

钢筋混凝土桥面板保护层厚度对冲切强度的影响

杨秋宁,毛明杰,张文博

宁夏大学土木与水利工程学院;宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术中心,银川 750021

摘要 目前在钢筋混凝土桥面板冲切破坏机理的研究中,多数国家规范用冲切强度计算公式均未将保护层厚度作为计算参数。为揭示钢筋混凝土桥面板抗拉侧保护层厚度对其静力冲切强度的影响规律,采用中国规范用公式、Matsui公式及自行推导公式,对16块不同保护层厚度的钢筋混凝土板试件的理论强度进行计算,通过比对3个公式的计算结果与实验结果的差异,分析了保护层厚度对混凝土板的作用机理,并对自行前期推导的计算公式进行评价、完善,提出新的采用保护层作用系数的计算方法。算例的比较结果表明,新提出的钢筋混凝土板冲切强度计算公式适用范围较广且精度得以提高。

关键词 钢筋混凝土桥面板;冲切强度;保护层厚度;压缩强度;有效板厚

中图分类号 TU528.04

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.36.015

Effects of Cover Thickness on the Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs

YANG Qiuning, MAO Mingjie, ZHANG Wenbo

School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University; Engineering Technique Research Center for Water Saving Irrigation and Water Resources in Ningxia, Yinchuan 750021, China

Abstract In the several codes and standard equations for the punching shear strength of reinforced concrete slabs, the cover thickness is not an influencing factor of the punching shear strength. 16 specimens of reinforced concrete slabs with various cover thicknesses are selected in the tests. The punching shear strength is found to increase with the increase of the cover thickness, in a nonlinear way. The mechanism of the impact of the cover thickness on the concrete slab strength is analyzed based on a comparison between the calculation results and the test results, and finally, a new calculation method is proposed through the evaluation of the incipient theoretical equation. Test data are compared with the provisions of CCES, and with the proposed equation of Matsui, a simplified equation is proposed, which enjoys a better accuracy.

Keywords reinforced concrete slab; punching shear strength; cover thickness; compressive strength; effective slab depth

随着《国家新型城镇化规划》的提出,中国将掀起基础设施建设高潮,仅上海地区将建成近500座新型桥梁。对桥梁用钢筋混凝土板构件而言,在海洋性高温多湿及内陆寒冻盐碱地区的气候条件下,钢筋被氯盐腐蚀,体积膨胀后引发混凝土裂缝或剥落、钢筋断面面积减少,钢筋混凝土桥面板发

生盐害损伤现象较为突出。以前,受氯盐腐蚀地区,常采用钢筋或混凝土表面涂抹防腐剂等措施减少盐害。研究显示,增加混凝土保护层厚度能有效防止盐害对钢筋的腐蚀^[1]。

目前,多数国家设计规范用钢筋混凝土桥面板冲切强度评价公式^[2-4],常以板的有效高度为主要影响因素,并未考虑

收稿日期:2014-06-19;修回日期:2014-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51468052);宁夏科技支撑项目(2013ZY030)

作者简介:杨秋宁,副教授,研究方向为桥梁工程、新型建筑材料等,电子信箱:yangqn@nxu.edu.cn;毛明杰(通信作者),副教授,研究方向为结构工程、新型建筑材料等,电子信箱:maomj@nxu.edu.cn

引用格式:杨秋宁,毛明杰,张文博. 钢筋混凝土桥面板保护层厚度对冲切强度的影响[J]. 科技导报, 2014, 32(36): 93-97.

板全厚对公式的影响。中国的钢筋混凝土板构件计算是从力学机理着手,设定其冲切锥面倾角为 45° ,剪力计算截面取距荷载边 h_0 处,抗力计算截面取距荷载边 $h_0/2$ 处,分别采取锥底截面及锥中断面计算其冲切剪力及抗力^[5],并规定了最小板厚。由此可以认为,通过改变保护层厚度可使板构件全厚增大,提高板的冲切强度。Matsui^[6]根据对实际桥面板试件破坏断面的观察,建立了板构件冲切破坏力学模型,分不同截面区域对锥型破坏断面内所受到的最大剪力及最大拉力等内部应力积分求导,并考虑荷载增加时构件中性轴位置的变化及保护层厚度的影响,是目前对桥面板冲切强度影响因子考虑较全面的研究。但Matsui公式的保护层厚度限定在10~40 mm的范围,超过则不适用。

