

文章编号: 1006-9941(2016)01-0106-05

一种应用于高温火区爆破中的不可逆起爆网路的耐温与传爆性能

王飞, 马宏昊, 沈兆武

(中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 针对发生在高温火区炮孔装药的误爆和早爆安全事故, 采用传爆试验法、燃烧法、系统可靠性法则研究了一种应用于高温火区爆破的新型不可逆起爆网路, 测试了金属爆炸索在高温环境中的耐温特性、不可逆起爆元件的传爆可靠性以及阻爆效果、评价并计算了整个爆破网路的安全性及可靠度。结果表明: 炮孔内使用金属爆炸索比塑料导爆索耐高温安全时间长, 降低了因高温造成炮孔误爆的概率; 孔外部分包含的不可逆起爆元件具有类似于电路中二极管的作用, 在爆破网路中起着单向安全控制作用, 避免发生因单个炮孔的意外引发整个爆破网路误爆, 保证了主网路的安全。当炮孔数达到 64 个时, 不可逆起爆网路可靠度依然可达到 99.99%, 明显优于传统爆破网路。

关键词: 高温爆破; 金属爆炸索; 不可逆起爆元件; 爆破网路安全

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.01.018

1 引言

近年来在高温火区煤矿爆破开采过程中已经发生多起重大安全事故, 原因皆是在爆破作业中子网路炮孔发生早爆、误爆引发整个起爆网路误爆, 这些事故严重威胁了人员的生命安全、影响了矿产资源的开采效率^[1]。治理火区爆破已成为当前的一项重要课题。为此, 张杰等^[2]研究了火区高温炮孔分类及处理方法, 总结了不同温度范围炮孔的不同降温灭火技术, 根据具体情况处理一些危险性较大的炮孔, 在实际工程应用中发挥了良好的作用。廖明清等^[3]、蔡建德等^[4]研究了火工品在高温环境下的耐热性能, 发现导爆索芯药黑索今热稳定性高, 熔点高, 在 150 °C 炮孔内受热一定时间可以稳定传爆, 是高温爆破首选的起爆器材。史秀志等^[5]通过现场和实验研究了高温环境下爆破器材的隔热保护, 采用石棉布、橡胶板、耐火泥、海泡石构成的多层复合隔热体系, 使爆破器材可耐受 400 °C 高温 10 min, 为高温环境下控制爆破争取了有效的安全时间, 并对高温爆破中的起爆器材提供了安

全保护。李建军等^[6]通过爆发点实验和热板实验得到了乳化炸药基质和粉状炸药 5s 爆发点和最低着火点, 为火区爆破的研究提供重要参考。关于高温火区爆破领域, 对于提高整个爆破网路的安全性研究较少。在子网路由于某处意外原因, 如高温、放电、刺穿等原因发生单个炮孔的早爆、误爆引发整个爆破网路的误起爆时, 孔内导爆索与炸药耐高温性能相比更容易成为误起爆的主因^[4,6]。为此, 本研究采用传爆试验法^[7]、燃烧法^[8]、系统可靠性^[9]研究了一种应用于高温火区爆破的新型不可逆起爆网路, 其炮孔中使用耐温金属爆炸索, 孔外采用一种类似于二极管原理的不可逆起爆元件与孔内爆炸索相连。通过燃烧法对比研究的金属爆炸索与一般工业导爆索的耐温性能与传爆性能, 爆炸实验法验证了该元件传爆方式, 为高温火区爆破的研究提供一条新型途径。

2 实验部分

2.1 实验样品制备

2.1.1 金属爆炸索

金属爆炸索在小直径下能够稳定传递爆轰, 爆轰速度低、爆炸能量低, 具备一定延时的作用, 其关键是金属爆炸索药芯药剂^[10-11]。与塑料导爆索药芯相比, 实验采用感度适中的黑索今作为基本成分, 添加钝感添加剂, 保持金属爆炸索的稳定爆轰、降低爆速、安全生产^[12]; 根据炸药热点理论, 外壳采用导热性良好铝

