DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.08.007

动车组转向架构架材料的研发及应用

杨集友,王显亮,孙浩晏,沙　迪,郑魏婧
(中车长春轨道客车股份有限公司,吉林 长春 130113)

摘　要:转向架构架作为动车组主要承载结构,既受复杂交变载荷,又受环境条件影响,对其可靠性要求较高,因此其选材要求较为严苛。现阶段构架均采用欧洲和日本进口的耐候耐蚀钢板,可靠性高。近些年国产耐候耐蚀钢板的研制已取得突破性成果,试验验证其可靠性已不弱于欧洲和日本进口的钢板,但还未实现批量应用。考虑成本及进货周期,未来一段时间内国产钢板是构架应用材料的主要方向。随着车辆轻量化设计需求的逐渐提升,结合工业技术和新型复合材料研究的不断突破,传统轻质材料和新型复合材料在将来将逐渐取代传统钢板成为构架的主要应用材料。

关键词:动车组;转向架构架;材料;可靠性

中图分类号:TG142　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)08-0736-06

Research on Material Developement and Application of EMU Bogie Frame

YANG Jiyou, WANG Xianliang, SUN Haoyan, SHA Di, ZHENG Weijing
(CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130113, China)

Abstract: As the main bearing structure of EMU (Electric Multiple Units), bogie frame was not only affected by complex alternating load, but also by environmental conditions, which requires high reliability, so the material selection requirements were strict. At present, the structure was made of weather-resistant steel plate imported from Europe and Japan with high reliability. In recent years, a breakthrough had been made in the development of weather-resistant and corrosion-resistant steel plate made in China. Tests had verified that its reliability was no less than that of steel plate imported from Europe and Japan, but it had not been applied in batch. Considering the cost and purchase cycle, domestic steel plate will be the main direction of frame application materials in the future. With the gradual improvement of vehicle lightweight design requirements, combined with continuous breakthroughs in industrial technology and new composite materials research, traditional lightweight materials and new composite materials will gradually replace the traditional steel plate and become the main application materials for the framework.

Key words: EMU; bogie frame; material; reliability

构架作为动车组转向架的关键承载部件之一,将各零部件连接组成转向架总系统,承受和传递来自车体、轨道和各零部件工作和振动的各种载荷。动车组转向架构架目前主要采用H型焊接结构,其主体结构由侧梁与横梁组对焊接而成;根据转向架功能需求,分别在侧梁和横梁焊接设置有一系悬挂、轮轴定位、垂向减振器、横向减振器、抗蛇行减振器、抗侧滚扭杆、牵引电机、齿轮传动、基础制动和中央牵引等设备零部件安装座。典型转向架及构架结构如图1。

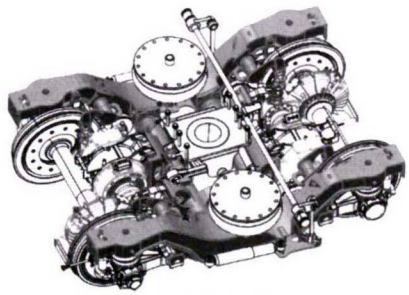


图1 动车组转向架及构架
Fig.1 EMU bogie and frame

1 构架选材依据

构架作为全寿命结构部件,其材料除需满足车辆静载下的屈服强度和动载下的疲劳强度外,还需要满足极端大气环境下防腐性能、低温环境的耐候性能。同时由于结构复杂,目前构架均采用钢板和钢管焊接而成,制造过程中涉及钢板折弯、焊接和加工工艺,因此在构架选材时也要保证材料具有较好的焊接和冷成型等工艺性能。

1.1 材料强度

动车组高速运行过程中构架不仅直接承载来自

收稿日期:2020-05-24
基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0304600)
作者简介:杨集友(1987-),陕西榆林人,学士.高级工程师.主要从事转向架焊接技术方面的工作.
电话:0431-84427138,E-mail:yangjiyou.ck@crccgc.cc

