

21世纪伊始铝电解工业的新进展

邱竹贤

(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

[摘要] 21世纪伊始, 法国 500 kA 特大型预焙阳极电解槽, 以及中国 320 kA 大型电解槽的出现, 标志着铝电解工业的重要新进展。文章从理论上分析了大型电解槽的优越性, 论述了减少电解槽的热损失系数, 即减少按单位电量核算的热损失量, 便是大型槽能够节省电能的基础; 应用低温铝电解和惰性电极是铝电解工业今后的发展方向。

[关键词] 铝电解工业; 大型电解槽; 低温铝电解; 惰性阳极和惰性阴极

[中图分类号] TF821 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)04-0041-06

1 引言

冰晶石-氧化铝融盐电解法历来是铝工业唯一炼铝方法。现在大型电解槽风起云涌, 法国开发了 500 kA 特大型电解槽。良好的生产指标来源于炼铝科学技术的改进, 亦即增大电解槽的容量, 同时电解质 NaF/AlF₃ 摩尔比逐渐减小, 电解温度相应降低。今后的发展趋势是在较低温度下进行铝电解(例如 850~930℃)。这时候, 惰性电极和绝缘侧壁可以更好地发挥作用, 槽寿命得以延长, 生产成本大幅度降低。

2 大型电解槽纷纷浮出水面

在最近 20 年内, 国内外工业预焙阳极铝电解槽的电流明显增大。以我国而论, 20 世纪 70 年代抚顺铝厂和沈阳铝镁设计院研究开发了 100 kA 边部下料预焙阳极电解槽, 打破了历年来沿用的 60 kA 自焙阳极的格局, 使人们耳目为之一新。抚顺铝厂又开发了 135 kA 预焙槽, 以后推广应用到包头铝厂。贵州铝厂自从引进了 160 kA 预焙槽之后, 研制了 180~240 kA 预焙槽, 形成新技术。青海铝厂位于我国的西部高原, 也应用了 160 kA 大型焙

槽。郑州轻金属研究院的沁阳铝厂首先开发了 280 kA 大型预焙槽, 接着焦作铝厂建立了 280 kA 铝电解系列。广西平果铝厂则开发了 300~320 kA 大型槽^[1]。伊川铝厂等也都建设了 300kA 大型预焙槽。一时风起云涌, 令人惊异。

我国原有的 60 kA 级自焙阳极电解槽, 由于产量小, 烟气污染等原因, 纷纷改建成预焙阳极电解槽。例如, 抚顺铝厂建成的 200 kA 槽系列。

在国外, 美国铝业公司 (Alcoa)、法国彼施涅公司 (Pechiney) 和巴林铝公司 (Barin Al) 等于数年前开始用 300 kA 预焙阳极电解槽。法国彼施涅公司于 2001 年公布了新近研制的 500 kA 特大型预焙槽^[2], 特大型预焙槽浮现水面, 标志着世界铝工业进入一个新的发展时期。

图 1 为最近 50 年来世界铝工业电解槽的电流增长趋势。表 1 是年产 20×10^4 t 电解铝的广西平果铝厂用不同电流强度时的若干技术经济指标的比较, 这对于评价大型槽的优点具有很大的说服力。

法国彼施涅公司 500 kA 槽的生产技术参数如下: 电流效率 93%, 每槽日产铝 3 825 kg, 阳极效应系数 0.04~0.05 次/槽·d, 每一个电解槽系列有 336 台槽, 铝的年产量达到 46 万 t。如以 180 kA,

[收稿日期] 2002-11-26

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (59974008)

[作者简介] 邱竹贤 (1921-), 男, 江苏海门市人, 中国工程院院士, 东北大学教授

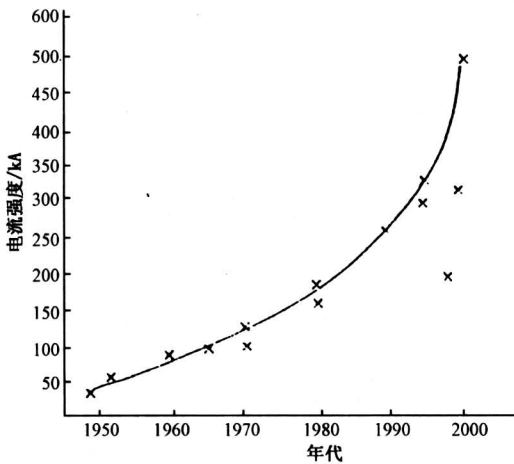


图 1 近 50 年间铝电解槽电流强度增大趋势

Fig.1 Tendency of current increases of aluminium electrolysis cells in recent 50 years

