则,是在保证耐磨带具有一定高硬度(比如不低于HRC55)条件下,尽量减小套管的被动磨损,同时允许钻杆接头耐磨带适度磨损。钻井工程中普遍追求的“套管友好型耐磨带”特性是:①为了保护钻杆接头需在其上堆焊耐磨带,以利耐磨;②同时还必须考虑套管免受或少受其磨损,即耐磨带需要善待套管,形成互为依存的套管友好型耐磨带。该特性恰好体现并佐证了耐磨带焊接材料选用原则的合理性。该原则涉及焊接材料合金系统的设计和合金元素的影响及控制。

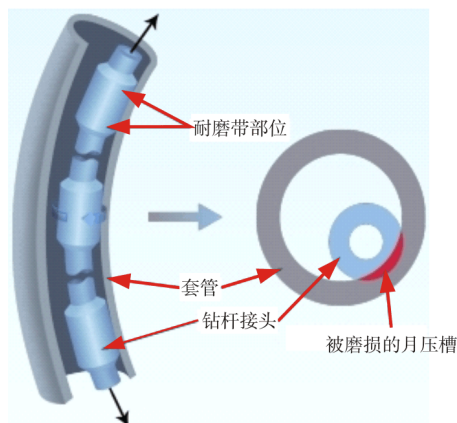


图4 钻具接头耐磨带与套管磨损示意图

从表 3 所列堆焊焊接材料的合金系统的设计可以分析所用合金元素的作用。这 4 种熔敷材料的合金系分别是: ARNCO 100XT 为 FeCrNiMo,

鸣锐 150GH 为 FeCrNiMoNb, GD-100 为 FeCrNb, 鸣锐 160GH 为 FeCrMoNbVB。其中主要合金元素的作用如下:

(1) C 元素。是强烈的奥氏体化形成元素和降低 M_s 点元素。在堆焊材料的设计中, C 是最重要的强化元素, 同时也是致脆元素。C 具有间隙固溶强化的作用, 增加材料中 C 的含量, 将促进马氏体的形成。碳含量进一步提高会促使碳化物的形成, 并减少碳化物质点间距, 增加二次硬化峰值, 获得高的硬度。但 C 含量的增加会使材料的塑性和韧性下降。因此, 在能够满足性能要求的前提下, 应尽量降低材料中所含有的 C 含量。堆层控制 $w(C)$ 为 0.30%, 个别为 0.50% 或更高 (见表 3)。

(2) Cr 元素。是铁素体形成元素，产生固溶强化，促进马氏体 (M) 形成。Cr 也是很强的碳化物形成元素，随 Cr 含量的增加，可形成 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 、 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ 等碳化物。Cr 增加钢的淬透性并有二次硬化作用，提高硬度和拉伸屈服强度。 $w(\text{Cr})$ 超过 12% 时，使钢有良好的高温抗氧化性和耐氧化性介质腐蚀的作用，并增加钢的热强性，成为不锈钢耐酸钢及耐热钢的主要合金化元素。含量高时，易发生 σ 和 475℃ 脆性。堆焊层中控制 $w(\text{Cr})$ 约为 7%~12%。

(3) Mo 元素。是铁素体和强碳化物形成元素；具有固溶强化作用，提高钢的淬透性，可使铁素体的强度和硬度提高，并成为贝氏体高强度钢的重要合金化元素之一。 $w(\text{Mo})$ 约 0.5%时，能降低或抑止其他合金元素导致的回火脆性。在较高回火温度下，形成弥散分布的特殊碳化物，有二次硬化作用。提高钢的热强性和蠕变强度， $w(\text{Mo})$ 为 2%~3%能增加耐蚀钢抗有机酸及还原性介质腐蚀的能力。堆焊层中控制 $w(\text{Mo})$ 约为 0.5%~1.25%。

(4) V 元素。是强铁素体、强碳化物及氮化物形成元素。V 固溶于奥氏体中可提高钢的淬透性；但化合物状态存在的 V，由于这类化合物的细小颗粒形成新相的晶核，将降低钢的淬透性。V 可增加钢的回火稳定性并有强烈的二次硬化作用。有细化晶粒作用，所以对低温冲击韧度有利。焊层中加入一定量的 V 形成钒基碳化物，即形成了高硬的弥散分布的第二相粒子，对基体起到弥散强化或沉淀强化作用。第二相质点数量越多，直径越小，弥散度越大，则其强化效果越明显。

