doi：10.3969/j.issn.1007-9289.2011.06.017

E347L 不锈钢焊带设计生产及其埋弧堆焊层性能

张心保

（山西太钢不锈钢股份有限公司 技术中心，太原 030003）

摘　要： 为了替代进口 EQ347 堆焊用钢带，试制生产了带极堆焊用 E347L 焊带。介绍了其设计思路及生产技术要点，分析了焊接工艺参数和合金元素对堆焊层成形和性能的影响。生产中采用 AOD 炉外精炼，热锻及热轧温度低于 1 250 ℃，冷轧后产品规格 0.5 mm × 50 mm，尺寸偏差可控制在±0.01 mm。进行了埋弧带极堆焊试验及检测，检测内容包括堆焊层的化学成分、力学性能和耐蚀性能等。结果表明，生产的 E347L 焊带堆焊层化学成分完全满足相关标准的要求，180°弯曲无裂纹，FN 值在 5～7 之间，E347L 堆焊层的硬度测试结果在 204～210 HV 之间，晶间腐蚀后弯曲无裂纹产生。该不锈钢焊带已替代进口焊材并用于化工工业中的加氢反应器中。

关键词： E347L；焊带；埋弧带极堆焊；设计生产；性能

中图分类号： TG455　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1007-9289(2011)06-0092-06

Design and Fabrication of E347L Stainless Steel Surfacing-strip and Properties of SAW Deposited Metal

ZHANG Xin-bao

(Technology Center, Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003)

Abstract: E347L stainless steel strip for SAW strip surfacing was designed and fabricated in order to replace imported EQ347 stainless strip. The design method and key points of the technology were briefly presented. Also, the effects of alloy agents and welding parameters on the formation and properties of the deposited metal layer were analyzed. In the course of fabricating, AOD secondary refining was adopted; hot forging temperature and hot rolling temperature should be below 1 250 ℃. The specifications of strip after cold rolling is 0.5 mm×50 mm, and dimensional variation can be controlled within ±0.01 mm. SAW strip surfacing test and analysis including chemical composition of the deposited metal, mechanical properties and intergranular corrosion test were carried out. The results show that the quality of the E347L strip accords with the specifications of the relevant standards. No flaw was found in bending test and intergranular corrosion test; the measured FN is between 5 and 7, and the hardness of deposited metal of E347 is between 204 and 210 HV. The stainless steel surfacing-strip has been used in hydrogenating reactor in chemical industry as a substitution for imported welding material.

Key words: E347L; surfacing-strip; SAW strip surfacing; design and fabrication; property

0　引　言

带极堆焊是一种重要的表面改性方法，具有高熔敷效率和低稀释率的特点。金属材料在服役过程中，表面经常与腐蚀介质接触或经受磨损。在表面堆焊耐蚀层或耐磨层是一种有效提高表面性能的方法，可以在平面或曲面上进行。带极堆焊包括埋弧带极堆焊和带极电渣堆焊两种。埋弧带极堆焊是采用直流反接，在工件和焊带之间的焊剂层下形成电弧，熔池上的焊剂可以保护焊接熔池，具有良好的焊缝成形及综合性能。电渣堆焊是利用导电熔渣的电阻热熔化堆焊材料，电渣槽中产生的热量熔化伸进电渣槽内的焊带和基体金属形成堆焊层[1]。我国于 20 世纪 80 年代开始引进带极堆焊技术，90 年代开始进行焊带的国产化研究。目前带极堆焊广泛应用于石油化工、能源工业领域压力容器，反应器，塔器，换热器等设备中[2]。文中所述试验研究中均采用的是埋弧带极堆焊。

AWS（American Welding Society）EQ347 不锈钢具有优良的力学性能及耐蚀性，非常容易满足许多容器壁对硬度、耐磨性及耐蚀性的要求，因此，在 Cr-Mo 型低合金钢基体表面堆焊 EQ309L 过渡层后再堆焊 EQ347L 可以提高表

收稿日期： 2011-09-07；**修回日期：** 2011-11-07

作者简介： 张心保(1974—)，男(汉)，山西太原人，工程师，硕士。

面的力学性能和耐蚀性能[3]。当前我国的高端焊材基本上依赖进口,山西太钢公司为了满足国内市场需求,利用自身的技术和设备优势,设计并生产了 E347L 不锈钢带极堆焊用钢带,产品规格为 0.5 mm×50 mm,质量达到了进口材料的水平,可用于化工工业中的加氢反应器、重整反应器、精制反应器及其他化工设备中。