为解析钢筋混凝土桥面板受拉侧保护层厚度对板冲切强度的影响规律及作用机理,在保持板试件有效高度不变的条件下,分别对4种保护层厚度,16块钢筋混凝土板试件进行实验。根据实验结果,分析其破坏机理的同时对以往公式进行评价,推导更加合理精确的公式

1 实验概况

1.1 使用材料及配合比

实验共制作板试件16件,粗骨料使用粒径5~20 mm,表观密度 2.73 g/cm^3 的碎石,吸水率为0.75%,细骨料表观密度为 2.58 g/cm^3 的河砂。钢筋采用 $\Phi 10$ II级热轧带肋钢筋,屈服强度400 MPa以上。混凝土中的配合比,水泥、细骨料及粗骨料之比为1:1.96:2.96,水灰比为0.49,水泥用量 362 kg/m^3 ,减水剂采用聚羧酸系AE减水剂,用量为 0.9 kg/m^3 。

1.2 试件概述

本实验制作的试件如表1所示。

表1 桥面板试件种类、尺寸及实验结果

试件号	抗压强度/ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	保护层/ mm	板全厚/ mm	加载板 边长/mm	破坏荷载/ kN
T-10-1	41.9	10	110	100	127.4
T-30-1	34.7	30	130	100	166.6
T-30-2	32.5	30	130	100	164.6
T-50-1	42.2	50	150	100	164.6
T-50-2	32.5	50	150	100	159.7
T-50-3	28.3	50	150	100	205.9
T-50-4	40.9	50	150	100	191.5
T-70-1	42.2	70	170	100	191.1
T-70-2	41.9	70	170	100	200.9
T-70-3	28.3	70	170	100	191.2
T-70-4	40.9	70	170	100	201.1
L-50-1	34.7	50	150	200	196.0
L-50-2	40.3	50	150	200	232.8
L-70-1	40.3	70	170	200	228.3
L-70-2	38.4	70	170	200	230.3
L-70-3	38.4	70	170	200	198.9

试件尺寸 $1500 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$ 。试件受拉区的钢筋保护层厚度分别为10、30、50、70 mm,有效高度均为95 mm,配筋率为0.556%。另外,加载用钢垫板边长为100 mm(T型)及200 mm(L型)的正方形。

1.3 实验方法

图1为实验加载方式示意图,板试件自然养护28 d后,四边简支于刚性边框固定的直径50 mm钢棒支座上,支座中心距离1300 mm。加载时500 kN油压作动器置于边长100 mm(200 mm)、厚度30 mm的正方形钢板上,在板构件中央位置,垂直向下施加荷载。加载同时测定板试件的中央挠曲变形,受压、受拉区混凝土应变及受拉区钢筋应变等。试件冲切破坏后,观测其裂缝分布及断面破坏形式。