上部车体的重量，同时由于轨道不平顺以及车轮制造中无法避免的几何或尺寸公差，导致转向架运行时将承受来自与轨道接触产生的各种冲击。这些冲击载荷通过车轮和一系悬挂直接传递给构架，再加上与之相连的牵引电机、齿轮箱和基础制动装置等零部件的工作载荷和惯性振动的作用，构架在动车组运行过程中，同时承受复杂的各向交变拉压和弯曲载荷。由此在选择转向架构架材料时，材料具有良好的力学性能是构架设计的基础。

构架材料选择首先要具有较高的屈服强度，保证构架在特殊冲击载荷下，有足够的抵抗变形或破坏的能力；其次要选择较高的抗拉强度，作为构架抗疲劳设计的基础指标，以保证构架寿命期内具有足够的抵抗疲劳破坏的能力，但要注意屈强比不可过大。目前一般取屈强比 0.65~0.75，以便于发生屈服至彻底破坏的周期内，能够及时检查发现和预防，从而提高构架的安全性。因此，基于屈强比和可焊性等因素，行业内均采用屈服强度 350 MPa、抗拉强度不小于 520 MPa 级别的钢材。

1.2　可焊性

由于构架结构复杂，需通过各种板材和钢管焊接而成，因此要求构架材料具有较好的可焊性，以保证较好的焊接质量和焊缝结构强度。

可焊性取决于钢的化学成分，可用碳当量公式表示：

$$CEV=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15 \quad (1)$$

式中，CEV 为该材质的碳当量，C、Mn、Cr、Mo、V、Ni、Cu 为该元素所占百分比。

根据材料焊接性能评估，当 CEV≤0.45 时，材料可焊性较好。

1.3　耐腐蚀性

由于构架处于动车组下方走行部，其结构直接暴露在空气中，其表面虽有油漆保护，但由于运行中常受风沙甚至碎石击打，导致在油漆破坏的区域母材直接暴露于空气中，长时间受雨雪或酸碱水汽腐蚀。因此要求材料具有较好的抗腐蚀性能，以减少材料表面腐蚀对构架强度和寿命的影响[1,2]。耐候指数 I 可用来表征材料耐大气腐蚀的性能，并可根据 Legaul-Leckie 公式[3]进行简单评估：

$$I=26.01Cu+3.88Ni+1.20Cr+1.49Si+17.28P+7.29Cu\times Ni-9.10Ni\times P-33.39Cu^2 \quad (2)$$

式中，Cu、Ni、Cr、Si、P 为该元素所占百分比。

耐候指数 I 越大，材料耐蚀性越好。目前也采用周期浸润腐蚀试验测试腐蚀速率，一般要求腐蚀速率≤65%。

1.4　低温韧性

目前，我国动车组运营线路较广，从北至南运营环境温度范围从 -40 ℃到 +50 ℃。一般要求运营环境低于 -25 ℃时，属于高寒动车组，其零部件的设计和寿命评估均需按照低温要求进行。高寒动车组主要运营于我国北方地区，以适应冬季的低温环境（目前也执行长交路的跨线运营），均要求按照 -40 ℃进行设计，因此，零部件均需按照此低温要求进行试验验证。对于俄罗斯或北欧地区，低温要求则达到 -60 ℃。

构架作为主要承载件，需验证其材料的低温韧性来保证结构可靠性。目前要求钢板材料在 -40 ℃时，冲击功值为 27 J 与常温下相当。

1.5　冷加工性能

由于构架大部分板材需焊前冲压后成型，因此还需要具有良好的延展延伸性。一般屈强比小于 0.7 时，冲压工艺性良好。

当然，除以上主要性能指标外，构架在实际制造中还需关注材料成本和产品质量，包括材料的晶粒度和夹杂物等，以保证材料性能的一致性。

2　构架材料应用现状

目前，国内外动车组转向架构架的钢材都采用优质或特殊优质钢，已不再采用普通碳钢。现在构架用钢板材料主要应用有欧系 S355J2W、P355NL1[3]和日系 SMA490BW。详细应用见表 1，化学成分和机械性能对比见表 2 和表 3。