(5) B 元素。是缩小奥氏体区的元素,使共晶点向左移动,并且 B 在奥氏体中的溶解度很小(最大溶解度为 0.008%),随着 B 添加量的增多,会形成较多的硼化物硬质相,呈断网状态分布在初生奥氏体相周围,构成良好的耐磨骨架。另外,由于 B 的原子半径比 C 大,它比 C 形成硬质相的倾向更强,这对增强堆焊金属的耐磨性也是有利的。在 Fe-Cr-C 系耐磨堆焊合金中加入 B^[10],当 $w(B)$ 在 0.1%~0.9% 时,可使表面宏观硬度显著提高;当 $w(B)$ 大于 1% 时,继续加入 B,对宏观硬度的增加影响较小。

(6) W 元素。是缩小 γ 相区、强碳化物形成元素。W 与 C 原子亲和力大,容易形成 W_2C 、WC,增加耐磨性。除了形成碳化物外,W 还部分溶入铁中形成固溶体,其作用与钼相似,按质量分数计算,一般效果不如 Mo 显著。

(7) Si 元素。是强铁素体形成元素,不形成碳化物。Si 除在铁素体和奥氏体中提高固溶强化作用外,还具有脱氧作用,降低焊缝中的氧含量,降低氧对焊缝金属的不利作用。Si 含量较高时,对钢的焊接性不利,并易导致冷脆;对中高碳钢回火时易产生石墨化。堆焊层中 $w(Si)$ 约为 0.85%~1.20%。

(8) Mn 元素。是稳定奥氏体元素,可以降低 M_s 点,提高淬透性。此外,Mn 还是良好的脱氧剂和脱硫剂,Mn 与 Si 联合脱氧有利于降低焊缝中的氧含量,与 S 结合形成 MnS,防止形成低熔点的 FeS 引发焊缝中热裂纹。Mn 和 Fe 能够形成固溶体,提高钢中铁素体和奥氏体的强度和硬度,同时又是弱碳化物形成元素,取代渗碳体中的部分 Fe,形成复合渗碳体。但是过量的 Mn

含量将使钢的晶粒粗化,使钢的延展性降低,韧性下降。堆焊层中 $w(Mn)$ 约为 1.05%~1.60%。

(9) Ni 元素。是扩大奥氏体相区元素,不形成碳化物。Ni 的固溶强化及提高淬透性的作用中等。能细化铁素体晶粒,在强度相同的条件下,提高钢的塑性和韧性,特别是低温韧性。与 Cr、Mo 等联合使用,提高钢的热强性和耐蚀性,是热强钢及奥氏体不锈钢耐酸钢的主要合金元素之一。堆焊层中 $w(Ni)$ 约为 0.03%~4.0% 不等。

综上,为了获得耐磨带综合抗磨性能,焊接材料中合金元素的控制思路是:①利用 Si、Mn 联合脱氧,降低堆焊层中氧的含量;②必须严格限制其含碳量(0.3%~0.5%,个别 0.88%),以使熔敷金属有较好的韧性,防止裂纹发生;③采用添加合金元素(Cr、Ni、Mo、Nb 等)的方法并配合相应的焊接工艺来提高熔敷金属的硬度,以弥补碳含量降低所带来的硬度下降。

3 钻杆接头耐磨带焊接材料的种类及工艺方法

表 4^[11-16]列出了典型耐磨带堆焊材料合金系统及其使用性能。从现阶段可以收集到的相关文献看,几乎所有用于耐磨带的专用焊材均未被列入有关国家标准,如美国 AWS 中查不到相当于 ARNCO 和其他公司生产的耐磨带焊丝的牌号或型号。这些耐磨带专用焊丝产品说明书中也没有给出焊丝的化学成分。表 3 所列几种耐磨带焊丝的化学成分是用户化验所得数据,并非焊材生产企业出示的技术数据。