1　E347L 不锈钢焊带成分设计及生产工艺要点

AWS EQ347 不锈钢是铬镍奥氏体不锈钢,具有很高的力学性能及优良的耐蚀性能、焊接性能,相当于国标牌号 06Cr18Ni11Nb 不锈钢。美国焊接学会(AWS)IICA 标准对其化学成分和力学性能及 WRC-FN 值(铁素体数)要求示于表 1 及表 2 中。

根据用户供货技术要求并结合国外标准,确定焊带的化学成分范围如表 3,在进行生产时成分控制范围比标准要求更严格,并结合热处理工艺将铁素体质量分数控制在 5%～12%以内。实芯焊带由钢锭经过热锻、热轧、酸洗、打磨、固溶、冷轧、平整、光亮退火、分条等多道工序最终成型,E347L 焊带的冶炼及轧制生产技术工艺要点总结如下:

(1) 严格控制冶炼环节化学成分,从炉料结构到铸成符合要求的钢锭,不仅严格按产品标准控制成分范围,而且尽可能达到生产控制目标要求,如表 3 所示。

(2) 在 AOD 炉二次精炼过程中,正确地控制各个冶炼阶段的 O_2/Ar 比,以达到以下目标:①脱碳速度高,很容易将碳含量降至很低的水平;②能够大量使用高碳铬铁等低廉的合金料,而且由于钢中铬的氧化比较少,铬回收率比电炉钢高,有利于降低冶炼成本;③钢水搅拌力强,有利于脱硫和脱氧,特别是在采用高碱度的炉渣,并强力搅拌的情况下,脱硫效率极高,可以生产含硫很低的不锈钢。

(3) 奥氏体不锈钢在高温下的变形抗力大,若加热不当,就不能保证轧制塑性,而且在高温下会出现 α 相,在 1 100～1 250 ℃的温度范围内 α 相的含量较低,当温度超过 1 250 ℃时,α 相急剧增加。因此,锻造和热轧的加热温度必须控制为≤1 250 ℃,详见热锻温度表 4 及热轧加热温度表 5。通过控制热锻及热轧温度,有效地防止了钢带边部发生开裂现象,保证了钢带的质量。

表 1 AWS EQ347 不锈钢焊接用钢带化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of AWS EQ347 stainless steel surfacing-trip(w/%)

标准	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	N	Cu
美国焊接学会 IIC A	≤ 0.08	1.0～2.5	0.30～0.65	≤ 0.025	≤ 0.015	19.0～21.5	9.0～11.0	≤ 0.75	10×C%～1.0	≤ 0.02	≤ 0.75

表 2 AWS EQ347 不锈钢焊接用钢带力学性能及 FN 值

Table 2 Mechanical properties and FN of AWS EQ347 stainless steel surfacing-trip

牌号	$R_p0.2$/(N·mm^{-2})	R_m/(N·mm^{-2})	伸长率/%	FN
EQ347	800～1 000	900～1 200	4～14	5～12

表 3 E347L 不锈钢焊带的成分设计 (质量分数/%)

Table 3 Chemical composition design of E347 stainless steel strip (w/%)

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	N	Cu
E347L 供货标准	≤ 0.020	1.5～2.5	0.20～0.50	≤ 0.025	≤ 0.015	19.5～21.0	10.0～11.0	≤ 0.20	0.5～0.8	≤ 0.060	≤ 0.20
生产控制目标	≤ 0.010	1.8～2.1	0.30～0.50	≤ 0.015	≤ 0.008	19.8～20.3	10.2～10.5	≤ 0.20	0.55～0.70	≤ 0.040	≤ 0.20

表 4 E347L 焊带热锻温度

Table 4 Hot forging temperatures of E347L strip

加热温度/℃	锻造温度/℃	终锻温度/℃	冷却方式
1 220～1 250	1 230±20	≥ 850	空冷

表 5 E347L 焊带热轧加热温度

Table 5 Hot rolling temperatures of E347L strip

加热温度/℃	热轧温度/℃	终轧温度/℃	冷却方式
1 230～1 250	1 230±20	≥ 900	空冷

(4) 超低碳奥氏体不锈钢变形抗力大，为了实现高效率、高精度的轧制一般应采用刚性大的多辊冷轧机，如国产 MS-6C-400E 六辊轧机或德国森吉米尔 Sendzimir 二十辊冷轧机。我公司采用的是森吉米尔廿辊轧机，厚度尺寸偏差可控制在±0.01 mm。

