

特约专栏

钛合金及其在舰船装备上的应用现状与趋势

常 辉¹, 王向东², 周 廉^{1,3}

(1. 南京工业大学, 江苏 南京 210009)

(2. 中国有色金属工业协会钛锆铪分会, 北京 100814)

(3. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘 要: Ti合金作为一种质轻、高强、耐腐蚀的优异轻型结构材料,能够显著提升舰船装备技战术性能,增强海洋安全保障能力。目前,舰船用Ti合金材料技术主要集中在俄、美、法、日、中等国家,其中俄罗斯、美国和法国在军用舰船用Ti的研究和应用方面处于世界领先水平,而日本的民用舰船用Ti合金方面已经进行了很好的尝试。文献资料表明,Ti合金在舰船上主要用来制造耐压壳体、热交换器、冷凝器、核反应堆外壳以及配套管道系统,未来Ti合金在使用量和使用部位上还将会不断扩大,新的先进加工成形技术及焊接技术仍将得到充分重视,大力降低Ti合金部件的制造成本是目前国外发展的重点方向。近年来我国Ti工业得到了迅猛的发展,材料加工和成形技术以及装备水平得到了很大的提高,而且Ti合金成本也降到了历史最低水平,为Ti合金在舰船上的应用带来了良好的机遇。因此,我国应充分重视“海洋金属”Ti在舰船乃至海洋重要工程装备上的应用研究和技术发展,以创新和超越的思路与理念为舰船提供安全性、可靠性和全寿命的保障,为实现海洋强国的战略目标及海洋经济创新发展提供重要的物质支撑。

关键词: Ti合金; 舰船; 应用; 现状; 趋势

中图分类号: TG 146.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2014)09-0603-05

Present Situation and Development Trend of Titanium Alloy and Its Applications in Ships

CHANG Hui¹, WANG Xiangdong², ZHOU Lian^{1,3}

(1. Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

(2. China Nonferrous Metals Industry Association Titanium Zirconium & Hafnium Branch, Beijing 100814, China)

(3. Northwest Institute for Non-Ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: As a lightweight, high strength, excellent corrosion resistance structural materials, titanium can significantly improve the technical and tactical performance of ships equipment, and enhance life-time security capabilities. Currently, titanium alloy and its manufacture technologies for ships utilization are mainly concentrated in Russia, the United States, France, Japan, China etc. Russia, the United States and France have made remarkable progress known in titanium research and applications for warships, and Japan is well known by titanium applications in civil ships. Literature shows that titanium and titanium alloys are mainly used for shell, heat exchanger, condensers, nuclear reactors shell as well as piping systems. Titanium and titanium alloy used for ships will continue to expand in the future, and some new advanced processes and technologies will be paid much more attention in order to reduce the cost of titanium parts manufacturing. In recent years, Chinese titanium industry has made a great development, and titanium manufacture processes and forming technologies as well as its equipment levels have greatly improved, and also the cost of titanium alloy has dropped to historic lowest point, that provides the massive application of titanium alloy in ship with a great opportunity. We should pay sufficient attentions to research and development of titanium alloy, which was called “Marine Metal”, and try to give a strong support to the safety, reliability and security of the ships during its whole life.

Key words: titanium alloy; ship; application; current situation; tendency

收稿日期: 2014-06-12

基金项目: 中国工程院战略咨询项目(2014-XZ-8)

第一作者及通讯作者: 常 辉, 男, 1969年生, 教授, Email:
ch2006@njtech.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.09.09

1 前 言

随着产业化发展的加速和城市化水平的提高,人类面临的资源短缺问题越来越严峻。据统计,陆地主要矿

产资源的可开采年限大多在 30 ~ 80 年间,而石油、天然气的消耗只有 100 余年时间。纵观全球,现有陆地能源与矿物资源的枯竭,迫使人们不得不把目光投向占地球表面积 70.8% 的海洋。因此,大力发展海洋资源,发展海洋经济已成为许多国家,特别是发达国家和新兴经济体的共同目标。

要想建设海洋强国,不仅要大力发展海洋经济,还要建设强大的海军。海军对维护海洋权益和国防安全,将发挥巨大作用。在现代战争朝着“陆海空天”一体发展的时代,海洋可为国家提供巨大的战略空间。