300 kA 与 500 kA 相比, 则有明显的差异 (表 2)。

表 1 不同电流强度铝电解槽的指标比较

Table 1 A comparison of aluminium electrolysis cells at different current intensities

槽容量/kA	160	180	280	320
槽数/台	460	390	268	230
每吨铝所需的铝母线量/t	23.5	20.1	18.0	16.3
每吨铝所需钢量/t	19.9	17.6	14.7	13.3
每吨铝所需的占地面积/m ²	115.1	102.6	74.5	66.1

表 2 180 kA, 300 kA 系列与 500 kA 系列的比较^[2]

Table 2 A comparison of 180 kA, 300 kA series with 500 kA series

	180 kA 系列	300 kA 系列	500 kA 系列
系列数/槽数	3/720	2/756	1/336
电流/kA	190	320	460
生产能力/kt	380	500	460
产铝量/t (a·人) ⁻¹	350	550	750
投资费/美元·t ⁻¹	4 500	4 000	3 400
建设时间/月	30	30	24
生产投入时间/月	18	12	8

从经济上看, 特大型槽比一般大型槽的投资费可节省 15%, 生产费可降低 10%。图 2 示出 500 kA 槽的槽膛内型。其明显的特点是阳极在槽膛内有很大的填充率, 阴极表面产铝的部分明显增大, 而产铝少的面积明显减少, 因此电流效率随槽电流增大而提高。这是一个重要的优点。

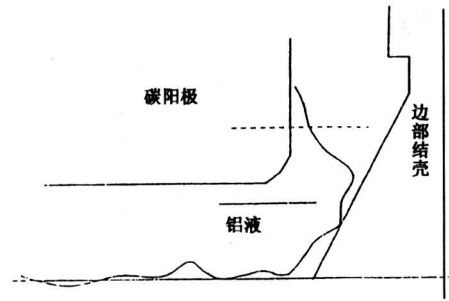


图 2 500 kA 槽的槽膛内形

Fig.2 The configuration of side solid sludge in 500 kA cell

槽电流何以能够如此迅速地增大呢? 这可从我国沁阳铝厂的 280 kA 槽看出, 原来是两支 140 kA 槽系列, 把它们合并起来, 就形成 280 kA 槽, 再一翻, 岂不就是 500~600 kA 槽了。

大型槽的建立, 当然是有科学根据的, 首先是要有电磁场的基础研究, 其次要有坚实的槽壳, 可靠的阴极碳块、绝缘侧壁材料和优良的施工技术, 才能确保取得优良的生产指标。

值得重视的是, 现在德国易北铝厂 (Elbwerk) 继续研究连续预焙阳极^[3], 电流达到 129 kA, 年产铝量 7 万 t。此槽建立于 1972 年, 由德国联合铝公司 (VAW) 首创 (图 3 为此槽的示意图)。其主要指标是:

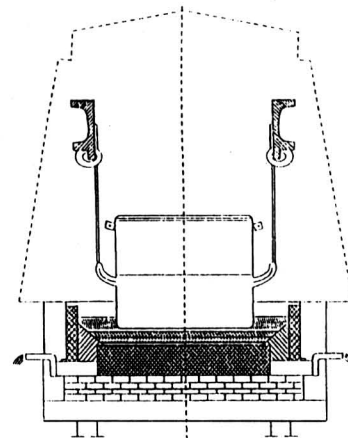


图 3 VAW 连续预焙槽示意图

Fig.3 The continuous prebaked anode cell in VAW

电流 129 kA, 槽电压 4.70 V, 电流效率 92%, 电耗 15.3 kW·h/kg, 阳极消耗量 415 kg/t。

此种连续预焙槽的特点是: 每隔 60 d 加接一次阳极, 阳极的总高度为 900 mm, 上下两块阳极之间有一层粘接糊。在生产中不必取出阳极的残

极，吨铝的阳极净耗量只有 415 kg，因此它兼有预焙阳极和自焙阳极的特点。德国联合铝厂坚持此项技术研究历 30 年之久，实在难能可贵。一项重大新技术成就的取得，一般少则数年多达几十年的时间。据报道，经过不断的技术改进之后，其每 kg 铝电耗量可望降低到 10~11kW·h，阳极消耗量也将有明显减少。