(5) 为了获得美观光亮的表面，采用连续光亮退火炉，将液氨在触煤的作用下，加热分解为(75% H_2 + 25% N_2)混合气体作为该光亮退火炉的保护气氛。

(6) 为了去掉热轧在表面形成的氧化层，必须进行酸洗，对超低碳奥氏体锈钢采用的酸洗采用(8% HF + 15% HNO_3)混合溶液，温度控制在 40～60 ℃。

2 E347L 不锈钢带极堆焊工艺及影响因素

2.1 堆焊耐蚀层化学成分及铁素体含量控制

熔敷金属的耐蚀性和铁素体含量在很大程度上取决于化学成分。焊缝中有一定量铁素体能降低焊缝金属的热裂倾向，提高耐晶间腐蚀性能。焊缝中的 δ 相可以打乱单一奥氏体柱状晶的方向性，避免贫铬层贯穿于晶粒之间构成腐蚀介质的集中通道；处于敏化温度区间时，富铬碳化物最易于在两相界面 δ 相一侧形核，从而大大减少了碳化物沿奥氏体晶界析出[4-6]。

但铁素体含量高，不仅在某些介质中会引起选择性腐蚀，而且会造成 σ 相脆化。如加氢反应器制造过程中往往经过多次 650 ℃以上的热处理，累计时间可达到 20 多小时，且设备长期在高温下运行，可能使堆焊层的铁素体发生 δ-σ 相的转变.造成堆焊层的脆化。因此，对铁素体含量必须予以控制，一般认为应控制在 5%～12%[4]。

E347L 焊带的化学成分除了 C、Si、Mn、P、S、Cr、Ni 等元素外，为了提高强度及耐蚀性添加了少量的 Mo 和 Nb 等元素，Mo 和 Nb 是强铁素体形成元素，对于形成铁素体有贡献作用。在冶炼生产时，尽可能地将各元素含量控制在生产控制目标范围内，AOD 或 VOD 二次精炼技术可以将 C 和 N 含量控制在很低的范围内。施焊的时候制定合理的焊接工艺参数和热处理制度，以获得理想的熔敷金属的化学成分和 FN 值。

2.2 堆焊层熔敷金属的成形及性能影响因素

2.2.1 焊接工艺因素对堆焊层成形及性能的影响

为了制定合理的焊接工艺，查阅了相关的技术文献资料，总结了各因素对工艺性和堆焊层成型和性能的影响如下。

(1) 电源外特性

对于等速送丝(带)系统，一般应选择用平外特性或缓降外特性电源。当网络电压波动时，电弧电压变化较下降外特性的小。另外，弧长的自动调节是通过焊丝(带)的熔化速度来实现的，熔化速度取决于焊接电流，平特性电源的电压变化很小时电流变化较大，焊接过程自调节性能好，电弧电压稳定，这样可保证焊接过程的稳定，控制焊道的堆高和熔深及熔宽，从而获得优质的堆焊层[7-8]。

(2) 电源极性

在表面堆焊时，直流正接比直流反接效率高 15%～20%，但正接容易产生夹渣和咬边等缺陷；反接时焊接工艺过程稳定，稀释率比正接时大。为了提高抗剥离能力，母材的稀释率应控制在 15%～20%，故生产上经常采用反接极性[7-8]。

(3) 焊接电流

焊接电流对焊带熔化速度、焊道堆高、母材熔深(稀释率)以及焊道成形均有较大影响。电流太小，不利于引弧和熔化焊剂形成空腔，且焊道堆高太小；电流太大，虽然效率高，但随着热输入量的增加，使熔深增加，稀释率变大，进而影响焊道的化学成分，还易产生咬边，焊后冷却时间加长，容易析出有害相，影响堆焊层的耐蚀性能和力学性能[8]。

(4) 电弧电压

电弧电压过高和过低都会影响焊接过程的稳定性。在其他条件不变时，焊接电压提高，热输入量也增加，焊道的熔宽和稀释率增加，但产生明弧的可能性也增加，一般为 24～28 V[8]。