Ti 金属质轻、高强、耐蚀,特别耐海水和海洋大气腐蚀,是优异的轻型材料,被称为“海洋金属”。Ti 及 Ti 合金在海洋工程中具有广泛的用途,特别适于做轻型海工装备,对提高海洋工程装备的作业能力、安全性、可靠性具有十分重要的意义,是建设海洋强国的重要战略材料。本文将简述 Ti 合金的特点及其对舰船装备的重要战略意义,介绍了 Ti 合金在国内外舰船装备上的应用现状及发展趋势,同时分析我舰船装备 Ti 合金的发展机遇,提出了我国舰船用 Ti 合金的发展方向 and 主要问题。

2 Ti 合金特点及其对舰船装备的重要战略意义

2.1 Ti 合金特点

Ti 合金作为一种优异的海洋金属,最突出的特点是耐蚀性强、密度低、比强度高,同时兼具很高的抗冲击性能。Ti 合金无磁性且成形、加工、焊接性能好,具有优良的中子辐照衰减性能。这使得 Ti 合金对于各类海洋工程有广泛的适用性^[1],主要表现为以下方面。

优异的海水耐蚀性能 Ti 表面可形成氧化膜使 Ti 钝化而不受腐蚀。Ti 的钝化膜具有很好的自愈合性,当其破损之后可以迅速自动修复,形成新的保护膜。Ti 在氯化物水溶液和酸性烃类化合物中具有优异的抗腐蚀性,可以使海洋工程装备与整体结构同寿命设计,减少维护成本。同时可以减少腐蚀裕量设计,大幅降低装备的结构质量,并且无需涂层保护,简化了制造工艺,降低了制造成本,保护了海洋环境。表 1 比较了几种船用金属材料在流动海水中的腐蚀速率,可见 TC4 Ti 合金与其它金属材料相比几乎不发生任何腐蚀^[2-3]。

高的比强度 高的比强度可以使设备设计更加紧凑,大幅减小结构质量,提高设备的技术水平,使舰船的航速、浮力及机动性得到提升,同时还可以提高装备的安全性。表 2^[4]是比较了几种舰船用金属材料的屈服比和比强度, Ti 密度比钢小 40%,但强度与钢相当,

屈服比和比强度在几种常用舰船材料中居首位。

高的抗冲击及抗疲劳性能 Ti 合金能够提供设备抗静载荷及动载荷的能力^[4],同时提高了设备抗海水周期性冲击的能力,提升了安全性能。从表 3^[5]中可以看出, Ti 及 Ti 合金的抗冲击性能最佳。

表 1 几种船用金属材料在流动海水中腐蚀速率的比较 (mm/a)

Table 1 Comparison of corrosion rates of several marine metallic materials in the flowing seawater (mm/a)

Velocity of flow/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1Cr18Ni9	LF2	B30	TC4
3.0	0.029	0.008	0.011	0
7.5	0.033	0.066	0.027	0
11	0.070	0.260	0.058	0

表 2 几种舰船用金属材料的屈服比和比强度的对比

Table 2 Comparison of yield-tensile ratio and specific strength of several marine metallic materials

Materials	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$R_{p0.2}/R_m$	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$R_{p0.2}/\rho$
TP2	206	60	0.29	8.93	6.72
B10	290	140	0.48	8.91	15.7
Stainless steel by HDR	750	400	0.53	7.8	51.3
TA2	440	320	0.73	4.5	71.1
TA24	730	630	0.86	4.5	140

表 3 几种船用合金的抗冲击性能

Table 3 Attack resistance properties of several marine alloys

Brand	Impact resistance/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Ti Gr. 9	0.24
Ti Gr. 2	0.16
Inconel 625	0.14
Monel 400	0.06
316SS	0.05
70/30 CuNi	0.04

无磁性 Ti 合金没有磁性,既可以提高探测仪器及工具的抗磁干扰,又能保证信号的准确性,同时减小了设备的磁物理场效应,增加了隐蔽性。

优良的塑性成形及加工性能 Ti 合金可采用传统的加工成形技术生产板材、管材及精密铸件,具有良好的机械加工性能,热膨胀系数低,可焊性好,焊后强度及塑性可保持在 90% 以上,有时焊后无需热处理,提高了生产效率^[6-8]。

