

doi: 10.7690/bgzd.2022.08.008

## 典型海拔高度下弹道差异分析

于洪有, 焦 扬

(中国人民解放军 63856 部队, 吉林 白城 137001)

**摘要:** 针对高海拔气压影响武器射击能效发挥的问题, 提出一套系统的枪弹高原射表编制方法。通过对高原和平原试验数据分析处理, 对比枪弹在高原和平原条件下外弹道特征量的变化, 从理论上分析原因、总结规律, 获得一套系统的枪弹高原射表编制方法。计算验证结果证明, 该方法可显著提高射表精度。

**关键词:** 高原; 外弹道; 射表

**中图分类号:** TJ411 **文献标志码:** A

## Analysis of Trajectory Difference at Typical Altitude

Yu Hongyou, Jiao Yang

(No. 63856 Unit of PLA, Baicheng 137001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the air pressure at high altitude affects the energy efficiency of weapon shooting, a systematic method for compiling the firing table of cartridge at high altitude is proposed. Through the analysis and processing of the plateau and plain test data, the change of the exterior ballistic characteristic quantity of the cartridge under the plateau and plain conditions is compared, the reasons are analyzed and the laws are summarized theoretically, and a set of systematic method for compiling the plateau firing table of the cartridge is obtained. The calculation verification results show that this method can improve the accuracy of firing table significantly.

**Keywords:** plateau; exterior ballistics; firing table

## 0 引言

高海拔地区气象条件与低海拔地区差别较大, 导致弹丸空气动力特性发生变化, 从而引起弹道形状改变, 弹道高与射程均有所增加。以往编拟的射表, 虽然考虑气象和弹道变化的修正, 给出气压每改变 1 500 Pa 等条件下的修正量, 使用者根据实际射击条件经过查表计算, 可获得需要的射角(或瞄准角), 但由于查表修正过程比较繁琐, 在部队没有得到应用, 修正效果也无从检验<sup>[1-3]</sup>。当气象和弹道条件发生显著改变时, 若继续使用平原射表指导高原射击, 而不进行相关修正, 弹着点与预期势必出现

偏差, 从而影响武器射击能效发挥。笔者选择最具代表性的高原环境, 对枪弹初速、飞行时间、弹道径向速度、跳角等弹道参数和气象参数进行了一系列系统测试, 获得了丰富的数据资料, 并将其应用于笔者的研究。

## 1 高原外弹道特性分析

## 1.1 飞行时间

飞行时间作为弹道符合对象, 是弹道变化最直观的表征量之一。表 1 为不同海拔下弹头飞行时间测试结果。

表 1 不同海拔下弹头飞行时间对比

海拔/m	I 型步枪	II 型步枪	III 型机枪	某型大口径狙击枪配用某型	某型大口径狙击枪配用某型
	400 m 射程处/ms	600 m 射程处/ms	800 m 射程处/ms	狙击弹 1 500 m 射程处/ms	多功能弹 1 500 m 射程处/ms
220	611	950	1 418	2 949	2 797
4 000	541	810	1 115	2 340	2 246

由上表可知: 随着海拔增加, 枪弹飞至某一射程处用时明显缩短, 枪弹飞行速度随着海拔增加在增大, 枪弹飞行中所受空气阻力随海拔增加在减小。

## 1.2 初速

为避免后效作用给外弹道计算造成困难, 外弹

道模型中均未考虑火药气体后效力对弹丸的作用影响, 计算中并不采用弹丸飞离枪口瞬间的实际速度, 而是采用根据后效作用结束后的弹丸运动规律逆推算得出的虚拟初速  $V_0$ 。高原环境下, 初速是否发生了改变? 弄清这一问题对确定表定初速非常重要,

收稿日期: 2022-04-07; 修回日期: 2022-05-28

作者简介: 于洪有(1982—), 男, 吉林人, 工程师, 从事轻武器射表编拟研究。E-mail:13514363311@qq.com。

表 2 为不同海拔下初速数据结果。

表 2 不同海拔下初速值对比

海拔/m	某型小口径枪弹		
	配用于 I 型步枪 /(m/s)	配用于 II 型 短步枪/(m/s)	配用于 III 型机枪 /(m/s)
220	814	885	899
3 000	818	898	922
4 000	825	901	930

