

车削参数和滚挤压参数对滚轮滚挤压表面质量影响分析^{*}

李风雷 夏 伟 周照耀 张 田

华南理工大学

摘 要:滚挤压是一种金属表面微塑性连续变形精加工工艺,现在日益被用作切削加工后的表面强化终处理工艺以获得具有压缩残余应力的高性能低粗糙度的镜面零件表面。本文分析了车削前处理工艺对后续滚挤压加工效果的影响,采用考虑交互作用的 $L_{27}(3^{13})$ 正交试验设计与分析方法研究了车削滚挤压复合工艺中车削三要素(即车削速度 v 、车削进给量 f 、车削深度 a_p)和滚挤压三要素(即滚挤压速度 v_b 、滚挤压进给量 f_b 、滚挤压深度 a_b)对滚轮滚挤压 45 号钢的滚挤压效果(即表面粗糙度 R_a 、小负荷维氏硬度 H_v 的影响规律),其中考虑了对滚挤压效果影响最显著的车削进给量 f 、滚挤压深度 a_b 与滚挤压进给量 f_b 两两之间的交互作用,分析得出对滚挤压效果影响最显著的主要因素及其规律。从试验的角度发现车削进给量对滚挤压效果有显著影响,与理论分析和预测相吻合。

关键词:滚轮滚挤压, 微塑性变形, 车削, 田口 L_{27} 正交表, 方差分析

Research on Influence of Turning Parameters and Burnishing Parameters on Roller Burnished Surface Quality

Li Fenglei Xia Wei Zhou Zhaoyao et al

Abstract: Burnishing, an ultra-precision superficial micro-plastic deformation process, is used increasingly as a surface enhancement finishing treatment after machining operations not only to give a mirror-like and work-hardened surface but also to introduce favorable compressive residual stress in it. The aim of this study was to analyze the influence of the initial turning process on the burnishing effects by utilizing the Taguchi's $L_{27}(3^{13})$ orthogonal array method, three turning parameters, namely the turning speed, turning depth and turning feed, three burnishing parameters, namely the burnishing speed, burnishing depth and burnishing feed were selected as the experimental factors in the Taguchi's design of experiments to determine which one has the dominant influence and how it works on burnishing effects, namely the surface roughness and surface microhardness, the pairwise interaction between turning speed, burnishing depth and burnishing feed were also considered. The experimental data agreed well with the theoretical analysis made before and the result is turning feed has dominant influence on the burnished surface quality.

Keywords: roller burnishing, micro-plastic deformation, turning, taguchi's L_{27} orthogonal table, ANOVA

1 引言

零件的表面质量不仅影响其外表的美观度,而且对零件的耐磨性、耐腐蚀性、耐疲劳性、配合性、承载能力、使用寿命以及能源消耗都产生重要影响。表面微塑性滚挤压精加工(简称滚挤压)是一种无屑冷加工工艺,可用于取代磨削加工,对机械零件表面进行光整和强化处理。

大量试验数据和工业应用表明,对金属零件表层材料的局部加压使其表层产生微塑性变形,能改善表层晶粒组织,产生冷作硬化现象,使表层材料存在残余压应力作用,对于提高零件的耐磨性以及抗疲劳强度等具有非常明显的效果。滚挤压正是利用了这一原理,它采用硬度高且表面光滑的滚珠或滚柱(材料为陶瓷、PCBN 或硬质合金等)在工件表面作

相对滚动,施加一定的压力使工件表层达到塑性变形,从而修整工件表面的微观几何形状、降低表面粗糙度,同时使零件表层金相组织细化并产生表面残余压应力以提高工件的表面硬度、承载能力、耐磨损能力、疲劳强度及耐腐蚀能力,采用合适加工条件可以得到表面性能优越的精密镜面工件^[1]。图 1 是滚挤压作用原理图,滚挤压的实现形式有很多种,图 2 就是其中较典型的一种。