表 4 耐磨带典型堆焊材料合金系统及其使用性能

堆焊方法/ 文献	牌 号	合金系统	堆层硬度 (HRC)	堆层 耐磨性	堆层 减磨性	堆层裂纹倾向	综合评价
PAW 喷焊/ [11]	Fe-50	Fe-Cr-Ni- W-B-Si	>60	高	差	明显的裂纹、掉块及咬边缺陷	裸眼耐磨性好,但对套管磨损严重
FCAW (自 保护) [12]	ARNCO 200XT	Fe-Cr-C	>50	居中	一般	平行于熔合线、贯穿厚度的宏观热裂纹数量多	第一代产品,耐磨性居中,减磨性一般,降低套管磨损
GMAW [12]	ARNCO 100XT	Fe-Cr-Mn- Mo	>50	一般	最好	裂纹倾向小,无龟裂	200XT 的改进型,第二代产品,耐磨性一般,减磨性最好,对套管磨损最小。这是一种创新的无裂纹套管友好型耐磨带解决方案,为钻井行业提供无裂纹产品的第一个系列
GMAW [12]	ARNCO 300XT	Fe-Ni-Nb	>60	最好	居中	横向树枝状微热裂纹,数量很少	第三代产品,耐磨性最好,减磨性居中

续表

堆焊方法/ 文献	牌 号	合金 系统	堆层硬度 (HRC)	堆层 耐磨性	堆层 减磨性	堆层 裂纹倾向	综合评价
GMAW/ [12]	ARNCO 150 XT	Fe 基多 元素	>60	最好	摩擦 系数低 (套管 友好型)	无裂纹	第四代产品，无裂纹，可无限次重复焊接，集 100XT 与 300XT 优点于一身，耐磨性是 100XT 的 4 倍，耐用性是 100XT 的 2 倍。焊接过程中烟尘、飞溅明显减少，摩擦系数低，抗硫化氢能力卓越
GMAW/ [12]	ARNCO 350 XT	Fe-Ni- Nb-B	>60	比 300XT 好	更好	100% 无裂纹	最大限度保护钻具接头，套管磨损率低，100% 无裂纹（单层或者双层），堆层与基体结合力强，无剥落，无需去除旧耐磨带，可直接在其上焊接
PAW 喷 焊/[13]	EFD-1-50	Fe-Cr- Mn-Mo	>50	一般	不详	基本 无裂纹	在 200XT 基础上改进，克服了 200XT 的缺点，耐磨性优于 200XT
PAW 喷 焊/[13]	EFD-2-50	Fe-Cr- Mn-Mo	>55	较高	不详	无裂纹	EFD-1-50 基础上提高，成本、价格下降，性能与 200XT 相同
PAW 喷 焊/[13]	EFD-3-50	Fe 基 WC	>65	较高	不详	无裂纹	耐磨带硬度高，适用于裸眼钻井
PAW 喷 焊/[11]	PT100	高 Cr 合 金	>50	居中	较好	不详	主要技术指标明显超过碳化钨耐磨带，实现了钻杆接头和套管的双保护效果
美国 Postle 公 司/[14]	强力邦 Tuffband NC	Fe-W	>60	优良	优良	无裂纹	堆层无开裂，即使在最恶劣的钻井环境下堆层也不会剥落，能延长钻杆接头和套管寿命，在关键部位最大限度地减少酸性气体问题，100%可翻新（获得 Fearnley Procter NS-1™ 2 级资格认证）
	久固邦 Duraband NC	Fe-Cr	50~58	卓越	优良	100%无 裂纹	耐磨带 100%无开裂，无 H ₂ S 气体结晶点，腐蚀物质和钻井液不会进入裂纹中，即使在恶劣的钻井环境下也不太可能产生耐磨带的剥落；卓越的抗磨性能，避免高昂的过早翻新费用（获得 Fearnley Procter NS-1™ 2 级资格认证）
瑞典 ESAB Stoody/ [15]	HB-56	-	56~60	良好	套管 友好型	无裂纹	堆层是一种提供抗冲击性和耐磨性平衡的通用型非开裂、高硬度、套管友好型耐磨带合金。可应用于带或不带碳化钨 (WC) 添加剂的碳钢和低合金钢。当使用适当的预热应用于新的或适当重建的钻具接头时堆层无裂纹
	HB-64	-	61~65	非常好	套管 友好型	无裂纹	该耐磨合金在马氏体基体中产生了小的初始金属碳化物均匀分布。由于焊缝堆层的低摩擦系数以及具有优异的抗冲击性和抗塑性变形性，是一种非常适合套管的耐磨带材料（即套管友好型）。该合金具有裸眼钻井需要的高硬度和优异的耐磨性特点。当使用适当的预热在新的或适当重建的钻具接头上应用时，堆层无裂纹。如果将 HB-64 涂覆在先前开裂、未正确清洁或含硼高的耐磨带上，则 HB-64 可能无法保持无裂纹。与许多其他耐磨带焊丝相比，具有更好的焊接性
英国 WA 集团/[16]	DRILL- GUARD Ti	Fe-Ti- V-Nb	55~58	卓越	套管 友好型	无裂纹	DRILL-GUARD 系列焊丝具有高耐磨、低摩擦系数、无裂纹、不剥落等特点；系列焊丝生产的耐磨带对套管提供了卓越的保护，不仅具有与其他耐磨带堆层高度的兼容性，即可在别的耐磨带堆层上堆焊获得满意的堆层，而且该焊丝获得了优秀焊工的青睐
	DRILL- GUARD Nb	Fe-Ti- V-Nb	55~58	卓越	套管 友好型	无裂纹	DRILL-GUARD 系列焊丝具有高耐磨、低摩擦系数、无裂纹、不剥落等特点；系列焊丝生产的耐磨带对套管提供了卓越的保护，不仅具有与其他耐磨带堆层高度的兼容性，即可在别的耐磨带堆层上堆焊获得满意的堆层，而且该焊丝获得了优秀焊工的青睐
	DRILL- GUARD CC	Fe 基多 碳化物 元素	55~57	卓越	套管 友好型	无裂纹	除了前 2 种特点之外，DRILL-GUARD CC 焊丝也可与碳化钨一起使用，以增强底部钻具组合（bottom hole assembly, BHA）的保护