优良的中子辐照衰减性能 在同等强度的中子辐照条件下,普通钢材受到辐射需要近 100 年才能逐渐衰减,而 Ti 合金的辐照衰减性能是其 10 倍以上,即 8 ~ 10 年后就可以安全回收,这对核废料的掩埋、核动力设备的回收以及生态环境的保护具有非常重要的意义^[9]。

2.2 Ti合金对舰船装备的重要战略意义

基于Ti合金的优异性能,使用Ti合金可以大幅降低舰船装备的结构质量,在实现舰船高机动性的同时,还可以保障其高可靠性和安全性。与传统材料舰船相比,既实现了同寿命服役,极大地降低舰船装备的维护时间和成本,又能保障装备的战斗力。因此,Ti合金是保障舰船装备性能和技战术水平的重要支撑材料,舰船装备Ti合金化是海洋强国战略的必然选择。

3 Ti合金在国外舰船装备上的应用现状及发展趋势

海洋工程用Ti合金属于高技术产业,目前仍集中在少数发达国家和地区,俄、美、法、日、中属主要国家。其中俄罗斯、美国和法国在军用舰船用Ti的研究和应用方面处于世界领先水平,而日本在民用舰船用Ti合金方面也取得了很大的进展。Ti合金在舰船上主要用来制造耐压壳体、热交换器、冷凝器、核反应堆外壳以及配套管道系统^[7-10]。

3.1 在船体结构方面的应用

俄罗斯在潜艇用Ti方面最先进,率先研制出全Ti壳核潜艇。早在1968年,前苏联(俄罗斯)建造了世界上第1艘Ti合金多功能核动力潜艇(Papa,图1),排水量5 200 t,长度100 m,是Ti合金应用于大型海装结构革命性的一步。1974~1981年前苏联相继建造了一系列全Ti壳体核动力潜艇(Alfa级到NATO),排水量2 300 t,长80 m。1983年建成潜深最大的Ti壳体核动力潜艇“Komsomolets(共青团)”号,排水量达到5 600 t,长度120 m。1983~1992年建成了“Sierra”级到“NATO”系列Ti合金壳体核动力潜艇,排水量6 300 t,长度110 m。

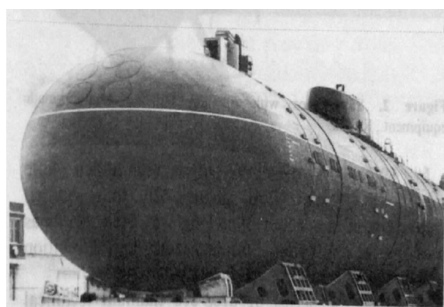


图1 前苏联“Papa”级核潜艇照片

Fig. 1 Photo of “Papa” nuclear submarine produced by Fore-Soviet

美国在舰船用Ti方面也表现突出,20世纪90年代中期开始在LPD17两栖船坞运输舰的上层建筑区大量使用了Ti,为其减轻了约50%的质量,有效降低了运输舰上部质量,提高了稳定性。另外,在LPD也已经

将CP-Ti用于海水管路系统,其管径为12.7~300 mm,总长度达到3 650 m以上。同时,美国2003年开始研究Ti合金在CVN航母甲板上应用,利用Ti代替钢,CVN航母甲板的重量减轻了1 545 t,而Ti应用于航母甲板仅需评估杂质最大含量水平对动态断裂韧性的影响。而Ti-64合金也已经成功应用于航母的主桅平台。

日本率先开发全Ti民用船只,主要包括游艇和捕鱼船。其特点是质量轻,速度快,燃油少,CO₂排量少,不需要表面涂层,附着物容易清理,并且减振性与降噪性均良好。1997年研制了“Titan lady”号全Ti游艇,重达5.3 t,长12.5 m。1999年建造了“Aki Ma Ru”号全Ti捕鱼船,重4.6 t,长14.0 m。