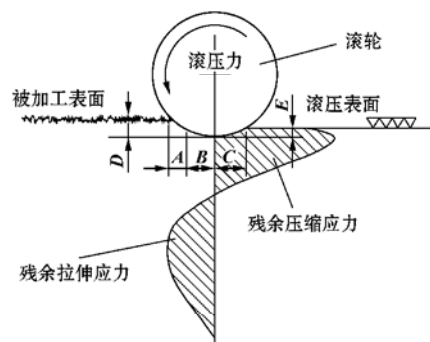


图 1 滚挤压作用原理图

^{*} 广东省自然科学基金资助项目(项目编号:06025669)
收稿日期:2006 年 6 月

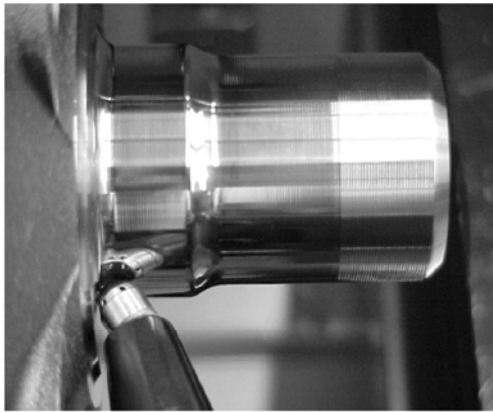


图2 滚挤压工艺图

目前滚挤压广泛应用于需要表面精加工而且高表面性能的很多领域,例如汽车发动机零件如缸体、曲轴、连杆、活塞等;各种精密机械中的导向轴、导管、衬套;各种金属连接头、阀体;各种零件的配合面等。滚挤压基本上可以实现内面、外面、平面、锥面、球面等几乎所有形状零件的精密加工,而且由于无需特殊驱动机器,可以广泛应用于几乎所有金属加工现场。

滚挤压在国外的应用范围目前已从普通车床常用金属如碳钢、铸铁、铝铜等普通有色金属滚挤压发展出镍合金^[2]和钛合金^[3]等航空航天用特种材料滚挤压、高硬度材料(如淬硬钢)滚挤压^[4~6]、复杂自由型面滚挤压^[7,8]低塑性变形滚挤压(Low Plasticity Burnishing)^[9,10]等多种方式以及各种组合工艺^[11,12]。滚挤压工具从自制简易滚挤压工具时代发展到复杂工业用滚挤压工具时代,主要的滚挤压工具厂家包括日本 SUGINO、YAMATO 以及德国的 ECOROLL。现在已发展出液压式滚挤压工具、钻石刀头滚挤压工具^[13,14]以及复合式滚挤压工具。但国内的深入应用仍局限在汽车等领域(如发动机零件),而普通机加工领域基本很少应用,存在较大的推广空间。

本研究的目的之一是确定前处理工艺如车削参数对滚挤压效果的影响规律,因为目前绝大多数的试验研究滚挤压的文献为了简化问题,都将滚挤压加工独立出来进行研究,没有综合考虑滚挤压工艺与前续工艺之间的联系。而实际上前续工艺及其工艺参数的选择会影响到滚挤压加工的质量。例如,零件在前续工艺加工后得到的零件表面粗糙度、表面硬度、残余应力以及残余应变对后续的滚挤压工艺参数的选择就具有重要的影响。本研究的目的二是对滚轮滚挤压进行更深入的研究,因为目前的

文献绝大多数都集中于技术要求比较高的液压滚珠滚挤压方式的研究,而对于实际工程应用广泛的滚轮或滚柱式滚挤压方式研究较少。

2 试验试样、器材及试验方案

2.1 试验试样材料及尺寸

工件试样采用 $\Phi 55$ 的 45 钢棒料,其基本力学性能见表 1。

表1 试验材料基本力学性能

弹性模量 E	切变模量 G	泊松比 μ	屈服强度 σ_s	抗拉强度 σ_b
209(10^3 MPa)	82.3(10^3 MPa)	0.269	553(MPa)	737(MPa)

试验工件经过粗车、半精车,最后采用的精车参数为:车削速度 $v = 119.38\text{m/min}$ 、车削进给量 $f = 0.06\text{mm/r}$ 、车削深度 $a_p = 0.1\text{mm}$,车削后的试样尺寸如图 3 所示,其中 i 从 1 到 7, $1 \times i$, $2 \times i$, $3 \times i$ 表示试验号数。