耐磨带堆焊材料的种类比较丰富。这是产品结构特点和所用焊接方法所决定的。20 世纪 30 年代以来,一些单位采用铁基 (Fe-50、Fe-60) 或钴基碳化钨硬质合金耐磨带。碳化钨耐磨带在裸眼中能较好地保护钻杆,但堆层组织中高硬度的碳化钨颗粒对套管产生较大的磨损,影响钻井工程进度和经济效益。为此,在国际钻井工程招标中或国内较深井钻井中,碳化钨硬质合金接头耐磨带已被明令禁用。

美国安科公司的堆焊材料多达 5 种^[12]。第一种是 20 世纪 90 年代开发的 ARNCO 200XT 第一代药芯焊丝。该焊丝采用 Fe-Cr-C 合金系,其耐磨带堆层硬度大于 HRC50,耐磨性较好,磨损率较小。现场应用表明,在减小钻杆磨损的前提下,能有效降低套管的磨损。该焊丝的不足之处是堆层宏观热裂纹数量较多,堆层的减磨性尚需改进。2001 年安科公司又推出了 ARNCO 100XT 药芯焊丝。该焊丝采用 Fe-Cr-Mn-Mo 合金系,是 ARNCO 200XT 的改进型第二代产品,焊前工件预热温度为 66~316 ℃,其耐磨带堆层硬度大于 HRC50。该产品具有下列特性:耐磨带上无龟裂;在钻井过程中,对套管的磨损降为最低;在裸眼井中,其耐磨性与碳化钨合金相当;提高钻杆接头寿命 300%;套管与钻杆接头同时得到保护;可在原先残存的碳化钨堆层上加焊 100XT;可在钻杆原有的 100XT 带上重新补焊;可用于新旧不同尺寸的钻杆;适用于钻杆、加重钻杆、钻铤、扶正器、减震器,以及其他各种井下工具。该焊丝的不足之处是堆层的耐磨性比碳化钨层稍差。2003 年安科公司研制成功 ARNCO 300XT 第三代耐磨带药芯焊丝。该焊丝采用以 B 代 C 和多元素综合强化合金化技术,其耐磨带堆层硬度大于 HRC60,耐磨性较以前提高,减磨性适中,堆层热裂纹倾向已大大减小,该焊丝在高研磨岩性地区工作时,已呈现出预期的优越特性。2009 年安科公司又推出了 ARNCO 150XT 第四代耐磨带药芯焊丝。该焊丝采用 Fe 基多元素合金系统,其耐磨带堆层硬度大于 HRC60,耐磨性最好(耐磨性是 100XT 的 4 倍,耐用性是 100XT 的 2 倍),摩擦系数低,堆层无裂纹,可无限次重复焊接。该焊丝属于套管友好型,集 100XT