3.2 在舰船动力系统方面的应用

Ti合金在舰船动力系统中,主要应用于核反应堆壳体、冷凝器、热交换器及配套的管路系统。

俄罗斯的整体型核反应堆壳体一般采用Ti-Al-V-Zr系Ti合金,所用Ti合金筒形件的直径约为2 750~3 500 mm,最小长度480 mm,最大长度1 600 mm,同时也使用了厚度为160 mm的板材^[9]。前苏联早在20世纪60年代就成功研制出Ti合金热交换器,其中仅用于核动力热交换器的型号就多达12个,生产了约60台,服役年限为5~25年。而传统的船用热交换器更是生产了18个型号的6 300台,服役年限为25~35年。法国的DCNS公司也成功研制出了核动力潜艇换热器,其中壳体和管道为铸造成形的Grade 2纯Ti,管板采用了Grade 4纯Ti。该公司生产的核动力潜艇冷凝器重约20 t,用Ti量Ti达到45%,其中外壳采用Grade 23 Ti合金,管束为Grade 2纯Ti,管板采用了Grade 4纯Ti。此外,美军的DDG51驱逐舰也使用CP-Ti代替Cu:Ni为90:10的Cu-Ni合金来制造热交换器^[12-13]。

Ti合金在舰船的管路及其他系统上的应用也极为广泛,美海军在LPD 17两栖船坞运输舰的海水配管系统上使用了Ti,直径为12.7~304.8 mm,全寿期节省成本近1 700万美元。美军自由级濒海战斗舰(LCS)主燃汽轮机排气管道(进气口)也通过使用Ti合金和高速热丝钨极氩弧焊(GTAW)等方法,重量减少达8 100~9 900 kg,制造成本及全寿命成本显著降低^[13-14],如图2所示。在一些其他系统上,美军的CG47导弹巡洋舰、DDG51导弹驱逐舰以及CVN航母的润滑油冷却器、自动补偿装置冷却器以及发动机套冷却器均采用了Ti合金制造。同时,美军将Grade 2与Grade 5 Ti用于制造CG47和DDG51的消防泵。未来,美军还计划在废油、洒水以及污水系统方面使用Ti合金^[15]。

目前,国内舰船装备用Ti主要包括:潜艇的主冷



图2 美军自由级濒海战斗舰(LCS)主燃气轮机Ti制排气管道照片(取自 Titanium Fabrication Corp. 网站)

Fig. 2 Photo of main gas turbine exhausting ducts made by titanium in Freedom-LCS of U. S. Navy

凝器、Ti 合金鱼雷发射水缸、核动力压水堆一回路系统危急冷却器、声纳导流罩、Ti 合金螺旋桨、柴油机排烟管道及通海管路系统、相关管路及泵阀系统、深潜器耐压壳体及辅助系统。总体来说,舰船装备用Ti的范围和数量还非常有限^[16-21]。表4^[22]是我国创新研究的几种舰船用Ti合金及性能指标。

总的来说,Ti合金凭借其优异的性能,在舰船装备上已经取得了较为广泛的应用,为装备的高性能化提供了重要的保障。未来,舰船装备用Ti合金材料及技术的研究将会进一步得到加强,Ti合金的低成本先进加工

和成形技术研究也必将得到重视和开发,舰船装备上Ti的使用部位和用量必将会进一步扩大。

4 我国舰船装备用Ti的机遇及发展方向

近10年来,我国Ti工业和技术得到了迅猛发展,Ti加工产品产量从2005年到2012年产量提升了5倍多。在铸锭、锻造和板材生产方面,我国已装备了完善和先进的Ti及Ti合金生产线,技术水平达到世界先进水平。在铸锭生产方面,装备了先进的混布料系统、VAR炉(Max. 15 t)、EB炉及PAM炉,最大扁锭铸锭达到370 mm×1 340 mm×5 000 mm,满足了海洋工程用Ti合金锭型的要求。在锻造生产方面,装备了万t级自由锻、1 000~5 400 t快锻机等先进设备,可生产 $\phi 14 \sim 600$ mm的锻棒。在板材生产方面,可生产最大规格达到 $\delta 0.5 \sim 75$ mm×2 700 mm×2 700 mm板材。在Ti及Ti合金管材方面,已装备了完善的Ti及Ti合金挤压管、轧制和焊管生产线,可生产 $\phi 2 \sim 200$ mm的薄壁及厚壁管材,最大长度达到15 000 mm。至于Ti及Ti合金精密铸件生产,也已基本具备了相关的生产技术和装备,可生产的最大整体Ti合金铸件可达1 500 mm×400 mm,最小壁厚为0.8 mm,单重达到近800 kg。