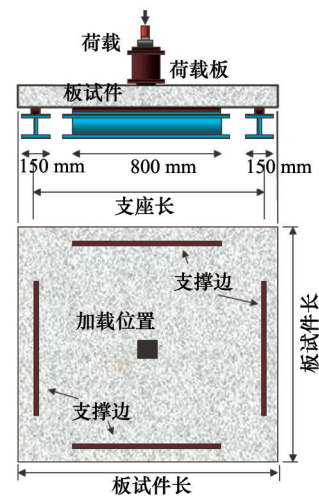


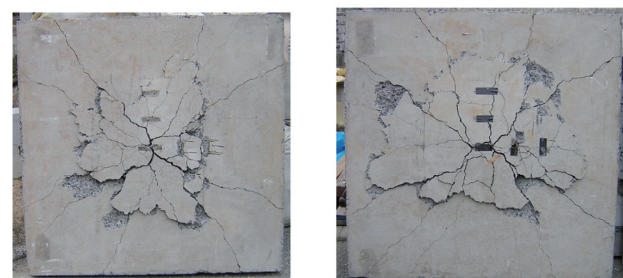
图1 加载方式

Fig. 1 Loading method

2 结果及分析

2.1 实验后的裂缝及混凝土剥落状态

图2为实验后的桥面板试块裂缝,所有试件受压侧中央均发生同加载钢板等面积大小的塌陷破坏,受拉区混凝土大面积脱落,呈锥形破坏断面。裂缝较集中于加载板位置四周,沿荷载施加方向呈放射状分布,具有显著的冲切特征。破坏断面的形状在加载钢板部呈明显的弧线状,中性轴附近呈 40° 角向下延伸,到达受拉钢筋处后冲切角度减小,直至混



(a) T-50-1

(b) T-70-1

图2 实验后的桥面板试块裂缝

Fig. 2 Cracks in slab specimen after loading

凝土板底面。通过测量发现,保护层厚度 50、70 mm 的板试件冲切破坏部分的面积更大。结果表明,用破坏面积作为桥面板冲切强度公式的影响参数,对计算精度影响较大。

2.2 加载荷载和受力钢筋应变的关系

图 3 为加载荷载和主要受力钢筋应变的关系。相同加载条件下保护层厚度 10 mm 桥面板的钢筋应变最大,随着保护层厚度增大,钢筋的应变减小。并且,同样的保护层厚度而载荷板尺寸增大时,钢筋应变变小。所有的试块在加载初期钢筋的应变增加并不明显,达到一定荷载钢筋屈服后,钢筋应变急增,随后随着荷载增加,强度变化不大。

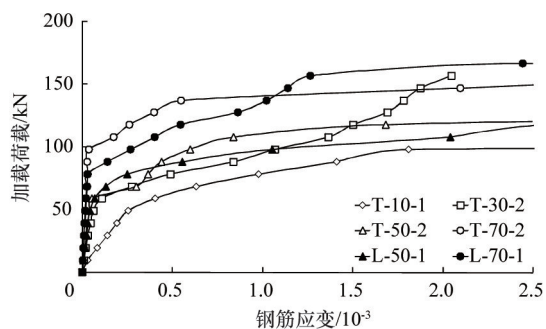


图 3 加载荷载和钢筋应变的关系

Fig. 3 Load-strain relationships of main reinforcement bar

2.3 加载荷载和中央挠度的关系

图 4 为桥面板中央挠度和加载荷载的关系。相同荷载作用下,桥面板保护层厚度越大,刚性越大,而中央挠度变小。由此可以发现,保护层厚度增大时,桥面板的刚度提高。并且,随着保护层厚度增大时,弹性范围内荷载变大,刚性裂缝减少。对于相同保护层厚度的桥面板而言,在大尺寸载荷板的作用下,由于分布荷载的影响,板中央挠度变小。结论符合板受力破坏理论的观点。

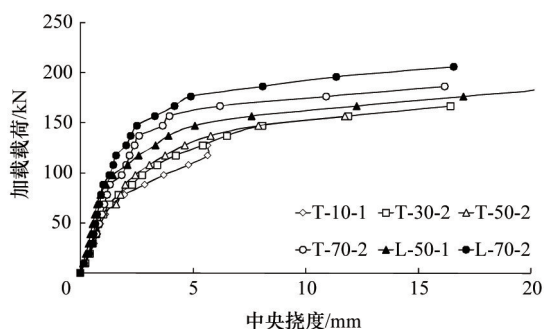


图 4 桥面板中央挠度和加载荷载的关系

Fig. 4 Load-deflection relationships of middle slab

2.4 桥面板冲切强度公式分析

板构件冲切强度的计算,国内外研究者根据相异的理论分析及不同实验方法所得的数据,提出了不同的评价公式。中国普通混凝土板构件的计算,从力学机理着手,假设其冲切锥面倾角为 45° ,剪力计算截面取距载荷边 h_0 处,抗力计算