与 300XT 优点于一身;焊接过程中烟尘、飞溅明显减少,摩擦系数低,抗硫化氢能力卓越。2013 年安科公司再推出 ARNCO 350XT 最新耐磨带药芯焊丝。该焊丝采用 Fe-Ni-Nb-B 合金系统,其耐磨带堆层硬度大于 HRC60,耐磨性比 300XT 好,减磨性更好;最大限度保护钻具接头,套管磨损率低,堆层 100%无裂纹;堆层与基体结合力强,无剥落,无需去除旧耐磨带,可直接在其上焊接。

表 4 中 EFD 系列产品是该公司推出的钻具耐磨带堆焊材料(等离子喷焊用药芯焊丝)^[13]。3 种焊丝的研发目标是改进 ARNCO 200XT 药芯焊丝,并克服该焊丝存在的缺点(堆焊层热裂纹倾向严重;堆焊层耐磨性中等;堆焊层减磨性较弱)。迄今为止,尚无文献显示 EFD 系列产品与 ARNCO 200XT 的详尽比较情况。尽管如此,该公司认为所开发的 EFD 系列药芯焊丝产品,填补了国内耐磨带焊接材料的空白,达到了国际先进水平。

PT100 是一种采用高铬合金系统、直径为 1.6 mm 的等离子喷焊用药芯焊丝^[11]。其耐磨带堆层硬度大于 HRC50,耐磨性居中,减磨性较好,主要技术指标明显超过碳化钨耐磨带,实现了钻杆接头和套管的双保护效果。同时该焊丝具有价格便宜、工艺简便、焊前工件不需预热、焊后工件不必保温、可以重复堆焊等优点。

强力邦 Tuffband 和久固邦 Duraband1 是美国 Postle 公司开发的耐磨带焊接材料,均已获得 Fearnley Procter NS-1™ 2 级资格认证^[14]。前者采用 Fe-W 合金系统,其耐磨带堆层硬度大于 HRC50,耐磨性、减磨性优良,堆焊层无裂纹。应用表明,即使在最恶劣的钻井环境下堆层也不会剥落;能延长钻杆接头和套管寿命,在关键部位最大限度地减少酸性气体问题,100%可翻新。后者采用 Fe-Cr 合金系统,其耐磨带堆层硬度 HRC50~58,耐磨性卓越、减磨性优良,堆焊层 100%无裂纹。应用表明,卓越的抗磨性能,避免了高昂的耐磨带过早翻新费用;即使在恶劣的钻井环境下也不太可能产生耐磨带的剥落。

瑞典 ESAB Stoodly HB-56 药芯焊丝之前已获得 NS-1 2 级认证。Stoodly HB-56 对套管非常友

好，获准可用于新的应用或对自身重新应用。Stoody HB-56 可形成具有出色耐磨性和优异焊接性的无裂纹马氏体堆层。

瑞典 ESAB 品牌 Stoody®宣布，Stoody HB-64^[15]药芯焊丝已获得 Fearnley Procter NS-1 油田耐磨带应用和再应用 2 级认证。Stoody HB-64^[15]（洛氏硬度 60~64）是一种用碳化铌增强，具有卓越性能和无裂纹耐磨带的钻具钢合金。其特殊配方的耐磨合金成分在马氏体基体中产生小的初始金属碳化物的均匀分布。Standy HB-64 提供低摩擦系数的焊缝堆层，以减少钻具接头和套管磨损。它在耐磨带条件下表现出优异的耐磨性。Stoody HB-64 根据 NS-1 获得批准，可用于新的耐磨带应用（在新钻杆接头上堆焊）以及重新应用于自身（在旧的耐磨带上重堆）。

英国 Welding Alloys 公司的 DRILL-GUARD 系列焊丝^[16]中，前两种采用 Fe-Ti-V-Nb 合金系统，第 3 种采用 Fe-基多元合金系统，碳化物种类更多。3 种焊丝具有高耐磨、低摩擦系数、无裂纹、不剥落等特点；其耐磨带对套管提供了卓越的保护，具有与其他耐磨带堆层高度的