收稿日期: 2014-09-05; 修回日期: 2015-02-12

基金项目: 国家自然科学基金资助(51134012), 国家自然科学基金面上项目(51174183, 51374189)

作者简介: 王飞(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事含能材料及爆炸力学相关领域研究。e-mail: kingfly@mail.ustc.edu.cn

通信联系人: 马宏昊(1980-), 男, 副教授, 主要从事含能材料及爆炸力学相关领域研究。e-mail: hhma@ustc.edu.cn

管,避免金属爆炸索在某一局部区域积累热量形成高温热点,而是沿管径向均匀传热。为此,本实验选取炸药成分质量配比为黑索今 85%,消焰剂 10%,粘合剂 5%,外径 16 mm,内径 14 mm 纯铝管。依据拉丝机拉拔规定^[13]逐级拉制实验所需样品直径。金属爆炸索见图 1。

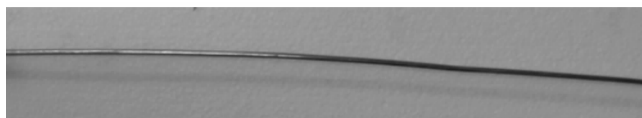


图 1 金属爆炸索

Fig.1 Metal detonating cord

2.1.2 不可逆起爆元件制备

不可逆起爆元件包括外壳、隔爆体、传爆药、密封件等部分,实验室自制。外壳和隔爆体由金属材料(如铁、铝等)制成。外壳是两端开口的筒形,内表面与隔爆体过盈配合。外壳两端与邻近端口的密封件之间留有足够长度的空腔,使导爆索插入外壳后留有足够长度与外壳过盈配合。隔爆体是一端开口、一端封闭的敞口筒形,隔爆体与外壳之间通过过盈配合固连,隔爆体内装填传爆药,为避免传爆药在隔爆体内流动,在传爆药上方压盖蜡纸等^[14]。隔爆体中传爆药由激发装置和不同密度分层钝感装药构成。所述密封件由橡胶、塑料等变形材料制作,为中空筒形结构,中心空孔内分布倒齿形结构,使导爆索插入空孔中即可在倒齿作用下不可拔出,以此实现导爆索与不可逆起爆元件快速连接的目的。密封件分别位于隔爆体两侧,与外壳过盈配合,即外壳内从起爆方向向传爆方向的结构依次为,密封件,隔爆体,密封件,其中隔爆体压盖蜡纸为敞口端指向起爆方向,封闭端指向被起爆方向。见图 2 所示:

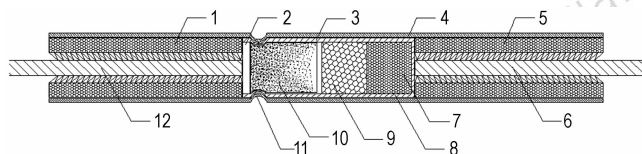


图 2 不可逆起爆元件结构示意图

1,5—密封件,2—密封蜡纸,3—隔爆体,4—圆筒形壳体,6—传爆端导爆索,7—一次装药,8—隔爆体内壳,9—二次装药,10—激发装置,11—卡口固定,12—起爆端导爆索

Fig.2 Structure diagram of irreversible detonating component
1,5—sealing element, 2—sealing wax paper, 3—isolation from the explosion structure, 4—cylindrical shell, 6—the propagation end of detonating cord, 7—1st charge, 8—the inner shell, 9—2nd charge, 10—excitation device, 11—bayonet fixing, 12—the beginning of detonating cord

图 2 中 3 为不可逆起爆元件中隔爆体结构,隔爆体内部由分层装药构成见表 1,底层 7 为高密度造粒钝化后的太安,中层 9 为松散密度下造粒钝化后的太安,上层 10 为激发装置,由激发药与铁质内帽组成,激发药组分为太安/石墨/铝粉/氧化剂。

表 1 分层装药结构密度

Table 1 The layered structure charge density

layered structure	ignition charge	2nd charge	1st charge
charge	PETN/graphite /Al/ oxidant	granulation PETN	granulation PETN
density/g · cm ⁻³	0.8	0.9–1.0	1.2–1.3