从数据表象来看：海拔 4 000 m 与海拔 220 m 初速差值最小为 11 m/s、最大为 31 m/s，海拔 4 000 m 与海拔 3 000 m 初速差值最小为 3 m/s、最大为 8 m/s。初速  $V_0$  随海拔增加而有所“增加”，海拔高度变化越小， $V_0$  改变也越小。以上表象并不能揭示问题本质，以某型狙击弹测速数据为例，解释这一表象：如图 1 所示，由于空气阻力减小，不同距离处弹丸存速值高原明显大于平原，所以根据存速逆推算获得的初速必然有所“增加”。

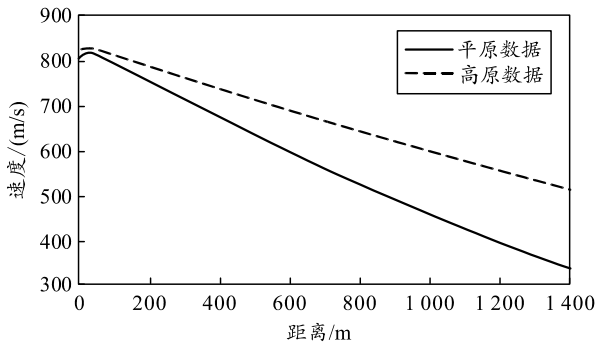


图 1 某型狙击弹高原与平原  $V-X$  曲线对比

从海拔 0 m 到海拔 5 000 m，气压降低约 50%，简单推算，由此导致枪弹所受的膛内与膛外的压力差增量为原来的万分之一，从而导致弹丸初速(出枪口瞬间)增加万分之一。仅考虑初速增加万分之一这一弹道初始条件变化，以某型狙击枪为例，通过弹道计算发现：初速增加万分之一，射距离 800 m 对应的弹道距离增量约为 10 cm，弹道高低增量约为 1 mm。这种量级的改变，不足以影响射击命中。即外界大气压的改变，对弹丸初速影响十分微弱，可以忽略。