兼容性。此外第 3 种焊丝（DRILL-GUARD CC）也可与碳化钨一起使用，以增强底部钻具组合（bottom hole assembly, BHA）的保护。3 种耐磨带焊丝 DRILL-GUARD Ti、Nb 和 CC，都获得了 Fearnley Procter™ NS-1 3 级认证。该认证使 Welding Alloys 公司成为唯一一家拥有所有钻杆耐磨带焊丝最高水平认证的公司。

表 4 所列多种耐磨带焊接材料涉及的焊接方法，主要有等离子喷焊（PAW）和熔化极气体保护焊（GMAW），GMAW 中包括药芯焊丝电弧焊（FCAW）。焊接材料确定以后，堆焊工艺是保证耐磨带使用性能的决定因素。表 5 列出了安科耐磨带焊接工艺参数^[17]。安科耐磨带焊接工艺要点是在主要焊接参数（电流、电压、极性、保护气体及流量、焊丝干伸长、焊枪与工件相对位置）符合要求条件下，特别强调工件预热温度（安科耐磨带焊接手册：预热温度随钻杆直径增大而提高，同时保证在堆焊部位温度的均匀性，即管内外需热透）和焊道层间温度控制，工件焊后冷却方式需符合规范要求，以及耐磨带尺寸的保证等工艺规范。

表 5 安科（ARNCO）耐磨带焊接工艺参数

工艺方法	焊丝牌号	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	电源极性	保护气体	气体流量/(L·min ⁻¹)	焊丝干伸长/mm	工件预热温度/℃	焊道层间温度/℃	焊后冷却方式	焊枪与工件相对位置
GMAW	150 XT, 350 XT	1.6	280~320	28~32	DCEP	98%Ar+2%O ₂	16.5~21	25.4	107~343 (随钻杆直径增大而提高)	≤454	静态空气中保温缓慢冷	见图 5 ^[17]

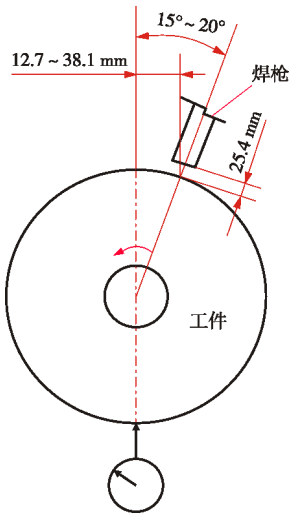


图 5 焊枪与工件的相对位置示意图

4 钻杆接头耐磨带焊接材料的应用

中国石油集团川庆钻探工程有限公司川西钻探公司和中国石油天然气管道科学研究院有限公司，针对所研发的鸣锐 160GH 石油钻杆接头耐磨带药芯焊丝进行了显微组织和性能研究及工程应用^[8]。采用 GMAW 方法，在执行表 6 中实例 1 所示的工艺要点时，从堆层显微组织特性（见表 7）揭示了堆层的高硬度和耐磨性能。川西钻探公司钻具井控公司在新都基地采用鸣锐 160GH 耐磨带药芯焊丝敷焊了 Φ127 mm（5 in）S135 钻杆 10 根。该次敷焊是在原安科 ARNCO 350XT 焊丝敷焊过的耐磨带上进行的，

鸣锐 160GH 耐磨带焊丝与原耐磨带有良好的兼容性和野外适用性,焊道成形平整、无气孔、无裂纹;焊层厚度 3 mm,宽度 76 mm;耐磨带焊层平均硬度为 HRC59.5~HRC60.5。鸣锐 160GH 焊丝敷焊后的钻杆在龙岗 70 井、双探 8 井、磨溪 022-H4 井进行了试用,入井累计使用 16 820 m。钻杆回收后进行了尺寸测量

和无损检测,敷焊层磨损后的厚度约为 2 mm,3 口井使用后未发生裂纹、掉块、损坏套管的现象,耐磨层光洁,磨损量较少。该焊丝敷焊质量和使用效果能够达到进口焊丝 ARNCO 350XT 的水平(具有套管友好型耐磨带特性),符合 SY/T 6943—2013《石油钻具耐磨带》标准的要求。