表 1 动车组转向架构架主要材料型号
Tab.1 Main material of EMU bogie frame

钢板牌号	执行标准	应用情况	适用环境温度
SMA490BW	JIS G 3114	日本、CRH2/CRH380A 系列	0 ℃
S355J2W	EN10025-5	欧洲、CRH3C/380B/380C 系列、CR400/CR300 系列	-20 ℃
P355NL1	EN10028	欧洲、CRH1/CRH380D 系列	-40 ℃

基于上述 3 种牌号钢板的化学成分对比，由于材料的制造工艺不同，欧系 S355J2W、P355NL1 和日系 SMA490BW 的主要差异在合金元素的添加比例有较小差异，而 P355NL1 材料主要基于压力容器用钢需求，对有害元素 S、P 控制较为严格，同时作为非耐大气腐蚀钢材，Cu、Cr、Ni 元素添加相对较少。

基于上述 3 种牌号的钢板机械性能对比，屈服强度均达到 355 MPa 以上，抗拉强度达到 470 MPa 以上，强度均满足构架的使用条件。但 SMA490BW

表 2 各材料化学成分对比 w(%)
Tab.2 The chemical composition of material

牌号	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	Mo	Ni
S355J2W	≤0.19	≤0.55	0.45~1.6	≤0.035	≤0.035	/	0.35~0.85	0.2~0.6	≤0.35	≤0.7
SMA490BW	≤0.18	0.15~0.65	≤1.4	≤0.035	≤0.035	/	0.45~0.75	0.3~0.5	/	0.05~0.3
P355NL1	≤0.18	≤0.5	1.1~1.7	≤0.025	≤0.015	≤0.012	≤0.3	≤0.3	≤0.08	≤0.03

牌号	V	Ti	Nb	Zr	Als	Fe	附注
S355J2W	0.01~0.14	0.01~0.12	0.01~0.065	≤0.17	≥0.02	其余	---
SMA490BW	/	/	/	/	/	其余	Mo+V+Ti+Nb≤0.15
P355NL1	≤0.1	≤0.03	≤0.05	/	≥0.02	其余	Cr+Cu+Mo≤0.45;V+Ti+Nb≤0.12

表 3 各材料主要力学性能对比
Tab.3 The main mechanical properties of each material

牌号	屈服强度 R_e/MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A (%)	冲击功 K_{V2} /J
S355J2W	≥355	470~630	≥20	≥27(-20 ℃)
SMA490BW	≥365	490~610	≥21	≥27(0 ℃)
P355NL1	≥355	470~610	≥20	≥27(-40 ℃)

没有低温冲击功的要求,S355J2W 仅对 -20 ℃条件下的低温冲击有要求,而实际应用中 S355J2W 材料 -40 ℃条件下的冲击韧性也能满足≥27 J,目前也在 CRH380BG 高寒动车组中经过大批量验证。

除上述 3 种应用较广的材料外,也有如早期欧洲采用的 S355J2 以及极寒地区如俄罗斯或北欧地区应用的 P355NL2(-50 ℃)钢板材料。根据近些年 S355J2W 材料的广泛应用,最新 2019 版的 EN10025-5 标准中也增加两种牌号 S355J4W 和 S355J5W,以满足 -40 ℃和 -50 ℃环境应用需求。

3 构架材料国产化研究

依托国家科技支撑计划“中国高速列车关键技术研究及装备研制”,基于 EN10025-5 标准,由各主机厂、中科院金属所、鞍钢、武钢、宝钢等单位共同研制开发了国产耐大气腐蚀钢板 S355J2W(H)[4]。

3.1 材料性能测试

国产 S355J2W(H)化学成分和力学性能与进口 S355J2W 对比如表 4 和表 5。

其中表中 EN10025-5 为《热轧产品钢结构 第 5 部分:改良耐候结构钢交货技术条件》,TJ/CL413 为《铁道客车转向架用耐大气腐蚀热轧钢板暂行技术条件》。