截面取距载荷边 $h_0/2$ 处。分别采取锥底截面及锥中断面计算其冲切剪力及抵抗力。但也有研究对此截面选取的计算结果的精确度提出置疑^[7]。式中采用有效高度作为参数因子,并未考虑保护层厚度的影响,冲切强度的计算公式为

$$V = 0.7\beta_n f_t \eta \mu_m h_0 \quad (1)$$

式中, β_n 为截面高度影响系数, f_t 为混凝土抗拉强度, η 为荷载作用面积系数, h_0 为有效高, μ_m 为距载荷边沿 $h_0/2$ 处的截面周长。

Matsui 在已有的研究基础上建立了板冲切力学模型,分不同截面区域对锥型破坏断面内所受到的最大剪力及最大拉力等内部应力积分求导,并考虑了载荷增加时构件中性轴位置的变化影响,提出预应力混凝土板冲切强度的计算公式^[8],首次在该计算式中引入保护层厚度作为影响因子,但是保护层厚度的范围固定在 10 ~ 40 mm。

$$V = \tau_{s \max} \{2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m\} + \sigma_{t \max} \{2(4c_d + d_d + b)c_m + 2(a + 2d_m)c_d\} \quad (2)$$

式中, $\tau_{s \max}$ 为混凝土抗剪强度最大值, $\sigma_{t \max}$ 为混凝土抗拉强度最大值, c_d 、 c_m 分别为受力钢筋及分布钢筋保护层厚度, a 、 b 分别为加载垫板受力钢筋及分布钢筋方向的边长, x_d 、 x_m 分别为受压侧受力钢筋及分布钢筋保护层厚度; d_d 、 d_m 分别为受力钢筋及分布钢筋有效高。

前期研究利用近 500 个桥面板实验结果^[9],分析桥面板高度对桥面板冲切强度的影响,推导较为简便的公式,但此公式的保护层厚度定义在 40 mm 以下,其计算表达式为

$$V = 1.35 \sqrt[3]{f'_c} \sqrt[4]{\rho} u h \quad (3)$$

式中, ρ 为配筋率, u 为加载板周长, h 为板全厚, f'_c 为混凝土抗压强度。

本研究为评价前述公式对保护层厚度较大板构件的计算精度,对比 16 件板试件的实验结果,对以往公式进行分析,推导更加合理精确的公式。

2.5 利用实验结果推导公式

本研究利用 16 件实验试件,根据前述的 3 个公式求得的结果如表 2 所示。根据中国规范用公式, Matsui 公式,实验结果显示桥面板冲切强度的破坏荷载有随着保护层厚度及载荷板尺寸的增加而增大的倾向。但由于中国规范用公式未考虑保护层厚度为其影响因子,因此虽增加保护层厚度,但计算结果基本相同。实验值与计算值的平均比值为 1.7。Matsui 公式适用于保护层厚度小于 40 mm 的桥面板,对于本研究实验的保护层厚度 50 mm 以上的试件,所得计算结果较大。结果表明, Matsui 公式不适用于保护层厚度大于 40 mm 的桥面板。

利用本研究推导公式得出的实验值与计算值的比的平均值为 0.73,变异系数为 18.4%。对于保护层厚度 30 mm 以下的试块,实验值与计算值的平均比值基本接近 1,说明精度较好。但是,保护层厚度超过 30 mm 后计算结果变的很大。这是因为笔者推导公式时采用的桥面板试件的保护层厚度

均小于 40 mm, 所以显示出较好的精度。另外, 桥面板冲切强度随着保护层厚度的增大而增大, 但是, 保护层厚度超过 50 mm, 冲切强度的变化就不太显著了。因此, 需要分析桥面板保护层厚度对桥面板冲切强度的影响。