2.2 实验

2.2.1 金属爆炸索高温下安全性实验

根据黄寅生等^[8]关于钝感猛炸药金属爆炸索安全性试验研究中提出的燃烧实验技术,本实验中采取无基板情况下的燃烧实验,将金属爆炸索直接放置于高温火源上进行燃烧,分析爆炸索的安全性能。

采用无基板燃烧实验研究金属爆炸索的耐温性能,在一处四周空旷安全地带,择取一定长度实验室自制金属爆炸索(线装药密度 2.3 g · cm⁻³,外径 2.4 mm)放置于高温环境下加热灼烧,实验灼烧所用燃料为煤油,火焰温度采用香港希玛手持式高精度红外线测温仪测量,将爆炸索横置于油面上方 10.0 cm,被灼烧长度为 12.0 cm 左右,在安全距离外架起索尼高清摄像机观察高温灼烧环境下爆炸索的变化情况,以此来分析其在高温环境下的安全性。实验如图 3 所示。



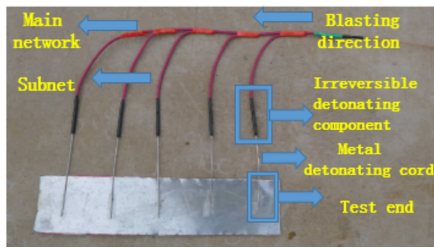
图 3 金属爆炸索的无基板燃烧实验

Fig.3 Burning experiment of metal detonating cord

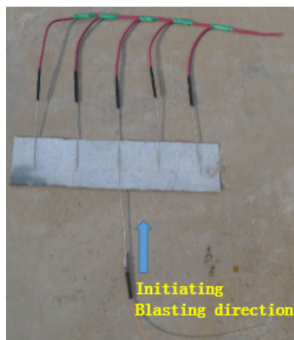
2.2.2 不可逆起爆网络传爆实验

以传爆实验法为主,使用实验室制成不可逆起爆网络,模拟高温火区爆破进行传爆性能测试。正向传爆实验装置见图 4a,主网路部分采用工业用导爆索,各个子网路模拟现场高温炮孔,以金属爆炸索模拟孔内部分,不可

逆起爆元件模拟孔外连接部分,将子网路金属爆炸索固定在 2 mm 铝板上作为实验端。将正向起爆网路整体部分放置于空中爆炸罐中,以一发 8#工业雷管按图示方向引爆主网路导爆索。研究不可逆起爆网路正向传爆可靠性^[15]。同理进行爆炸网路反向传爆实验,将反向起爆网路整体部分放置于空中爆炸罐中,以一发 8#工业雷管引爆子网路金属爆炸索,实验模拟在高温火区爆破实验中因某处意外原因(如高温、放电、刺穿等)导致某一炮孔早爆、误爆时,在误爆发生时不可逆起爆元件是否可以起到保护主网路的阻爆作用。见图 4b。



a. the positive explosive experiment



b. the reverse explosive experiment

图 4 双向传爆实验

Fig.4 The bidirectional explosive experiment

3 结果与讨论

3.1 金属爆炸索的耐热分析

金属爆炸索无基板燃烧实验结果见表 2。由表 2 可以看出,金属爆炸索在火焰平均温度 470 °C 条件下灼烧均未发生径向爆轰传播。火焰燃烧下金属索被灼烧部分缓慢升温,内部钝感药芯在高温下化学反应加速直至发生爆炸熔断。在火焰燃烧条件下小直径爆炸索不会因误起爆发生爆轰。如图 5。

金属爆炸索在高温条件下,铝制外壳具有良好的导热性将周围热量径向均匀传热,不会快速在外表面形成局部热量积累,引起爆炸;同时内部药芯加入了消焰剂与粘合剂,增加了药芯的热分解温度,比工业用导爆索有更高的爆点。



图 5 金属爆炸索未发生径向爆轰

Fig.5 The metal detonation cord not occur as radial detonation

表 2 金属爆炸索的灼烧试验

Table 2 The burning experiment of metal detonation

No.	flame temperature / °C	burning length / cm	outer diameter / mm	linear density / g · m ⁻³	test phenomenon
1	468	12	2.4	2.3	not radial detonation
2	472	12	2.4	2.3	not radial detonation
3	469	12	2.4	2.3	not radial detonation