通过上述化学成分对比,国产钢板依据自身工艺特点,对化学成分指标进行了微调,主要收窄了 C、Si、Mn 和 S 元素的控制范围。实际产品化学成分显示,进口和国产对化学成分控制的侧重点不同,国

表 4 S355J2W 钢板化学成分检测结果 w(%)
Tab. 4 Chemical composition testing result of S355J2W steel

类别	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
EN10025-5	≤0.19	≤0.55	0.45~1.60	≤0.035	≤0.035	0.35~0.85	0.20~0.60
进口钢板 1	0.15	0.398	0.94	0.008	0.003	0.43	0.26
进口钢板 2	0.142	0.385	0.91	0.007	0.011	0.42	0.26
进口钢板 2	0.143	0.387	0.93	0.007	0.002	0.45	0.27
TJ/CL413	0.05~0.12	0.20~0.40	0.80~1.60	≤0.030	≤0.006	0.35~0.85	0.25~0.40
国产钢板 1	0.064	0.031	1.25	0.012	0.003	0.45	0.28
国产钢板 2	0.078	0.032	1.24	0.011	0.003	0.47	0.3
国产钢板 3	0.077	0.29	1.23	0.012	0.002	0.48	0.29

类别	Ni	Mo	Zr	V	Ti	Nb	Als
EN10025-5	≤0.70	≤0.35	≤0.17	0.02~0.14	0.01~0.12	0.010~0.065	≥0.020
进口钢板 1	0.22	0.046	0.003	0.026	0.003	0.014	0.035
进口钢板 2	0.22	0.03	0.002	0.023	0.002	0.013	0.034
进口钢板 2	0.23	0.019	0.002	0.022	0.002	0.014	0.036
TJ/CL413	0.15~0.65	≤0.30	≤0.15	≤0.12	≤0.12	≤0.05	≥0.015
国产钢板 1	0.2	0.004	/	0.034	0.015	0.019	0.037
国产钢板 2	0.2	0.014	/	0.033	0.012	0.015	0.034
国产钢板 3	0.23	0.004	/	0.036	0.013	0.021	0.031

表 5 S355J2W 钢板力学性能检测结果

Tab.5 Mechanical properties testing result of S355J2W steel

类别	屈服强度 R_e/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	伸长率 A (%)	冲击功 K_{v2} /J		
EN10025-5	≥355	470~630	≥21		≥27(-40 ℃)	
进口钢板 1	440	561	27.6	81	145	124
进口钢板 2	415	581	26.5	118	126	62
进口钢板 2	417	551	28.7	197	206	215
TJ/CL413	≥355	490~630	≥21		≥34(-40 ℃)	
国产钢板 1	443	525	30	365	333	360
国产钢板 2	403	521	29.5	190	185	77
国产钢板 3	445	540	30.5	238	245	264

产钢板相较进口，其适当降低了 C、Si 元素含量，增加了合金元素 V、Ti、Nb 含量。

进口材料与国产标准要求基本一致，但在低温冲击功方面，国产标准要求略高，但差异不大。从实际供货产品抽样的性能对比看，进口材料与国产材料的性能相当。另外对国产钢板进行折弯测试，其弯曲性能满足要求，如图 2。