(5) 焊接速度

在电流、电压一定的情况下,焊接速度太低,生产效率低,并且母材受热作用时间较长,晶粒较粗大,易析出有害相,熔深增加,焊道较厚,在堆焊层易产生热裂纹,且母材稀释率变大;焊接速度太高,焊剂不能充分熔化而使熔池温度下降,并可能产生明弧,而且使焊道堆高减小,影响熔敷金属质量。一般情况下,焊接速度控制在 140～190 mm/min 较为适宜[8]。

(6) 焊剂

好的焊剂是获得优质堆焊层的重要因素,除了起到焊缝合金化的作用外,还应起到防止超低碳不锈钢焊带堆焊层的增碳和含 Nb 焊带的粘渣问题。熔炼焊剂比烧结型焊剂熔深大,电极熔化量少,工艺性能好,颗粒强度高,能多次使用;烧结型焊剂堆焊成形较好,但和熔炼型焊剂相比容易吸潮,成本较高,目前大部分用烧结焊剂[7-8]。

2.2.2　合金元素对堆焊层性能的影响

E347L 焊带中的 Cr 是保证获得不锈耐蚀性的决定性因素,Ni 是奥氏体化元素,可改善不锈钢的塑韧性和焊接性,降低脆性转变温度,还与 Cr 一起提高金属的耐蚀性。Nb 是强碳化物形成元素,与碳的亲和力大于 Cr,易与钢中的 C 和 N 形成稳定的金属间隙相粒子,高温下也不易分解,起到了稳定 Cr 的作用,保证了不锈钢的耐蚀性。

Mo 可以提高不锈钢的耐蚀性、强度和抗蠕变性,同时也促进不锈钢中 σ 和 χ 相的析出,降低不锈钢的性能,因此在设计焊带成分的时候,Mo 元素含量控制较严格。

Cu 可提高不锈钢的耐蚀性,改善塑性和冷成型性,在钢中形成弥散分布的富铜 ε 金属间化合物,起强化作用[9]。

在设计及改进焊带合金成分时,既要考虑各合金元素对焊接性及堆焊层性能的影响,控制其含量在一个适当的范围内;又要考虑到生产成本,力求做到兼顾产品质量与经济效益。因此在今后的焊接试验及性能研究中,要重点关注合金元素的作用及其稀释层过渡特性,以进一步优化产品的成分及性能。

3　埋弧堆焊试验及性能检测结果

3.1　焊接试验

由于 E347L 在成分和性能上与基体金属差别较大。首先在基体上堆焊 E309L 过渡层,然后在过渡层上进行 E347L 堆焊,焊带规格为 0.5 mm×50 mm×L,化学成分见表 6。埋弧堆焊的焊剂为专用焊剂 GXS-S340,在参考借鉴相关文献的焊接工艺参数和性能分析基础上制定工艺措施[10-12]。焊前预热温度 100～150 ℃,焊后在(680±20) ℃ 保温 20 h,具体焊接规范如表 7 所示。

焊缝外观见图 1,焊道平坦光洁,脱渣良好,搭接顺利,成形较好。

表 6 焊带化学成分实测值 (质量分数/%)

Table 6 Measured values of the strip chemical composition (w/%)

牌号	C	Si	Mn	S	P
E309L	0.025	0.31	2.07	0.001	0.015
E347L	0.020	0.46	1.73	0.001	0.019

牌号	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	N
E309L	21.27	11.70	0.0023	0.001		0.016
E347L	19.56	10.94	0.002	0.0020	0.61	0.018

表 7 焊接规范

Table 7 The welding parameters

参数	极性	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(mm·min^{-1})
数值	DCEP	750～850	27～29	160～180