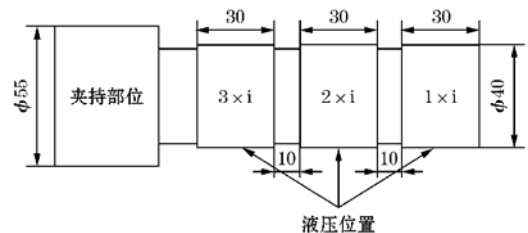


图3 试样尺寸

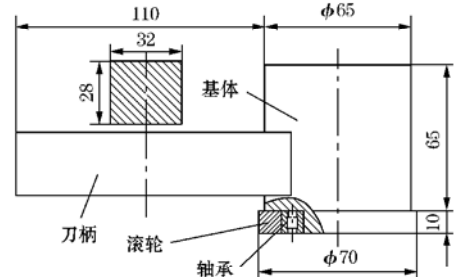


图4 滚轮式滚挤压工具结构示意图

2.2 试验器材

车削采用高速钢刀具,基本的刀具角度为: $\alpha_0 = 7^\circ$, $\gamma_0 = 0^\circ$, $\kappa_r = 45^\circ$, $\kappa'_r = 30^\circ$, $\lambda_s = 0^\circ$ 。

硬质合金滚轮式滚挤压工具结构示意图如图 4 所示。表面粗糙度测量选用北京 Time 公司的 TR200 粗糙度测量仪,设定取样长度 0.8mm,评定长度为 5l;硬度测量采用 HVS1000 数显微硬度计,选用小负荷维氏硬度检测,因为其检测力值介于维氏和显微维氏硬度检测之间,比较适合于测量钢表面强化层的表面硬度,加载载荷设置为 4.9N。

2.3 试验方案

采用考虑交互作用的 $L_{27}(3^3)$ 正交试验设计与分析方法研究车削参数和滚挤压参数对滚轮滚挤压表面质量效果的影响规律, 试验因素及其水平见表 2。

表 2 试验因素及其水平

代码	因素	水平 1	水平 2	水平 3
a_b	滚挤压深度	0.02mm	0.04mm	0.08mm
f	车削进给量	0.06mm/r	0.12mm/r	0.18mm/r
f_b	滚挤压进给量	0.06mm/r	0.09mm/r	0.13mm/r
a_p	车削深度	0.1mm	0.2mm	0.3mm
v_b	滚挤压速度	30.79m/min	60.32m/min	119.38m/min
v	车削速度	30.79m/min	60.32m/min	119.38m/min

依据已有滚挤压研究文献, 在该六项因素里面, 选取对滚挤压效果影响最显著的滚挤压深度 a_b 和滚挤压进给量 f_b 为重要因素, 而对于车削过程, 理论残留面积如图 5 所示, 随着刀具的刀尖圆弧半径 r_ϵ 和进给量 f 的不同, 理论残留面积最大高度 $R_{\max}$ 分四种情形, 其公式如下^[15, 16]:

①当 $r_\epsilon = 0$ 时, 由直线切削刃形成已加工表面

$$R_{\max} = \frac{f}{\cot \kappa_r + \cot \kappa_r'}$$

②当 $r_\epsilon > 0, f \leq 2r_\epsilon \sin \kappa_r'$ 时, 只由刀尖圆弧部分形成已加工表面

$$R_{\max} = r_\epsilon [1 - \sqrt{1 - (f/(2r_\epsilon))^2}] \approx f^2/(8r_\epsilon)$$

③当 $r_\epsilon > 0, 2r_\epsilon \sin \kappa_r' \leq f \leq \frac{r_\epsilon}{\sin \kappa_r'} [1 - \cos(\kappa_r + \kappa_r')]$ 时, 主切削刃不参与切出残留面积

$$R_{\max} = r_\epsilon (1 - \cos \kappa_r') + \sin \kappa_r' (f \cos \kappa_r' - \sqrt{2r_\epsilon f \sin \kappa_r' - f^2 \sin \kappa_r'})$$

④当 $r_\epsilon > 0, f \geq \frac{r_\epsilon}{\sin \kappa_r'} [1 - \cos(\kappa_r + \kappa_r')]$ 时, 由刀尖圆弧部分和主、副切削刃直线部分共同形成已加工表面

$$R_{\max} = \frac{f - r_\epsilon \left(\tan \frac{\kappa_r}{2} + \tan \frac{\kappa_r'}{2} \right)}{\cot \kappa_r + \cot \kappa_r'}$$