### 1.3 阻力系数

#### 1.3.1 不同海拔下阻力系数对比

某型小口径枪弹、某型狙击弹、某型多功能弹

分别以海拔 220、3 000、4 000 m 的弹道径向速度数据提取的阻力系数曲线见图 2—4 所示。

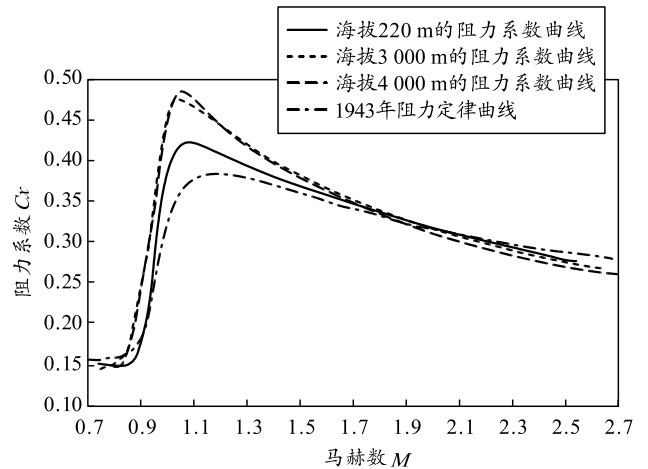


图 2 某型小口径枪弹各海拔  $C_x-M$  曲线对比

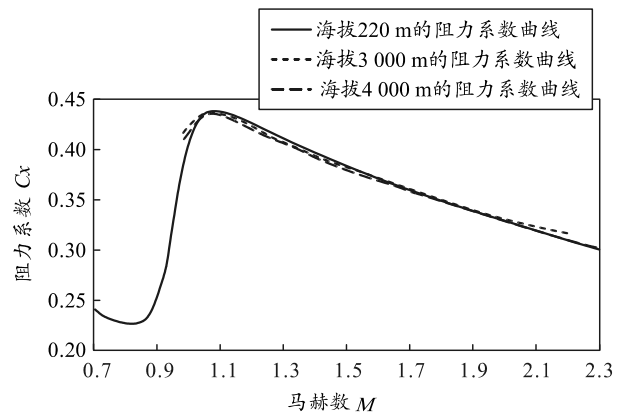


图 3 某型狙击弹各海拔  $C_x-M$  曲线对比

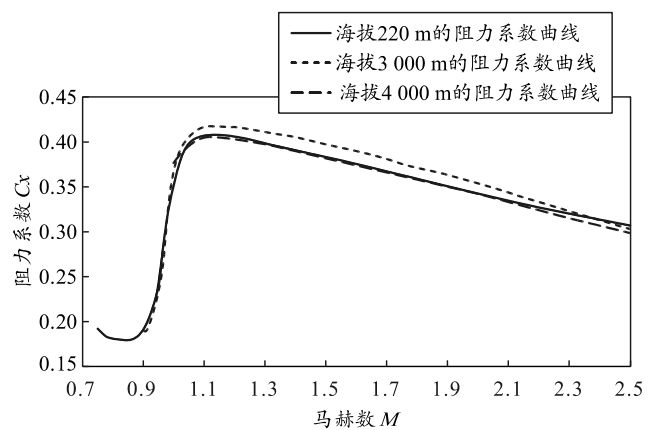


图 4 某型多功能弹各海拔  $C_x-M$  曲线对比

各弹丸在各海拔上阻力系数  $C_x$  最大值对应的马赫数  $M$  如表 3 所示。

表 3 阻力系数特征点(最大值)对比

海拔/m	某型小口径枪弹		某型狙击弹		某型多功能弹	
	$M$	$C_x$	$M$	$C_x$	$M$	$C_x$
220	1.091 90	0.423 11	1.102 37	0.438 85	1.132 18	0.407 51
3 000	1.041 53	0.476 39	1.100 78	0.437 19	1.131 45	0.416 99
4 000	1.061 38	0.485 04	1.100 72	0.435 11	1.130 87	0.404 85

由图 2—4 曲线变化趋势和表 3 可以看出:随着海拔增高,阻力系数  $C_x$  最大值点前移,其变化规律与外弹道学对阻力系数变化规律<sup>[4]</sup>的阐述基本吻合。随着海拔增高,某型小口径枪弹阻力系数有所减小,某型狙击弹、某型多功能弹阻力系数基本不变。从 3 种弹丸测试提取的实际结果看,不同海拔阻力系数曲线存在差异,但这种差异因弹丸不同而不同,随海拔变化规律并非一致。

### 1.3.2 配用于同口径枪械的枪弹阻力系数对比

图 5 为同口径 3 种枪械配用同种枪弹下阻力系数提取结果,可以看出枪弹阻力系数未因配用不同枪械而明显改变。

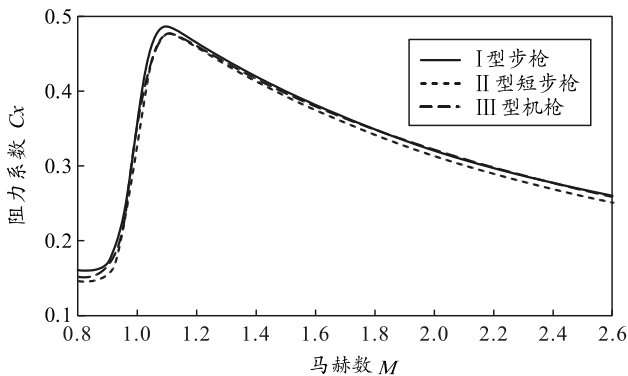


图 5 同口径 3 种枪械提取的  $C_x-M$  曲线对比

### 1.3.3 阻力系数变化原因分析

弹丸所受的空气阻力主要由摩擦阻力、涡流阻力及超音速时所特有的波动阻力组成<sup>[5]</sup>。与流体力学中绕流物体的阻力分析方法一样,弹丸的空气阻力表达式可以用量纲分析的方法得到:

$$R_x = (\rho v^2 / 2) S C_x \tag{1}$$

式中:  $R_x$  为空气阻力,其方向与弹丸质心速度矢量共线方向;  $\rho$  为空气密度,  $\rho = p / R_1 \tau$ ,  $R_1$  为气体常数,  $p$  为气压,  $\tau$  为虚温;  $v$  为弹丸与空气的相对速度;  $S$  为弹丸迎风面积,  $S = \pi d^2 / 4$ ,  $d$  为弹丸直径;  $C_x$  为空气阻力系数。