表4 我国创新研制的几种舰船用Ti合金及性能指标

Table 4 Several marine titanium alloy creatively developed in our country and its performance indexes

Trademark	Nominal composition	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	Z/%	K_{IC} /MPa·m ^{1/2}
TA22 (Ti-31)	Ti-3Al-1Mo-1.4Zr-0.8Ni	637	490	18	35	-
TA23 (Ti-70)	Ti-2.5Al-2Zr-1Fe	700	600	20		-
TA24 (Ti-75)	Ti-3Al-2Mo-2Zr	730	630	13	25	-
TA31 (Ti-80)	Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo	900	818	13	36	-
Ti91	Ti-3Al-1V-1Zr-1Fe	700	660	20	35	-
Ti-B19	Ti-3Al-5Mo-5V-4Cr-2Zr	1 250	1 150	6	20	>70

尽管我国在舰船装备用Ti领域也取得了一些成果,但是与国外相比,我国舰船用Ti起步晚,规模小,总体上处于起步阶段。俄罗斯先进舰船用Ti占舰船结构重量的15%~20%,与之相比,我国的舰船用Ti还不足结构重量的0.1%,发展严重滞后。我国舰船装备用Ti存在许多空白,在舰船上的应用大多属于小型、低端产品,还有很多核心技术尚未掌握,也未形成系统。我国舰船装备用Ti的基础性工作也相对薄弱,Ti应用的设计规范和标准没有完善,设计、应用与材料的研发脱节较为严重。另外,我们没有建立专有的舰船装备用Ti合金设计标准和规范,缺乏专有的检验、评价和测试平台。同时,由于Ti合金制造成本高,应用十分有限,使Ti金属材料的应用技术研究严重滞后,缺乏具有高

可靠、高效率的焊接成形技术。同时,舰船装备用Ti的基础研究严重不足,无法为设计和应用单位提供系统、规范和可靠的数据。舰船装备用Ti的品种规格也不全,尚未建立完整的体系,性能一致性和稳定性不够,这也很大程度上限制了Ti金属的使用范围。Ti合金要在舰船领域得到广泛使用,仍有如下技术瓶颈亟需解决:①舰船装备用Ti合金设计、验证及评价技术;②高性能Ti合金材料的低成本加工制造技术;③高性能Ti合金材料的稳定化生产技术;④高效可靠的大型Ti合金部件的先进焊接技术;⑤超大规格Ti合金部件的成形制造技术;⑥超大规格(厚度为80~120 mm)Ti合金板材加工技术;⑦超大规格(外径600 mm,壁厚20~30 mm,长度大于15 m)Ti合金管材的加工生产技

术; ⑧高效、稳定、可靠的 Ti 合金接触腐蚀、电偶腐蚀防护技术及海生物污损防护技术。

5 结 语

Ti 合金是一种十分理想的舰船用结构材料, 使用 Ti 合金可以大幅提高舰船的整体性能, 当然面临的问题也有很多。我国的舰船用 Ti 合金尚未建立完善体系, 缺乏标准规范。与国外相比, 我们发展严重滞后, 存在许多空白, 总体水平还有很大差距。然而可以预见的是, 我国舰船用 Ti 合金领域的潜能是不可估量的, 若能够抓住当前机遇, 其应用前景十分明朗。