从以上公式来看, f 对 $R_{\max}$ 的影响非常显著。而滚挤压过程的主要机理之一就是将表面凸起部分碾压至凹陷部分, 因此可以认为车削进给量 f 是影响滚挤压效果的最重要因素之一。因此综合考虑后选取车削进给量 f 、滚挤压深度 a_b 和滚挤压进给量 f_b 作为重要因素, 考虑了两两之间的交互作用。另外根据试验及简单估算, 受工件变形和车床刚度的影响, 对于滚轮这种线接触滚挤压形式, 滚挤压力对实际滚挤压深度有重大影响, 为了降低这种影响, 根

据简化后的滚挤压试样变形公式 $F_b = pl^3/3EI$, 将试验顺序按滚挤压深度依次增大的顺序由外向内依次安排。

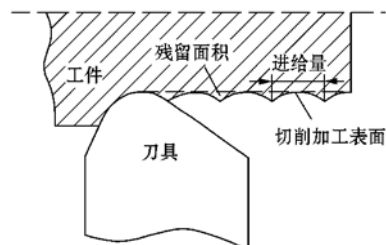


图 5 车削残留面积示意图

3 试验结果分析

3.1 表面小负荷维氏硬度的试验结果分析

表 3 滚后表面小负荷维氏硬度的 ANOVA 表

方差来源	F 值	显著性
Model	6.49	★★
a_b	6.65	★
f	7.54	★
f_b	6.18	★
a_p	3.10	
v_b	6.52	★
v^Δ		
$a_b \times f$	6.38	★
$a_b \times f_b^\Delta$		
$f \times f_b$	7.81	★★

从试验结果看, 车削进给量对于滚后表面硬度的影响最大, 只要与车削进给量相关的三个变量都对它有显著影响(或高度显著影响), 因为车削进给量对工件理论残余面积具有重大影响, 其它车削参数对滚挤压硬度的影响都湮没在噪声中, 因为他们对于工件表面形貌影响不大而且处在滚挤压处理之前。

从图中可知, 滚挤压深度越大表面硬度越大, 这是因为滚挤压深度越大, 滚挤压力也相应增大, 并导致表面硬度的增大, 但滚挤压深度过大, 不仅综合机械性能达不到要求, 而且晶体内产生的滑移、孪生、晶体拉长、晶体转动、破碎等塑性变形都将进一步加剧, 从而表面变脆脱皮, 这是在滚挤压加工中要尽力避免的状况。车削进给量对表面硬度的影响相对复杂, 表面硬度随着车削进给量的增加而增加, 达到一个最大值后开始减小, 这是因为随着车削进给量的增加, 切削面积增大, 因此变质层的深度增加, 从而使滚前表面硬度增大^[16]。然而当进给量增大到使

后续滚挤压深度无法完全填平表面粗糙凹谷的时候,滚后表面硬度开始下降,但下降的幅度不大。滚挤压进给量和滚挤压速度越大,表面硬度越低,这是因为两者越大,工件表面材料塑性变形的时间越短,从而降低了硬化程度。