3 大型电解槽何以能够节电

现在全世界的铝电解温度为 950~970℃，电耗量每吨铝是 13 000 kW·h（直流电）。当前能源价格上涨，供电紧张，故各国都在寻求铝工业的节电途径。理论上，节电的潜力甚大，因为电解法生产铝的吨铝电耗理论值不过 6320 kW·h，而实际电耗量却高出 1 倍有余。

研究节电问题的理论依据是电解槽的能量平衡。如把电解槽整体作为计算体系，则供给电解槽的能量 $A_{供}$ 分配在下列三个方面：

补偿铝电解所需的能量 $A_{电解}$ ；补偿槽热损失所需的能量 $A_{热损}$ ；补偿槽内外导线损失的能量 $A_{导线}$ ；故有

$$A_{供} = A_{电解} + A_{热损} + A_{导线} \quad (1)$$

或

$$IU_{平均} = 0.33561rf + Q_{热损} + IU_{导线} \quad (2)$$

I ——电流强度/kA；

r ——电流效率；

$U_{平均}$ ——平均电压/V；

$U_{导线}$ ——导线中的电压降/V；

$Q_{热损}$ ——电解槽的热损失量/kW·h；

f ——电解出每公斤铝所需能量/kW·h。

这里，取时间为 1 h，上式可转化成：

$$\frac{IU_{平均}}{0.33361r} = f + \frac{Q_{热损}}{0.33561r} + \frac{IU_{导线}}{0.33361r} \quad (3)$$

或者以电耗率 W （每克铝瓦时）表示则有：

$$W = f + W_{热损} + W_{导线} \quad (4)$$

此式便是按照单位铝产量核算的能量平衡式。由于 r 变化不大，一般为 90%~95%，故 f 值可当作恒定看待，约为每 kg 铝 6.33~6.65 kW·h。(4) 式右侧诸项中，比重最大的项目是 $W_{热损}$ ，它约占供入总量的 50% 以上。根据 50 年来积累的电解槽能量平衡资料，其值是在 5~12 kW·h/kg Al 范围内。

铝电解槽的热损失量随其型式和规模大小而

异，那么怎样来作比较呢？阿布拉莫夫（Абрамов）等人提出了热损失率 q 的概念，它是按照电解质的单位几何平均面积计算的热损失量。莫那（Molnar）也采用热损失率的概念，它是按照单位阳极面积或阴极槽壳面积计算的热损失量。换言之，热损失率是以电极或电解质的物理状态作为比较基础。邱竹贤从电化学的观点，提出了另外一种概念，即以单位电量作为比较基础。按照单位电量核算的热损失量称为热损失系数 $a_{热损}$ ，其量纲为伏，相当于电压：

$$a_{热损} = \frac{Q_{热损}}{It}$$

这里 t 为电解时间，取 1 h，故

$$a_{热损} = \frac{Q_{热损}}{I}$$

在图 4 上绘示出从 1947—2001 年的 28 台不同型式电解槽的总电耗率 ($W_{总}$) 与热损失系数 ($a_{热损}$) 随电流变化的曲线。从计算结果看出，无论是自焙槽还是预焙槽， W 和 $a_{热损}$ 值均随电流增大而减小，而且这两条曲线几乎是平行的。由于补偿热损失的能量 $W_{热损}$ 占电耗率总量的 50% 以上，所以 $a_{热损}$ 决定着 $W_{总}$ 的变化趋势。

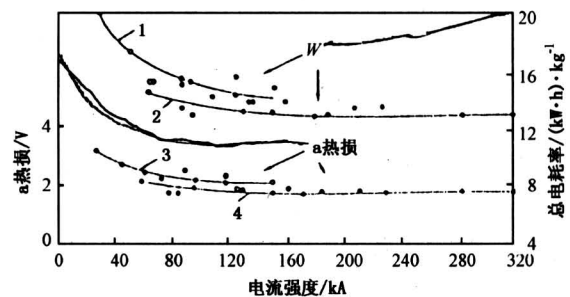


图 4 不同电流强度铝电解槽的 $a_{热损}$ 与 $W_{总}$ 的关系

1, 3—自焙槽；2, 4—预焙槽

Fig.4 Relations of $a_{h.l.}$ and W_{total} for aluminium electrolysis cells with different current intensities