参考文献 References

- [1] G Lutjering, J C Williams. *Titanium*[M]. Germany: Springer, 2003: 1-8.
- [2] Zhu Xiangrong(朱相荣), Dai Ming'an(戴明安), Chen Zhenjin(陈振进), *et al.* 高流速海水中金属材料的腐蚀行为[J]. *Journal of Chinese Society of Corrosion and Protection*(中国腐蚀与防护学报), 1992, 12(2): 173-179.
- [3] Kimoto H. Corrosion Behavior of Hot-Dipped Aluminized Steel Pipe in Seawater[J]. *Corrosion Engineering*, 1999, 48(9): 597-602.
- [4] Imam M A, Chu H P, Rath B B. Fatigue Properties of Titanium Alloy Ti-6Al-2Sb-1Ta-0.8Mo[J]. *Materials Science and Engineering*, 2002(A323): 457-461.
- [5] Zhao Yongqing(赵永庆), Chen Jun(陈 军). 船用钛合金研制现状[M]// *Advisory Reports for Marine Engineering*(海洋工程咨询报告). Beijing: Chemical Industry Press, 1203.
- [6] Casavola C, Pappalettere C, Tattoli F. Experimental and Numerical Study of Static and Fatigue Properties of Titanium Alloy welded Joints[J]. *Mechanics of Materials*, 2009(41): 231-243.
- [7] Cui Li, Kutusna Muneharua, Simizu Takao, *et al.* Fiber Laser-GMA Hybrid Welding of Commercially Pure Titanium[J]. *Materials and Design*, 2009(30): 109-114.
- [8] Lu W, Li X Y, Lei Y P. *et al.* Study on the Mechanical Heterogeneity of Electron Beam Welded Thick TC4-DT Joints[J]. *Materials Science and Engineering*, 2012(A540): 135-141.
- [9] Igor V Gorynin, Stal S Ushkov, Vladimir I Mikhaylov. Titanium-Key to Ocean Depth[C]// *Proceedings of the 11th World Conference on Titanium*. Kyoto: The Japan Institute of Metals, 2007: 1 617-1 624.
- [10] Gorynin I V. Titanium Alloys for Marine Application[J]. *Materials Science and Engineering*, 1999(A263): 112-116.
- [11] Krylov V V. About Designing Experience of Subnavys and Deep Submersibles from Titanium Alloys in Bureau[J]. *Malachite*, 2002, 7(3): 63-70.
- [12] Rodney R Boyer, James C Williams. Developments in Research and Applications in the Titanium Industry in the USA[C]// *Proceedings of the 12th World Conference on Titanium*. Beijing: Science Press, 2011: 10-19.
- [13] Kuang Mengsheng(匡蒙生), Hu Weimin(胡伟民), Guo Aihong(郭爱红), *et al.* 钛及钛合金在美海军舰船上的应用[J]. *Torpedo Technology*(鱼雷技术), 2012, 20(5): 331-335.
- [14] Barbara, K Henon. Orbital Welding of Titanium Pipe for U. S. Navy Ships[J]. *American Welding Society*, 2009, 88: 26-28.
- [15] Zhang Wenyu(张文毓). 钛换热器市场发展分析研究[J]. *Materials & Marketing*(船舶物资与市场), 2011(2): 31-34.
- [16] Thierry Millot, Morgane LE Thuaut. Use of Titanium in the Warship Propulsion Sector[C]// *Proceedings of the 12th World Conference on Titanium*. Beijing: Science Press, 2011: 2 249-2 253.
- [17] Li Xianjun(李献军), Wang Gao(王 镐), Ma Zhongxian(马忠贤). 钛在舰船领域的应用及前景[J]. *World Nonferrous Metal*(世界有色金属), 2013(8): 24-27.
- [18] Pan Luokun(潘罗坤). 舰船用钛及钛合金经济性分析[J]. *Development and Application of Materials*(材料开发与应用), 2010, 25(5): 85-88.
- [19] Tian Fei(田 非), Yang Xionghui(杨雄辉). 舰艇用钛合金技术应用分析[J]. *Chinese Journal of Ship Research*(中国舰船研究), 2009, 4(3): 77-80.
- [20] Zhou Jiayu(周佳宇), Ha Jun(哈 军). 钛合金材料在舰船管系上的应用[J]. *Development and Application of Materials*(材料开发与应用), 2006, 21(3): 40-42.
- [21] Bai Yunhui(白云辉), Xiang Ping(向 平). 钛合金在舰船武器装备中的应用[J]. *Mechanical Engineer*(机械工程师), 2012(12): 35-36.
- [22] Jia Shuanxiao(贾栓孝). 海洋工程领域用钛研发现状[M]// *Advisory Reports for Marine Engineering*(海洋工程咨询报告). Beijing: The Chinese Academy of Engineering, 2013.