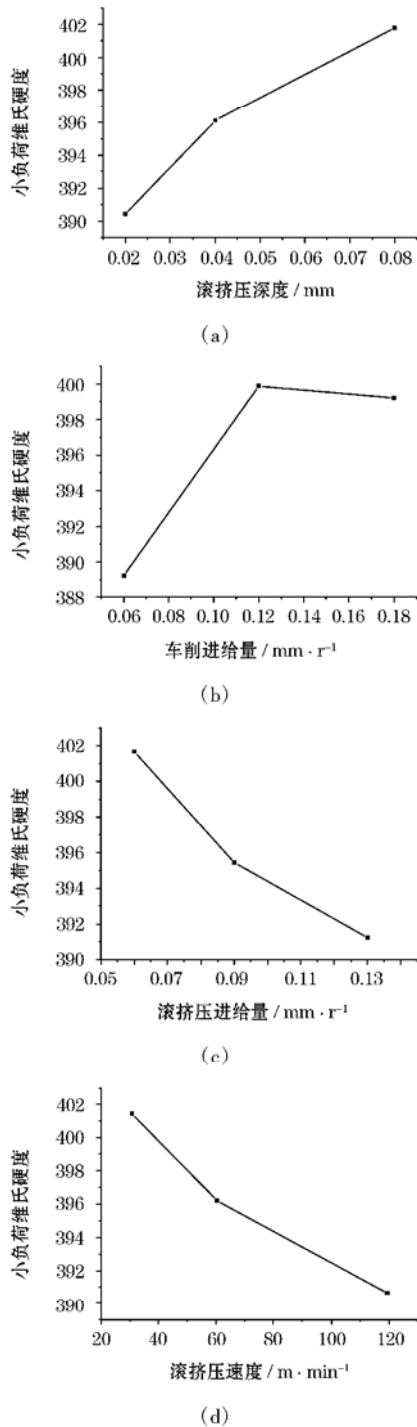


图6 车削、滚挤压因素和小负荷硬度指标关系图

3.2 表面粗糙度的试验结果分析

从试验结果看,车削进给量越大,初始表面粗糙度越大,对滚挤压过程中的塑性填平过程带来难度,

表4 滚后表面粗糙度 ANOVA 表

方差来源	F 检验值	显著性
Model	2.95	★
a_b^{Δ}		
f	3.50	★
f_b	2.81	*
a_p^{Δ}		
v_b^{Δ}		
v	2.55	
$a_b \times f^{\Delta}$		
$a_b \times f_b^{\Delta}$		
$f \times f_b^{\Delta}$		

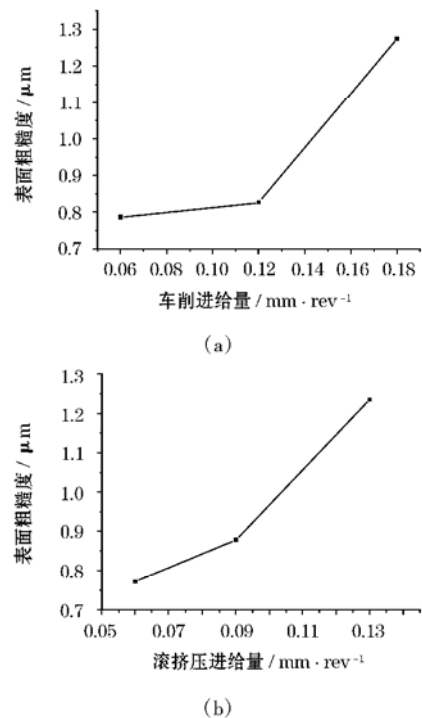


图7 车削、滚挤压因素和表面粗糙度指标关系图

所以车削进给量越大,滚后表面粗糙度越高。另外滚挤压进给量越大使滚轮间距拉大同时使塑性填平时间缩短,因而滚后粗糙度越高。

4 结语

(1)实际试验结果表明,车削参数中车削进给量对滚挤压效果最显著,车削进给量以及与之相关的两个交互因素对滚后表面小负荷维氏硬度都有显著影响(或高度显著影响);车削进给量对滚后表面粗糙度有显著影响,这些都与理论分析和预测吻合。

(2)对于改善表面粗糙形态,试验数据表明滚轮滚挤压可以将粗糙度 R_a 降低一个数量级,可以将表面硬度提高 30% 以上,在实际滚挤压操作中,一般车削都采用最优参数(有时是粗磨)后才进行滚挤压