空气阻力系数  $C_x$  的表达式如下:

$$C_x = C_{x0} + C_{\alpha} \alpha^2 \tag{2}$$

由式(1)和式(2)可知,空气阻力大小取决于: 1) 弹丸的形状、尺寸及其表面状况; 2) 空气的密度、粘性和可压缩性; 3) 弹丸与空气的相对速度,而阻力系数大小则取决于零阻系数  $C_{x0}$  诱导阻力系数  $C_{\alpha}$  和攻角  $\alpha$ 。

从速度和飞行时间测试结果来看,高原条件下弹丸飞行时所受空气阻力与平原相比明显减小,但

不同弹丸的阻力系数随海拔变化规律并非一致,可以从 2 方面分析这一现象: 1) 由试验误差引起,包括测试误差、数据处理误差等; 2) 由不同海拔下弹丸章动幅值衰减规律不同而引起。实际操作中,同类弹道参数所采用的测试设备、测试方法、数据处理方法、提取和拟合方法均相同,测试和处理均是分组进行,并将结果取平均值,试验误差已经降至很小。所以弹丸章动幅值衰减规律的不同是造成高原与平原阻力系数差异的主要原因。

### 1.4 跳角

高原地区土壤含砂量大,这种地质构成对枪械射击稳定性是否存在影响? 空气含氧量减少引起射手体力下降,是否会影响操枪射击? 下面通过跳角试验结果对以上问题加以分析,高原与平原跳角试验结果如表 4 所示。

表 4 高原与平原跳角试验结果

海拔/ m	I 型步枪 配用某型 小口径 枪弹/(°)	II 型步枪 配用某型 小口径 枪弹/(°)	III 型机枪 配用某型 小口径 枪弹/(°)	某型大口 径狙击枪 配用某型 狙击弹/(°)	某型大口 径狙击枪 配用 某型多功 能弹/(°)
220	6	-9	0.5	3	4
4 000	4	-1	6	1	4

由上表可以看出,海拔改变,跳角值变化并不明显,这是因为: 1) 进行试验的高原地区地质构成与平原地区非常相似,基本属于中硬地面; 2) 空气含氧量减少所引起的射手体力下降并不明显,不足以影响操枪射击。由数据还可以看出,枪身越长,枪械自重越大,跳角值波动越小; 枪身越短,枪械自重越小,跳角值波动越大。

### 1.5 射程

空气阻力减小,势必导致枪弹射程增加,如表 5 所示。

下表中的有效射程为指标规定值,对应的其他弹道诸元为射表解算值,括号内数值为高原值。若以射表解算值作为评定有效射程的标准,这 5 种枪械弹药有效射程增量都在 10% 以上,弹道终点落速比平原高 102~119 m/s。

需要指出,评定枪械有效射程的条件主要有 2 点: 1) 通过射表指导射击,使弹道与目标交汇,前提是枪械弹药必须具有良好的散布精度; 2) 弹头侵入目标,对目标造成致伤或穿甲等。

由图 2 可以看出,与平原相比,某型小口径枪弹阻力系数在马赫数  $M$  从 1.5 衰减到 0.8 的过程中明显增大,此期间飞行攻角  $\alpha$  在变大,将影响飞行

稳定性，而飞行稳定性是保证散布精度的前提。另外，对于穿甲弹，穿甲性能还取决于弹头动能和着

角，而攻角变大会严重分散穿甲动能，即使着角为 0，也必将降低穿甲性能。

表 5 高原与平原 5 种枪械弹药弹道诸元对比

弹道诸元	I 型步枪配用某型 小口径枪弹	II 型短步枪配用某型 小口径枪弹	III 型机枪配用某型 小口径枪弹	某型大口径狙击枪配 用某型狙击弹	某型大口径狙击枪配用 某型多功能弹
射角/(°)	0.3	0.2	0.6	0.6	1.1
有效射程/m	600 (700)	400 (450)	800 (1 050)	1 000 (1 150)	1 500 (1 850)
有效射程相对 增量/%	17	13	31	15	23
最大弹道高/m	1.1 (1.2)	0.5 (0.5)	2.6 (3.1)	3.2 (3.4)	9.7 (10.9)
落角/(°)	0.5 (0.5)	0.3 (0.3)	1.1 (0.9)	0.9 (0.8)	2.0 (1.7)
落速/(m/s)	452 (571)	511 (621)	338 (456)	459 (565)	345 (447)