表 6 钻杆接头耐磨带焊接工艺要点

实例号/文献号	焊接方法	焊接材料牌号	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	电源极性	干伸长/mm
1/[8]	GMAW	鸣瑞 160GH	1.6	280~300	27.5~29	DCEP 直流反接	17~25
2/[13]	PAW 喷焊	EFD-2-55	1.6	270~300	27~29	DCEN 直流正接	导电嘴距工件距离 15~18
实例号/文献号	保护气体	气体流量/ (L·min ⁻¹)	预热温度/℃	焊道层间 温度/℃	焊后冷却 方式	焊枪与工件相对位置	
1/[8]	80%Ar+ 20%CO ₂	15	260~320	—	静态空气中 保温缓冷	见图 5	
2/[13]	Ar	15	不预热 (RT)	不控制	室内缓冷	焊枪垂直于钻杆轴线,偏离中心 5~40 mm,保证焊接时焊枪处于上坡状态	

表 7 钻杆接头耐磨带焊缝组织及性能

实例号/文献号	焊接方法	显微组织	平均硬度 (HRC)	磨损量/g (载荷 100 N)	平均耐磨性
1/[8]	GMAW	马氏体、铁素体和渗碳体基体上弥散分布的 NBC 硬质相 (见图 6 ^[8])	62.1	0.183/0.254	1.43
2/[13]	PAW 喷焊	—	59.0	—	—

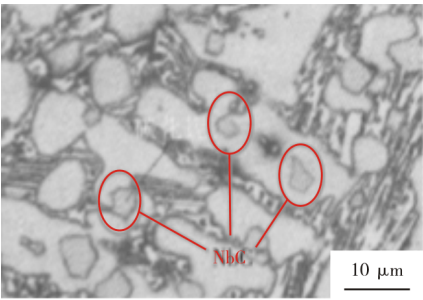


图 6 耐磨带堆焊层显微组织

大港油田集团有限责任公司,采用填加 EFD-2-22 型药芯焊丝的等离子 (PAW) 喷焊工艺,开展钻杆接头耐磨带喷焊工艺研究^[13]。在执行表 6 中实例 2 所示工艺要求时,对已有等离子喷焊设备进行改造,使其可用焊丝进行喷焊;以最佳工艺参数匹配进行对比试验。在工程应用中,将 EFD-2-55 型焊丝喷涂钻具 140 余根发往 50535 钻井队,与耐磨带为 FeO 合金粉的钻具同时使用。目前已经使用 7 口井,共计进尺 16 180 m,仍在继

续使用中。现场检测 EFD-2-55 型耐磨带各项尺寸磨损量非常小,仍可以使用多口井。井队人员反映这种耐磨带的耐磨性非常好,对钻杆接头的磨损很小(具有套管友好型耐磨带特性,见表 8)。分析表明,EFD-2-55 型耐磨带具有良好的经济和社会效益,达到了预期目标。

表 8 2 种耐磨带钻具使用前其厚度的变化

使用时间段	厚度/mm	
	EFD-2-55 药芯 焊丝耐磨带	FeO ₇ 合金粉 耐磨带
使用前	3.0	3.0
使用 1 口井后	2.9	2.6
使用 2 口井后	2.8	2.0
使用 3 口井后	2.6	1.5
使用 4 口井后	2.4	1.0
使用 5 口井后	2.0	0.6
使用 6 口井后	1.7	0.3
使用 7 口井后	1.4	0.1

5 结 论

(1) 钻杆接头耐磨带焊接性的主要问题是焊接裂纹倾向严重, 以及 HAZ 的脆化和软化。选用合适的焊接材料和合理的焊接工艺, 是控制和改善钻杆接头耐磨带焊接性的重要技术手段。

(2) 钻杆接头耐磨带焊接材料的选用可以采用“性能匹配”原则, 即在保证耐磨带具有一定高硬度(比如不低于 HRC55)条件下, 尽量减小套管的被动磨损, 同时允许钻杆接头耐磨带适度磨损。该原则涉及焊接材料合金系统的设计和合金元素的影响及控制。