1, 3—Söderberg cells; 2, 4—prebaked cells

(3) 式和 (4) 式是我们讨论节电问题的依据。实际上，铝工业一百年来所以能够节省电解中的电能，主要是靠减小 $a_{热损}$ 而实现的，一方面是设法减少电解槽的热损失量 ($Q_{热损}$)，另一方面是提高电流强度 (I) 和电流效率 (r)。

预焙阳极电解槽的电流效率高，有的达到 92%~94%，这与阳极气泡容易排出有关。自焙阳极是一个庞然大物，一般 60 kA 自焙槽的阳极面积

占 6.8 m^2 ，阳极中央部位底掌下面的气泡距边缘较远，不易排出，形成气膜电阻，还导致炭渣沉积在那里，甚至形成阳极“包块”，造成局部电流短路，引起电流效率明显降低，所以自焙槽宜使用狭长的碳阳极，预焙槽阳极的宽度一般是在 0.8 m 以内，具有重要的尺寸优势。第二，自焙槽阳极至侧壁的距离较远，一般为 $400 \sim 450 \text{ mm}$ ，而预焙阳极只有 $250 \sim 300 \text{ mm}$ 可使电流比较均匀地通过电解质层，减小了低效率的周边区域。第三，预焙槽从槽中央部位自动下料，真正实现了“勤加工少下料”，电流从槽底上均匀地通过，防止产生局部过热现象，从而使电流效率提高。

预焙阳极电解槽的另一个优点是，用同样大小的槽壳可以增加铝产量 $30\% \sim 40\%$ 。这一方面是由于提高了电流效率，另一方面是由于提高了槽膛内阳极填充率。

4 世界铝产量

2001 年世界原铝产量为 25 Mt 。

所谓原铝是指电解槽中生产出来的纯铝，它不包括铝合金以及再生铝。生产每吨再生铝所需能量仅占原铝的 5% ，故世界各地对再生铝倍加关注。

现在世界上有 43 个生产原铝国家和地区，美国、中国、俄罗斯、加拿大等国为主要产铝国家。其中规模最大的铝厂为俄罗斯的布拉茨克铝厂，年产铝约 80 万 t 。其次是克拉斯诺雅尔斯克铝厂约 75 万 t 。世界上铝矿储量丰富而且电力开发潜力大的国家，例如澳大利亚提供氧化铝和原铝，中国的原铝产量，2001 年为 360 万 t 。从发展趋势来看，中国的原铝产量不久将超过 400 万 t ，居世界前茅。铝电联营可以降低生产成本。中国有一百多家铝厂，大多规模较小，需要技术改造。中国主要铝厂的名称和产量如表 3 所示。

现在全世界的人均用铝量约为 3 kg ，其中发达国家约为 20 kg 。看来，铝产量的增长还有很大的潜力。2000 年美国的二次铝产量约为 200 万 t ，其原铝产量还不到 400 万 t 。今后数年内，中国铝工业的主要弱点仍然是原料氧化铝供应不足，但是中国的再生铝产量将会增多。

5 铝工业的发展方向

今后铝电解工业的发展方向是在电解质组成、阳极材料、阴极材料和绝缘侧壁诸方面进行改革，

亦即有低温电解与采用新型电极材料等趋势。前者不改变电解槽结构，后者要改变电解槽结构。

表 3 中国的主要铝厂及其产量

Table 3 Chief aluminium plants and their yearly production

厂名	2001 年产量/ 10^4 t	2002 年预计/ 10^4 t
贵州	24.2	24
青海	20.8	23
青铜峡	14.5	23
平果	13.4	13.4
云南	12.3	10
包头铝厂	11.9	12
山西关铝	11.7	11
兰州	9.8	10
抚顺	9.0	9

注：根据 2002 年 1 月北京安泰科分析人士网上报道。

5.1 低温铝电解

在已建立起稳定的能量平衡的条件下，经电解槽内壁向外传导出来的热量等于其外表面的对流和辐射热量之和，即

$$Q_{\text{传导}} = Q_{\text{对流}} + Q_{\text{辐射}}$$

降低电解温度，则经侧壁槽表面和底面的热流量减少，因而可以节电。降低电解温度还能够提高电流效率。根据长期的测定结果，在工业电解槽的温度范围 $940 \sim 960^\circ\text{C}$ 内，每降低温度 10°C ，大约提高电流效率 $1\% \sim 1.5\%$ ，因此也可节电。