表2 各推导公式计算的板冲切强度

Table 2 Calculation results according to different equations

试件号	中国规范式		Matsui 式		推导公式	
	计算值/ kN	实验值/ 计算值	计算值/ kN	实验值/ 计算值	计算值/ kN	实验值/ 计算值
T-10-1	103.0	1.237	134.1	0.950	142.5	0.894
T-30-1	101.2	1.647	218.1	0.764	178.2	0.935
T-30-2	97.9	1.682	213.1	0.772	174.3	0.944
T-50-1	103.0	1.598	353.1	0.466	244.0	0.675
T-50-2	97.9	1.632	313.9	0.509	223.6	0.714
T-50-3	91.8	2.243	295.5	0.697	214.3	0.961
T-50-4	103.5	1.851	348.6	0.549	242.1	0.791
T-70-1	103.0	1.855	493.8	0.387	303.5	0.662
T-70-2	103.0	1.950	492.0	0.408	304.3	0.644
T-70-3	91.8	2.083	403.4	0.474	267.0	0.716
T-70-4	103.5	1.944	486.4	0.413	302.0	0.666
L-50-1	142.7	1.374	439.5	0.446	298.3	0.641
L-50-2	145.3	1.602	467.8	0.498	313.6	0.742
L-70-1	145.3	1.572	629.5	0.363	383.0	0.596
L-70-2	145.3	1.585	615.1	0.374	376.9	0.611
L-70-3	145.3	1.369	615.1	0.323	376.9	0.528
实验/计算的 平均值	1.702		0.525		0.733	
均方差	0.208		0.178		0.135	
变异系数	0.159		0.340		0.184	

2.6 保护层厚度对冲切强度的影响

本课题组利用国内外相关文献建立了一个总数近 500 个实验结果的数据库^[9]。其中, 没有保护层厚度大于 40 mm 的试件, 说明多数研究未将保护层厚度作为影响因子考虑^[10]。

本研究推导的式(3)只考虑了 4 个影响参数, 板厚考虑时采用的是板全厚。但是, 可以判定保护层厚度变大时, 其作用并非都有效。计算结果显示, 随着保护层厚度的增加, 保护层厚度的影响效果变小。本研究拟用 α 来表示其影响关系, 式(3)中, 保护层厚度超过 40 mm 时建议采用公式(4)。

$$V = 1.35 \sqrt[3]{f_c} \sqrt[4]{\rho} (u + 2\pi\alpha h) \alpha h \quad (4)$$

根据实验结果算定的作用系数 α 和桥面板保护层厚度的相关关系如图 5 所示。系数 α 是以实验值为基础, 利用最小自乘法求得。利用回归分析求得的系数 α 和桥面板保护层厚度

c 的计算公式^[8]为

$$\alpha = 1.0387 - 0.0041c \quad (5)$$

利用式(5)计算冲切强度的计算值与实验值的比值见表 3。实验值与计算值的平均比值为 1.01。变异系数为 12.1%。针对本研究实验数据, 所得结果更为精确。说明推导的简易公式是妥当的。

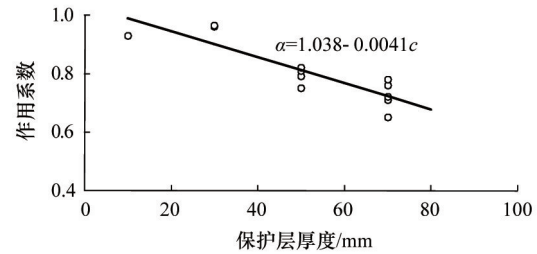


图5 保护层厚度和作用系数的关系

Fig. 5 Relationship between cover thickness and effect coefficient

表3 利用公式(5)的计算结果

Table 3 Calculation results according to equation (5)

试件号	实验值/ kN	式(5)代入推导公式	
		计算值/kN	实验值/计算值
T-10-1	127.4	141.9	0.898
T-30-1	166.6	154.0	1.082
T-30-2	164.6	150.7	1.092
T-50-1	164.6	179.9	0.915
T-50-2	159.7	164.9	0.969
T-50-3	205.9	158.0	1.303
T-50-4	191.5	178.6	1.073
T-70-1	191.1	187.3	1.020
T-70-2	200.9	187.7	1.070
T-70-3	191.2	164.9	1.160
T-70-4	201.1	186.3	1.079
L-50-1	196.0	226.7	0.865
L-50-2	232.8	238.3	0.977
L-70-1	228.3	247.6	0.922
L-70-2	230.3	243.6	0.945
L-70-3	198.9	243.6	0.817
实验/计算平均值			1.012
均方差			0.123
变异系数			0.121

3 结论

为讨论桥面板抗拉侧保护层厚度对钢筋混凝土桥面板冲切强度的影响,制作16块保护层厚度不同的钢筋混凝土桥面板试件,分析保护层厚度对冲切强度的影响。利用实验结果对中国规范用公式、Matsui公式及本研究推导公式进行精确度对比,针对保护层厚度的变化推导算定公式。