图 2 S355J2W(H)不同厚度钢板冷弯试验

Fig.2 Cold bending test of S355J2W(H) steel with different thickness

对国产 S355J2W(H)钢板的耐腐蚀性能、晶粒度及夹杂物等进行了的对比测试，结果显示各指标与进口材料相当，如图 3、表 6、图 4。

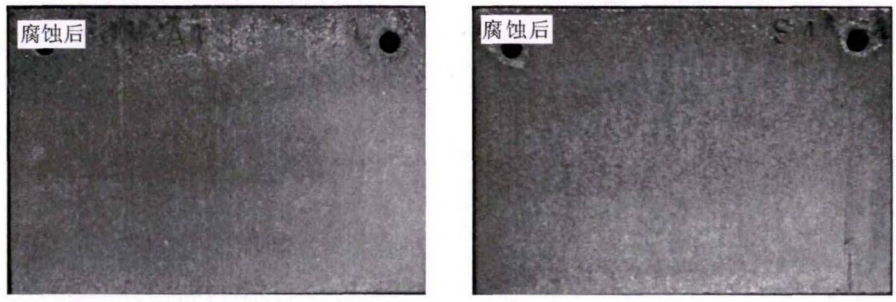
表 6 钢板夹杂物等级检测对比

Tab.6 Detection and comparison of steel inclusion grade

夹杂物种类	国产钢板		进口		技术条件要求	
	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系
A 类（硫化物）	无	0.5	无	0.5	无	≤2.0 级
B 类（氧化铝）	无	1.0	无	1.0	无	≤2.0 级
C 类（硅酸盐类）	无	1.5	无	1.5	无	≤2.0 级
D 类（球状氧化物）	无	1.0	无	2.0	无	≤2.5 级

3.2 国产钢板焊接构架测试验证

采用国产化钢板焊接制造的构架，先期进行台架强度试验，顺利通过 1 000 万次疲劳试验，未发现



(a)国产S355J2W(H)相对腐蚀速率(58%)　(b)进口S355J2W相对腐蚀速率(57%)

图 3 钢板腐蚀性能测试对比

Fig.3 Comparison of corrosion performance of steel

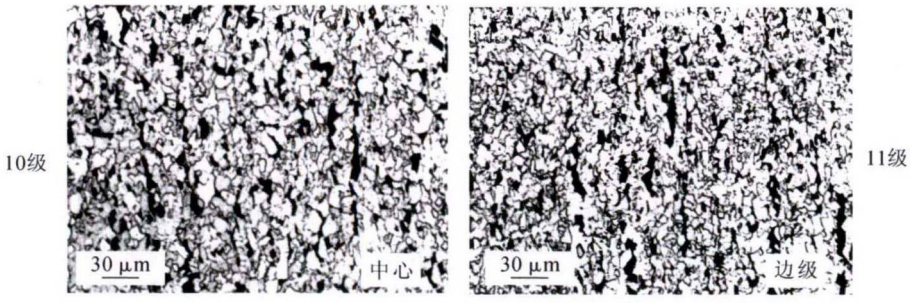


图 4 钢板晶粒度检测结果

Fig.4 Comparison of corrosion resistant performance of steel

材料或焊接接头存在破坏或裂纹。后期国产钢板构架装车进行线路考核,并对构架关键焊缝或母材进行了动应力测试,以实测应力进一步评估国产钢板的可靠性。在沪昆线和哈大线进行动应力测试,测试结果表明动、拖车构架各区域的应力水平均在许用范围内,满足疲劳强度要求。

3.3 国产钢板应用现状

基于国产 S355J2W(H)钢板研究成果,2014 年以来,该钢板已经在铁路客车和地铁车辆经过批量应用验证,现阶段已基本全部实现国产化。同时动车组转向架构架国产钢板的装车应用也正在稳步推进中,但由于动车组速度高、风险大,目前仍处于小批量装车验证中。

3.4 国产钢板技术发展

现阶段基于我国基础工业体系的实际现状以及国家产业升级的战略布局,传统钢铁材料作为工业基础学科,仍将是未来一段时间内重点攻坚发展的核心产业。转向架构架作为动车组的核心部件,其长寿命、高可靠性、耐候耐蚀性以及优良的加工性能,未来仍是技术发展的关键项点。很长一段时间内,动车组转向架构架材料的国产化仍将是主要方向,主要涉及以下几个方面:

(1)国产耐候耐腐蚀钢板批量应用,实现构架材料的完全国产化,如 S355J2W(H)钢板材料的批量应用,以替代进口。

(2)基于现有研究成果,并结合我国钢铁冶金技术特点,进一步优化提升国产耐候耐腐蚀钢材制造技术和产品质量,实现该材料全过程的中国标准体系建设和应用。

(3)基于高铁技术向外输出的潜在需求,推进苛刻环境下构架钢板材料的技术研发,如北欧和俄罗斯等极寒地区(-60 ℃)、东南亚高温潮湿的沿海地区以及中东高温风沙地区等苛刻环境下钢板材料的适应性和可靠性[4]。

因此,需继续深度发展钢板材料技术,形成技术体系,才能与欧洲和日本形成技术竞争力,实现成本和竞争优势。

4 构架新材料技术发展

基于节能环保的需求,转向架轻量化是动车组未来技术发展的必然趋势,因此基于新技术或应用新材料实现转向架构架轻量化将成为主要手段[5-9]。

一方面,随着制造技术的不断突破,使铝合金、钛合金等轻质金属材料的应用具备可能性[6],可大幅降低零部件的重量,实现轻量化需求。目前动车组铝合金材料的应用方面正逐渐从车上延伸至车下承载部件,部分零部件如联系枕梁、齿轮箱箱体、牵引拉杆和牵引梁等已实现成熟应用。目前铝合金和钛合金材料在构架的应用也有部分单位已经开始了相关的研究。

另一方面,随着新材料在航空、汽车、船舶及其他工程领域的应用,使得新材料在结构设计、制造工艺、服役性能及维护等多方面积累了丰富经验,为新材料在轨道车辆领域应用提供了借鉴。目前国内外诸多企业和机构已对碳纤维复合材料在车辆的应用开展了系统研究,涉及车辆内装、车上设备以及转向架构架等承载部件,如日本川崎重工的 efWING 转向架[5]、英国雷丁大学 GFRP 转向架和我国中车四方股份研制的新一代碳纤维复合材料地铁转向架等。随着技术积累,未来碳纤维复合材料将是构架新材料应用研究的新方向。

5 结束语

由于动车组高速、高可靠性的技术需求,现阶段转向架构架钢板材料仍依靠进口,但正在稳步推进国产化替代工作。现阶段基于欧洲标准的国产化耐候钢板已经研制完成,并在低速地铁和客车转向架中已经实现批量应用,也将逐步在动车组转向架实现批量应用,最终将完全替代进口。

而针对转向架构架材料的技术发展,基于高可靠性和安全性考量,未来国产耐候钢板在相当长一段时间内仍是构架主要材料,且应用前景可观。但需进一步提升耐候钢板的技术研究,加快标准体系建设,才能保证未来在国际市场技术竞争力。

构架新材料的应用正在进行探索和突破,将是未来动车组轻量化设计的主要途径之一,也是未来构架技术发展的主要方向之一。但正如前所述动车组高速运营的安全需求,构架材料可靠性始终是第一位的,因此新材料的技术发展过程会持续较长时间周期。

参考文献:

[1] 朱藤辉,刘丽,王高见,等. 高速列车焊接转向架构架材料及性能研究进展[J]. 电焊机,2018,48 (6): 1-7.

[2] 杨松柏,陆强. 客车焊接转向架腐蚀现状及对策[J]. 技术与应用,2013 (8): 47-51.

[3] 何博,胡学文,王海波,等. 耐候指数对低碳钢耐大气腐蚀性能的影响[J]. 安徽冶金,2015(3): 13-15.

[4] 中国铁路总公司. 铁道客车转向架用耐大气腐蚀热轧钢板暂行技术条件.TJ/CL413-2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.

[5] 丁叁叁,田爱琴,王建军,等. 高速动车组碳纤维复合材料应用研究[J]. 电力机车与城规车辆,2015 (38): 1-8.

[6] 虞大联，邓小军，刘韶庆，等. 复合材料技术在转向架中的应用[J]. 电力机车与城规车辆，2015 (38)：17-22.