就射表而言，只能协助解决弹道与目标的交汇问题，所以对枪械弹药有效射程增加只能是初步定性分析，更加科学深入的定量分析需要终点弹道试验加以验证。

## 2 射表编制方案

依据高原外弹道特征量变化及其影响，以提高射表全地域适用性及精度为优先考量，兼顾编表成本和可操作性，设计试验方案如下：

### 1) 弹道模型选取。

枪弹外弹道特点是弹头飞行速度高，弹道低伸平直，在有效射程内攻角本身及变化都很小，由角运动引起的弹道变化不明显；因此，选用质点弹道模型和弹丸自身阻力系数编拟枪弹射表，即可满足使用要求。

### 2) 海拔选址与试验项目设置。

选择 3 个(或以上)典型海拔进行阻力系数、飞行时间测试。飞行时间测试在每个海拔各进行 2 个距离射，一个用于符合计算，另一个用于检查弹道高。

### 3) 跳角测试。

高原试验证明，射手间操枪习惯、控枪能力、瞄准等差异客观存在，其对跳角结果的影响程度远大于海拔变化。所以跳角试验可只安排在平原场地进行。跳角关乎瞄准修正，对于火炮，这种修正是可以准确做到的，因为期间并未混入人为操作影响，而对于手持射击的枪械而言，由于射手成绩的代表性无依据标准进行检验，根据 3 名射手射击的跳角结果所采取的修正，可能会“以偏概全”，为了克服这种“以偏概全”的发生，跳角射手的选拔非常关键，一味选择射击成绩最好的射手并不科学，建议选择特级射手、一级射手、二级射手各一名，由其射击获得的平均结果更具有代表性。

### 4) 射表计算与编拟。

以试验结果为依据，根据提取的曲线之间差异

的大小，按海拔跨度，分配各曲线的计算适用区间。配用各海拔区间阻力系数曲线，以各典型海拔测得的飞行时间为符合对象，采用实际射击条件进行符合计算，求得符合系数，计算弹道时根据海拔区间分别使用。

考虑到作战区域涵盖平原、高原、丘陵、盆地、山地等地形，所以射表适用范围要覆盖海拔 0~6 000 m，全部射表应包括：①基本射表；②枪口水平面上的弹道高表；③气象和弹道变化的修正量表；④高低角对距离的修正量表；⑤海拔变化的修正量表。其中：①、②、④采用海拔 0 m 的各标准参数计算给出，形式和内容沿袭平原射表；③根据气象和弹道条件改变量计算给出弹道修正量；⑤为新增部分，从海拔 0 m 开始，高度每增加 500 m，根据各标准参数(气温和药温、气压、初速)的改变，给出弹道修正量。

## 3 计算验证

使用 III 型机枪已有的平原气象和弹道变化的修正量表按海拔 4 000 m 的标准射击条件对已有的平原基本射表进行修正，获得海拔 4 000 m 各射距离对应的射角，记为  $q'_n$ 。利用 III 型机枪高原试验数据，采用本文中编拟方法，计算获得海拔 4 000 m 各射距离对应的射角，记为  $q_n$ 。各射距离  $q'_n$  与  $q_n$  对比及相对误差如表 6 所示。

由下表可知，原射表与新射表相对误差最大达 9%，以 800 m 射距离计算，若继续使用平原射表射击，弹着点比预期将高出近 40 cm。

## 4 结束语

高原与平原相比，枪弹外弹道发生了显著改变，高原环境下若继续沿用平原基本射表，而不加以修正，在一定程度上将影响枪械射击效能发挥。所以在作战中需要区分平原和高原环境，灵活使用