参数	带极伸长/mm	层间温度/℃	搭接量/mm	堆焊厚度/mm
数值	30	≤200	8～10	3.8

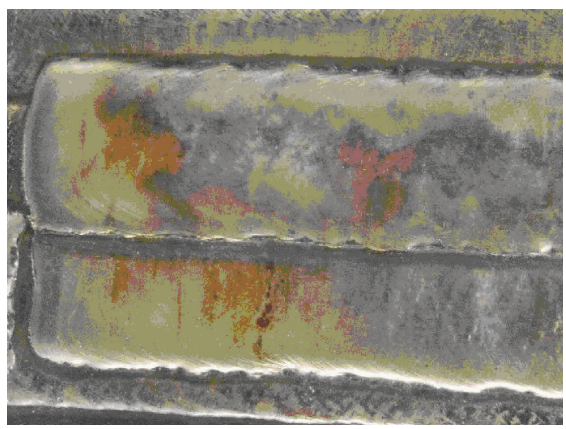

图 1 E347L 堆焊层外观

Fig. 1 Appearance of E347L deposited metal

3.2 熔敷金属化学成分

熔敷金属取样位置在 E347L 堆焊耐蚀层表面以下 1.5～2.5 mm 处，分析结果见表 8。

E347L 埋弧堆焊的熔敷金属成分完全符合 JB/T4747 标准，磁性法铁素体测量法测得的铁素体数 FN 为 5～7。

3.3 熔敷金属抗弯性能

在焊道取侧弯试样，按照国标 GB/T 2653 进行 4T 压头 180°侧弯试验，试样无裂纹出现，如图 2 所示。

表 8 熔敷金属化学成分（质量分数/%）

Table 8 Chemical composition of deposited metal (w/%)

项目	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	N
AWS 标准	≤0.08	0.30～0.65	1.0～2.5	≤0.030	≤0.030	19.0～21.5	9.0～11.0	≤0.75	≤0.75	10×C%～1.0	
JB/T4747 标准	≤0.060	≤1.00	0.5～2.5	≤0.015	≤0.025	18.0～21.0	9.0～12.0			8×C%～1.0	
第一道实测值	0.028	0.692	1.36	0.002	0.024	19.33	11.02	0.029	0.022	0.298	0.032
第二道实测值	0.030	0.699	1.30	0.002	0.024	19.19	10.98	0.036	0.026	0.259	0.036

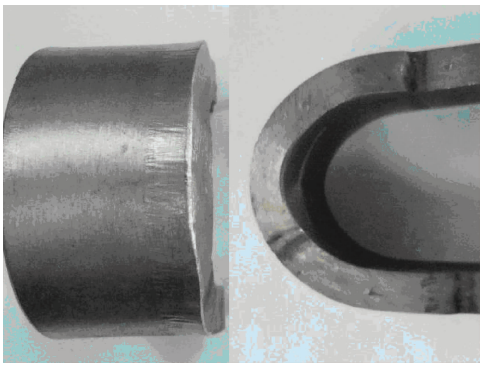

图 2 侧弯试验结果照片

Fig. 2 Photograph of the side-bending test

3.4 硬度测试

取样对母材和堆焊层进行硬度测试，测试结果列于表 9，可见 HAZ 的硬度要高于母材和堆焊层。

表 9 硬度测试结果

Table 9 The results of the hardness test

位 置	母材	HAZ
硬度/HV	161/158/164/157	250/229/244/240
位 置	E309L	E347L
硬度/HV	187/198/193/194	207/204/209/210

3.5 熔敷金属耐蚀性能

按照 GB/T4334.5，在 E347L 堆焊焊道取规格 80 mm×10 mm×4 mm 的试样两块，经过 16 小时的硫酸-硫酸铜溶液微沸腐蚀之后，再进行面弯试验，结果如图 3 所示，试样无裂纹出现。表明 E347L 堆焊的耐蚀层具有良好的耐晶间腐蚀性能，能够满足使用要求。

图 3 晶间腐蚀试验结果照片

Fig. 3 Photograph of intergranular corrosion test

4 结 论

带极堆焊与普通 MIG/MAG 焊、丝极埋弧

焊、焊条电弧焊相比具有稀释率小、熔覆效率高、熔池浅、熔覆金属的化学成分均匀、组织和性能好及焊道宽而平整等优点,焊带是影响带极堆焊质量的关键因素,经过成分及工艺设计生产的E347L 不锈钢焊接钢带表面美观,尺寸精度高。通过焊接试验堆焊层成分性能检测分析,该E347L 不锈钢焊带的工艺焊接性及堆焊耐蚀层的化学成分满足 AWS 和 JB/T4747 标准的要求;180°侧弯合格,堆焊层硬度在 204～210 HV 之间;耐晶间腐蚀性能优良;堆焊层 FN 值在 5～7 之间。完全可以替代进口材料,满足加氢反应器等化工设备的耐蚀堆焊层的要求。

国内焊带的研发及生产应用较晚,质量和品种与发达国家相比存在差距。今后应着重改进熔炼和轧制生产工艺,提高焊带的尺寸精度,改进热处理设备及工艺,调整硬度,提高表面光洁度,进一步提高产品质量以及丰富品种牌号和规格。

参考文献

[1] Martin Kubenka, Gabriellf Galazzi, Solveig Rigdal. 带极堆焊技术的应用 [J]. 电焊机, 2010, 40(8): 59-63.