(3) 受产品结构特点和焊接方法控制, 钻杆接头耐磨带焊接材料的种类较多, 采用的工艺方法各具特色; 国外知名品牌焊接材料性能优良, 钻杆接头耐磨带焊接材料的国产化工作已经取得阶段性成果。

(4) 国产化焊接材料生产的钻杆接头耐磨带已在各类钻井工程中成功应用, 其各项性能指标已经达到国外知名品牌水平, 发挥了良好的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 陈猛, 余世杰, 欧阳志英. 某井 S135 钢级钻杆接头耐磨带区域刺漏原因分析[J]. 钢管, 2018, 47(6): 45-49.
- [2] MURTHY G V S, DAS G, DAS S K, et al. Hardbanding failure in a heavy weight drill pipe [J]. Engineering Failure Analysis, 2011(18): 1395-1402.
- [3] 刘光磊, 黄磊. 钻杆耐磨带堆焊工艺及性能分析[J]. 金属加工(热加工), 2015(22): 58-59.
- [4] 刘飞, 邹付兵. 150GH 与 100XT 两种耐磨带焊丝性能分析及应用[J]. 焊接, 2015(8): 64-67.
- [5] ZHANG K, WANG Z Q, WANG D G. Research Progress of the Drill String Hardbanding Materials [EB/OL]. (2019-11-06) [2022-01-12]. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.90013>.
- [6] 王新虎, 张冠军, 李方坡, 等. 钻杆钢的成分、热处理工艺及其力学性能[J]. 石油管材与仪器, 2015, 1(2): 33-36, 40.
- [7] MASAO H, SABURO M, Kaneaki T. Microstructural Analyses of Grain Boundary Carbides of Tempered Martensite in Medium-Carbon Steel by Atomic Force Microscopy[J]. Materials Transactions, 2002, 43(7): 1758-1766.
- [8] 姚宇, 夏培培, 周文华, 等. 鸣锐 160GH 石油钻杆耐磨带堆焊药芯焊丝性能研究及应用[J]. 焊接技术, 2019, 48(8): 69-71.
- [9] Pegasus Vertex, Inc. WHITE PAPER Casing Wear Causes, Prediction and Prevention [EB/OL]. [2022-01-12]. <http://white-paper/Casing-Wear-Causes-Prediction-and-Prevention.pdf>.
- [10] 王智慧, 贺定勇, 王月琴. 硼对 Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金组织的影响[J]. 材料工程, 2001(10): 18-20.
- [11] 李玉民, 李飞, 郭建军, 等. 钻杆接头 PT100 耐磨带的敷焊工艺与应用[J]. 石油机械, 2003, 31(5): 20-22.
- [12] Arnco Technology Trust Ltd. Wear resistant Hardbanding Alloys for the Worldwide Petroleum Industry [EB/OL]. [2022-01-12]. <http://www.arncotech.cn>.
- [13] 魏立明, 范斌, 赵福优, 等. 钻杆耐磨带新型喷涂材料(100XT, 200XT)喷焊工艺研究[C]//海油气勘探开发技术论文集. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [14] Postle Industries Inc. Hardbanding solution [EB/OL]. [2022-01-12]. http://www.hardbanding-solutions.com/postle/index_pi.php.
- [15] ESAB. Hardfacing & High Alloy Product Selection Guide [EB/OL]. [2022-01-12]. https://www.esab.com.ru/shared/documents/downloads/2102a_stoodyaeb_hardfacing_highalloy_catalog_8-15-17.pdf.
- [16] Welding Alloys Group. Drill-guard [EB/OL]. [2022-01-12]. <https://drill-guard.com/premium-hardbanding-cored-wires/drill-guard-ti.html>.
- [17] Arnco Technology Trust Ltd. Arnco Hardbanding Specification Manual [EB/OL]. [2022-01-12]. <https://www.docin.com/p-1418311712.html>.

作者简介: 孙 咸, 男, 教授, 主要从事焊接材料及金属焊接性方面的研究和教学工作, 对焊接材料软件开发具有丰富经验。获国家科技进步二等奖 1 项(2000 年), 省(部)级科技进步一等奖 2 项, 二等奖 3 项, 1992 年获国务院颁发的政府特殊津贴, 已发表学术论文 200 余篇。

收稿日期: 2022-01-18

修改返回日期: 2022-02-14

编辑: 董 超

欢迎投稿 欢迎订阅