[7] 李辰，许淑萍，张伟龙，等. 复合材料在轨道交通转向架中的应用[J]. 纤维复合材料，2019 (3)：6-11.

[8] 门永林，楚永萍，冯遵委. 纤维增强复合材料在转向架上的应用研究[J]. 铁道机车车辆，2019 (39)：92-95.

[9] 李梁京，王继荣，李军. 新型轻材料在转向架部件中的应用[J]. 青岛大学学报(自然科学版)，2017 (30)：42-46.

(上接第 732 页)

[17] Hunt J D. Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites and eutectic [J]. Materials Science and Engineering, 1984, 65(1): 75-83

[18] Zhu M F, Hong C P. A modified cellular automaton model for the simulation of dendritic growth in solidification of alloys [J]. ISIJ International, 2001, 41(5):436-445.

[19] Flood S C, Hunt J D. Columnar and equiaxed growth:I-A model of a columnar front with a temperature dependent velocity [J]. J Crys Growth,1987,82(3): 543-551.

[20] Flood S C, Hunt J D. Columnar and equiaxed growth: I-I-E-quiaxed growth ahead of a Columnar front[J]. J Crys Growth, 1987, 82(3):552-560.

[21] Hunt J D. Steady state columnar and equiaxed growth of dendrites and eutectic [J]. Materials Science and Engineering,1984,65 (1): 75-83.

[22] 张博，朱花，赵晓东，等. 空心钢锭凝固过程缺陷的模拟研究[J]. 太原科技大学，2018，39(1):35-41.

[23] 松野淳一. 锻造用大型中空钢锭的凝固与偏析 [J]. 英在田摘译. 大型铸锻件，1983(4):66-71.

[24] 许天华. 空心钢锭的制造技术[J]. 一重技术，2004 (2)：28-31.

[25] 宋迎德，郝海，谷松伟，等. 枝晶尖端生长速度对凝固组织数值模拟的影响研究 -Ivantsov 函数近似方式的确定 [J]. 铸造技术，2011，32(1):34-38.

(上接第 735 页)

比，可以看出半调式斜流泵叶轮叶片加工制造的问题得到了有效的解决，保证了设计要求。

7 结论

通过完善铸造工艺和机加工工艺，保证了叶片加工精度的问题；叶片定位销孔设计错误时，面临着无工艺卡头并且要解决加工定位销孔的问题，通过工装胎具的设计，解决了装卡的问题。通过解决半调式斜流泵在试制过程中的各种问题，编制半调式斜流泵叶轮典型制造工艺，为其加工制造提供了宝贵经验。

参考文献：

[1] 成大先，王德夫，刘世参，等. 机械设计手册(第五版)[M]. 北京：化学工业出版社，2011.

RX 榕霞®

福建省榕霞石英砂有限责任公司
漳浦县榕霞矿业开发有限公司

公司简介
Company

我公司创办于1976年，是国内较早从事石英砂系列产品生产、销售一体化经营的综合性企业。公司拥有丰富的优质石英砂矿产资源，矿区面积1000多亩，年开采量可达40万吨。公司生产的石英砂产品具有SiO2含量高，含泥量低、角形系数小等特点，是高品位的天然石英砂。

"榕霞"天然石英砂系列产品现广泛应用于国内铸造行业、机械制造行业、全国各水处理行业及玻璃制造、钢铁冶金行业等，质量达到国际先进水平。公司已通过ISO9001、ISO14001管理体系认证，先进的生产工艺及完善的品质保障体系确保了产品质量的长期稳定，专业的销售团队为客户提供优质完善的售后服务。

产品主要理化性能

Sio2 > 98%	角形系数 < 1.3
灼烧减量 < 0.5%	含泥量 < 0.3%
含水量(干砂) < 0.2%	耐温 > 1700℃

地址:福建省晋江市金井　电话:0595-85332410 85332410　传真:0595-85331410　www.rxsgy.com　E-mail:rxsgy@163.com