[2] 张瑞华, 朱旻, 李岩. 国内不锈钢焊带的研究现状 [J]. 材料导报, 2010(5): 97-100.

[3] 张义霞, 高军松, 陈巨辉. 铬镍奥氏体不锈钢材料的堆焊工艺研究 [J]. 材料开发与应用, 2010(8): 57-60.

[4] 郭传江, 刘晓书, 赵艳春, 等. 关于不锈钢堆焊层铁素体测算方法的研究 [J]. 压力容器, 2000, 12(3): 16-19.

[5] 黄嗣罗, 何祥. 不锈钢带极堆焊工艺研究 [J]. 焊接, 1999(2): 12-16.

[6] 惠媛媛. A508－Ⅲ钢的不锈钢带极堆焊工艺[J]. 热加工工艺, 2009, 38(17): 151-152

[7] 韩越, 汤传健, 毕晓敏. 带极堆焊质量影响因素 [J]. 石油化工设备, 2006(6): 60-62.

[8] 谢彦武, 葛忠贞, 李远, 等. 影响不锈钢电渣带极堆焊质量原因的分析 [J]. 锅炉制造, 2008(3): 61-64.

[9] 陆世英. 不锈钢概论 [M]. 北京: 科学技术普及出版社, 2007: 21-39.

[10] 周维愚, 范铮. 加氢反应器不锈钢带极埋弧堆焊和电渣堆焊 [J]. 锅炉技术, 1990(11): 14-17.

[11] 成林, 董安霞, 王振雷. 国产不锈钢带极堆焊材料的堆焊工艺 [J]. 焊接, 2002(1): 25-28.

[12] 张璞临, 徐笑梅. 加氢反应器带极堆焊的质量控制 [J]. 压力容器, 1999,16(4): 49-54.

作者地址: 山西省太原市尖草坪 2 号　　030003
太钢技术中心
Tel: (0351) 3016 978
E-mail: zhangxb1@tisco.com.cn

·本刊讯·

理事介绍

黄卫东,教授,博士生导师,1956 年生。1989 年获西北工业大学工学博士学位,1991 年任西北工业大学教授,西北工业大学首批“英才培养计划”入选者。1998 年获国家杰出青年科学基金资助,由于在实验室建设上的突出贡献,黄卫东教授于 1999 年任凝固技术国家重点实验室主任,2001 年被聘为教育部长江计划特聘教授。主要学术兼职有中国铸造学会副理事长,《铸造技术》杂志主编等。主要研究领域:凝固与晶体生长理论,高性能致密金属零件的激光快速成形技术,大型复杂薄壁铸件精密铸造技术。发表学术论文 283 篇,出版国防重点专著《激光立体成形》。授权中国发明专利 9 项,国防发明专利 1 项,实用新型专利 1 项。培养硕士生 30 人,已毕业 20 人,博士生 41 人,已毕业 17 人。获得省部级科技一等奖 2 项,二等奖 3 项,三等奖 1 项。获得的主要荣誉奖有:1991 年国家教委和国务院学位委员会表彰的“做出突出贡献的中国博士学位获得者”,“航空航天部优秀青年教师”,1992 年获“国务院政府特殊津贴”,1999 年航空工业总公司“有突出贡献的优秀中青年科技专家”;2000 年国家人事部“百千万人才工程”第一、二层次人选;2001 年度中国高校自然科学二等奖,1999～2001 年度陕西省铸造基金一等奖。获 2009 和 2002 年度陕西省科学技术一等奖,2003 年“国防科技工业百名优秀博士”,2004 年“国家重点实验室计划 20 周年先进个人”,获国家科技部颁发的“金牛奖”,2005 年中国科协“西部开发突出贡献奖”,2006 年首届“陕西省优秀科技工作者”,2010 年宝钢优秀教师称号。