射表。

表 6 原射表与新射表误差对比

射距离	$q'_n$ /mil	$q_n$ /mil	射角相对误差/%	弹道高差
100	0.601 5	0.562 0	7.03	0.001 8
150	0.921 3	0.859 0	7.26	0.008 4
200	1.254 3	1.168 0	7.39	0.015 5
250	1.601 3	1.489 0	7.54	0.027 5
300	1.963 2	1.823 0	7.69	0.038 3
350	2.341 0	2.170 0	7.88	0.055 2
400	2.735 7	2.533 0	8.00	0.080 3
450	3.148 7	2.911 0	8.16	0.104 1
500	3.580 8	3.305 0	8.35	0.124 5
550	4.033 8	3.718 0	8.49	0.170 9
600	4.508 8	4.149 0	8.67	0.200 3
650	5.007 7	4.601 0	8.84	0.243 8
700	5.532 0	5.074 0	9.03	0.305 4
750	6.083 7	5.570 0	9.22	0.367 5
800	6.664 7	6.092 0	9.40	0.429 7

射表表载诸元信息量较大，若想全部装定固化在某种瞄准具上非常困难。实际上为枪械配装的大部分瞄准具均为机械或光学瞄准具，只能装载某一海拔(首选海拔 0 m)各射程对应的瞄准角，一次刻入，无法更改。由于射程越远，高原与平原表尺通用性越差，解决这个问题有 3 种方法：1) 根据弹道修正量计算瞄准角改变量，通过调整瞄准具分划实现射击修正；2) 根据弹道修正量计算瞄准角改变量，通过调整准星高度实现射击修正；3) 根据弹道

修正量，通过调整瞄准点实现射击修正。在操作中，方法 1)和 2)相对便捷，在海拔变化的修正量表可根据瞄准具的结构设计给出表尺分划调整量或准星高低调整量，方法可参照文献[6]。方法 3)需要通过瞄准具在目标处找到准确的位移尺寸参照物，实际操作中不易实现，需要射手在训练和战场环境中积累这方面经验。

参考文献：

[1] 刘万励, 李映坤, 陈雄. 不同能量分配下的双脉冲发动机电外弹道特性研究[J]. 兵工自动化, 2020, 39(10): 15-19.

[2] 方晓帆, 李瑾, 吴婷飞, 等. 非标准条件弹道诸元解算精度检验方法[J]. 兵工自动化, 2021, 40(4): 45-47.

[3] 刘东睿, 崔健, 苏伟, 等. 弹丸外弹道试验装置运动控制系统[J]. 兵工自动化, 2021, 40(9): 50-53.

[4] 韩子鹏. 弹箭外弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 36-41.

[5] 宋丕极. 枪炮与火箭外弹道学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993: 11-13.

[6] 董富强, 阎媛. 多种弹共用表尺的分析[J]. 测试技术学报, 2008, 22(6): 529-532.

[7] ALTINTAS Y, LEE P. A General Mechanics and Dynamics Model for Helical end Mills[C]. Annals of the CIRP, 2011, 45(1): 59-64.

[8] SCHULZ H, MORIWAKI T. High Speed Machining[C]. Annals of the CIRP, 2016, 41(2): 637-643.

[9] DEWES R C, ASPINWALL D K. A review of ultra high speed milling of hardened steels[J]. Journal of material processing technology, 2018, 69(1-3): 1-17.

[10] TOBIAS S A. Machine Tool Vibration Research[J]. International Journal of Machine Tool Design Research, 2020, 1(1): 1-44.

[11] TLUSTY J, POLACEK M. The Stability of Machine Tools Against Self Excited Vibrations in Machining[J]. ASME International Research in Production Engineering, 2015, 1(1): 465-474.

[12] MERRITT H E. Theory of Self-Excited Machine-Tool Chatter[J]. Journal of Engineering for Industry, 2017, 87(4): 447-454.

\*\*\*\*\*

(上接第 30 页)

参考文献：

[1] 刘伟虔. 窄长铝材构件锯铣复合加工设备静动态特性与结构优化设计研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.

[2] 胡博. CRH3 动车组车体结构优化设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.

[3] 任晋峰. 高铁车辆振动基础研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2016.

[4] 张硕韶, 尹德猛, 胡文浩, 等. 高速动车组铝合金车体设计[J]. 中国铁路, 2018(2): 43-46.

[5] 刘静安. 6005A 大型特种型材的研制[J]. 轻合金加工技术, 2019, 32(4): 36-41.

[6] 张政民, 王忠平, 宋福田, 等. 轨道车辆薄壁铝型材的典型加工工艺[J]. 新技术新工艺, 2013(9): 80-83.