纵观铝工业一百多年的生产实践，可得出一个结论，即电解温度趋向于降低，这主要是由于电解质 NaF/AlF_3 摩尔比逐渐减小所致。在铝工业初期， NaF/AlF_3 摩尔比大约为 3.0，电解温度 1000°C ；随后摩尔比逐渐减小，电解温度随之降低。到 2000 年左右，减小到 $2.1 \sim 2.2$ ，今后还要继续下去。表 4 示出了铝工业的电解温度和 NaF/AlF_3 （摩尔比）一百多年来的演变轨迹。

东北大学在 60 年代初开始研究低温电解，所用的电解质为氟-氯化物体系；添加氧化铝，在此体系中找到一系列的低熔点成分，可在 850°C 左右进行电解。

最近 20 年来，又研究纯氟化合物体系，添加氧化铝，何鸣鸿和李庆峰在此体系中找到宽广的低熔点区域，可在 $750 \sim 900^\circ\text{C}$ 下进行电解，并获致高效率。在此项研究中系统地测量了低熔点电解质体系的物理化学性质和电化学性质以及电解的电流效率，因而对于此种电解质有较为全面认识。现在继续研究铝的低温电解。

表 4 铝电解温度和 NaF/AlF₃ 摩尔比的演变^[4]

Table 4 Development of electrolysis temperatures and NaF/AlF₃ molar ratios for industrial aluminium electrolysis cells

年份	工厂名称	NaF/AlF ₃ 摩尔比	电解温度/℃	电流效率/%	电能消耗/(kW·h) t ⁻¹
1888	美国匹兹堡电解厂 1800 A	>3.0	1 000	70	40 000
1947	台湾铝厂 27 000 A	3.0	980~1 000	80	20 000
1958	抚顺铝厂 60 000 A	2.8	970~980	85	16 500
1965	抚顺铝厂 130 000 A	2.7~2.8	970~980	88	15 500
1985	美国霍利山铝厂 180 000 A	2.5~2.6	950~960	92	13 600
1985	挪威卡尔莫铝厂 180 000 A	2.5~2.6	950~960	92	13 600
1987	法国彼施涅 280 000 A	2.2~2.4	950~960	94	13 500
1995	法国彼施涅 300 000 A	2.2	950~960	94	13 400
2001	法国彼施涅 500 000 A	2.2	940~950	94	13 200

邱竹贤、王兆文和高炳亮等在实验室内研制了 1 000 A 低温电解槽，已在 800℃~850℃ 进行正常电解，又在 200 A 电解槽内，进行 845℃ 低温电解。电解槽内壁用氮化硅粘结的碳化硅砖砌筑，碳阳极中心有小孔，可从中排出 CO₂+CO 气体，收集这并用气体分析仪测定电解效率。电解质的组成为 NaF/AlF₃ 摩尔比 1.8，Al₂O₃ 的质量分数为 3%，添加 8% NaCl 和 3% CaF₂，电流效率平均为 96%~98%，接近法拉第定律的理论值。显示出低温电解的一个重大优点。此外，低温电解还能延长电解槽的寿命。

5.2 新型电极材料和改变电解槽的结构

1998 年澳大利亚报道，Comalco 铝业公司在 92 kA 的电解槽上采用斜面碳阳极和斜面 TiB₂/C 惰性阴极，电解槽的阴极电流密度为 0.97 A/cm²，150 天的试验结果，电耗为 13 300 kW·h/t。并认为当电解槽的阴极电流密度提高到 1.2 A/cm²，并保持电解槽热平衡不变时，电解槽的产量可增加 50%。产生的铝液送入槽内凹坑中，故阴极上面只有薄层铝液，不会产生很大的波峰，极距可缩短到 2~3 cm^[5]（见图 4）。

现在美国研制惰性阳极，在 Massena 铝厂的工业电解槽上应用试验 223 d。电流效率达到 65%~90%，槽电压为 5.8~7.2 V，所得铝的纯度为 90%~93%。其目标是要达到电流效率 85%，槽电压 5.0 V，铝纯度 99.3%。

一般用碳阳极的工业电解槽的指标是，电流效率 94%，槽电压 4.5V，铝纯度 99.8%。看来，如果能够达到预定目标，则惰性阳极槽的效果接近碳阳极槽了。而氟化氢的排放量相等，二者均为 400 × 10⁻⁶，这是一个令人鼓舞的消息。中国国内现