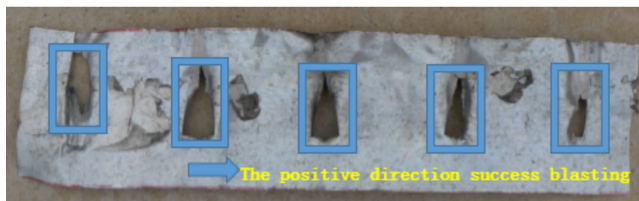
3.2 不可逆起爆元件的机理探讨

图 6 为不可逆起爆网路的双向传爆实验结果。从图 6a 可以看出,金属爆炸索固定端铝板均有明显传爆痕迹,传爆稳定可靠,说明正向传爆时爆轰波可以顺利从主网路经过不可逆起爆元件传爆至各子网路,满足高温火区常规爆破需求。图 6b 为不可逆起爆网路的反向传爆实验结果,由其实验端铝板的爆炸传播痕迹与不可逆起爆元件损坏痕迹可以看出,元件顺利阻止了爆轰波的传播并且爆炸能力不破坏周围的子网路,剩余网路部分可以正向顺利起爆。说明元件可以阻止因子网路误起爆,进而引发整个爆破网路的误起爆。此元件工作原理类似于二极管,正向则导通,反向则阻断。从而在高温火区爆破中大大提高了爆破网路的安全性,给爆破网路增加一道安全底线。

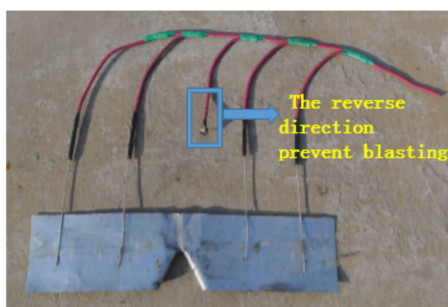
如图 2 元件结构,不可逆起爆元件中位于隔爆体敞口一侧的导爆索被外部起爆后,爆轰波传至隔爆体内上层激发装置,利用激发药爆炸后产生的高温高压气体与能量快速剪切激发装置底部密封端形成高速运动撞击片,产生大量热点和强冲击效应,极短时间内压缩第一层低密度钝化装药,引起爆轰,引爆底层高密度钝化装药进行爆轰传递,传爆过程中药体的激发感度逐级降低,爆轰能量逐级增大,从而撞击隔爆体封闭端一侧的导爆索,使之爆炸,实现从隔爆体敞口一侧的导爆索向密封一侧的导爆索的传爆。反之,位于隔爆体封闭端一侧的金属爆炸索被意外起爆后,爆轰波传至隔爆体封闭端底部高密度钝化装药时,由于爆炸索直径小、线密度低产生的爆轰能量较小,隔爆体底部封闭

端有约束减弱爆轰波传播能量,底层高密度钝化装药热点少、起爆感度低,爆轰波在隔爆体内熄爆,无法引爆位于另一侧(隔爆体敞口端)的导爆索,虽然外壳可能被导爆索破坏,但敞口端的导爆索无法被起爆,达到隔爆的目的(见图6b)。

在实际爆破网络中,仅在某些需要单向传爆的位置添加该元件,即可实现所期望的单向传爆效果,使整体网络的不可逆传爆,相比较常规网络,提高了可靠性与安全性,保障人员安全。



a. positive explosive experiment



b. reverse explosive experiment

图6 爆破网络双向传爆实验结果

Fig.6 Results of the bidirectional detonation transmission for the blasting network

3.3 不可逆起爆网络安全可靠评价

根据系统可靠性标准^[9],进行100组不可逆起爆网络正向传爆与反向阻爆实验,100组正向实验全部传爆,100组反向实验全部顺利阻爆,以此分析系统可靠度。结果见表3。