压操作,所以滚挤压效果要比本研究中的效果更好。

参考文献

- 1 上海杉野机械有限公司. 滚压加工技术. 工具技术, 2005 (06): 91 ~ 94
- 2 Paul S, Preve'y. The effect of cold work on the thermal stability of residual compression in the surface enhanced IN718. 20th ASM Materials Solutions Conference & Exposition St. Louis, Missouri, October 10 ~ 12, 2000
- 3 Mr Michael, J Shepard. Effects of surface treatment on fretting fatigue performance of Ti-6Al-4V. Proceedings of the 8th National Turbine Engine High Cycle Fatigue (HCF) Conference, April 14 ~ 16, Monterey, CA, 2003
- 4 F Klocke, J Liermann. Roller burnishing of hard turned surfaces. Int. J. Mach. Tools Manufact. 1998, 38: 419 ~ 423
- 5 Liviu Luca, Sorin Neagu-Ventzel, Ioan Marinescu. Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels. Precision Engineering. 2005, 29: 253 ~ 256
- 6 Roettger K. Roller burnishing of hard turned surfaces. Ph. D. Dissertation. 2002 WZL, RWTH, Technical University of Aachen, Germany
- 7 Fang-Jung Shiou, Chien-Hua Chen. Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process. Journal of Material Processing Technology, 2003, 140: 248 ~ 254
- 8 L N Lo'pez de Lacalle, A Lamikiz, J Munoa, J A Sa'nchez. Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing. Int. J. Mach. Tools Manufact. 2005, 45: 1659 ~ 1668
- 9 Paul S Preve'y. The effect of low plasticity burnishing (LPB) on the HCF performance and FOD Resistance of Ti-6Al-4V. 6th National Turbine Engine High Cycle Fatigue (HCF) Conference, 2001
- 10 Paul S Preve'y, John T Cammett. The influence of surface enhancement by low plasticity burnishing on the corrosion fatigue performance of AA7075-T6. International Journal of Fatigue, 2004, 26: 975 ~ 982
- 11 A M Hassan, A M S Momani. Further improvements in some properties of shot peened components using the burnishing process. Int. J. Mach. Tools Manufact, 2000, 40: 1775 ~ 1786
- 12 Toshiaki Segawa, Hiroyuki Sasahara, Masaomi Tsutsumi. Development of a new tool to generate compressive residual stress within a machined surface. Int. J. Mach. Tools Manufact, 2004, 44: 1215 ~ 1221
- 13 Xingbo Yu, Lijiang Wang. Effect of various parameters on the surface roughness of an aluminum alloy burnished with a spherical surfaced polycrystalline diamond tool. Machine Tools & Manufacture, 1999, 39: 459 ~ 469
- 14 Hongyun Luo, Lijiang Wang, Chuang Zhang. Study on the aluminum alloy burnishing processing and the existence of the outstripping phenomenon. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 116: 88 ~ 90
- 15 周泽华. 金属切削原理. 上海: 上海科学技术出版社, 1992
- 16 白井英治. 切削磨削加工学. 北京: 机械工业出版社, 1982

第一作者: 李风雷, 博士研究生, 华南理工大学机械工程学院, 510641 广州市

汽车企业跨国合作联合重组势在必行

进入7月以来,国内的汽车企业整合的浪潮一度高涨,尤其是民族品牌与跨国公司的合作,打破了由过去合资企业中“洋品牌”一枝独秀的格局,中国的汽车企业在合作谈判中开始握有更多的话语权。

国内汽车企业新一轮整合浪潮之所以受关注,在于这些新的合作上,不再是简单的出资金、由外方掌握核心技术的合作,而是在实现优势互补的基础上进行。

经过近几年的发展壮大,在国内汽车企业之间,做大做强已经成为共识。国内自主品牌企业寻找合作伙伴,与跨国公司合作绝非心血来潮。

汽车分析师贾新光认为,哈飞与PSA的合作就是得益于哈飞在深圳建立的基地。哈飞过去地处偏僻,品牌影响力在国内还未形成优势,在深圳建立基地将会迅速提高生产规模和品牌的影响力,也为合资创造了条件。

与国外先进企业的合资是自主品牌战略的选择,不仅有助于技术的提升,还可以用合资企业的利润解决自主品牌长远发展的资金需求,也同时关乎中国汽车行业的未来。

如今,鼓励汽车产业的重组和合作被写入《汽车产业发

展政策》中,一个全新的汽车合作时代已经步入国家战略发展的轨道。

如果说,国家在《汽车产业发展政策》中支持“三大”集团是政策引导,也因此掀起过一次国内汽车行业兼并重组的高潮。但政策中也不排斥汽车企业间的合作。随着国内汽车企业,尤其是自主品牌的实力在去年就开始增强,奇瑞、华晨等企业已经开始尝试国际化竞争。而急于在国内寻找“第二春”的企业也将目光锁定在了自主品牌身上。

与国际品牌的合作是中国汽车制造商学习国际标准和提高生产技术的绝佳机会。业内的专家多数认可了这种合作。但是,中国汽车生产企业联合重组,推进合资带动本土汽车工业的新跨越,是机会还是挑战,只有尝试后才能知道。

自主品牌率先开创了各种花样翻新的合作模式,国内的几大汽车集团却还停留在过去那种狭隘的合资框架里。

目前,国内汽车企业集团间联合最具可能性的是收购MG罗孚项目上互为竞争对手的上汽与南汽。两者间互有优势,但一直没有突破区域的隔阂影响。其实,谁“勾搭”谁都不要紧,只要是为中国汽车未来的长远发展,联合重组、优势互补是开创新格局的一个历史选择。