在也有众多的惰性阳极研究工作正在进行着。应用惰性阳极的优点是可降低铝生产的成本并免除硫与碳有关污染物的产生，其阳极反应是生成氧气，有益于环保。所以，惰性阳极是值得研制的。低温电解与惰性阳极的联合应用将会使工业铝电解发生重大变革（图 5）。

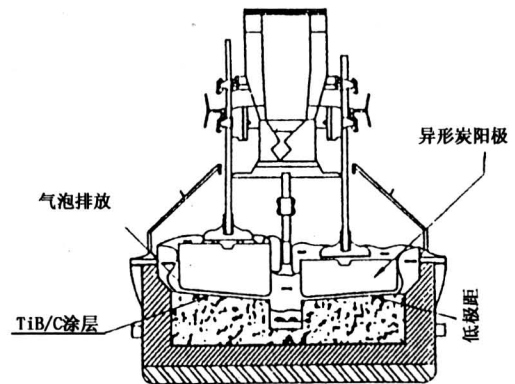


图 4 Comalco 公司惰性阴极电解槽

Fig.4 The inert cathode cell in Comalco Company

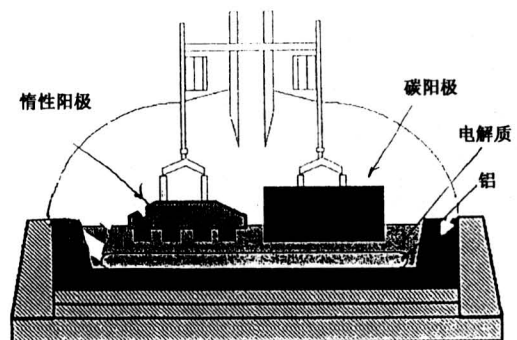


图 5 惰性阳极（左）与碳阳极（右）的比较

Fig.5 Comparison of inert anode (left) with carbon anode (right)

参考文献

- [1] Tin Ensheng, Liu Yonggang, Xi Canmin, *et al.* Developing the GP320 cell technology in China[J]. *Light Metals* 2001, 213~217
- [2] Vanvoren C, Homs P, Basquin JL, *et al.* AP50, The Pechiney 500 kA cell[J], *Light Metals* 2001, 221~226
- [3] Birthe A, Scholemana, Wilkening S, *et al.* Reduction cell with continuous prebaked anodes-A new approach [J]. *Light Metals* 2001, 167~178
- [4] 邱竹贤. 铝电解原理与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998
- [5] 冯乃祥. 《轻金属》, 铝电解槽的新发展[J]. 沈阳铝镁设计研究院 50 年院庆特刊, 2001, 42~49

Development of Aluminium Electrolytic Industry at the Beginning of the 21 st Century

Qiu Zhuxian

(*Northeastern University, Shenyang 110004, China*)

[**Abstract**] New prebaked anode cells of 500 kA and 320 kA capacity appeared in France and China separately at the beginning of the 21st century. These are important advances in aluminium electrolytic industry. This paper mentioned the various advantages of large prebaked anode cells, especially the lowering of electrical energy consumption due to a decreasing of heat loss coefficient. For the future development of prebaked anode cells, there may be three ways: Using low-temperature electrolysis technology (at 800~900℃); Using inert cathode and anodes in the construction of new type electrolysis cells; ③ a combination of ① and ②.

[**Key words**] aluminium electrolytic industry; large prebaked anode cell; aluminium electrolysis at lower temperature; inert cathode and inert anode

(cont. from p. 37)

The Century-long Rush of Students for Study Abroad and Its Impact on China's Science and Engineering Enterprise

Song Jian

(*Chinese Academy of Engineering, Beijing 100038, China*)

[**Abstract**] A detailed retrospect is made about the 130 years-long historical stream of Chinese students rushing abroad for study, in order to reveal their efforts and contributions to the establishment and development of science and engineering enterprise in China since late Qing Dynasty. A chronicle of 10 generations of students studied abroad in the period of 1870~2000 is suggested and justified. An analysis is made with emphasis on the 9th and 10th generations of students selected and sent abroad by government of PRC since 1949.

Historical records and statistical data show that all generations of returned students, scientists and engineers have played an indispensable and decisive role in the course of revolution and reconstruction of the country in the 20th century, many of them devoted their lives to the course. It is argued that the stream of students going abroad will be even intensified in the 21st century due to further opening and harmonizing of the country with the rest of the world.

[**Key words**] study abroad; historical retrospect; impact; science and engineering enterprise