表3 不可逆起爆网络的可靠性分析

Table 3 Reliability analysis of irreversible detonating network

experimental number	test results	reliability /%
the positive direction explosive (100 times)	all success blasting 100%	100
the reverse direction explosive (100 times)	all stop blasting 100%	100

对爆破网络进行安全性定量分析^[9]。常规爆破网络,各子网络与主网络之间连接相当于串联网路,任何单一炮孔子网络发生早爆、误爆均可引发整个网络

的误爆。假设某个子网络的安全度为 P_i ,则各个子网络的安全度分别为 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 。则爆破主网络的安全度为:

$$P = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n = \prod_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

在不可逆起爆网络中,每个不可逆起爆原件相当于一个切断开关,当单一炮孔发生早爆、误爆时,主网络不会发生误爆,所以各个炮孔与主网络之间相当于并联网路。则爆破主网络的安全度为:

$$P = 1 - (1 - P_1) \times (1 - P_2) \times \dots \times (1 - P_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (2)$$

在实际爆破中, n 即是子网络数量,在高温火区中单个炮孔就是一个子网络。假设单一炮孔的安全度为0.9990,对比不同数量炮孔时常规爆破网络与不可逆爆破网络的安全度,见表4。

表4 两种爆破网络安全度比较

Table 4 Comparing two kinds of blasting network safety

hole numbers	common network safety	irreversible detonating network safety
1	0.9990	0.9990
2	0.9980	0.9999
4	0.9960	0.9999
8	0.9920	0.9999
16	0.9841	0.9999
32	0.9685	0.9999
64	0.9380	0.9999

由以表4得知,不可逆起爆网络正向传爆率达100%,金属爆炸索传爆可靠,满足实际应用要求;反向传爆阻断率为100%,当子网络发生早爆、误爆时可以顺利阻止爆轰波传至主网络,避免整个网络误起爆,减少重大事故的发生;反向传爆阻断后的爆破网络可以顺利正向传爆,不影响爆破作业。通过与常规爆破网络安全度对比,当炮孔数量达到64个时,常规网络整体安全度为0.9380,不可逆起爆网络安全度为0.9999,安全性明显比常规网络高,适合用于高温火区爆破。

4 结论

(1) 实验室制备了一种铝制外壳式金属爆炸索,比传统导爆索拥有良好的耐高温性能、较长的受热分解时间、熔断后不发生径向爆轰传爆。

(2) 通过传爆实验法,不可逆起爆元件正向传爆率达100%;反向传爆时,由于爆炸索直径小、线密度低产生的爆轰能量较小,隔爆体底部封闭端有约束减

弱爆轰波传播能量并且底层高密度钝化装药热点少、起爆感度低,从而使得反向传爆被阻断。满足特种工程爆破需要。

(3) 应用系统可靠性法则分析,与常规爆破网路相比,当炮孔数量达到 64 个时,常规网路整体安全度为 0.9380,新型网路安全度为 0.9999,在大规模多炮孔爆破中安全性提升明显。

参考文献:

- [1] 朱月敏. 煤矿安全事故统计分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012. ZHU Yue-min. Statistics and analyse of coal mine safe accidents [D]. Fu Xin: Liao Ning Technical University, 2012.
- [2] 张杰, 郝新民, 马伟, 等. 高温炮孔爆破的安全处理探讨[J]. 工程爆破, 2013, 19(1-2): 102-104. ZHANG Jie, HAO Xin-min, MA Wei, et al. Discussion on the safe disposal of the high temperature hole blasting[J]. *Engineering Blasting*, 2013, 19(1-2): 102-104.
- [3] 廖明清, 孙孚铤. 普通导爆索在高温爆破中的应用[J]. 爆破器材, 1991 (1): 19-21. LIAO Min-qing, SUN Fu-qing. Applications of common detonating fuses in high-temperature blasting jobs[J]. *Explosive Materials*, 1991 (1): 19-21.
- [4] 蔡建德, 李战军, 傅建秋, 等. 硐室爆破时高温硐室装药的安全防护试验研究[J]. 爆破, 2009 (1): 92-95. CAI Jian-de, LI Zhan-jun, FU Jian-qiu, et al. Experimental research on safety protection of chamber blasting charging in high temperature chamber[J]. *Blasting*, 2009 (1): 92-95.
- [5] 史秀志, 谢本贤, 鲍侠杰. 高温控制爆破工艺及新型隔热材料的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2005 (1): 68-71. SHI Xiu-zhi, XIE Ben-xian, BAO Xia-jie. Experimental study of controlled blasting technology of high temperature coagulation and new heat insulation material[J]. *Mining Research and Development*, 2005 (1): 68-71.
- [6] 李建军, 汪旭光. 乳化炸药热点火的实验研究[J]. 工程爆破, 1997 (2): 26-30. LI Jian-jun, WANG Xu-guang. Experimental study on thermal ignition for emulsion explosives[J]. *Engineering Blasting*, 1997 (2): 26-30.
- [7] 龚翔. 小药量柔性导爆索的传爆可靠性[J]. 火工品, 1998, (1): 1-5. GONG Xiang. Detonation transfer reliability of mild detonating fuse with small core load[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1998 (1): 1-5.
- [8] 黄寅生, 张春祥, 沈瑞琪, 等. 钝感猛炸药金属导爆索安全性试验研究[J]. 火工品, 2000 (3): 9-12. HUANG Yin-sheng, ZHANG Chun-xiang, SHEN Rui-qi, et al. Safety tests on metal sheath mild detonating fuse with thinner diameter[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2000 (3): 9-12.
- [9] 国家安全生产监督管理局. 安全评价[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002: 389-395. State Administration of Work Safety, Safetyevaluation [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2002: 389-395.
- [10] Mei Q, Zhu J F, Li Z L. Study on detonation features of low powder detonating fuse in the bending condition[C]// *Advanced Materials Research*, 2011, 243: 5960-5963.
- [11] Lee R, Rodgers J. A new detonating cord for reducing unwanted damage in controlled blasting[C]// *Proceedings of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*, 2001, 11: 167-173.
- [12] 黄寅生, 张春祥, 沈瑞琪, 等. 小直径低爆速金属导爆索[J]. 火工品, 1999 (4): 5-8. HUANG Yin-sheng, ZHANG Chun-xiang, SHEN Rui-qi, et al. Mild detonating fuse with small diameter and lower detonation velocity[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1999 (4): 5-8.
- [13] 梅群. 低能量导爆索关键技术及应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007. MEI Qun. Study on key technology and application of low energy detonating fuses[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.
- [14] 马宏昊. 高安全雷管机理与应用的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008. MA Hong-hao. Research on the principle and application of the high-safe detonator[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.
- [15] 白颖伟, 张蕊, 李哲, 等. 柔性多点同步爆炸网络设计技术研究[J]. 含能材料, 2009, 17(2): 225-228. BAI Ying-wei, ZHANG Rui, LI Zhe, et al. Design on mid multi-point synchronous explosive circuit[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(2): 225-228.

Heat Resistance and Explosion Transfer Performance in the Irreversible Detonating Network Applied in High Temperature Mine Blasting

WANG Fei, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: In order to solve the problem of the sudden spontaneous firing and premature explosion of high temperature in the blast hole charge, a new type of irreversible detonating network applied in the high temperature coal mine was studied by adapting explosion test method, combustion of thermal analysis and system reliability rule. The experiment tests on the heat resistance property of metal detonation cord in high temperature and detonation propagation reliability and resistance effect of the irreversible initiating component were carried out, and the blasting network security and reliability were evaluated and calculated as well. Results show that the metal detonation cord in the hole can effectively improve the safe time of the high temperature resistant performance, and reduce the probability of sudden spontaneous firing. The irreversible detonating structure, similar to the role of the diode in the circuit, plays a safety control function in the blasting network, and avoids the sudden spontaneous firing of the whole detonating network caused by a certain blasthole, ensuring the safety of the main network. The irreversible detonating network reliability reaches 99.99% with the hole number of 64, better than the traditional blasting network.

Key words: high temperature blasting; metal detonation cord; irreversible detonating element; blasting network security

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.01.018