1) 本研究实验结果显示,桥面板冲切强度随着保护层厚度的增大而增大;当保护层厚度超过50 mm,对冲切强度的影响不明显,由此可知,不同保护层厚度对公式的计算精度影响不大。

2) 中国规范用公式中采用有效高度作为影响因子,未考虑保护层厚度对冲切强度的增大效果,计算值较实验值偏低。

3) 中国规范规定道路桥梁桥面板最小板厚,对于保护层厚度较大的钢筋混凝土桥面板来说,其适用性需要再探讨。在本研究静载实验的基础之上,今后可以考虑利用移动轮荷载进行实验。

4) Matsui公式虽将保护层厚度作为影响因子用于计算,但适用范围限定于保护层厚度为10~40 mm的桥面板构件。

5) 本研究通过保护层厚度较大的试件实验结果,推导出保护层厚度和系数 α 的式(5),将笔者已推导的简易公式适用范围扩大,并且更加精确。

参考文献(References)

- [1] 黄艳娇,朱瞰. 混凝土保护层厚度与结构设计使用年限[J]. 混凝土, 2004(10): 58-59.
Huang Yanjiao, Zhu Tun. Concrete cover thickness and the using period of structure design[J]. Concrete, 2004(10): 58-59.
- [2] American Concrete Institute Committee 318. ACI 319-08: Building code requirements for structural concrete (ACI318-08) and commentary [S]. Michigan: American Concrete Institute, 2008.
- [3] Concrete Committee of Japan Society of Civil Engineers. Standard specification for concrete structures 2007[S]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2010.
- [4] Isamu Y, Atsushi O, Yail K, et al. A composite deck having transverse stiffeners bonded with a cementations adhesive subjected to moving-wheel fatigue[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2013, 18(9): 848-857.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010—2010混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50010-2010 code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [6] Shigeyuki M. Review of researches and technologies on highway bridge decks and contribution of wheel running machines[C]//JSCE Proceeding of 5th Symposium on Decks of Highway Bridges. Osaka: Japan Society of Civil Engineers, 2006: 1-12.
- [7] 杨秋宁,毛明杰. 轻骨料预应力混凝土板冲切强度的研究[J]. 混凝土, 2010(6): 115-117.
Yang Qiuning, Mao Mingjie. Punching shear strength of prestressed slabs with light weight aggregate[J]. Concrete, 2010(6): 115-117.
- [8] Hamada S, Yang Q, Mao M. Evaluation of punching shear strength of reinforced concrete slabs based on database[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2008, 6(1): 205-214.
- [9] Yang Q. A rational equation of the punching shear strength for reinforced concrete slabs based on data base[D]. Yamaguchi: Yamaguchi University, 2008.
- [10] 王春生,周江,缪文辉. 混凝土桥面板耐久性计算与影响参数分析[J]. 桥梁建设, 2012, 42(6): 49-53.
Wang Chunsheng, Zhou Jiang, Miao Wenhui. Calculation and influential parameter analysis of durability of concrete bridge deck slabs[J]. Bridge Construction, 2012, 42(6): 49-53.
- [11] Concrete Committee of Japan Society of Civil Engineers. Standard specification for concrete structures-2007 [S]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2010.

(责任编辑 赵业玲)

·学术动态·



中国气象学会第28届理事会诞生

2014年11月5日,中国气象学会第28次全国会员代表大会在北京开幕。中国科协党组书记、书记处第一书记尚勇,中国气象局党组书记、局长郑国光出席开幕式并讲话。来自全国各地的280余位代表参加会议。中国科协副主席、中国气象学会第27届理事会理事长、中国科学院院士秦大河主持开幕式。

大会选举产生了中国气象学会第28届理事会、常务理事会。中国气象学会第27届理事会副理事长、中国科学院院士王会军当选理事长,宇如聪、费建芳、钱泽宏、端义宏、杨修群、胡永云、李廉水等当选副理事长,翟盘茂当选秘书长。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/16074978.html>。